



Gestión dinámica de la escasez de aguas superficiales mediante la metodología de dinámica de sistemas

Dynamic Management of Surface Water Scarcity Through the Dynamics of Systems

Sergio Huincho-Lapa¹

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

Fernando Viterbo Sinche-Crispín²




Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

Carlos Alcides Almidón-Ortiz³

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

Resumen

Del agua dulce disponible en el planeta, solo el 1% escurre por la superficie de la tierra y se encuentra distribuida en forma desigual, y su escasez es cada vez más evidente (JUMAPAM, 2021). Las regiones del Perú y la Ciudad de Pampas no son ajenas a esta problemática, que requiere ser analizada desde un enfoque de sistemas debido a que los enfoques tradicionales ya no resultan válidos. El propósito del trabajo es proponer una alternativa de gestión de la escasez de aguas superficiales, haciendo el uso de modelos dinámicos y considerando el índice de escasez de agua como un indicador de alerta de la escasez de aguas superficiales. El modelo fue construido siguiendo el proceso de modelado de la dinámica de sistemas, basándose en la metodología para el cálculo del índice de la escasez de agua superficial (Gonzalo *et al.*, 2004), concluyendo que el modelo propuesto muestra

- 1 Magister en Ingeniería-mención: Planeación Estratégica y Gestión en Ingeniería de Proyectos, Ingeniero de Sistemas, docente de la Universidad Nacional de Huancavelica. Perú. Correo: Sergio.huincho@unh.edu.pe  <https://orcid.org/0000-0001-5341-7043>
- 2 Doctor en Ingeniería de Sistemas, Magister en Administración-mención Informática para la Gestión, Ingeniero de Sistemas, docente de la Universidad Nacional de Huancavelica. Perú. Correo: fernando.sinche@unh.edu.pe  <https://orcid.org/0000-0002-8418-7831>
- 3 Magister en Ingeniería de Sistemas-mención: Ciencias de la Computación e Informática, Ingeniero de Sistemas, docente de la Universidad Nacional de Huancavelica. Perú. Correo: carlos.almidon@unh.edu.pe  <https://orcid.org/0000-0003-1055-9724>

su utilidad en la comprensión de la complejidad del problema en estudio y que es una herramienta de gestión en la toma de decisiones.

Palabras claves: escasez de agua, gestión del agua, modelación dinámica.

Abstract

Only 1% of the freshwater available on the planet runs off the earth's surface and is unevenly distributed, and its scarcity is increasingly evident (JUMAPAM, 2021). The regions of Peru and the City of Pampas are not alien to this problem, which requires to be analyzed from a systems approach since the traditional approaches are not helpful anymore. The work aims to propose an alternative for the management of surface water scarcity, using dynamic models and considering the water scarcity index as a warning indicator of surface water scarcity. The model was built following the system dynamics modeling process, based on the methodology for calculating the surface water scarcity index (Gonzalo *et al.*, 2004). In conclusion, the proposed model shows its usefulness in understanding the complexity of the problem under study and as a management tool in decision-making.

Keywords: water scarcity, water management, dynamic modeling.

Introducción

El agua como elemento fundamental de desarrollo es un recurso indispensable para la supervivencia de los seres vivos, los ecosistemas y para la actividad socioeconómica de los países. Razón que ha sido reconocida por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) como el derecho humano al agua y al saneamiento, plasmado entre los objetivos de desarrollo sostenible al año 2030 que indica “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” (CEPAL, 2016, p. 19).

La dinámica de la población mundial según la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2019), aumentará en 2 000 millones de personas para el año 2050 y cerca de 11 000 millones para 2100. Esto provocaría el aumento de la demanda mundial de agua hacia el año 2050, con un ritmo de crecimiento del 20% al 30% por encima del nivel actual de uso del agua, impulsado por una combinación entre el aumento de la población, el desarrollo socioeconómico y los cambios en los modelos de consumo (UNESCO, 2019). Estas tendencias tendrían grandes consecuencias para las generaciones venideras, provocando la escasez de aguas superficiales de las cuencas, principalmente en las grandes ciudades de los países en desarrollo.

Perú no es ajeno a estas tendencias, que según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2018) alcanza una población de 31 millones 237 mil 385 habitantes, y las proyecciones indican que la población en el año 2021 llegaría a 33 millones 149 mil habitantes. El consumo

anual de agua asciende aproximadamente a unos 20 072 millones de metros cúbicos por año, de los cuales 80% es empleado en actividades agrícolas, 18% en servicios de agua potable y alcantarillado y usos industriales, 2% empleado en la industria minera y el restante en uso no consuntivo (Laclette & Zúñiga, 2012). En estas actividades se evidencian la falta de conciencia y deficiente gestión sobre los recursos hídricos, así como la actividad agrícola a través de uso de las pesticidas y fertilizantes en los campos de cultivo contribuye a la contaminación de los cursos de agua; en las actividades tipo domésticas, comerciales e institucionales, la mayor parte de aguas residuales, sin tratamiento alguno, son vertidas a los cauces de los ríos. Estos factores vienen ocasionando cada vez más la escasez de aguas superficiales en el país. Son situaciones que permiten pensar en herramientas que ayuden a realizar una gestión eficiente de los recursos hídricos. Dado que, en el Perú, las políticas de gestión de recursos hídricos establecidas por el Ministerio de la Agricultura MINAGRI (2015) no conducen a un manejo eficiente del agua, toda vez que las metas perseguidas son muy amplias, se genera una descoordinación institucional, con carencia de métodos y criterios de trabajo que no tienen resultados sinérgicos.

La gestión de recursos hídricos es un sistema complejo, en el que no puede emplearse el pensamiento lineal causa-efecto y se hace esencial un enfoque sistémico (holístico), debido básicamente a que existen bucles de realimentación entre los elementos relacionados con la demanda y oferta del agua. Al respecto, Martínez y Villalejo (2018) consideran la gestión integrada de los recursos hídricos GIRH desde una perspectiva multidisciplinaria como: “el manejo del agua superficial y subterránea, en sentido cualitativo, cuantitativo y ecológico, vinculando sus disponibilidades con las necesidades y las demandas de la sociedad relacionadas con el agua” (p. 60). Adicionalmente considera que el núcleo del problema se encuentra en la inadecuada gestión y gobernabilidad de los recursos hídricos (la ineficiencia y el uso no coordinado del recurso hídrico). Por su lado, Martínez y Vargas (2016) concluyen que “los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento son sistemas complejos, formado por múltiples variables interconectadas que exhiben retroalimentación y conductas emergentes” (p. 153). Estas características requieren buscar otras visiones, como señala Hernández y Posada (2018): “enfoques que buscan abordar la gestión del agua de una manera integral, reconociendo el papel que cumple el agua en

los ecosistemas y en asociar su gestión a su manejo, con una perspectiva integral” (p. 554); así como el enfoque holístico, donde los temas hídricos sean tratados de forma integrada, mas no como eventos aislados. Asimismo, [Moreira, Mirandola, Luiz, Salinas y de Oliveira \(2020\)](#) señalan que para proponer medidas y acciones de planificación ambiental y manejo integrado que busquen la preservación de las aguas, minimizando los impactos causados por las actividades socioeconómicas que en esta se llevan a cabo, es fundamental comprender las cuencas hidrográficas como unidades sistémicas.

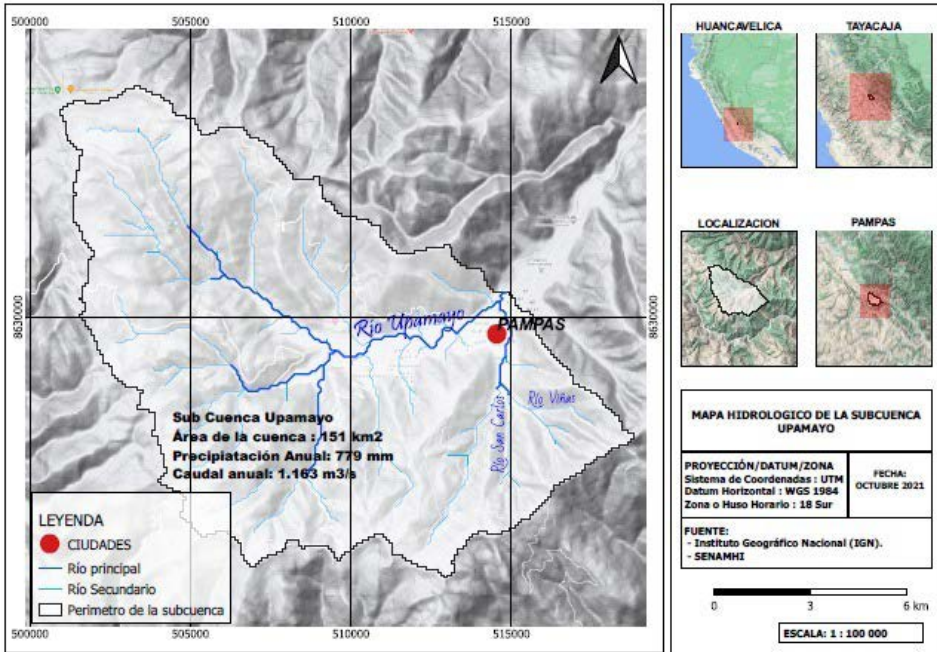
La dinámica de sistemas como una metodología del enfoque sistémico para modelar el comportamiento de sistemas complejos sería una herramienta útil para abordar el problema de gestión de la escasez de recursos hídricos. Con este trabajo proponemos una alternativa de gestión de la escasez de aguas superficiales haciendo el uso de modelos dinámicos y el índice de escasez de agua. El primero permite tomar decisiones, analizando la oferta hídrica disponible y la demanda como sistemas complejos con una estructura de realimentación dinámica; y el segundo sirve como un indicador de alerta de la escasez de agua.

Área de estudio

El caso de aplicación con el fin de discutir el uso del modelo dinámico ha sido en el distrito de Pampas, capital de la provincia de Tayacaja, de la región Huancavelica–Perú. El distrito presenta un sistema de drenaje compuesto por los ríos, manantiales, puquiales, quebradas y riachuelos que desembocan al río Mantaro.

El río Upamayo, perteneciente a la subcuenca homónima tiene una superficie de 151.17 km² y es la fuente más importante que emplaza parcialmente en el distrito. Otras fuentes que emplazan 9.39 km² de superficie del distrito son: Samerino (13.85 km²) y Macas (16.89 km²) ([SENAMHI, 2016](#)). La población se abastece del líquido que procede de los riachuelos Viñas y San Carlos, que alcanzan un caudal de 40 litros/segundo en épocas del invierno (ver Mapa 1).

Mapa 1. Mapa hidrológico de la subcuenca Upamayo



Fuente: Elaboración propia a partir de Instituto Geográfico Nacional (IGN) y Senamhi (2021).

Marco teórico

Índice de escasez de agua

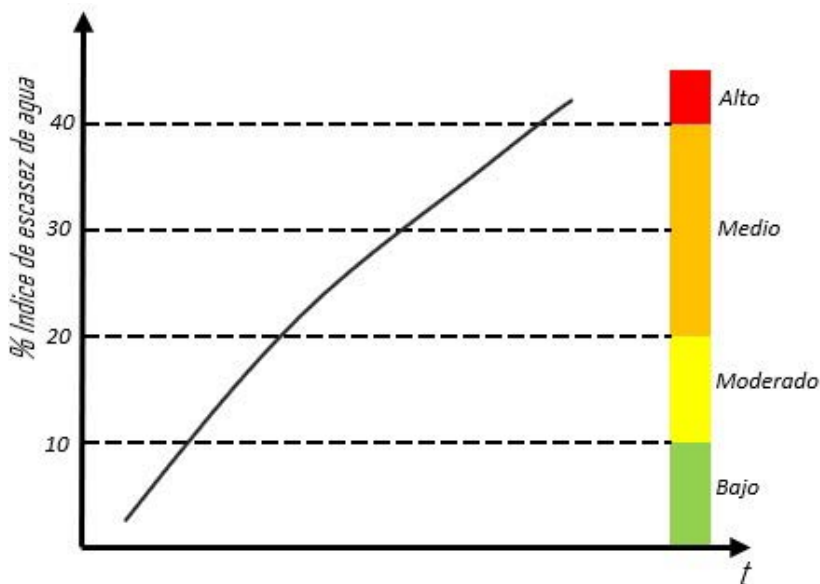
La escasez de agua es la condición en la cual la demanda de este recurso no puede ser satisfecha. Un fenómeno causado por las actividades desarrolladas por los seres humanos y por la variabilidad hidrológica, que se manifiesta en los países con tasas elevadas de crecimiento poblacional. Al respecto, [Gonzalo, Marin, Domínguez y Vanegas \(2004\)](#) establecen una metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial, determinada con base en la relación porcentual entre la oferta disponible en las fuentes abastecedoras y la demanda de agua del conjunto de actividades sociales y económicas. Se distinguen umbrales críticos a través de cuatro categorías: I) *Alta*: cuando la demanda supera el 40% del agua disponible. Donde la oferta y la demanda requieren acciones urgentes para aumentar la oferta y/o reducir la demanda. II) *Medio*: cuando la demanda se encuentra entre el 20% y 40% del agua disponible y se requiere tomar prioridades

a los distintos usos, así como una inversión para mejorar la eficiencia en su utilización. III) *Moderado*: cuando los requerimientos de agua están entre el 10% y 20% del agua disponible indica que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador del desarrollo, requiriendo esfuerzos para aumentar la oferta y reducir la demanda. IV) *Baja*: cuando la demanda de agua es inferior al 10% del agua disponible indica que no se experimenta presión importante sobre el recurso hídrico (ver Figura 1).

Gestión de aguas superficiales

La gestión de aguas superficiales muestra su mayor importancia en los tiempos actuales. Los actores gubernamentales como tomadores de decisión sobre la asignación del agua enfrentan cada vez mayor responsabilidad y compromiso con su localidad debido a que la oferta del agua disminuye frente a una demanda exigida por la población creciente. La complejidad dinámica de los factores demográficos y climáticos también incrementan la presión sobre los recursos hídricos, donde el tradicional enfoque asistémico ya no resulta válido. Bajo esta visión se hace esencial la búsqueda de otros enfoques donde los temas hídricos sean tratados de forma integrada.

Figura 1. Modo de comportamiento del índice de la escasez de agua



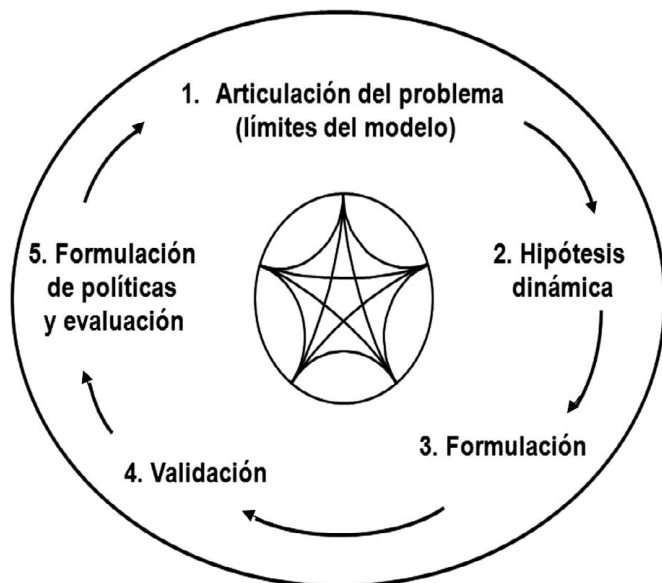
Fuente: Elaboración propia.

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un enfoque holístico, aceptado internacionalmente para el desarrollo y gestión eficiente, equitativo y sostenible de los recursos hídricos que cada vez es más limitado. Para [Global Water Partnership GWP \(2009\)](#) la gestión integrada de los recursos hídricos es: “un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinado; del agua, del suelo y los otros recursos relacionados, a fin de maximizar resultados económicos y bienestar social de forma equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (p. 3). La GIRH integra el sistema natural con el sistema humano, el primero considera la importancia de la calidad y la disponibilidad del agua, y el segundo determina las características del uso y manejo del agua. Y [MINAGRI \(2010\)](#) en el ámbito de la cuenca hidrográfica define la gestión integrada de los recursos hídricos como: “un proceso que promueve, el manejo y desarrollo coordinado del uso y aprovechamiento multisectorial del agua con los recursos naturales vinculados a esta, orientado a lograr el desarrollo sostenible del país sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas” (p. 3).

Marco metodológico

La metodología empleada por la naturaleza compleja del problema fue la de dinámica de sistemas, una metodología del enfoque sistémico más empleada para la modelación de entornos complejos y en recursos hídricos en particular. La metodología contiene un conjunto de herramientas que permiten comprender la estructura y la complejidad de los sistemas. Para [Sterman \(2000\)](#) la dinámica de sistemas “es un método de modelado riguroso que nos permite crear simulaciones informáticas formales de sistemas complejos y utilizarlas para diseñar políticas y organizaciones más eficaces” (p. 6). La metodología es fundamentalmente interdisciplinaria debido a que su interés es el comportamiento de sistemas complejos, para su estudio continúa un proceso de modelado iterativo que se basa en la teoría de la dinámica no lineal y el control de realimentación (figura 2).

Figura 2. El proceso de modelado



Fuente: [Sterman \(2000\)](#).

Métodos y materiales

Situación problemática

El abastecimiento de agua en el distrito de Pampas depende del sistema de explotación de aguas superficiales, que integra el agua potable, alcantarillado y saneamiento; brindando los servicios a las actividades socioeconómicas desarrolladas por la población. El sistema cuenta con una planta potabilizadora de capacidad de 400 m³ de agua. Sin embargo, no se cuenta con sistemas de tratamiento de aguas residuales, tampoco de explotación de aguas subterráneas ni pluviales, que servirían para atender la demanda que crece exponencialmente.

Y como parte de la demanda de agua en aplicación de la ecuación (6), en el estudio se consideró el conjunto de actividades socioeconómicas de la siguiente manera: En el *sector doméstico*, el uso de agua es cada vez mayor, debido al crecimiento exponencial de la población que alcanza 8120 habitantes con un nivel de consumo promedio de 240 m³/año/hab., tomando como referencia la ciudad de Huancavelica donde el consumo asciende a 20 m³/mes, según la Superintendencia Nacional de Servicios

de Saneamiento (SUNASS, 2013). En el *sector de servicios*, existen 35 instituciones privadas y públicas (educativas, salud, entre otras) que demandan el servicio de agua para desarrollar actividades socioeconómicas de la población. El coeficiente de consumo promedio de agua asciende a 1320 m³/año por institución (SUNASS, 2013). En el *sector de comercio*, la actividad comercial (restaurant, abarrotes y otros) ha crecido exponencialmente como una fuente de sustento económico del 20% de la población, con un consumo de agua promedio que asciende a 480 m³/año (SUNASS, 2013). En el *sector agrícola*, el área cultivada alcanza aproximadamente 4 400 000 m², la cual demanda un recurso hídrico con un nivel de consumo de 0.85 m³/año/ m². Otros factores determinados fueron: la precipitación anual de 0.737 m³/año/m² y evapotranspiración potencial de 0.122 m³/año/ m² (SENAMHI, 2016). Y en el *sector pecuario*, para fines de estudio se ha determinado una cantidad de 1200 principales ganados que demandan en mayor escala el líquido elemento, el consumo promedio es 26.64 m³/año por cabeza de ganado (Quevedo *et al.*, 2019).

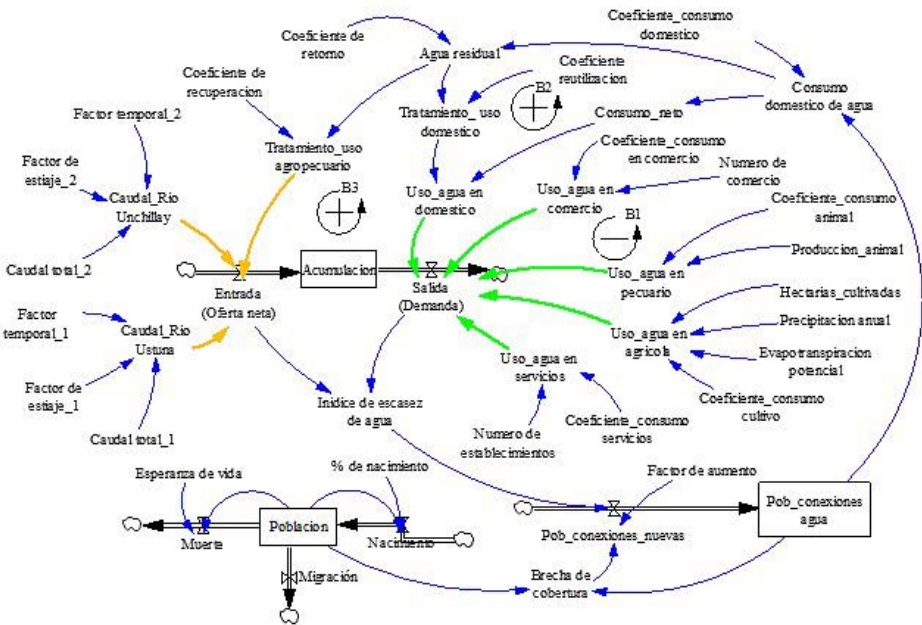
Modelo dinámico

Con la información previamente obtenida se formuló el modelo dinámico de gestión de la escasez de aguas superficiales a través del diagrama de stock y flujos, que tienen un significado matemático y sus valores de los parámetros se evidencian en la Tabla 1. El diagrama fue desarrollado en Vensim Ple Plus, como muestra la Figura 3, que explica la estructura dinámica de la disponibilidad de aguas superficiales y la demanda de agua provocada por las actividades socioeconómicas y cómo estas condicionan las tendencias de la escasez de agua.

El modelo contiene bucles de realimentación tanto positivas como negativas. El primero tiende a generar un comportamiento de crecimiento de las variables, mientras el segundo tiende a generar un comportamiento que busca un equilibrio. El *bucle negativo B1* explica cómo el aumento de las actividades socioeconómicas relacionadas al uso doméstico (domésticas, comerciales, institucionales), al uso pecuario y al uso agrícola de agua provocan la mayor demanda del agua, generando su mayor escasez en el tiempo de estudio. Este último afecta negativamente la cobertura de agua, provocando cambios en las mismas variables socioeconómicas donde se dieron los cambios iniciales. El *bucle positivo B2* explica cómo una gestión adecuada de aguas residuales generada en las actividades socioeconómicas provocaría

el aumento de la oferta de agua, que actualmente se encuentra condicionada por las fuentes de abastecimiento (los ríos, riachuelos, etc.), provocando disminución de la escasez del agua y generando mayor cobertura en las variables socioeconómicas. Y el bucle positivo B3 explica cómo la gestión adecuada de aguas residuales reduciría el nivel de la demanda y la escasez de agua, aumentando la cobertura en las variables socioeconómicas.

Figura 3. Modelo de gestión de la escasez de aguas superficiales



Fuente: Gonzalo *et al.* (2004).

Sistema de variables

El sistema de ecuaciones del modelo dinámico se basó de la Metodología de Gonzalo *et al.* (2004), considerando su naturaleza dinámica, donde:

Índice de escasez

Su cálculo se debe a la relación entre la oferta hídrica de aguas superficiales disponibles en las fuentes abastecedoras y la demanda de agua provocada por las actividades socioeconómicas:

$$I = \frac{D}{O_n} \times 100\% \quad (1)$$

Donde: I : índice de escasez %, D : demanda total de agua m^3 , O_n : oferta hídrica superficial neta m^3 .

La oferta hídrica superficial

La oferta de agua se refiere al volumen de agua almacenada en los cuerpos de aguas superficiales en un periodo determinado de tiempo. Para Costa, Gonzalo, Domínguez & Vanegas (2005) la oferta se clasifica en: oferta total, que refleja el agua que discurre por las fuentes abastecedoras, y la oferta neta, la cual define la cantidad de agua que ofrecen las fuentes luego de haber descontado la cantidad de agua que debe quedarse en ellas para efectos de mantener el mínimo caudal durante el periodo de estiaje y para tomar en cuenta los efectos adversos de la irregularidad temporal de oferta. Su cálculo se realiza a través de la ecuación 2:

$$O_n = O_t \times (1 - R_e + R_{it}) \quad (2)$$

Donde: O_n : oferta hídrica superficial neta m^3 , O_t : oferta hídrica superficial total (m^3), R_e : es factor de reducción para mantener el régimen de estiaje, R_{it} : es factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica. Cada una de las variables son expresadas de la siguiente manera:

– El volumen de oferta hídrica total (O_t) se obtiene como:

$$O_t = Q_o \times T \quad (3)$$

Donde: Q_o es considerado como caudal modal de las fuentes abastecedoras m^3/s y T cantidad de segundos en un año.

– El porcentaje de factor de reducción para mantener el régimen de estiaje (R_e) se construye con base en la función de densidad probabilística (FDP) de los caudales de estiaje Q_{min} . De esta función se extrae el caudal de estiaje con el 97.5% de probabilidad de excedencia $Q_{min} 97.5\%$,

de modo que la reducción para mantener el régimen de estiaje de la fuente sería igual a la siguiente ecuación:

$$Re(\%) = \frac{Q_{min\ 97.5\%}}{Q_0} \times 100 \quad (4)$$

- Para estimar el porcentaje del factor de reducción por irregularidad temporal (R_{it}) de la oferta hídrica se considera: C_v , que representa los coeficientes de variación, C_s , que es la asimetría de los caudales promedio anuales, y P , el radio de correlación de los caudales diarios; expresada a través de una función como:

$$R_{it} = f(Q_0, C_v, C_s, \rho) \quad (5)$$

La estructura explícita de la función anterior es desconocida, por ello, como primera aproximación para obtener el (R_{it}) se aplica el siguiente coeficiente de variación por irregularidad temporal de la oferta hídrica:

- Cuando C_v : (0 – 0.2) el R_{it} (%) es 15
- Cuando C_v : (0.2 – 0.3) el R_{it} (%) es 25
- Cuando C_v : (0.3 – 0.4) el R_{it} (%) es 35
- Cuando C_v : (0.4 – 0.6) el R_{it} (%) es 40
- Cuando C_v : (>0.6) el R_{it} (%) es 50

Demanda hídrica

La demanda hídrica es determinada a través de los cálculos de volúmenes de consumo de agua por tipo de servicio. Este cálculo no contempla las pérdidas del agua en los sistemas de conducción, almacenamiento, tratamiento y distribución de agua en el suministro de agua potable, tampoco considera el nivel tecnológico, ni otros métodos de obtención del agua. Bajo estas consideraciones la demanda total de agua (D_t) está dada por la siguiente ecuación:

$$D_t = D_{ud} + D_{uc} + D_{us} + D_{ua} + D_{up} \quad (6)$$

Donde: *Dud*: demanda de agua para uso o consumo doméstico; *Duc*: demanda de agua para uso comercial; *Dus*: demanda de agua para uso en servicios; *Dua*: demanda de agua para uso agrícola; *Dup*: demanda para usos pecuarios.

Población

La población en general es un factor condicionante de la demanda de agua dado que, con el crecimiento demográfico, aumenta el consumo de agua en las actividades socioeconómicas. En consecuencia, la demanda del agua será mayor a lo largo del tiempo. La expresión matemática es:

$$Poblacion(t) = \int_0^n \left(\frac{dNacimiento}{dt} + \frac{dMuertes}{dt} \right) + poblacion(to) \quad (7)$$

Y la expresión de la población con acceso a las conexiones domésticas que dependen del índice de escasez de agua es:

$$Pob_conex\ agua(t) = \int_0^n \frac{d(\frac{Brecha\ de\ cobertura * Factor\ aumento}{\text{índice de escasez de agua}})}{dt} + pob_conex\ agua(to) \quad (8)$$

Estas variables se encuentran interrelacionadas formando bucles de realimentación en una unidad estructural de la cuenca hidrográfica, lo que determina su característica sistémica (ver Figura 3).

Prueba del modelo

Para demostrar la utilidad del modelo en la gestión de la escasez de aguas superficiales, este fue sometido al análisis estructural y del comportamiento, aplicando las pruebas de análisis de [Stermán \(2000\)](#). En los siguientes párrafos se resumen las pruebas desarrolladas:

Primero:

Respecto a la aplicación de la Técnica de Análisis Estructural, el modelo fue sometido al *test de evaluación de la estructura*, el cual consiste en comparar la estructura del modelo con la estructura del sistema real que el modelo representa. Para ello, se realizó una revisión detallada de literaturas referidas a la gestión de los recursos hídricos como [UNESCO \(2015\)](#), [UNESCO \(2019\)](#), [GWP \(2009\)](#) y Administración Nacional de Agua ([ANA, 2013](#)). Además, se realizó un análisis de la bibliografía

relacionada al tema, desarrollada por [Martínez y Vargas \(2016\)](#); [Vilchis, Garrocho & Díaz \(2018\)](#) y [Martínez y Villalejo \(2018\)](#), tomando en cuenta sus aportes y enfoques utilizados, los cuales fueron relevantes para el desarrollo estructural del modelo. Adicionalmente, se examinó la literatura en el desarrollo de los modelos como Industrial Dynamics de J. Forrester y Business Dynamics de J. Sterman, ya que representan el origen y las bases teóricas en el desarrollo del modelo y la caracterización de las variables.

El *test de verificación de parámetros*, que implica comparar los parámetros del modelo con la información disponible sobre el sistema real. En el modelo, los valores de los parámetros que condicionaron el comportamiento de las variables tuvieron como fuente el INEI, proporcionando los indicadores demográficos del periodo 2010 al 2020. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (s.f.) proporcionó la información sobre el cálculo de los indicadores de la escasez del agua. El [SENAMHI \(2016\)](#), con la caracterización hidrológica, proporcionó la información respecto a la oferta y demanda hídrica existente en el distrito de Pampas. Y la [SUNASS \(2013\)](#) contribuyó con las informaciones referentes a la demanda de agua (ver Tabla 1).

Por último, el *Test de Consistencia Dimensional*, el cual implica un análisis de las unidades de medida de las variables que conforman el modelo. La consistencia dimensional de ecuaciones del modelo fue revisada con la ayuda del software Vensim ple que cuenta con las herramientas: Check Model, función para comprobar la sintaxis del modelo, y Units Check, función para detectar errores en la coherencia de las unidades. Adicionalmente, se realizó una inspección directa de las ecuaciones.

Tabla 1. Valores de los parámetros del modelo

Parámetros	Unidades	Fuente de información	Valor
Coef_consumo domestico	m3/Year/hab	SUNASS (2013)	240
Coef_consumo comercio	m3/Year/hab	SUNASS (2013)	480
Coef_consumo animal	m3/Year/animal	Quevedo et al. (2019)	26.64
Coef_consumo cultivos	Dmnl	CORDECRUZ; PNUD; FAO (1989)	0.85
Coef_consumo servicios	m3/Year*servicio	SUNASS (2013)	1320
Coef_retorno	Dmnl	PTAR-Uniminuto	0.75
Evapotranspiracion potencial	m3/Year/m2	SENAMHI (2016)	0.122
Precipitación anual	m3/Year/m2	SENAMHI (2016)	0.737
Hectáreas cultivadas	m2	Municipalidad Provincial de Tayacaja (2015)	440
Numero de comercio	Comercio	Determinación propia	400

Parámetros	Unidades	Fuente de información	Valor
No de establecimientos	Servicio	Determinación propia	35
Factor temporal	Dmnl	SENAMHI (2016)	0.15
Factor de estiaje	Dmnl	SENAMHI (2016)	0.17
Población	hab	INEI (2017), (2018)	11 182
Tasa de nacimientos	hab	INEI 2017	0.021
Caudal total_1	l/s	Municipalidad Provincial de Tayacaja (2019)	229.43
Caudal total_2	l/s	Municipalidad Provincial de Tayacaja (2019)	229.43

Fuente: Elaboración propia.

Segundo:

La técnica de análisis del comportamiento permitió corroborar el funcionamiento del modelo y el estado del sistema en el periodo de 2010 al 2020. El *Test de reproducción del comportamiento* implica comparar si el comportamiento del modelo presenta las mismas características estadísticas que el sistema real. El desempeño del modelo fue evaluado considerando el % de error generado entre los datos simulados y reales, tomando como referencia el estudio de Barlas (1996) que establece “un modelo será válido si la tasa de error es más pequeña que el 5%” (p. 14). La expresión matemática utilizada es:

$$\% \text{ error relativo} = \frac{\text{dato simulado} - \text{dato real}}{\text{dato real}} * 100 \quad (9)$$

Considerando el acceso a la información histórica disponible en la zona de estudio, las variables sometidas a esta prueba fueron las variables: *la población, población con conexiones domésticas* y *el consumo de agua doméstica*. Los resultados de análisis de comparación de medias obtenidas de la relación de datos simulados y datos reales, para *la población* obtuvo el % de error relativo de 2.5%, para *población con conexiones domésticas* se obtuvo 0.54% y para el nivel de *consumo de agua doméstica* se obtuvo 0.60%. Estos resultados presentaron tasa de error aproximadas, con variación mínima, menores del 5%.

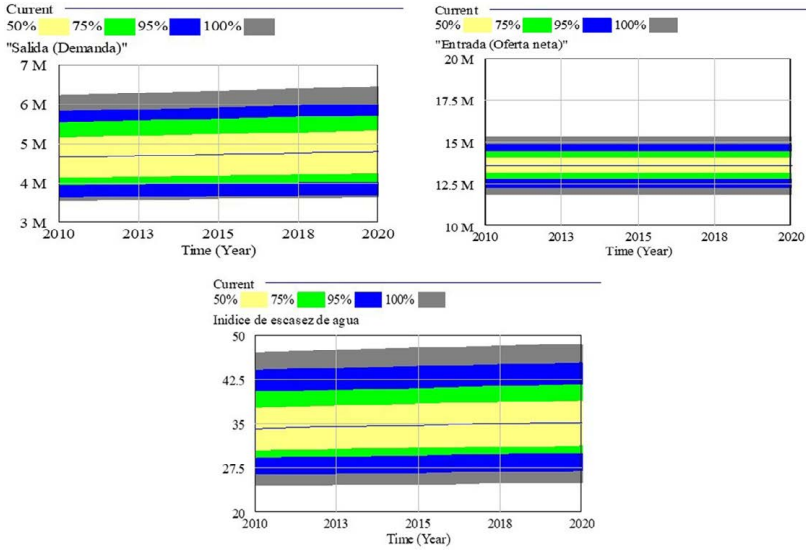
El *Test de análisis de sensibilidad*; que implica centrar la atención en la sensibilidad del modelo ante los cambios del valor de los parámetros dentro el rango plausible de incertidumbre. Para comprobar, se realizaron simulaciones de Monte Carlo con ayuda de software Vensim en un rango

de incertidumbre de 50% (-50%, 100%, +50%) sobre el valor estimado de parámetros inciertos determinados como:

- Tasa de nacimiento	- (0.010, 0.021, 0.03)
- Coeficiente de retorno	- (0.375, 0.75, 1.125)
- Coeficiente_consumo domestico	- (120, 240, 360)
- Coeficiente_consumo comercio	- (240, 480, 720)
- Coeficiente_consumo servicio	- (606, 1212, 1818)
- Factor temporal_1	- (0.075, 0.15, 0.225)
- Factor de estiaje_1	- (0.085, 0.17, 0.255)
- Factor temeporal_2	- (0.075, 0.15, 0.225)
- Factor de estiaje_2	- (0.085, 0.17, 0.255)

La Figura 4 muestra el resultado de las simulaciones de modos de comportamiento y los límites de confianza dinámicos del 50%, 75%, 95% y 100% de las variables relevantes en una muestra de 200 simulaciones, asumiendo que la distribución de valores es uniforme. Bajo estos supuestos, existe un 50% de probabilidad de que la *demanda de agua* alcance los valores aproximados entre 4.5 y 5.3 millones de m³ de agua en el periodo del 2010 a 2020, y de 95% de probabilidad de que alcance los valores entre 3.8 y 6.0 millones de m³ de agua. Quiere decir que la variable es muy sensible ante los cambios de los parámetros inciertos, permitiendo que la variable tenga mayor grado de confianza. Asimismo, el comportamiento de la variable *oferta neta* es menos sensible, presentando la estabilidad durante el periodo de evaluación, debido a que algunos parámetros no tienen influencia alguna sobre esta variable. Existe un 100% de probabilidad de que la oferta neta alcance los valores aproximados entre 12.2 y 15.1 millones de m³ de agua. Y, finalmente, en el mismo supuesto caso existe un 50% de probabilidad de que el *índice de escasez de agua* alcance los valores aproximados entre 31% y 38%, y de 95% de probabilidad de que alcance los valores entre 25% y 44%. La variable *índice de escasez de agua* es muy sensible durante el periodo de análisis ante los cambios de parámetros inciertos.

Figura 4. Resultado del análisis de Sensibilidad en Software Vensim



Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas aplicadas indican que la estructura del modelo desarrollado es coherente sintáctica y dimensionalmente. Las variables reproducen comportamientos plausibles que se aproximan a los datos estadísticos; y a su vez, tras el análisis de sensibilidad, se confirman los límites de confianza dinámicos de las variables frente los parámetros inciertos establecidos. Se afirma que el modelo dinámico presenta un nivel de confiabilidad aceptable respondiendo positivamente a los propósitos del desarrollo, y puede ser empleado para el análisis de las políticas establecidas en la gestión de la escasez de aguas superficiales.

Resultados

A fin de utilizar el modelo para el analizar la gestión de la escasez de aguas superficiales, se tomaron las políticas establecidas por [Qadir, Sharma, Bruggeman, Choukr-Allah & Karajeh \(2007\)](#) de que las aguas residuales son “un subproducto de procesos específicos o pueden ser el resultado de tecnología especializada para recolectar al agua. Recursos que necesitan un tratamiento adecuado previo al uso” (pp. 21-22). Y para [Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR \(2014\)](#), el Coeficiente de

Retorno (R) oscila entre 70% y 80%, que es el porcentaje del total de agua consumida que se devuelve al alcantarillado, las cuales pueden ser reutilizadas. Estas políticas fueron analizadas en la Figura 3, donde se perciben los resultados de simulación de la *demanda* de agua, *oferta neta* y el *índice de escasez de agua*, en tres situaciones y cada una en tres escenarios en un periodo de 2010 al 2040 (ver Figura 5).

Situación 1) el aumento poblacional y políticas de tratamiento: reutilización de aguas residuales

En un *escenario actual* donde no existen políticas de tratamiento para reutilizar el agua residual, la demanda de agua presenta un comportamiento lineal, en consecuencia, el índice de escasez de agua alcanza el 37% al año 2040, esto quiere decir que el agua demandada alcanzaría el 37% del agua disponible, este hecho alerta una situación de *escasez “medio”*, requiriendo medidas urgentes para mejorar la eficiencia en su utilización del agua y optimización de la oferta disponible. Y en un *escenario de aumento poblacional* al 8% del valor actual desde el año 2021, el comportamiento de la demanda es exponencial y el índice de escasez de agua alcanzaría 41%, alertando una situación *escasez “alto”*. En esta situación el agua se convierte en un factor limitador del desarrollo de actividades socioeconómicas y requiere una atención máxima de la oferta disponible. Sin embargo, en un *escenario de tratamiento* para reutilizar el 30% de aguas residuales desde el año 2021, tanto la demanda como el índice de escasez de agua presentarían una tendencia menor para el año 2040 que, en otros escenarios, reduciendo el índice de escasez del agua de situación Alta (41%) a una situación Medio (36%). Esta diferencia de 5% nos lleva a inferir que la implementación de políticas de reutilización de aguas residuales para disponer a uso doméstico permitiría reducir el agua demandada generando un ahorro de agua doméstica de hasta 540 289 m³.

Situación 2: el aumento poblacional y políticas de tratamiento: recuperación de aguas residuales

En el *escenario actual*, donde no existen políticas de tratamiento para recuperar el agua residual, la oferta de agua muestra un comportamiento constante, en consecuencia, el índice de escasez de agua presenta una tendencia lineal al año 2040; donde el agua demandada alcanzaría el 37% del agua disponible, alertando una situación de *escasez “medio”*. Y en un *escenario de aumento poblacional* al 8% del valor actual desde el

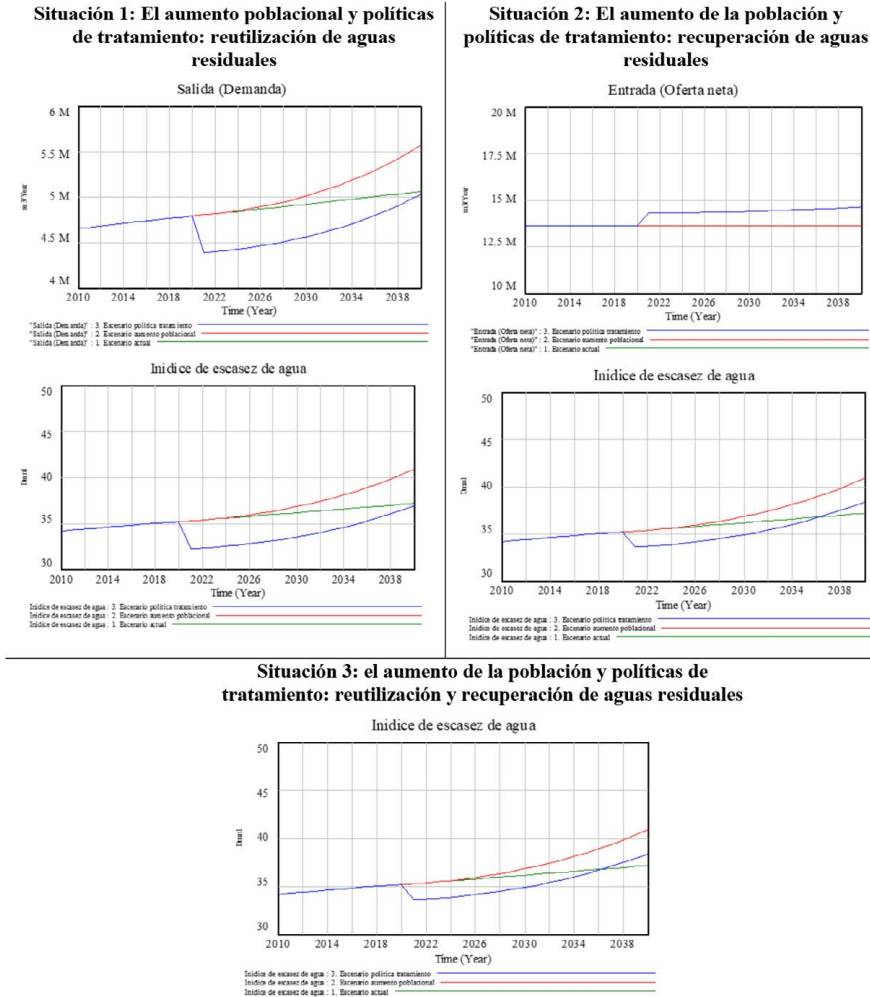
año 2021, el índice de escasez de agua alcanzaría el 41% para el año 2040, alertando una situación de escasez “alto”. Sin embargo, en un escenario de políticas de tratamiento para recuperar hasta el 50% de aguas residuales, la oferta de agua presenta una tendencia mayor al año 2040 en comparación del escenario actual; y el índice de escasez muestra un comportamiento menor que el escenario de aumento poblacional, reduciendo el índice de escasez de situación Alta (41%) a una situación Medio (38%). Esta diferencia de 3% se debe a la implementación de políticas de recuperación de aguas residuales para disponer en uso agropecuario que permitiría incrementar la oferta del agua hasta en 1 006 113 m³.

Situación 3: el aumento poblacional y políticas de tratamiento: reutilización y recuperación de aguas residuales

En un *escenario actual*, el índice de *escasez de agua* presenta una tendencia creciente alcanzando aproximadamente el 37% para el año 2040. Y en un *escenario de aumento poblacional* al 8% del valor actual desde el año 2021, el índice de escasez de agua alcanzaría el 41% alertando una situación de escasez “alto” para el año 2040. Sin embargo, en un escenario de políticas de tratamiento para reutilización de agua residual (30%) y recuperación (50%), el comportamiento del índice de escasez de agua presenta una tendencia menor que en otros escenarios, disminuyendo la situación Alta (41%) a una situación Medio (34%). Esta diferencia del 7% se debe a que la implementación de estas políticas de tratamiento reduciría la demanda de agua y permitiría incrementar la oferta del agua, lo cual hace que el índice de escasez sea menor.

Finalmente, en la Figura 5 se explica la situación actual de la escasez del agua en el distrito de Pampas y sus tendencias para el año 2040. Donde en un escenario de aumento de la población, el *índice de escasez* se ubica en una situación “alto”, sin embargo, con las políticas de tratamiento de aguas residuales, la situación de escasez se reduce a una situación “medio”. Esto se debe a que, a medida que se realizan los tratamientos de aguas residuales, la población dispone de una fuente adicional para cubrir sus requerimientos domésticos y agropecuarios, por lo cual la demanda disminuye y el índice de escasez del agua presenta una tendencia decreciente.

Figura 5. Resultado de simulación de las variables Demanda de agua, Oferta neta e Índice de escasez del agua



Fuente: Elaboración propia en software Vensim.

Discusión de resultados

Los resultados evidencian la utilidad del modelo dinámico como una herramienta de gestión que ayuda a visualizar el resultado de las decisiones en la gestión de la escasez de aguas superficiales, alertando sobre la situación de escasez del agua a través del indicador del índice de escasez, que

distingue los umbrales críticos (baja, moderado, medio y alta). La utilidad es coherente con respecto a las metas establecidas en la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible [CEPAL \(2016\)](#) que incluyen como pilar fundamental la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos GIRH, con el objetivo de asegurar el abastecimiento del agua dulce frente al crecimiento de la escasez del agua provocada por el crecimiento demográfico y cambio climático.

Asimismo, en el modelo las políticas frente las aguas residuales procedentes de actividades socioeconómicas presentan efectos positivos en el comportamiento de la escasez del agua, como: a mayor reúso de aguas residuales, disminuye la demanda del agua doméstica, y a la vez aumenta la disponibilidad del agua; en consecuencia, el comportamiento del índice de la escasez del agua presenta una tendencia baja. Estas políticas son coherentes con los establecidos por [ANA \(2013\)](#) sobre el tratamiento de aguas residuales que consiste en aumentar la calidad de las aguas, así como la disponibilidad de recursos hídricos, que pueden ser dispuestos para atender la demanda del recurso en otras actividades. De igual manera, para [UNESCO \(2019\)](#) la disponibilidad reducida de agua per cápita requiere de políticas como la “reutilización del agua, que ofrece oportunidades para fortalecer el abastecimiento convencional de agua, especialmente en ciudades que dependen de fuentes de agua más distantes” (p. 52), además, puede ser dispuesta para otras actividades, como para la irrigación de cultivos.

Conclusiones

Se concluye que la gestión de la escasez de aguas superficiales observada desde un enfoque de los sistemas dinámicos permite comprender su estructura compleja, ayudando a diseñar políticas más eficaces mediante escenarios de simulación. Por lo tanto, el modelo propuesto muestra su utilidad en la comprensión de la complejidad de la gestión del agua y como una herramienta para la toma de decisiones respecto a su escasez. Las estrategias de tratamiento de aguas residuales evaluadas con el modelo desarrollado permitirán prevenir y reducir la situación de la escasez de agua al año 2040.

Se sugiere que las instituciones involucradas en la gestión de los recursos hídricos deben considerar la metodología del cálculo de índice de la escasez de aguas superficiales y el enfoque de sistemas dinámicos

cuando implementen estrategias en la gestión de la escasez de los recursos hídricos y las cuencas hidrográficas, para enfrentar una oferta que cada vez disminuye frente a una demanda creciente de agua.

Referencias

- Autoridad Nacional de Agua. (ANA, 2013). *Plan Nacional de Recursos*. Lima, Ciudad de Lima: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183-210. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4)
- Comision Economica para America Latina y Caribe. (CEPAL, 2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Santiago, Chile: CEPAL.
- CORDECRUZ, Cooperación de Desarrollo de Santa Cruz; PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; FAO, La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1989). *Balance hídrico y necesidades de agua para los cultivos más importantes en la cuenca del río La Ciénega Vallegrande, Santa Cruz, Bolivia*. Vallegrande.
- Costa, C., Gonzalo, H., Domínguez, E. A., & Vanegas, R. (2005). El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis o una alerta para orientar la gestion del recurso hidrico? *Revista Ingenieria, Facultad de Ingenieria, Universidad de los Andes*, (22), 104-111. doi: <https://doi.org/10.16924/revinge.22.12>
- Global Water Partnership. (GWP, 2009). *Manual para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas*. Londres, Inglaterra: GWP.
- Gonzalo Rivera, H., Marin Ramirez, R., Domínguez Calle, E. A. & Vane-gas Sarmiento, R. (2004). *Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial*. Lima, Perú: OTAN-INEI.
- Hernández, S. M., & Posada, A. (2018). Avances de la Investigación Sobre la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 553-563. doi: <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1079>.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (INEI, 2017). *Compendio estadístico 2017*. Huancavelica.

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (INEI, 25 de junio de 2018). *Población del Perú*. Recuperado de: <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/poblacion-del-peru-totalizo-31-millones-237-mil-385-personas-al-2017-10817/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20los%20primeros%20resultados%20de,mil%20370%20mujeres%20m%C3%A1s%20que>
- Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Mazatlán. (JUMAPAM, 15 de marzo de 2021). *Distribución de Agua en el Planeta*. Recuperado de: <http://jumapam.gob.mx/cultura-del-agua/distribucion-de-agua-en-el-planeta/>
- Laclette, P., & Zúñiga, P. (2012). *Diagnóstico del agua en las Américas*. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC, Mexico.
- Martínez, P., & Vargas, A. (2016). Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 139-154.
- Martínez, Y., & Villalejo, V. M. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58-72.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (MINAGRI, 2010). *Reglamento de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos*. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (MINAGRI, 2015). *Plan Nacional de Recursos Hídricos*. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura y Riego.
- Moreira, A., Mirandola, P. H., Luiz, A., Salinas, E., & de Oliveira, I. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 69-85. doi: <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>
- Municipalidad Provincial de Tayacaja. (2015). *Plan de Desarrollo Concertado Tayacaja 2015-2021*. Pampas.
- Municipalidad Provincial de Tayacaja. (2019). *Planta de tratamiento de agua potable 2019*. Pampas.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (UNESCO, 2015). *Afrontar los retos estudios de casos e indicadores*. París, Francia: ONU.

- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (UNESCO, 2019). *No Dejar a Nadie Atrás. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019*. Francia: Lucart Estudio S.A. de C.V.
- Organización de Naciones Unidas. (ONU, 17 de junio de 2019). *Naciones Unidas*. Recuperado de: <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-population-prospects-2019.html>
- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. (PTAR, 2014). *Beneficios de Planta El Salitre*. Recuperado de: <https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/home>
- Qadir, M., Sharma, B., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R. & Karajeh, F. (2007). Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agricultural Water Management*, 87(1), 2-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.018>
- Quevedo, W., Quevedo, W., Ortiz, L., Sardán, S., Rivera, E., & García, D. (2019). Disponibilidad y consumo de agua para la ganadería bovina en el municipio de Mojocoya. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 17(20), 133-142.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (SENAMHI, 2016). *Caracterización Hidrológica del distrito de Pampas y Santiago de Tucuma – Departamento Huancavelica*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente.
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Massachusetts, USA: McGraw-Hill Higher Education.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (SUNASS, 2013). *Determinación de la fórmula tarifaria, estructura tarifaria y metas de gestión aplicable a la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Huancavelica S.A.C.* Huancavelica, Perú: Municipalidad Provincial de Huancavelica.
- Vilchis Mata, I., Garrocho Rangel, C. F., & Díaz Delgado, C. (2018). Modelo dinámico adaptativo para la toma de decisiones sostenibles en el ciclo hidrosocial urbano en México. *Revista Geografía Norte Grande*, (71), 59-90. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-34022018000300059>