

Índice de escasez hídrica en la cuenca del río Ambi, Ecuador

Water scarcity index in the Ambi river basin, Ecuador

Paúl Arias-Muñoz¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1263-2748>

David Díaz-Chapuzés², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4849-4866>

Santiago Cabrera-García³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6114-2043>

Gabriel Jácome-Aguirre⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8305-6226>

¹Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador / Laboratorio de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, dparias@utn.du.ec

²Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, eddiazc@utn.edu.ec

³Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador / Laboratorio de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, jscabrera@utn.edu.ec

⁴Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador / Laboratorio de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, gajacomea@utn.edu.ec

Autor para correspondencia: Paúl Arias-Muñoz, dparias@utn.edu.ec

Resumen

La disponibilidad y aprovechamiento del recurso hídrico actualmente es un problema que afecta el desarrollo de la vida y de actividades económicas. A pesar de que Ecuador es uno de los países con mayor disponibilidad de agua por habitante, el aumento de la demanda ejerce presión sobre las vertientes de abastecimiento. El presente estudio tuvo por objetivo determinar la escasez hídrica en la subcuenca del río Ambi, ubicada en la provincia de Imbabura en Ecuador, durante el periodo 1990-2017. Para ello, se determinó el índice de escasez hídrica (IEH) mediante el cálculo de la oferta y demanda hídrica usando los sistemas de información geográfica. La oferta hídrica se calculó con el uso del modelo hidrológico SWAT y los caudales simulados fueron validados con información recopilada desde el Instituto de Meteorología e Hidrología de Ecuador (INAMHI). Como resultados se obtuvo que durante el periodo 1990-2017, el valor promedio de la oferta hídrica fue de 4.94 m³/s y su demanda hídrica total fue de 17 m³/s. Esto demuestra que mientras la oferta disminuye, la demanda aumenta. Además, los valores obtenidos para el IEH se triplican desde el periodo 1990-1996 hasta el periodo 2007-2018 al pasar de 57.26 a 183.57 %. En consecuencia, los resultados

evidencian la alta presión ejercida desde la demanda a la disponibilidad de recursos hídricos.

Palabras clave: oferta hídrica, demanda de agua, modelo hidrológico, SWAT, caudal, disponibilidad hídrica.

Abstract

The availability and use of water resources is currently a problem that affects the development of life and economic activities. Although Ecuador is one of the countries with the highest water availability per inhabitant, the increase in demand puts pressure on water supply sources. This study aimed to determine water scarcity during 1990-2017 in the Ambi river sub-basin, located in the province of Imbabura in Ecuador. For this purpose, the water scarcity index (IEH) was defined by calculating water supply and demand using Geographic Information Systems. The water supply was estimated using the SWAT hydrological model to simulate flows. The flows were validated with information from the Institute of Meteorology and Hydrology of Ecuador (INAMHI). The average value of water supply during the period 1990-2017 was 4.94 m³/s, and its total water demand was 17 m³/s. This shows that as supply decreases, demand increases. In addition, the values obtained for the IEH tripled from the period 1990-1996 to the period 2007-2018, going from 57.26 to 183.57%. Consequently, these results evidence the high pressure from the demand for the availability of water resources.

Keywords: Water supply, water demand, hydrological model, SWAT, water flow, water availability.

Recibido: 19/04/2023

Aceptado: 30/08/2023

Publicado Online: 05/09/2023

Introducción

Actualmente, la demanda por los recursos hídricos es elevada frente a la oferta, principalmente debido al uso y aprovechamiento del agua disponible, ocasionando problemas en la disponibilidad y escasez del recurso en varias regiones del mundo (Alcama, 2013). Al determinar la oferta es posible conocer la capacidad hídrica de una cuenca hidrográfica; para ello se ha desarrollado varios modelos de simulación, los cuales están enfocados en la evaluación y predicción cuantitativa. Los modelos hidrológicos basados en parámetros físicos y determinísticos, como Hydrologic Simulation Package Fortran (HSPF) (Thober *et al.*, 2022), Agricultural Non-Point Source (AGNPS) (Lindi, 2014), o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Son, Le Huong, Loc, & Tran, 2022) sirven como herramienta de predicción de la oferta hídrica en cuencas hidrográficas. El modelo hidrológico SWAT, desarrollado por el Departamento Agrícola de Estados Unidos (USDA) y el Servicio de Investigación Agrícola (ARS), es utilizado para modelar la generación de agua y sedimentos en una unidad hidrográfica (Barrios & Urribarri, 2009; Gillig, McCarl, & Boadu, 2011). Por otra parte, la relación de la oferta y demanda hídrica se usa como un indicador del nivel de presión sobre el recurso hídrico, expresado de forma porcentual mediante el índice de escasez hídrica (IEH)

(Betancur, Jaramillo, & Molina, 2011). El uso de herramientas como el IEH permite comprender y cuantificar los impactos negativos en la gestión del recurso hídrico producto del incremento constante de la demanda del recurso hídrico para su consumo y aprovechamiento.

Existe una variación de la disponibilidad hídrica respecto a los habitantes en el planeta y su lugar de residencia. La mayor diferencia se establece entre Asia y Sudamérica, continentes que concentran diferentes proporciones de habitantes con alrededor del 60 y 6 % de la población mundial, respectivamente; sin embargo, disponen de similares reservas hídricas, que oscilan entre el 36 y 26 %, respectivamente (BID, 2009). Aunque en Latinoamérica existe mayor disponibilidad de agua respecto a su número de habitantes, también hay evidencia de que con el aumento de la población, las demandas por el agua se han tornado conflictivas (Martínez-Austria, 2013; Mejía, 2014; Chamba-Ontaneda, Massa, & Fries, 2019; Huang, Yuan, & Liu, 2021).

Ecuador es uno de los países con mayor concentración de redes hídricas por unidad de superficie (Tromben, 2011). La disponibilidad hídrica anual por habitante en el país es de 22 500 m³, y la disponibilidad de sus principales vertientes es de 4 863.41 m³/hab/año en la vertiente costera y 172 786.36 m³/hab/año en la vertiente amazónica (Weemaels, 2009; Campos, Sinichenko, & Gritsuk, 2014). La disponibilidad hídrica promedio y la que presentan ambas vertientes sobrepasan el umbral de estrés hídrico, que es 1 000 m³/habitante/año, lo cual fue establecido por Falkenmark (1999). Por ello, en Ecuador, la escasez hídrica se construye a través de otros factores. Aunque la oferta hídrica varía geográfica y temporalmente por la distribución de las cabeceras de cuencas

hidrográficas, y la presencia de una marcada época lluviosa y una época seca (Calles, 2016), no son las condiciones climáticas y geográficas las que marcan la escasez hídrica en el territorio ecuatoriano.

En el país, los factores que propician la escasez hídrica son la presión demográfica y las decisiones políticas implementadas para satisfacer la demanda de actividades económicas y uso de suelo (Küffner, 2005; Zapatta & Gasselin 2005; Weemaels, 2009). De acuerdo con la información de los boletines de la Secretaría Nacional del Agua (Senagua) (Senagua, 2011), el mayor porcentaje de uso y aprovechamiento hídrico está destinado al sector agrícola, con un 80 %, mientras que para el uso doméstico se destina un 13 % y finalmente al sector de la industria un 7 %. Bajo esta estadística queda claro que la presión de la demanda agrícola e industrial en el país marca la disponibilidad de agua en el territorio. A esto se suman los conflictos por el agua en, resultado de las tendencias regionales y locales de crecimiento urbano, parcelación de la tierra e incluso el aumento de monocultivos para producción de biocombustibles (Chiriboga, 2015; Terneus & Viteri, 2021).

Aunque el balance hídrico en Ecuador generalmente es positivo en todas sus unidades hídricas, existe una presión sobre el recurso hídrico a consecuencia de la demanda por consumo humano y de los diferentes sectores económicos (Neitsch, Arnold, & Williams, 2005). En ese sentido, la subcuenca del río Ambi no estaría exenta a esta realidad. Dentro de la subcuenca, las principales demandas hídricas son las siguientes: 46 % para hidroeléctrica, 44 % para riego y 6 % para uso doméstico. Bajo esos antecedentes, el objetivo del presente estudio fue determinar la escasez hídrica en la subcuenca del río Ambi. Para ello se calculó el IEH mediante

la aplicación de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), a fin de establecer la relación entre la oferta y la demanda hídrica para el periodo de 1990-2017.

Materiales y métodos

Área de estudio

La subcuenca hidrográfica del río Ambi pertenece a la unidad hídrica Mira y está ubicada al norte de Ecuador, en la provincia Imbabura (Figura 1). Presenta una superficie de 1 129.8 km² y se extiende por los cantones de Otavalo, Cotacachi, Antonio Ante, Urququí e Ibarra. La investigación se limitó a la sección que delimita como punto de aforo a la Estación Hidrológica Ambi DJ Cariyacu (Figura 1). La superficie de esta sección es 683.04 km²; presenta un rango altitudinal entre 2 080 msnm y 4 800 msnm; las elevaciones de mayor altitud son los volcanes Cotacachi (4 944 msnm) e Imbabura (4 630 msnm), los cuales no tienen glaciares de forma permanente. De acuerdo con los datos de los anuarios meteorológicos del INAMHI, el clima presenta una temperatura mínima de 5 °C, una temperatura máxima de 23 °C, una temperatura media de 15 °C, y una precipitación media anual de 1 246.3 mm.

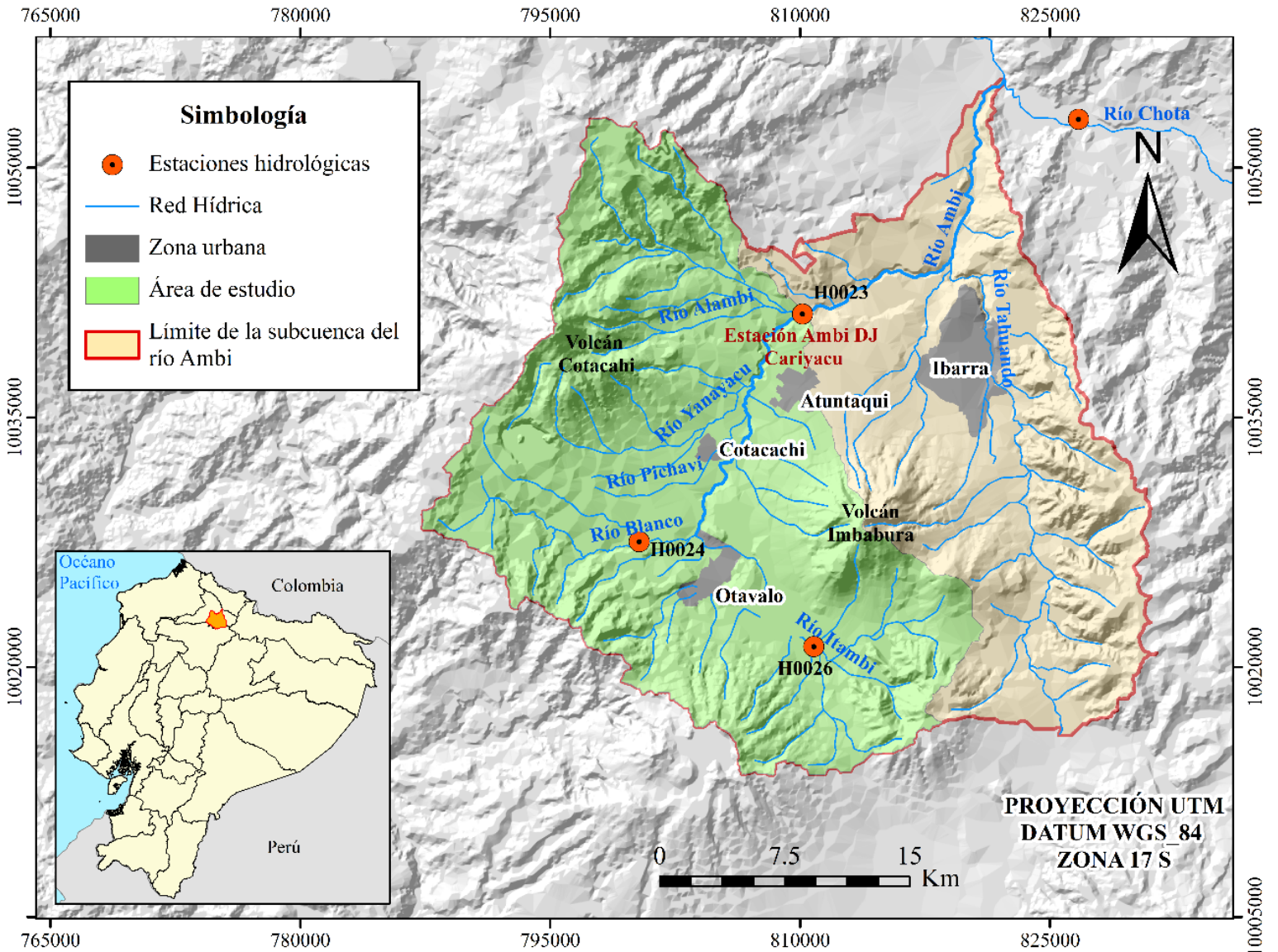


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Ambi, Ecuador.

De acuerdo con la información del VII Censo de Población y VI de Vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC, 2010), se estima que la población es de 280 881 habitantes y la densidad

poblacional es 249 hab/km². Las principales actividades son agricultura, ganadería y comercio, pero no son las únicas, pues coexisten con otras actividades, como manufactura, talabartería y construcción.

Preparación de datos de entrada del modelo hidrológico

El modelo hidrológico SWAT simula la producción de agua y sedimentos en una determinada cuenca hidrográfica. Los datos básicos requeridos para el modelo SWAT incluyen un modelo de elevación digital (DEM), tipo de suelo (textura), cobertura del suelo, meteorología (precipitación diaria y temperatura media diaria) y los datos de caudales de ríos para la validación (Torres, Fernández, Oropeza, & Mejía, 2004).

Se utilizó un SRTM-DEM con 30 metros de resolución para delimitar la cuenca hidrográfica y como insumo para definir los tipos de pendiente. En lo que respecta a la información edáfica, con base en la información desarrollada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2021) a escala 1:25 000, se identificaron siete tipos de textura de suelo, arcillo arenoso fino, arcillo fino, arenoso grueso, franco arcillo arenoso medio, franco arenoso moderadamente grueso, franco limoso moderadamente grueso, franco medio.

Para la cobertura de suelo se emplearon tres imágenes satelitales Landsat de los sensores TM, ETM y OLI/TIRS para los años 1996, 2007 y 2017. En el preprocesamiento de las imágenes se realizaron correcciones radiométricas, atmosféricas y geométricas (Chuvienco, 2002). Las correcciones radiométricas y atmosféricas se hicieron en el *software* QGIS 3.22.6 y las correcciones geométricas utilizando el modelo digital de

elevación SRTM-DEM. En el procesamiento se identificaron las coberturas, bosque, páramo, pastos, cultivos, zonas urbanas y sin vegetación. La información climática utilizada fue precipitación diaria, temperatura mínima diaria y temperatura máxima diaria. Los registros meteorológicos ingresados al modelo corresponden a las estaciones de Inguincho y Otavalo, que forman parte del Sistema Nacional de Estaciones del INAMHI y se ubican dentro del área de estudio (Figura 2).

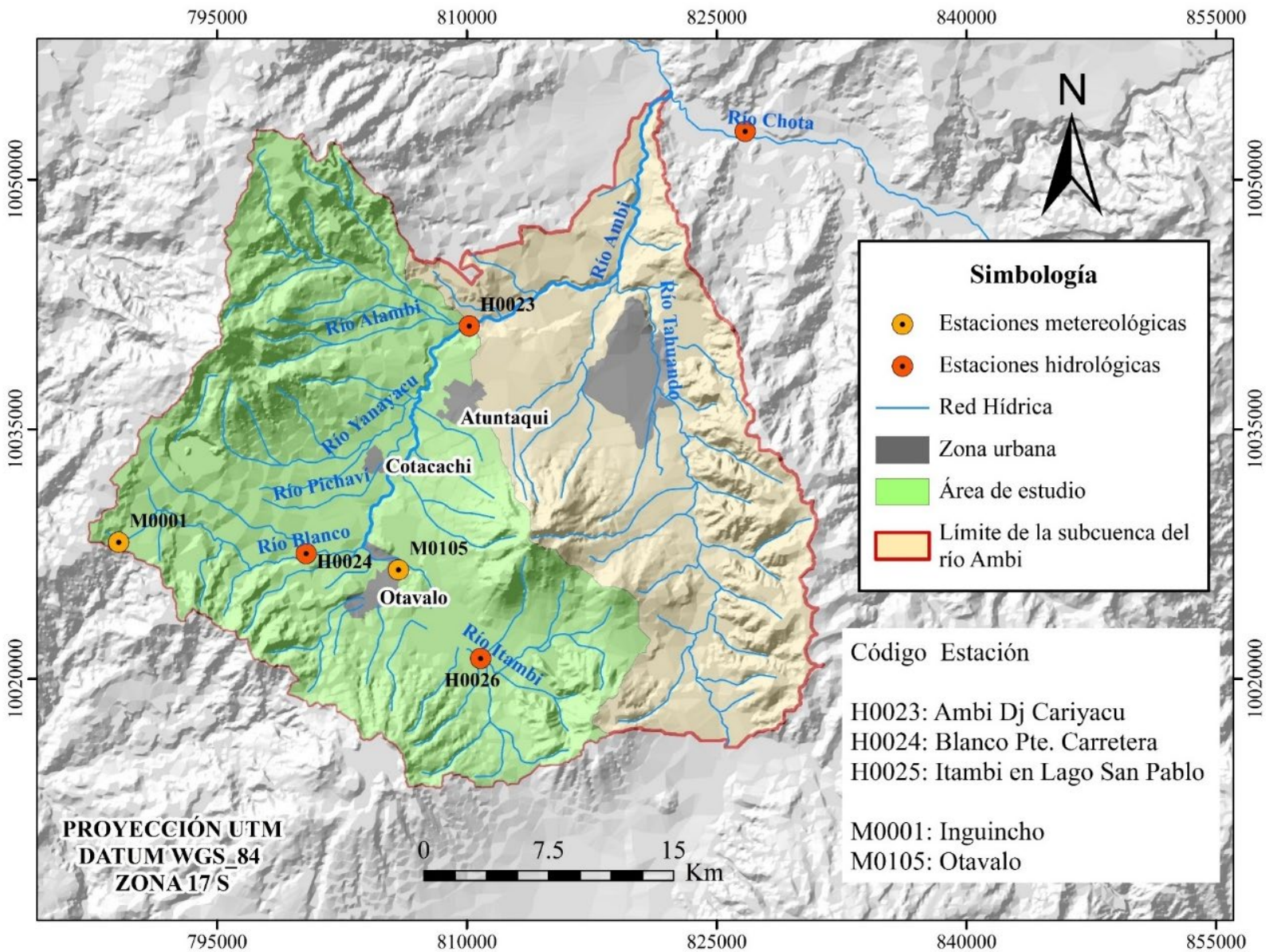


Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrológicas utilizadas para la simulación hídrica de la cuenca del río Ambi, Ecuador.

Modelación y calibración del modelo hidrológico

El modelo SWAT fundamenta su simulación en el balance hídrico, es decir, en las variables de entrada-salida del balance, y la capacidad de almacenamiento de agua en la cuenca o unidad hidrográfica. Durante el proceso de simulación en SWAT, en primer lugar se ingresó la información base; después, en la modelación, se calcularon los parámetros del ciclo hidrológico, donde se definió el movimiento del agua y los sedimentos a lo largo de la cuenca hasta su punto de salida, y finalmente se calibró y validó el modelo (Espinoza & Zelaya, 2022).

Para obtener una mejor eficiencia en los valores de simulación del modelo hidrológico SWAT, se crearon tres modelos de oferta hídrica para tres subperiodos: 1990-1996, 1997-2007 y 2008-2017. En cada subperiodo se ingresó la información meteorológica diaria con los registros diarios de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación de las estaciones meteorológicas Inguincho y Otavalo. La información edáfica del suelo se mantuvo constante y las coberturas de suelo utilizadas fueron de tres años. Para el subperiodo 1990-1996 se utilizó la cobertura de suelo para el año 1996; para el subperiodo 1997-2007 se usó la cobertura de suelo del año 2007, y para el subperiodo 2008-2017 se empleó la cobertura de suelo del año 2017.

La modelación inició con la delimitación de la cuenca hídrica y con la conformación de las unidades de respuesta hidrológica (HRU). Los HRU resultan del cruce de información de tipos de suelo con las diferentes coberturas o uso de suelo (Neitsch *et al.*, 2005). La modelación finalizó con la obtención de los valores mensuales de los caudales, mismos que fueron sometidos a procesos de calibración y validación.

La calibración manual se realizó solo en el parámetro Curva Número (CN2). Para ello se consideraron como referencia los valores estimados por Endara y Arias (2020) en la modelación hídrica de la cuenca media-alta del río Mira. La CN2 es un método empleado en el cálculo de la precipitación efectiva en relación con variables como lluvia acumulada, tipo de cobertura vegetal, uso del suelo y condiciones de humedad que presenta (Hawkins, Ward, Woodward, & Van Mullem, 2008).

Después de la calibración manual se validaron los caudales simulados mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, R^2 y el índice de Nash-Sutcliffe (NSE) (Széles *et al.*, 2020). El coeficiente de determinación o R^2 proporciona un valor que oscila entre 0.0 y 1.0; 1.0 indica un ajuste perfecto y, por tanto, un modelo muy preciso para las previsiones futuras; un valor de 0.0 indicaría que no se logra modelar los datos con la robustez suficiente. Para Moriasi *et al.* (2007), el NSE (Ecuación (1)) representa mejor la bondad de ajuste entre los datos simulados y observados. La interpretación del índice NSE se realizó de acuerdo con los criterios de Demissie, Knapp, Singh y Xie (2007) (Tabla 1):

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (1)$$

Donde:

Q_{simi} = caudal simulado.

Q_i = caudal observado.

Q = caudal medio observado.

Tabla 1. Valores referenciales para la validación de datos por medio del índice de Nash-Sutcliffe.

Rango	Eficiencia de ajuste
< 0.7	No aceptable
0.7-0.8	Aceptable
0.8-0.9	Bueno
> 0.9	Muy bueno

Fuente: Demissie *et al.* (2007).

Una importante limitación para el desarrollo de la presente investigación fue la escasez de datos continuos debido a que la información proporcionada por el INAMHI presentaba vacíos en los datos mensuales de caudales en las estaciones hidrológicas presentes en el área de estudio. Autores como Moriasi *et al.* (2007) señalan que cuando no se dispone de datos mensuales completos, la validación resulta ineficaz. Por ese motivo, para la validación se utilizaron los registros de caudales diarios disponibles de las estaciones hidrológicas Dj Ambi Cariyacu y Blanco Pte. Carretera, para los años 1992, 1994, 1998, 1999, 2008 y 2009 (Figura 3).

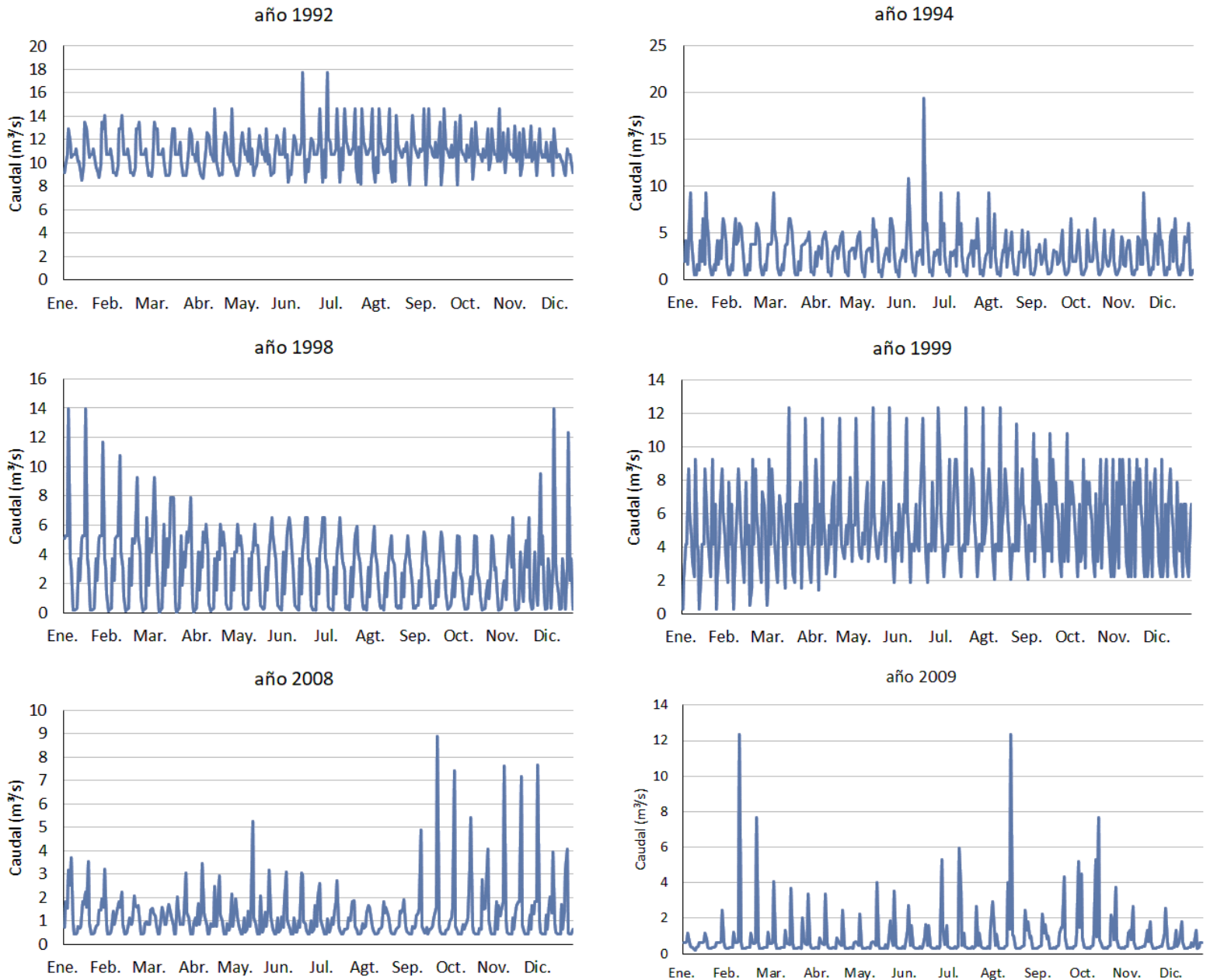


Figura 3. Registros de caudales para la validación del modelo hidrológico disponibles en las estaciones Ambi Dj Cariyacu (años 1992, 1994, 1998, 1999) y Blanco Pte. Carretera (años 2008, 2009).

Finalmente, después de validar el modelo se evaluó la disponibilidad de agua mediante la relación entre el volumen de agua por año y la cantidad de habitantes (Ecuación (2)):

$$I_d = \frac{Q_s}{P} \quad (2)$$

Donde:

I_d = disponibilidad de agua.

Q_s = volumen de agua expresado en m³/año.

P = cantidad de habitantes por año (IDEAM, 2008).

Cálculo de la demanda hídrica

Con base en la información proporcionada por la Senagua mediante comunicación personal, se determinó el aprovechamiento del recurso hídrico durante el periodo 1900-2017 en la subcuenca hidrográfica del río Ambi. Se aplicó la Ecuación (3) para determinar la demanda hídrica que, en síntesis, corresponde a la suma de consumos hídricos y al agua extraída no consumida:

$$D_h = Ch + C_{sa} + C_{si} + C_{ss} + C_e + C_a + A_{enc} \quad (3)$$

Donde:

D_h = demanda hídrica.

Ch = consumo humano.

Csa = consumo sector agrícola.

Csi = consumo sector industrial.

Css = consumo sector de servicios.

Ce = *consumo sector de energía.*

Ca = consumo del sector acuícola.

Aenc = extraída no consumida (IDEAM, 2010).

Además, se determinaron los usos consuntivos y usos no consuntivos, los primeros correspondientes a aquellos usos donde el caudal de agua utilizado no es devuelto hacia su fuente de captación como es el caso de la demanda para el consumo humano, agrícola e industrial. Por otra parte, los usos no consuntivos estuvieron representados por los usos para las centrales hidroeléctricas y molinos hidráulicos presentes en el área de estudio, donde el caudal empleado para estos fines se devuelve hacia su fuente de captación y por tanto no es necesario su inclusión en los cálculos en la demanda total (Cruz & Bielsa, 2001).

Determinación del índice de escasez hídrica (IEH)

La determinación del IEH se realizó mediante la aplicación de la Ecuación (4), que relaciona la oferta hídrica con la demanda del recurso ejercida como consecuencia de las necesidades humanas y su aprovechamiento (IDEAM, 2010). El IEH es un índice que se expresa de forma porcentual y se lo puede interpretar en cinco categorías, que van desde no significativo hasta alto (Tabla 2).

Tabla 2. Categorías de acuerdo con el porcentaje del índice de escasez.

Categoría	IEH (%)	Características
No significativo	< 1	Demanda no significativa en relación con la oferta
Mínimo	1-10	Demanda muy baja con respecto a la oferta
Medio	11-20	Demanda baja con respecto a la oferta
Medio Alto	21-50	Demanda apreciable
Alto	> 50	Demanda alta con respecto a la oferta

Fuente: IDEAM (2010).

El IEH se establece con la siguiente relación:

$$IEH = \frac{D}{O_n} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

IEH = índice de escasez.

D = demanda de agua (m³).

O_n = oferta superficial neta (m³) (IDEAM, 2010).

El cálculo del IEH se realizó aplicado a los tres subperiodos establecidos, a fin de comparar las fluctuaciones multitemporales entre los valores de la oferta y demanda hídrica, para conocer la variación en la presión sobre los recursos hídricos.

Resultados

Oferta hídrica (periodo 1990-2017)

En la subcuenca del río Ambi se obtuvo que el volumen de agua acumulada anual es de 155 917 218 m³/año, con una producción media de 4.94 m³/s. En promedio, durante abril se produce más caudal y en septiembre menos caudal (Tabla 3). De hecho, abril es el mes más lluvioso, con una precipitación promedio de 175.65 mm y septiembre es el tercer mes con menos lluvia, con una precipitación promedio de 64.84 mm.

Tabla 3. Valores de los caudales medios mensuales simulados para los subperiodos de estudio.

Mes	Subperiodo 1990-1996 (m ³ /s)	Subperiodo 1997-2007 (m ³ /s)	Subperiodo 2008-2017 (m ³ /s)	Promedio mensual (m ³ /s)
Enero	4.43	5.40	3.62	4.48
Febrero	4.29	4.97	6.74	5.33
Marzo	6.61	6.93	7.34	6.96
Abril	7.65	8.84	7.58	8.02
Mayo	6.93	8.63	8.24	7.93
Junio	5.89	5.55	4.52	5.32
Julio	4.72	2.56	3.99	3.76
Agosto	4.33	0.87	2.27	2.49
Septiembre	3.07	1.12	1.39	1.86
Octubre	5.18	1.23	3.52	3.31
Noviembre	4.36	4.41	4.42	4.40
Diciembre	4.80	6.09	5.49	5.46
Promedio anual	5.19	4.72	4.93	4.94

Además de esta temporalidad anual, la oferta también presenta variaciones a través del tiempo. Para el subperiodo 1990-1996, el caudal medio mensual simulado fue de 5.19 m³/s, con un volumen acumulado por año de 163 623 323 m³/año; para el subperiodo 1997-2007, el caudal medio mensual fue 4.72 m³/s, con un volumen acumulado por año de 148 752 886 m³/año; y para el subperiodo 2008-2017, el caudal fue de 4.93

m³/s, con un volumen acumulado por año de 155 375 446 m³/año (Tabla 3).

Al validar el modelo se obtuvo un R^2 de 0.85 para los caudales medios observados y simulados para el periodo 1990-2018. Ese mismo valor para los años 1992, 1994, 1998, 1999, 2008 y 2009 fue de 0.73, 0.94, 0.93, 0.85, 0.82 y 0.88, respectivamente. En los mismos años, los valores de los índices NSE fueron 0.71, 0.90, 0.92, 0.73, 0.79 y 0.77, respectivamente (Figura 4).

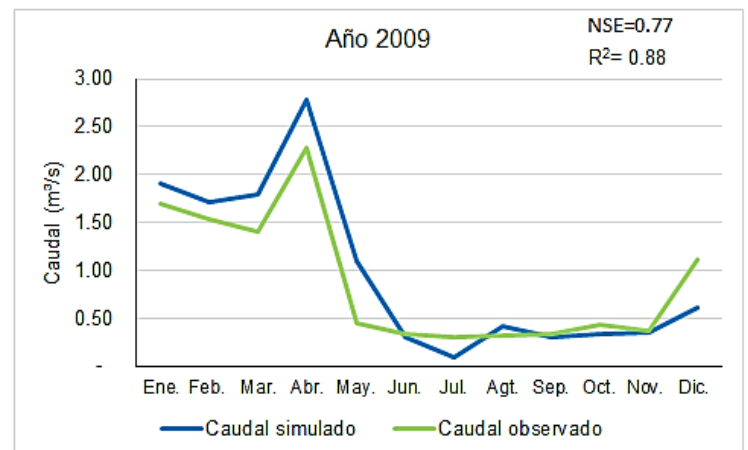
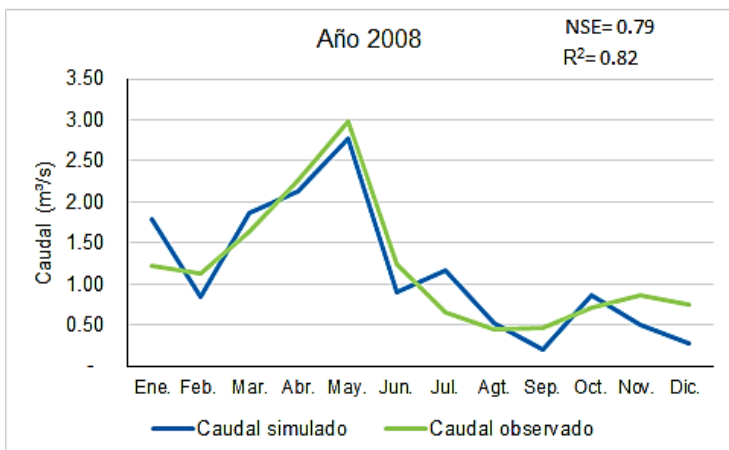
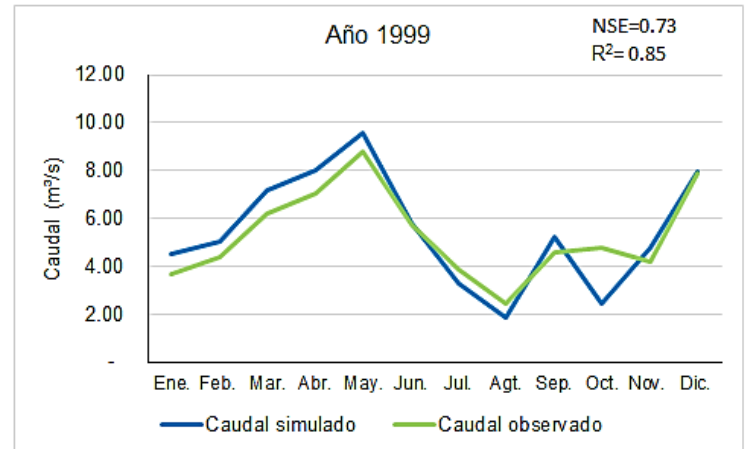
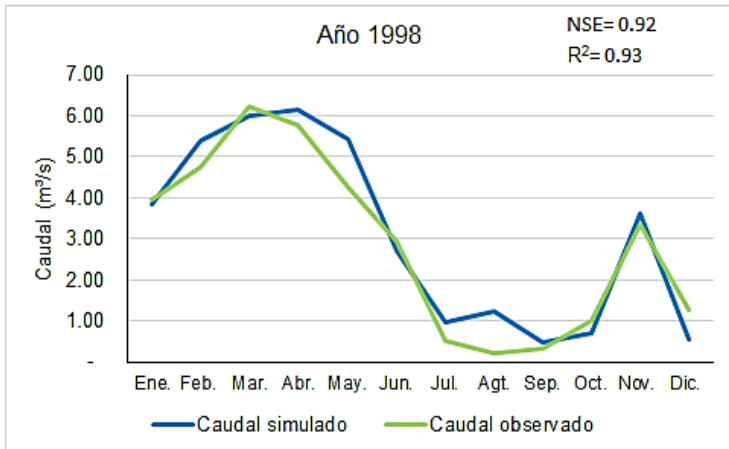
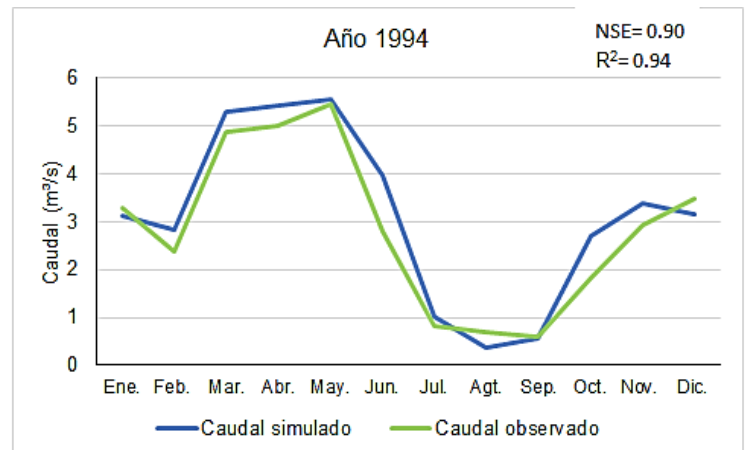
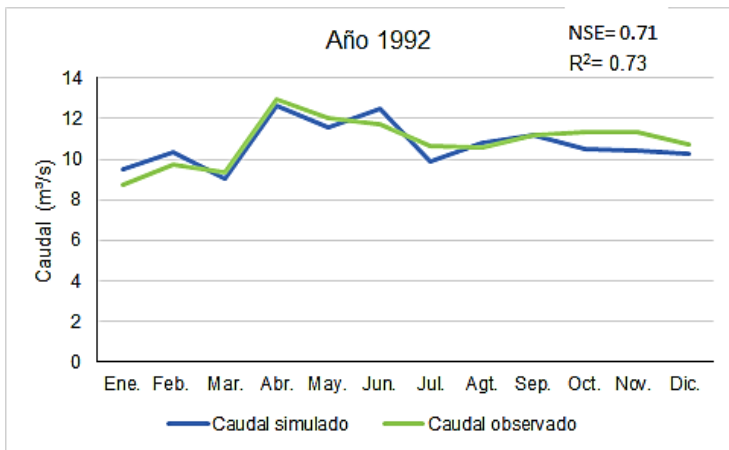


Figura 4. Comparación de caudales para la validación del modelo hidrológico.

Demanda hídrica (periodo 1990-2017)

Durante el periodo de estudio, en la subcuenca del río Ambi se identificaron 775 autorizaciones o concesiones de agua entregadas por la Senagua como autoridad competente del recurso hídrico (actualmente Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica, MATE). En ese periodo, el aprovechamiento del agua para hidroeléctricas, riego y uso doméstico fue mayor respecto a los demás tipos de uso. En general, la demanda anual alcanza un valor medio de 17.37 m³/s (Tabla 4), sin embargo, demandas como fuerza mecánica e hidroeléctricas son usos no consuntivos y no se consideraron dentro de la demanda total.

Tabla 4. Valores de caudal acumulado de la demanda hídrica para los subperiodos de estudio.

Uso	Subperiodo 1990-1996 (m ³ /s)	Subperiodo 1997-2007 (m ³ /s)	Subperiodo 2008-2017 (m ³ /s)
Abrevadero	0.00	0.003	0.004
Fuerza mecánica	0.29	0.29	0.29
Hidroeléctricas	0.14	2.74	8.03
Industria	0.01	0.09	0.09
Piscícola	0.23	0.22	0.22
Riego	2.14	7.11	7.80
Termales	0.00	0.005	0.006
Uso doméstico	0.60	0.85	0.92
Total	3.39	11.32	17.38

Sin incluir los usos no consuntivos, la demanda actual es 9.05 m³/s, con un volumen total por año de 285 400 800 m³/año. Esta demanda no ha sido constante en el tiempo debido a que entre los años 1990 y 2017 existió un incremento de las autorizaciones o concesiones de agua, al pasar de 373 autorizaciones en 1990 a 775 en 2017 (Figura 5). En consecuencia, la demanda que para el subperiodo 1990-1996 fue de 2.97 m³/s, con un volumen anual acumulado de 93 661 920 m³/año, para el subperiodo 1997-2007 aumentó a 8.29 m³/s y a 261 622 656 m³/año en volumen anual acumulado. Para el subperiodo 2008-2017, la demanda continuó incrementándose hasta alcanzar 9.05 m³/s y 285 400 800 m³/año.

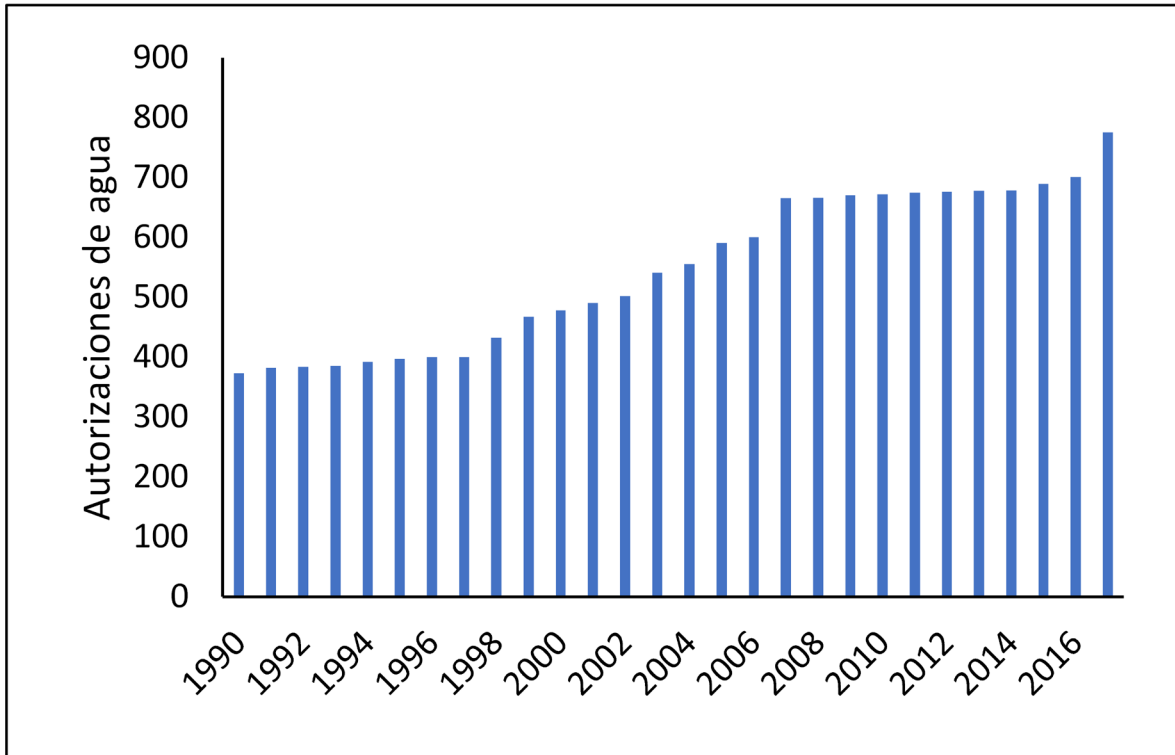


Figura 5. Incremento del número de autorizaciones de agua por parte de la Senagua para el periodo 1990-2017. Fuente: Senagua (2017).

Índice de escasez hídrica

La relación oferta/demanda hídrica en el periodo 1990-2017 cambia a partir del año 1999 cuando la demanda sobrepasa a la oferta (Figura 6). Este fenómeno se produce principalmente por el incremento de la demanda hidroeléctrica y riego (Tabla 4). Sin embargo, sin considerar las demandas no consuntivas, durante el periodo 1990-2017, el índice de escasez hídrica es alto con un valor del 183.19 %.

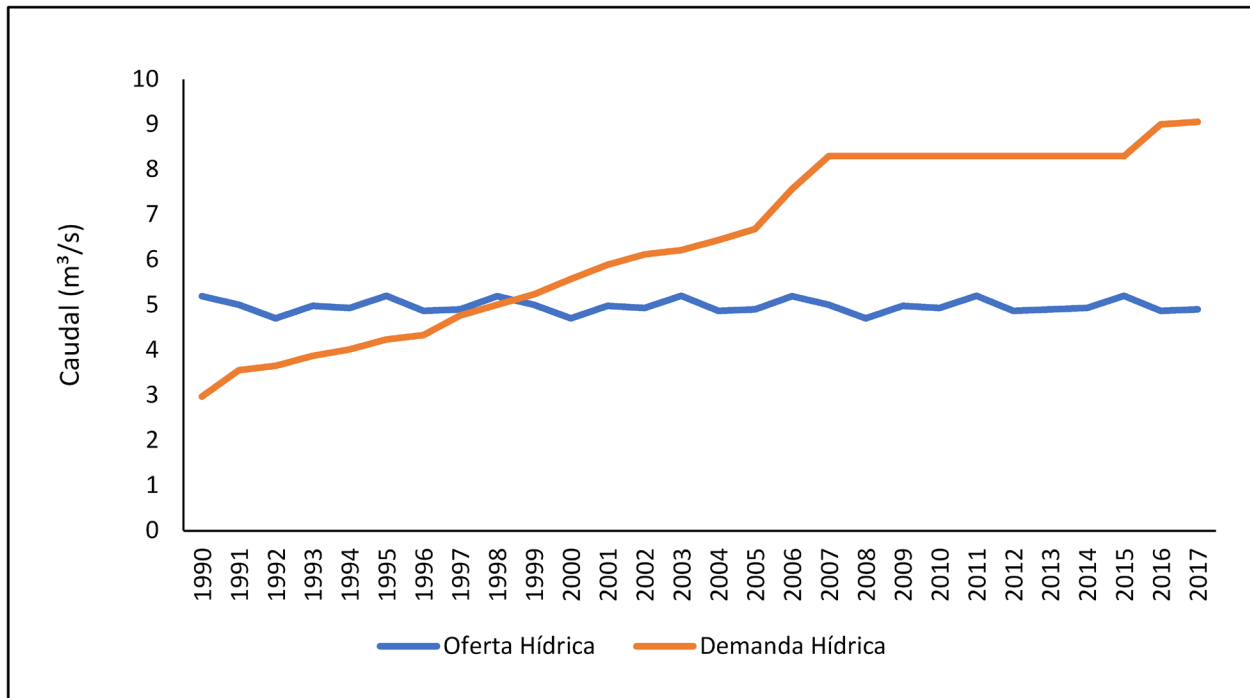


Figura 6. Variación de la oferta y demanda hídrica durante el periodo 1990-2017.

La variación de la oferta y la demanda ha ocasionado que la escasez también varíe en el tiempo. Mientras en el subperiodo 1990-1996 el IEH fue de 57.24 %, en el subperiodo 1997-2007 alcanzó una IEH de 175.76 % y en el subperiodo 2008-2017 el IEH continuó creciendo hasta alcanzar 183.57 %. Esto implica que la demanda hídrica ha crecido más que la oferta, lo que ha ocasionado que entre los años 1990 y 2017 se triplique la presión sobre los recursos hídricos existentes (Figura 6). Por lo tanto, el valor alto de IEH no implica déficit o ausencia de agua, sino que alta presión de la demanda sobre la oferta.

Discusión

Las razones del alza de la demanda se deben a que entre los años 1990 y 2017 se estima que existió un aumento de la población con una tasa de crecimiento de 4.29 % (INEC, 2010). También existió un incremento de espacios urbanos en un 2 %, de espacios agrícolas en un 25 % y una reducción de áreas de pastizales de 0.3 % de acuerdo con el análisis multitemporal de uso de suelo realizado. En general, el incremento demográfico se concentró en las principales ciudades: Otavalo, Atuntaqui y Cotacachi, lo cual confirma que la presencia o ausencia de centros urbanos incide en el incremento o reducción de la demanda hídrica.

Los resultados obtenidos en torno a la escasez hídrica demuestran que es proporcional al alza de la demanda hídrica. Sin embargo, en Ecuador, de acuerdo con la escala de Falkenmark (1999), no existe estrés hídrico. Esto, considerando que la disponibilidad hídrica anual per cápita de sus dos vertientes, Pacífico y Amazonas, sobrepasan el umbral de 1 000 m³/habitante/año, con un valor de 5 018.90 m³/habitante/año y 77 584.23 m³/habitante/año, respectivamente (Campos *et al.*, 2014). En cambio, la subcuenca del río Ambi, que pertenece a la vertiente del Pacífico, presenta estrés hídrico al presentar una oferta hídrica anual per cápita de 551.27 m³/habitante/año, menor a los 1 000 m³/habitante/año.

Esto concuerda con el alto valor en el índice de escasez hídrica obtenido para el periodo 1990-2017 en la presente investigación, lo que se traduce en una fuerte presión de la demanda sobre las fuentes de agua en la zona. De hecho, pasar de un índice de escasez de 57.24 % a un índice de escasez de 183.67 % implica una fuerte presión de demanda

sobre las fuentes de agua en esta zona. Sin embargo, estos valores no se traducen en un déficit permanente de oferta hídrica debido a que existe una fuente de recarga hídrica regular en sus páramos y un abastecimiento hídrico desde los deshielos de los nevados de la cordillera de los Andes (Quiroga, Martínez, & Sigüenza, 2021); esto, a diferencia de las demarcaciones y cuencas hidrográficas del litoral ecuatoriano, donde la disponibilidad de agua se ve reducido principalmente en los periodos de estiaje (Campos *et al.*, 2014).

Los estudios llevados a cabo por Changjian Institute of Survey, Planning, Design and Research (CISPDR) (CISPDR, 2016) en la demarcación hidrográfica del río Mira, ubicado entre las provincias de Carchi e Imbabura, para la evaluación del balance entre la oferta y demanda hídrica muestran que el volumen medio anual de la oferta hídrica es de 7 729 hm³, mientras que el volumen medio anual de la demanda hídrica es de 11 684 hm³, demostrando que el índice de escasez hídrica en la zona es alto, principalmente por el uso consuntivo de agua para las actividades de producción agrícola. A pesar de que los valores de la demanda hídrica superan a la oferta, la producción de agua en la cuenca cubre las necesidades de uso del recurso.

En las principales ciudades del área de estudio (Atuntaqui, Cotacachi y Otavalo) se estiman déficits de agua (CISPDR, 2016); pese a ello, existe una demanda satisfecha en la población. La demanda satisfecha de agua para consumo humano se puede explicar por la densidad poblacional que existe en la subcuenca, y sus requerimientos no superan los recursos e infraestructura hidráulica disponibles; mientras que la demanda satisfecha de agua para la agricultura puede explicarse

por el tipo de agricultura de secano que practica la mayoría de sus habitantes (Gutiérrez, 2014). Esta última condición comprueba que las autorizaciones entregadas para riego generalmente se concentran en pocas manos y es un factor desencadenante de la desigualdad entre la población.

La escasez hídrica en otras regiones, ciudades y localidades de Ecuador también se condiciona por causas propias de la demanda agrícola, industrial o poblacional. En un estudio desarrollado en la cuenca del río Guayas se concluye que el mayor reto para lograr la seguridad hídrica en el sureste y el centro de la cuenca es reducir la escasez del agua originada por alta demanda hídrica de los cultivos (Salmoral, Khatun, Llive, & Madrid, 2018). Por otra parte, en la isla de Santa Cruz de las islas Galápagos, Fernandes-Reyes (2022) determinó que la demanda hídrica del sector turístico incrementa la escasez de agua, producto del despilfarro constante del recurso. En otra región ecuatoriana, en la Amazonía, el impacto industrial puede ser aún más grave debido a las altas demandas hídricas del neoextractivismo minero (Mestanza-Ramón *et al.*, 2022).

Estas experiencias, sumadas a la de la presente investigación, sugieren que la escasez hídrica en el país propende a ser alta, justamente porque el agua es uno de los recursos que, según la Constitución del Ecuador, es de propiedad común. Esto, junto con la ausencia de una política pública que garantice la seguridad hídrica, ocasiona que un recurso con reservas finitas y en deterioro constante esté habitualmente en disputa (Angelakis *et al.*, 2021). La creciente demanda hídrica crea disputas entre la población local, empresas privadas y el gobierno, por el

acceso y uso del recurso para el desarrollo de actividades económicas, como la agricultura, ecoturismo, minería a gran escala y generación hidroeléctrica (Hinojosa, Guerrero, & Arias, 2017).

Los valores generados del IEH en la subcuenca del río Ambi han evidenciado el grado de presión de la demanda sobre la oferta hídrica, tal como han presentado otros estudios en Latinoamérica (Calle, Rivera, Sarmiento, & Moreno, 2008; Costa, Domínguez, Rivera, & Vanegas, 2005; Jaramillo, Molina, & Betancur, 2011). Costa *et al.* (2005) mencionan que a pesar de que la demanda puede superar en su totalidad a la oferta, esto no supone un escenario crítico, más bien es un indicio de manejo deficiente. En definitiva, el IEH es un indicador de presión sobre los recursos hídricos (Betancur *et al.*, 2011; Romero, Patiño, Corona, & Martínez, 2019).

Finalmente, las escalas altas en los índices de escasez es un llamado de atención al manejo actual de los recursos hídricos y convocan a un manejo prospectivo de los recursos hídricos. En esta nueva planificación prospectiva no se puede desvincular la oferta hídrica de la demanda de población y de las restricciones ambientales respecto a su uso, y así se garantizará una demanda satisfecha sin perjuicio del deterioro de las fuentes hídricas (Costa *et al.*, 2005; Sandoval & Günther, 2013).

Conclusiones

Se concluye que en la subcuenca del río Ambi, mientras la oferta ha decrecido al transitar de un caudal medio de 5.19 m³/s en el periodo 1990-1996 a un caudal medio de 4.72 m³/s en el periodo 2008-2017, la demanda total se ha triplicado, al pasar de 2.97 a 9.05 m³/s. En consecuencia, la escasez hídrica también ha aumentado, incluso sin considerar los usos no consuntivos. Según los valores del IEH, la escasez hídrica se mantiene alta e incluso se triplica desde el periodo 1990-1996 hasta el periodo 2007-2018, al pasar de 57.26 a 183.57 %. En general, para el periodo 1990-2017, la escasez alcanza un valor 183.19 % en el IEH. Estos resultados demuestran que desde 1990 hasta 2017 ha aumentado la presión de la demanda sobre los recursos hídricos disponibles. La razón por la que existe una demanda satisfecha frente a estos escenarios se explicaría porque los requerimientos hídricos no son constantes y no superan la infraestructura hidráulica disponible, y la agricultura que se desarrolla principalmente es de tipo seco. Sin embargo, estos resultados evidencian la alta presión ejercida desde la demanda a la disponibilidad de recursos hídricos, y a la vez ponen de manifiesto la necesidad de una adecuada gestión integrada de los recursos hídricos con un enfoque de manejo de cuenca hidrográfica en la subcuenca del río Ambi.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Técnica del Norte por todo el apoyo brindado para el desarrollo de la presente investigación.

Referencias

- Alcamo, D. P. (2013). Global estimates of water winthdrawals and availability under current and future "business-as-usual" conditions. *Hydrological*, 48, 339-348. DOI: 10.1623/hysj.48.3.339.45278
- Angelakis, A. N., Valipour, M., Ahmed, A. T., Tzanakakis, V., Paranychianakis, N. V., Krasilnikoff, J., Drusiani, Mays, L., El Gohary, F., Koutsoyiannis, D., Khan, S., & Del Giacco, L. J. (2021). Water conflicts: From ancient to modern times and in the future. *Sustainability*, 13(8), 4237. DOI: 10.3390/su13084237
- Barrios, A., & Urribarri, L. (2009). Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: cuenca alta del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(1), 11-29. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730384002.pdf>
- Betancur, T., Jaramillo, C., & Molina, F. (2011). Índices de escasez y de calidad del agua para la priorización de cuerpos de agua en los planes de ordenación del recurso hídrico, aplicación en la jurisdicción de Corantioquia. *Revista Ingenierías-Universidad de Medellín*, 10(19), 33-46. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242011000200004

BID, Banco Interamericano de Desarrollo. (2009). *Water: A threatened resource in Latin America and the Caribbean*. Recuperado de <http://www.iadb.org/es/noticias/anuncios/2009-11-17/hoja-informativaagua-un-recurso-en-jaque-en-america-latina-y-el-caribe,5956.html>

Campos, A., Sinichenko, E., & Gritsuk, E. (2014). *Disponibilidad de los recursos hídricos en el Ecuador*. Recuperado de http://www.academia.edu/8618821/Disponibilidad_de_agua_en_Ecuador_2014Climate-

Calle, E., Rivera, H., Sarmiento, R., & Moreno, P. (2008). Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. *Revista de la Academia Colombiana en Ciencias*, 32(123), 195-212. Recuperado de <http://bitly.ws/sQaL>

Calles, J. (2016). *Monitoreo de la calidad y cantidad del agua. El Agua en el Ecuador. Agua Ecuador*. Recuperado de <http://aguaecuador.blogspot.com/2016/07/monitoreo-de-la-calidad-y-cantidad-del.html>

Chamba-Ontaneda, M., Massa, P., & Fries, A. (2019). Presión demográfica sobre el agua: un análisis regional para Ecuador. *Revista Geográfica Venezolana*, 60(2), 360-377. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/3477/347766130008/347766130008.pdf>

- Chiriboga, J. (2015). *Cambio climático, agua y conflicto: disputas sociales, crisis hídrica y oportunidades de adaptación en la Sierra Centro Norte de Ecuador* (tesis de maestría), Universidad Andina Simón Bolívar, Quito. Recuperado de <https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/4738>
- Chuvienco, E. (2002). *Teledetección ambiental*. Barcelona: Ediciones Ariel.
- CISPDR, Changijian Institute of Survey, Planning, Design and Research. (2016). *Plan hidráulico regional de la demarcación hidrográfica Mira. Memoria*. Ecuador: Changijian Institute of Survey, Planning, Design and Research.
- Costa, C., Domínguez, E., Rivera, H., & Vanegas, R. (2005). El índice de escasez de agua, ¿un indicador de crisis o una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Revista Ingeniería e Hidrología*, 18-22. DOI: 10.16924/revinge.22.12
- Cruz, J., & Bielsa, J. (2001). Sobre la eficiencia, el uso sostenible del recurso del agua y la gestión del territorio. *Revista de Estudios sobre Despoblación y Desarrollo Rural*, 1, 85-112. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/296/29600103.pdf>
- Demissie, M., Knapp, V., Singh, J., & Xie, H. (2007). Coupling of hydrologic and hydraulic models for the Illinois River Basin. *Journal of Hydrology*, 10, 34-40. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.08.004

- Endara, R., & Arias, D. (2020). Efectos de la deforestación en la producción de caudales en la cuenca media alta del río Mira para el período 2000-2014. En: Aguirre, P. (comp.). *Estrategias de adaptación al cambio climático: el caso de la cuenca del río Mira* (pp. 21-43). Göttingen, Alemania: Cuvillier. Recuperado de <https://sustentabilidadyambiente.files.wordpress.com/2020/06/libro-riego.pdf>
- Espinoza, M., & Zelaya, C. (2022). Aplicación del modelo hidrológico SWAT en unidades hidrográficas de Nicaragua: simulación del escurrimiento superficial. *La Calera*, 22(38), 16-28. DOI: 10.5377/calera.v22i38.14116
- Falkenmark, M. (1999). Forward to the future: A conceptual framework for water dependence. *Ambio*, 356-361. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/4314909>
- Fernandes-Reyes, M. (2022). Analysis of water supply and demand management strategies in overcoming water scarcity in Santa Cruz. In: *Water, Food and Human Health in the Galapagos, Ecuador. Social and Ecological Interactions in the Galapagos Islands*. DOI: 10.1007/978-3-030-92411-9_2
- Gillig, M., McCarl, B., & Boadu, F. (2011). An economic, hydrologic, and environmental assessment of water management alternative plans for the South-Central Texas Region. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 33, 59-78. DOI: 10.1017/S1074070800020782
- Gutiérrez, A. (2014). Formal and informal irrigation in the Andean countries. An overview. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 11(74), 75-99. DOI: 10.11144/Javeriana.CRD11-74.fiac

- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E., & Van Mullem, J. A. (eds.). (November, 2008). *Curve number hydrology: State of the practice*. American Society of Civil Engineers. Recuperado de <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/55128/1/410.pdf>
- Hinojosa, L., Guerrero, W., & Arias, P. (2017). Exploring water security and water demand determinants in rural areas. The case of canton Cotacachi in Ecuador. *Water Resources and Rural Development*, 10, 22-32. DOI: 10.1016/j.wrr.2018.09.001
- Huang, Z., Yuan, X., & Liu, X. (2021). The key drivers for the changes in global water scarcity: Water withdrawal versus water availability. *Journal of Hydrology*, 601, 126658. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126658
- INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Censo. Quito, Ecuador*. Recuperado de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2008). *Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Estudio nacional del agua, Balance hídrico y relaciones de demanda-oferta de agua en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

- Jaramillo, C., Molina, F., & Betancur, T. (2011). Índices de escasez y de calidad del agua para la priorización de cuerpos de agua en los planes de ordenación del recurso hídrico. Aplicación en la jurisdicción de Corantioquia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(19), 33-45. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242011000200004
- Küffner, U. (2005). El proceso de formulación de la política hídrica en Ecuador. En: Ballesteros, M., Brown, E., Jouravlev, A., Küffner, U., & Zegarra, E. (eds). *Administración del agua en América Latina: situación actual y perspectivas* (pp. 33-47). Santiago de Chile, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Lindi, S. (2014). Prediction of runoff and sediment yield using AnnAGNPS Model: Case of Erer-Guda Catchment, East Hararghe, Ethiopia. *ARPN Journal of Science and Technology*, 4(10), 575-595.
- MAG, Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2021). *Geoportal de SIGTIERRAS*. Recuperado de <http://geoportal.agricultura.gob.ec/index.php/visor-geo>
- Martínez-Austria, P. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(5), 165-180. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000500011
- Mejía, A. (2014). Water scarcity in Latin America and the Caribbean: Myths and reality. En: Mejía, A. (comp.). *Water for the Americas* (pp. 56-76). Londres, RU: Routledge, Recuperado de <http://bitly.ws/sQe5>

- Mestanza-Ramón, C., Cuenca, J., D’Orio, G., Flores, J., Segovia, S., Bonilla, A., & Straface, S. (2022). Gold mining in the Amazon Region of Ecuador: History and a review of its socio-environmental impacts. *Land*, 11(2), 221. DOI: 10.3390/land11020221
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(39), 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153
- Neitsch, S., Arnold, J., & Williams, J. (2005). *Herramienta de evaluación de suelo y agua. Documentación Teórica*. Recuperado de <https://swat.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>
- Quiroga, L. M. S., Martínez, M. M., & Sigüenza, P. F. (2021). Simulación matemática de dos subcuencas del río Ambi y Tahuando, ubicadas en Imbabura-Ecuador, usando el modelo qswat para la determinación de parámetros hidrográficos. *Dominio de las Ciencias*, 7(4), 580-589.
- Romero, P., Patiño, C., Corona, B., & Martínez, P. (2019). Índice de escasez hídrica: ¿un indicador de la disponibilidad o una herramienta para la gestión del agua? *Entorno UDLAP*, 9, 18-23.
- Salmoral, G., Khatun, K., Llive, F., & Madrid, C. (2018). Agricultural development in Ecuador: A compromise between water and food security? *Journal of Cleaner Production*, 202. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.308

- Sandoval, A., & Günther, M. (2013). La gestión comunitaria del agua en México y Ecuador: otros acercamientos a la sustentabilidad. *Revista Ra Ximhai*, 9(2), 165-179. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7870297>
- Senagua, Secretaría Nacional del Agua. (2011). *Calidad del agua en el Ecuador*. Secretaría Nacional del Agua. Quito, Ecuador: Secretaría Nacional del Agua.
- Senagua, Secretaría Nacional del Agua. (2017). *Boletín de la Estadística Sectorial del Agua 2017*. Quito, Ecuador: Secretaría Nacional del Agua.
- Son, T., Le Huong, H., Loc, N., & Tran, P. (2022). Application of SWAT model to assess land use change and climate variability impacts on hydrology of Nam Rom Catchment in Northwestern Vietnam. *Environment Dev-Sustain*, 24, 3091-3109. DOI: 10.1007/s10668-021-01295-2
- Széles, B., Parajka, J., Hogan, P., Silasari, R., Pavlin, L., Strauss, P., & Blöschl, G. (2020). The added value of different data types for calibrating and testing a hydrologic model in a small catchment. *Water Resources Research*, 56(10), e2019WR026153. DOI: 10.1029/2019WR026153
- Terneus, C., & Viteri, O. (2021). Analysis of biofuel production in Ecuador from the perspective of the water-food-energy nexus. *Energy Policy*, 157, 112496. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112496

- Thober, S., Samaniego, L., Müller, S., Shrestha, P., Kelbling, M., Rakovec, O., Boeing, F., Marx, A., Kumar, R., & Attinger, S. (2022). Hyperresolution global operational hydrological modelling and forecasting: Enhancing reproducibility, skill and workflows setup. *EGU General Assembly*, 23-27. DOI: 10.5194/egusphere-egu22-3529
- Torres, E., Fernández, D., Oropeza, J., & Mejía, E. (2004). Calibration of the hydrologic model SWAT in the watershed "El Tejocote", Atlacomulco, State of Mexico. *Terra Latinoamericana*, 22, 437-444.
- Tromben, C. (2011). *América Latina y el agua: la crisis de la liquidez*. Recuperado de <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/america-latina-y-el-agua-la-crisis-de-la-liquidez>
- Weemaels, N. (2009). *Agua un derecho humano fundamental: uso y aprovechamiento del agua: situación nacional y propuesta*. Quito, Ecuador: Abya-Yala.
- Zapatta, A., & Gasselin, P. (2005). *El riego en el Ecuador: problemática, debate y políticas*. Quito, Ecuador. Recuperado de <https://hal.inrae.fr/hal-02833506/document>