

## PROPUESTA DE UN ÍNDICE DE AMENAZAS ECOHIDROLÓGICAS PARA LAS UNIDADES HIDROGRÁFICAS DEL PERÚ, APLICADO A LA CUENCA DEL RÍO PISCO

### PROPOSAL FOR AN INDEX OF ECOHYDROLOGICAL THREATS FOR THE HYDROGRAPHIC UNITS OF PERU, APPLIED TO THE PISCO RIVER BASIN

Erick Garcia Gonzales<sup>1,2</sup> y Jorge Tam Málaga<sup>1,3</sup>

#### Resumen

En esta investigación se propone un “Índice de Amenazas Ecohidrológicas - IAEH”, que consiste en la integración de nueve indicadores, agrupados en dos temas: hidrológicos y bióticos, seleccionados considerando dos criterios: i) la relevancia de los impactos negativos que pueden generar en los ecosistemas acuáticos de la cuenca y ii) la disponibilidad de información libre que existe para su implementación a nivel nacional. El cálculo de los nueve indicadores mencionados se realizó dentro de un Sistema de Información Geografía (SIG) y se estandarizan estadísticamente a fin de obtener un valor relativo del índice para cada subcuenca analizada. El IAEH se aplicó en la cuenca del río Pisco, en Perú, y se determinó que de las nueve subcuencas evaluadas, una subcuenca se clasifica en el rango de moderada amenaza, tres subcuencas en baja a moderada amenaza y cinco subcuencas en amenaza baja. La información generada es de suma importancia, ya que permite jerarquizar el nivel de amenazas relativas hacia los ecosistemas acuáticos de cada subcuenca (ríos, lagunas y humedales) y, en ese sentido, es una alternativa para llevar a cabo una evaluación rápida, y de baja demanda de recursos, que puede aplicarse en otras cuencas del país, particularmente en cuencas donde la mencionada información es limitada, ofreciendo una herramienta para la priorización de políticas relacionadas con la conservación y protección de los recursos hídricos y los ecosistemas acuáticos en aspectos como la determinación de caudales ecológicos, fajas marginales, zonas de protección y cabeceras de cuencas.

**Palabras clave:** índice, amenazas, ecohidrología, Pisco, subcuenca, ecosistemas acuáticos, GIRH, SIG.

#### Abstract

In this research, an "Ecohydrological Threat Index - IAEH" is proposed, which consists of the integration of nine indicators, grouped into two themes: hydrological and biotic, selected considering two criteria: i) the relevance of the negative impacts that they can generate in the aquatic ecosystems of the basin and ii) the availability of free data that exists for its implementation at the national level. The calculation of the nine aforementioned indicators was carried out within a Geographic Information System (GIS) and they are statistically standardized in order to obtain a relative value of the index for each sub-basin analyzed. The IAEH was applied in the Pisco River basin, Peru, and it was determined that from the nine sub-basins evaluated, one sub-basin is classified in the range of moderate threat, three sub-basins in low to moderate threat and five sub-basins in low threat. The information generated is extremely important, since it allows to rank the level of relative threats to the aquatic ecosystems of each sub-basin (rivers, lakes and wetlands) to be ranked in a hierarchy, and in this sense, it is an alternative to carry out a rapid and low-level evaluation. demand for resources, which can be applied in other basins of the country, particularly in basins where the aforementioned information is limited, offering a tool for the prioritization of policies related to the conservation and protection of water resources and aquatic ecosystems, in aspects such as the determination of ecological flows, marginal strips, water resources protection zones and headwaters basins.

**Key words:** index, threats, ecohydrology, Pisco, sub-basin, aquatic ecosystems, IWRM, GIS.

#### Introducción

El nuevo marco normativo sobre caudales ecológicos en el Perú señala que la Autoridad Nacional del Agua (ANA), a través de sus órganos desconcentrados denominados Autoridades Administrativas del Agua (AAA), determina de oficio los caudales ecológicos con fines de planificación de los recursos hídricos en los ámbitos de cuencas para la

protección y conservación del ecosistema acuático con base en objetivos específicos que se desean alcanzar (ANA, 2019); sin embargo, la ANA aún no cuenta con una metodología para establecer dichos objetivos y que sea de alcance nacional.

En ese sentido, para una estimación del caudal ecológico, en un nivel de planificación hídrica nacional, es necesario primero conocer, de alguna

manera general, el presente estado ecohidrológico de los ecosistemas de la cuenca (ríos, lagos, laguna y humedales) a consecuencia de las intervenciones humanas; de tal manera que esta información sea el punto de partida para la clasificación y asignación de los denominados objetivos específicos que se desean alcanzar en una cuenca o subcuenca con el cálculo de los caudales ecológicos conforme a la normativa vigente de la ANA (2019).

Respecto al estado del arte de las metodologías que se usan para determinar caudales ecológicos con fines de planificación hídrica, actualmente destacan a nivel internacional aquellas metodologías propuestas desde inicio de los años 2000, también conocidas como metodologías «Desktop» (Hughes & Munster, 2000; Hughes & Hannart, 2003; Smakhtin & Anputhas, 2006; Smakhtin *et al.*, 2007; King *et al.*, 2008; Poff *et al.*, 2017). Estas metodologías también son conocidas como «Desktop Reserve Model-DRM» o «Reservas ecológicas para ríos», ya que es el término usado para caudales ecológicos en Sudáfrica donde han sido desarrolladas (Smakhtin & Anputhas, 2006). De acuerdo con Smakhtin & Anputhas (2006), la cuantificación de los caudales ecológicos, bajo este tipo modelo, se debe establecer para una condición predeterminada que considera el desvío de su condición natural. Esta condición se determina por medio de un sofisticado sistema de puntuación basado en un número de indicadores establecidos que se relacionan con la importancia y sensibilidad de los ecosistemas evaluados (Smakhtin & Anputhas, 2006; Vörösmarty *et al.*, 2010).

Vörösmarty *et al.* (2010) propuso el cálculo de los índices de «Incidencia de Amenazas a la Seguridad Hídrica» (HWS, por sus siglas en inglés) e «Incidencia de Amenaza a la Biodiversidad» (BD, por sus siglas en inglés), cuyo marco ofrece una herramienta para la priorización de políticas y la gestión de respuestas ante crisis, y resalta la necesidad de poner un límite a las fuentes de amenazas, en lugar de aplicar remediaciones costosas, con la finalidad de asegurar la seguridad hídrica global para los seres humanos y la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos continentales. Cabe destacar una adaptación de los citados índices, hechos por Sood *et al.* (2017), que las Naciones Unidas ha considerado como una opción para la implementación de las Metas 6.4 y 6.6 del Objetivo de Desarrollo Sostenible sobre Agua y Saneamiento (ODS 6), relacionadas con el caudal ecológico y la conservación de los ecosistemas relacionados con el agua (Sood *et al.*, 2017; Dickens *et al.*, 2019).

En la presente investigación tiene como objetivo proponer un «Índice de Amenazas Ecohidrológicas - IAEH» para las unidades hidrográficas del Perú, el cual se basa en la propuesta de Vörösmarty *et al.* (2010) considerando tres temas y nueve indicadores en función de dos criterios: i) la relevancia de los impactos negativos que pueden generar en los ecosistemas

acuáticos y ii) la disponibilidad de información libre que existe para su implementación a nivel nacional, de manera que se puedan utilizar sin mayores inconvenientes en todas las cuencas del país. Considerando estos criterios el IAEH se implementó en la cuenca del río Pisco, Perú, ubicada en la vertiente hidrográfica del Pacífico, usando como apoyo herramientas estadísticas y geoespaciales SIG para estimar el nivel relativo de amenazas sobre los ecosistemas acuáticos, a escala de subcuenca, a fin de contribuir con información para la toma de decisiones en los diferentes niveles de gobierno (nacional, regional y local) que sirva para priorizar políticas, estrategias y planes para su conservación, recuperación y protección.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El área de estudio fue la cuenca del río Pisco, Perú, conformada por nueve unidades hidrográficas, ubicada en la vertiente del Pacífico entre los 13° 47' 38.4" y 12° 52' 37.2" de latitud sur y los 76° 13' 4.8" y 75° 2' 31.2" de longitud oeste. Tiene una extensión de 4 208.7 km<sup>2</sup> y de acuerdo a la delimitación oficial de Unidades Hidrográficas (UH) para el Perú usando el método de Pfafstetter, es de nivel 5 con código 13752 y está conformada en su siguiente nivel de delimitación (nivel 6) por nueve UH de Pfafstetter (ANA, 2012) (Figura 1). La administración de los recursos hídricos está a cargo de la Administración Local del Agua (ALA) Pisco, que pertenece a la Autoridad Administrativa del Agua (AAA) Chaparra-Chincha. Políticamente, la cuenca de río Pisco abarca parte de los departamentos de Huancavelica e Ica.

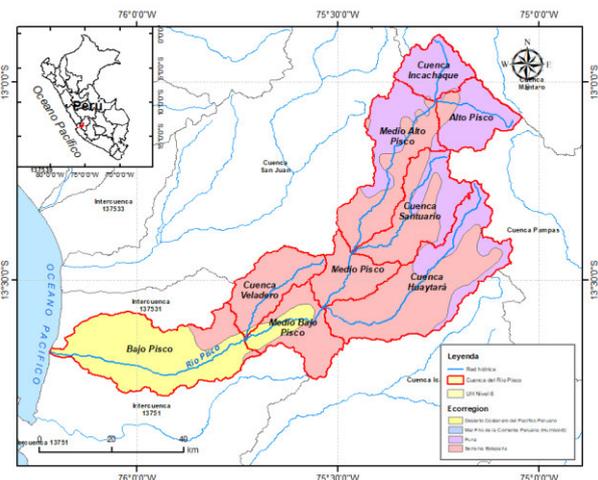


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.

La cuenca del río Pisco presenta tres ecorregiones (Figura 1): i) la ecorregión del desierto costanero del pacífico, cuyo límite altitudinal promedio es los 1 000 msnm y con precipitaciones promedio anuales inferiores a los 150 mm y temperaturas medias anuales de 18 a 19 °C.; ii) la ecorregión serranía esteparia, entre

los 1 000 y 3 800 msnm con precipitaciones que están por debajo de los 500 mm/año y temperaturas superiores a los 20 °C; y encima de los 3 000 msnm, con precipitaciones alrededor de los 700 mm anuales y temperatura media anual de 12 °C, y iii) la ecorregión puna por encima de los 3 800 msnm, con precipitaciones promedio de 700 mm anuales y temperaturas promedio anuales de 6 °C.

#### Información utilizada

Se usó la información oficial disponible de manera libre por las entidades nacionales que la generan, que incluyeron bases de datos geoespaciales de variables hidrológicas, ecológicas y sociales provenientes de distintas fuentes oficiales, disponibles en línea, cuyo detalle se muestra en la Tabla 1. La información de tipo vectorial se encontraba en formato “shapefile” del programa ArcGIS y se proyectó al sistema de coordenadas geográficas, Datum WGS 84. Para las entidades de tipo línea, polígono y punto se realizó una operación de recorte (Clip) con el límite de la cuenca del río Pisco, con la finalidad de reducir la información al área de estudio. La información alfanumérica se especializó en función de sus coordenadas o ubicación dentro de cada unidad hidrográfica.

**Tabla 1.** Información geoespacial y alfanumérica usada para la construcción de la metodología CMEH-CDC.

Tipo	Información geoespacial	Fuente
Punto	Puentes	MTC (2023)
	Embalses	ANA (s.f.)
	Bocatomas	ANA (s.f.)
	Vertimiento de aguas residuales	ANA (s.f.)
	Punto de salida de caudales	ANA (s.f.)
	Número de habitantes por centro poblados	INEI (2017)
Línea	Red hidrográfica	MINEDU (2020)
	Canales	ANA (s.f.)
	Red vial	MTC (2023)
Polígono	Unidades hidrográficas	ANA (s.f.)
	Áreas agrícolas	MIDAGRI (s.f.)
	Áreas urbanas	MINEDU (2020)
	Humedales	ANA (s.f.)
	Superficies impermeables	ANA (s.f.)
	Áreas acuícolas	PRODUCE (s.f.)
Alfanumérico	Lagunas	ANA (s.f.)
	Caudales de ríos	ANA (s.f.)
	Usos consuntivos	ANA (s.f.)
	Capacidad de embalses	ANA (s.f.)
	Número de especies no-nativas	Ortega <i>et al.</i> (2012)
	Caudal de vertimiento de aguas residuales	ANA (s.f.)

Cabe señalar que, en la construcción de los indicadores hidrológicos, se usó la información de caudales medios mensuales generados con el modelo SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) construido para la cuenca del río Pisco (ANA, 2022).

#### Métodos

El cálculo del IAEH se basa en la metodología propuesta por Vörösmarty *et al.* (2010) para el cálculo de los índices de «Incidencia de Amenazas a la Seguridad Hídrica» (HWS, por sus siglas en inglés) e «Incidencia de Amenaza a la Biodiversidad» (BD, por sus siglas en inglés), y de las modificaciones hechas por Sood *et al.* (2017). En ese sentido, de los cuatro temas y 23 indicadores propuestos por Vörösmarty *et al.* (2010), la presente metodología considera tres temas y nueve indicadores (Tabla 2), que se seleccionaron y reagruparon en función de su relevancia para el cálculo de caudales ecológicos y con base en la disponibilidad de información que existe para su implementación a nivel nacional, de manera que se puedan utilizar sin mayores inconvenientes en todas las cuencas del país. A continuación, se describen el detalle los temas y sus respectivos indicadores.

**Tabla 2.** Temas e indicadores para el cálculo del Índice de Amenazas Ecohidrológicas (IAEH).

N°	Tema Indicador	IAEH
		Peso Relativo
<b>I</b>	<b>Recursos hídricos-Cantidad</b>	<b>0.25</b>
1	Fragmentación de ríos	0.3
2	Índice de estrés hídrico por uso consuntivo	0.04
3	Índice de estrés hídrico humano	0.07
4	Índice de estrés hídrico agrícola	0.12
5	Interrupción del flujo	0.25
6	Desconectividad de humedales	0.22
<b>II</b>	<b>Recursos hídricos-Calidad</b>	<b>0.25</b>
7	Contaminación por aguas residuales	1
<b>III</b>	<b>Factores bióticos</b>	<b>0.5</b>
8	Número de especies no-nativas	0.53
9	Presión acuícola	0.47

#### TEMA I: RECURSO HÍDRICOS-CANTIDAD

Este tema se refiere a las intervenciones humanas que ocurren en la cuenca con fines de gestionar y manejar los aspectos relacionados con la cantidad del agua para los distintos usos, así como la conservación de sus bienes asociados y ecosistemas relacionados con el agua. Estas intervenciones pueden ocasionar un impacto negativo en la integridad ecológica de los ríos, lagos, lagunas y humedales, debido a la modificación o alteración de su régimen hídrico. Este tema comprende seis indicadores: 1) fragmentación de ríos, 2) índice de estrés hídrico por usos consuntivos, 3) índice de estrés hídrico humano, 4) índice de estrés hídrico agrícola, 5) interrupción del flujo y 6) desconectividad de humedales; cuya descripción y método de cálculo se detalla a continuación:

#### INDICADOR 1: FRAGMENTACIÓN DE RÍOS

La construcción de embalses o el represamiento de ríos y lagunas, si bien es una medida necesaria para el almacenamiento y regulación del agua con el fin de destinarlo a los diferentes usos, sea poblacional o productivo; también tiene un impacto negativo en la

salud de estos ecosistemas, ya que modifican o alteran su régimen hídrico natural, la conectividad hidrológica, así como el tiempo de residencia del agua. Además de los embalses, es importante considerar en la fragmentación de los ríos los impactos en la conectividad hidrológica que causan otras obras de infraestructura como bocatomas, puentes y alcantarillas, lo cual afecta directamente el flujo de especies, así como el transporte de materia orgánica, sedimentos, nutrientes y energía, tanto en espacio como en tiempo (Pringle, 2003). La información de puentes, embalses y bocatomas se tomó directamente de la base de datos recopilada del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC, 2023) y ANA (s.f.). Con respecto a la información de alcantarillas se generó mediante un análisis de intersección de la capa vectorial de vías y la red hidrográfica. La delimitación de unidades hidrográficas usada fue la base de datos oficial de la ANA generada con el método Pfafstetter (ANA, 2012) y descargada de ANA (s.f.). La red hidrográfica se tomó de la carta nacional disponible en línea por el Ministerio de Educación (MINEDU, 2020)

**Información requerida:** Se requieren las siguientes capas de información: i) ubicación espacial de infraestructura como puentes, embalses, bocatomas, alcantarilla, ii) delimitación de unidades hidrográficas y iii) red hidrográfica.

**Cálculo del indicador:** Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo la cantidad total de embalses, puentes, bocatomas entre la longitud de la red hidrográfica. Se expresa en número de infraestructuras por km de red hidrográfica (#/km).

#### INDICADOR 2: ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO POR USOS CONSUNTIVOS

Según Vörösmarty *et al.* (2010), el uso consuntivo del agua en la agricultura, industria y otros usos consuntivos, puede poner en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico para los seres humanos y los ecosistemas, cuando el consumo es mayor con relación al caudal de la cuenca. La información de usos consuntivos se tomó directamente de la base de datos de derechos de agua de la ANA (s.f.) y se sumó por unidades hidrográficas, las caudales se tomaron del estudio de la ANA (2022) a la salida de cada unidad hidrográfica.

**Información requerida:** Se requieren las siguientes capas de información: i) caudales medios anuales naturalizados, ii) usos consuntivos agrícola e industriales y iii) delimitación de unidades hidrográficas.

**Cálculo del indicador:** Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo la cantidad total de usos de agua por usos consuntivos entre los caudales medios anuales naturalizados. Se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades.

#### INDICADOR 3: ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO HUMANO

El concepto de índice de estrés hídrico humano fue introducido por Falkenmark & Widstrand (1992) y está

basado en el mínimo nivel de agua per cápita necesario para mantener una adecuada calidad de vida. Este índice resume la idea de que, con menos agua disponible por persona, más alto es el nivel de amenaza a los recursos hídricos, es decir, captura las consecuencias negativas para la oferta hídrica de la alta densidad de población humana y la baja disponibilidad natural de agua. La información de cantidad de población se agregó para cada unidad hidrográfica con base en la información recopilada del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2017).

**Información requerida:** Se requieren las siguientes capas de información: i) caudales medios anuales naturalizados, ii) cantidad de población y iii) delimitación de unidades hidrográficas.

**Cálculo del indicador:** Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo el caudal medio anual naturalizado entre la cantidad total de población. Se expresa  $m^3/persona$ .

#### INDICADOR 4: ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO AGRÍCOLA

Según Vörösmarty *et al.* (2010), el índice de estrés hídrico agrícola es análogo al índice de estrés hídrico humano y estima la carga que la actividad agrícola impone sobre los recursos hídricos renovables, por consiguiente, refleja la opción conjunta de una porción del ciclo hidrológico, una a través de la irrigación y otra implícitamente mediante la precipitación y la disponibilidad de agua en el suelo. A menor disponibilidad de agua por área agrícola, mayor es la competición potencial por el uso del agua entre la agricultura (que es el mayor consumidor de agua) y los demás usos. Las áreas agrícolas se tomaron del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI, s.f.).

**Información requerida:** Se requieren las siguientes capas de información: i) caudales medios anuales naturalizados, ii) áreas agrícolas y iii) delimitación de unidades hidrográficas.

**Cálculo del indicador:** Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo el caudal medio anual naturalizado entre la extensión del área agrícola. Se expresa  $m^3/km^2$ .

#### INDICADOR 5: INTERRUPCIÓN DEL FLUJO

De acuerdo con Vörösmarty *et al.* (2010), los cambios en el tiempo, frecuencia, duración y magnitud de eventos claves del flujo, tienen un impacto significativo en los ecosistemas de agua dulce. Por ejemplo, el aumento del tiempo de residencia es a menudo asociado con mayores cambios en el régimen térmico del río. De hecho, las guías para el cálculo de caudales ecológicos se enfocan en imitar el régimen natural del flujo, tanto como sea posible, para minimizar los impactos en la biodiversidad y los procesos ecológicos.

**Información requerida:** Se requieren las siguientes capas de información: i) caudales medios anuales naturalizados, ii) ubicación de embalses, iii) ubicación de puntos de salida de las subcuencas, iv)

capacidad de embalses, v) delimitación de unidades hidrográficas y vi) red hidrográfica.

**Cálculo del indicador:** Este indicador se calcula para cada subcuenca, a través de una estimación del cambio del tiempo de residencia del agua en la red de hídrica, dividiendo la capacidad del embalse ubicado aguas arriba del punto de interés entre la descarga media anual en el punto de salida de la red de drenaje, lo cual se asigna a cada segmento de la red hídrica. Los resultados se expresan en años de incremento en el tiempo de residencia. Un mayor detalle de la metodología de cálculo del indicador se describe en Vörösmarty *et al.* (1997).

#### INDICADOR 6: DESCONECTIVIDAD DE HUMEDALES

Según Vörösmarty *et al.* (2010), la desconectividad de humedales se define como la proporción de humedales ocupados por áreas agrícolas o urbanas, bajo la asunción de que la ocupación humana perjudica las interconexiones físicas y biológicas entre ríos y sus llanuras de inundación. Muchos casos de desconectividad se evidencian a través del drenaje y destrucción de humedales, a fin destinar dichas áreas para otros usos. Se debe señalar también que esta desconexión entre el río y su llanura de inundación se ha producido por la canalización y la construcción de diques con fines de proteger áreas urbanas y agrícolas. La extensión de superficies impermeables se generó integrando la información de vías, canales y áreas urbanas.

**Información requerida:** Se requieren las siguientes capas de información: i) extensión de humedales, ii) extensión de áreas agrícolas, iii) extensión de superficies impermeables, y iv) delimitación de unidades hidrográficas.

**Cálculo del indicador:** Este indicador se calcula para cada subcuenca, estimando la fracción de humedales ocupada por áreas agrícolas y superficies impermeables. Se genera un *buffer* de 90 metros con un enfoque precautorio para la protección de lagunas y humedales, y se extrae dicha extensión, luego, se calcula la proporción de áreas desconectadas dividiéndola respecto al total. Se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades.

#### TEMA II: RECURSO HÍDRICOS-CALIDAD

Este tema se refiere a los distintos tipos de contaminantes que se generan producto de las intervenciones humanas en la cuenca y que a su vez ocasionan un impacto negativo en la salud de los ríos, a través de la alteración de la calidad del agua. Este tema comprende un solo indicador: contaminación por vertimiento de agua residual. Este indicador se seleccionó con base en la información disponible actualmente. Sin embargo, en la medida que se pueda contar con mayor información sobre la calidad del agua, se podrán incluir otros indicadores como los usados en Vörösmarty *et al.* (2010).

#### INDICADOR 7: CONTAMINACIÓN POR VERTIMIENTOS DE AGUA RESIDUAL

Las aguas residuales son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades antropogénicas y que, por sus características de calidad requieren, de un tratamiento previo para su disposición final o reúso. Estas aguas pueden contener elementos como el fósforo, nitrógeno, materia orgánica, entre otros. Al considerar este indicador, de manera general se está considerando el impacto de todas aquellas sustancias que deterioran la calidad del agua de los ríos, hacia donde son vertidas principalmente y en muchos casos sin tratamiento previo. La ubicación y el caudal vertido por las fuentes contaminantes se tomó de la información de vertimiento de aguas residuales de la ANA (s.f.).

**Información requerida:** Se requieren las siguientes capas de información: i) ubicación de fuentes contaminantes ii) caudal que se vierte hacia los cuerpos de agua, iii) caudal medio anual naturalizado, y iv) delimitación de unidades hidrográficas.

**Cálculo del indicador:** Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo el volumen medio anual de las descargas de agua residual entre el volumen medio anual de la subcuenca. Se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades.

#### TEMA III: FACTORES BIÓTICOS

De acuerdo con Vörösmarty *et al.* (2010), este tema captura la distribución espacial y local de los impactos de los cambios de la biota en los ecosistemas de ríos. Los seres humanos han alterado la fauna de los ríos en muchas formas, pero existe poca información sobre la documentación de estos cambios. Este tema incluye dos indicadores de los cuatro propuestos por Vörösmarty *et al.* (2010), que se seleccionaron con base en la información disponible y son: 1) número de especies no-nativas, y 2) presión acuícola. Estos indicadores tienen una variedad de efectos nocivos sobre los ecosistemas de agua dulce desde cambios en la carga y ciclo de nutrientes, la desestabilización de la cadena alimentaria hasta la alteración de las interacciones entre especies. Se debe indicar que en la medida que se pueda contar con mayor información, se podrá incluir otros indicadores, ya que la metodología propuesta es adaptable a dichos cambios.

#### INDICADOR 8: NÚMERO DE ESPECIES NO-NATIVA

Los diversos impactos negativos de las especies no-nativas (introducidas) sobre los ecosistemas acuáticos, son una función del número absoluto de especies no-nativas (Vörösmarty *et al.*, 2010). Sin embargo, en esta investigación se evidenció que la falta de información a nivel espacial de especies no-nativas para la cuenca del país es una limitante, por lo que para la construcción de dicho indicador se debe usar información referencial encontrada en la literatura sobre el tema. En este caso se toma de la lista de especies introducidas en aguas continentales del Perú según Ortega *et al.* (2012). Luego con base en la clasificación propuesta por

LePrieur *et al.* (2008) se reasignaron los valores del indicador para que estén en el rango de 0 a 1 al igual que los demás indicadores calculados.

**Información requerida:** Se requieren las siguientes capas de información: i) número de especies no-nativa, y ii) delimitación de unidades hidrográficas.

**Cálculo del indicador:** Este indicador se calcula para cada subcuenca, considerando la clasificación global propuesta por LePrieur *et al.* (2008), que los agrupa en tres clases: 0-5, 5-20, y 20-70, reasignando dichos valores a 0, 0.5, y 1 respectivamente.

#### INDICADOR 9: PRESIÓN ACUÍCOLA

Según Vörösmarty *et al.* (2010), la acuicultura es una amenaza de rápido crecimiento en los ríos del mundo y que impacta sobre la seguridad hídrica y la biodiversidad de los ecosistemas de agua dulce. El sustento del cálculo de este indicador es que la actividad acuícola degrada la calidad del agua, altera la estructura del hábitat y flujo del agua cuando se practica directamente en el cuerpo de agua, asimismo, es una fuente de especies no-nativas que pueden llegar a ser invasivas en algunos casos. Sin embargo, como también lo señala Vörösmarty *et al.* (2010), se debe indicar que se reconoce la importancia de la acuicultura para la seguridad alimentaria cuando se realiza adecuadamente. Igual que en el caso del cálculo del indicador ocho, existe poca información sobre la producción acuícola a nivel detallado en los ríos del Perú. En ese sentido, con base en la información nacional existente, se aproximó el cálculo de este indicador a través de la ubicación de los derechos y concesiones acuícolas obtenidas del Catastro Acuícola Nacional del Ministerio de la Producción (PRODUCE, s.f.) y la extensión de las lagunas en las que se ubican.

**Información requerida:** Se requieren las siguientes capas de información: i) ubicación de la actividad acuícola, ii) extensión de los cuerpos de agua, y iii) delimitación de unidades hidrográficas.

**Cálculo del indicador:** Este indicador se calcula para cada subcuenca, dividiendo la extensión del área concesionada para acuicultura dentro de las lagunas entre el área total de las lagunas. Se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades.

El cálculo de los indicadores mencionados se realiza en un entorno de Sistemas de Información Geografía (SIG) con la finalidad de mostrar su distribución espacial a nivel de cada cuenca o subcuenca. Estos indicadores se estandarizan estadísticamente de manera que estén todos en el rango de 0-1, lo cual a su vez se interpreta que el valor de 0 es «sin amenazas incidentes» y el valor de 1 es «la más alta amenaza incidente», en ambos casos hacia los cuerpos de agua de la cuenca.

#### TRANSFORMACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS INDICADORES

Se requirió realizar una transformación estadística de los datos, debido a que los indicadores, por lo general, no siguen una distribución normal. En ese

sentido, se pueden usar algunas de las transformaciones estadísticas como la log normal, exponencial, gamma, la transformación de Johnson o la transformación de “Two-step” (Templeton, 2011) para aproximar los datos a una distribución normal, la cual se puede evaluar por medio de los test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk, y los valores de asimetría y curtosis.

Con los valores de los indicadores normalizados se procede a su estandarización conforme al procedimiento sugerido por Vörösmarty *et al.* (2010), adaptándolo para, en lugar de calcularlo por celdas, realizarlo a nivel de subcuencas. La normalización era necesaria debido a que los indicadores calculados inicialmente se encuentran en distintas escalas y unidades, por lo cual se requirió estandarizar dichos valores en una escala común y continua. Para realizar la estandarización, se usó la Función de Distribución Acumulada (FDA) de acuerdo con la Fórmula 1.

$$\widehat{D}(D_i) = P(D_i) = \frac{n}{N_{total}}$$

**Fórmula 1**

Donde  $D$  es el valor del driver estandarizado para la celda  $i$  de la malla,  $D_i$  es el valor del driver normalizado,  $P$  es la probabilidad acumulada,  $n$  es el rango de  $D_i$  relativo a todas las celdas de la malla ordenadas de modo ascendente, y  $N_{total}$  es el número total de celdas en la malla. Este procedimiento escala los valores de los indicadores en el rango de 0 a 1 (0 sin amenazas incidentes y 1 la más alta amenaza incidente), reemplazando cada valor inicial del driver con su percentil dentro de la frecuencia de distribución de valores a través de todas las celdas de la malla. Según Vörösmarty *et al.* (2010), la finalidad de este procedimiento es que todos los drivers estén ubicados en una misma escala numérica, así la influencia de los valores extremos es moderada y no es necesario aplicar cortes o transformaciones arbitrarias. Para cada celda en las que el valor de un driver dado fué estimado con certeza en cero, dicho driver se fijó en cero y se excluyó de la estandarización FDA. Estos procedimientos se pueden aplicar en programas estadísticos como SPSS o Minitab.

#### CÁLCULO DEL ÍNDICE DE AMENAZA ECOHIDROLÓGICA (IAEH)

El IAEH se calculó usando la Fórmula 2 propuesta por Vörösmarty *et al.* (2010).

$$IAEH_i = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^{d_j} W_j \omega_{k,j} \widehat{D}_{i,j,k}$$

**Fórmula 2**

Donde  $W_j$  es el peso del tema  $j$ ,  $\omega_{k,j}$  es el peso del indicador  $k$  dentro del tema  $j$ ,  $d_j$  es el número de indicadores subsidiarios dentro del tema  $j$ , y  $D_{i,j,k}$  es el puntaje estandarizado del indicador  $k$  dentro del tema  $j$  para cada celda  $i$  de la malla.  $W_j$ , de  $j = 1, 2, \dots, 3$ , suma 1.0, así como  $\omega_{k,j}$  de  $k = 1, 2, \dots, d_j$ .

Los valores de los pesos  $W_j$  y  $\omega_k$ , sugerido por Vörösmarty *et al.* (2010), reflejan la opinión de expertos en un amplio rango de disciplinas (ecología de ríos, ingeniería civil, economía ambiental, hidrología, evaluación de recurso hídricos) y con experiencia en trabajos en la mayoría de los continentes (América del norte y del Sur, Europa del Este y del Oeste, África, Asia del sudeste y Australia). Sin embargo, Vörösmarty *et al.* (2010) reconoce que la composición del equipo tuvo un sesgo hacia instituciones de países occidentales industrializados (3 de Norteamérica, 2 de Europa, 2 de Australia y 1 de Asia).

Para el caso de su uso en el Perú, en la presente propuesta metodológica se realizaron algunas modificaciones en la distribución de los pesos, conforme a la propuesta de temas e indicadores seleccionados en la presente investigación. En ese sentido, en el caso de las variables que eran las mismas que las señaladas por Vörösmarty *et al.* (2010), se

usaron los mismos pesos. En el caso del Tema I y el Tema II, el peso asignado fue de 0.25 para cada uno, ya que se consideró la misma importancia de ambos temas. En el caso del Tema III se le asignó el peso de 0.5, de manera que entre los tres temas sumen la unidad, dándose igualmente la misma importancia a los temas sobre recursos hídricos y los temas biológicos, que son la base para la determinación de los caudales ecológicos. En el caso de los dos indicadores del Tema III, se realizó un prorrateo entre los pesos asignados por Vörösmarty *et al.* (2010), de manera que sumen la unidad.

La integración de los tres temas y nueve indicadores se realizó con el apoyo de la herramienta "ModelBuilder" del programa ArcGIS 10.7, que es una aplicación que se utiliza para crear, editar y administrar modelos (Figura 2). Asimismo, en la Tabla 3 se muestra los rangos de clasificación y la leyenda que se usó para la elaboración de los mapas que resulten del cálculo del IAEH a fin de establecer una correspondencia cualitativa con el nivel de amenaza.

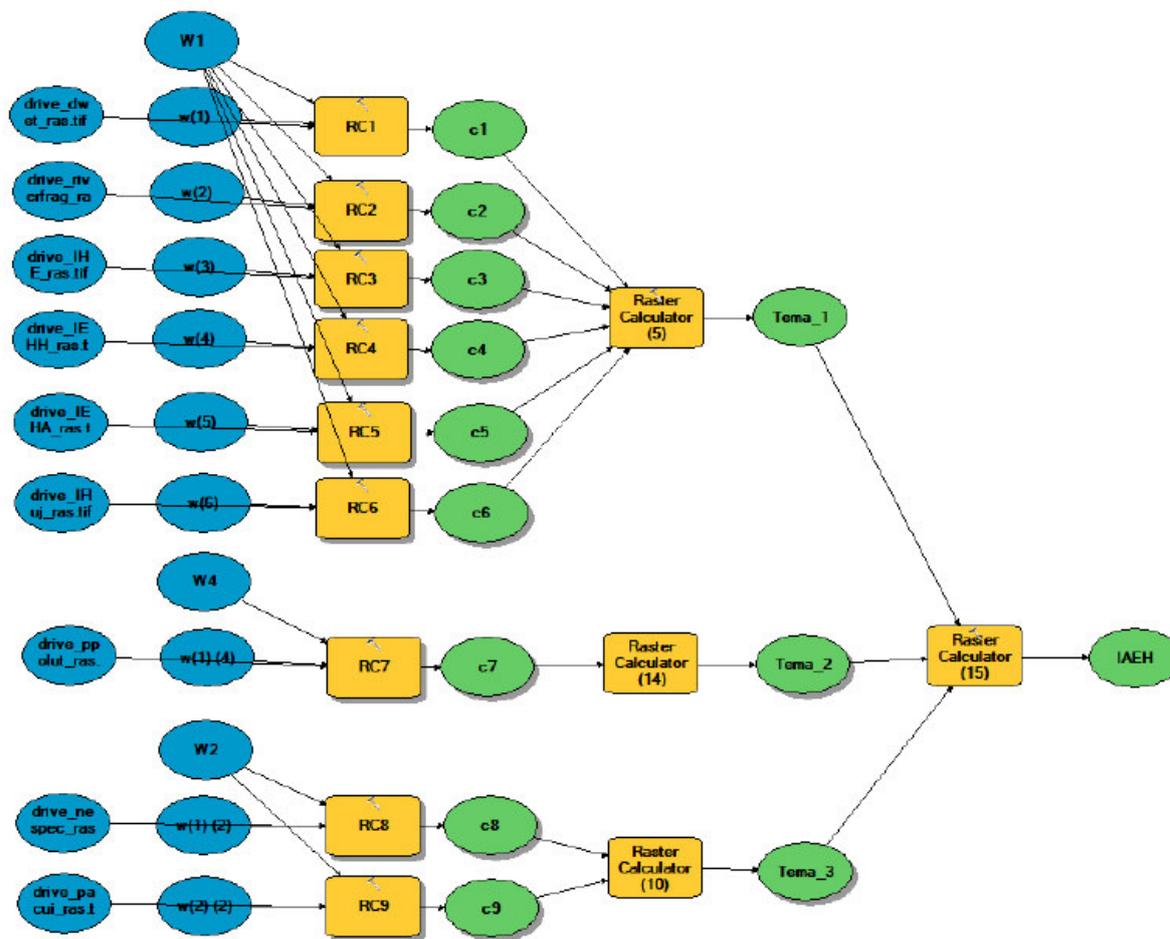


Figura 2. Modelo construido con la herramienta "ModelBuilder" para calcular el IAEH.

## Resultados

### Indicadores para el cálculo del IAEH

Los nueve indicadores que se requieren para calcular para el IAEH se muestran en la Figura 3, 4 y 5. A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis de cada indicador.

- 1) El indicador de fragmentación de ríos se muestra en la Figura 3(a). Se observa, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que la mayor fragmentación ocurre en la UH Bajo Pisco, debido principalmente a la existencia de bocatomas que captan el agua del río Pisco y la derivan para el uso agrícola en el valle; seguida de las UH Huaytará e Incachaque ubicadas en la parte media alta y alta de la cuenca del río Pisco. En esta última, a pesar de ser una zona de baja intervención, la presencia de vías ha fragmentado el paisaje de los humedales conocidos como bofedales, mientras que las UH Veladero, Alto Pisco y Medio Pisco son las que presentan una menor fragmentación de ríos. En el caso de la primera, es una cuenca de la parte media baja, ubicada en la zona árida, en la cual no existe mayor uso debido a la baja disponibilidad natural de la cuenca y la escasa población en la misma. La UH Alto Pisco, ubicada en la parte alta de la cuenca, presenta ligeramente una mayor fragmentación de ríos, debido principalmente a la existencia de lagunas, las cuales han sido represadas (Pultoc). En el caso de la UH Medio Pisco, se ubica en la parte media de la cuenca y no presenta un uso directo del agua del río y tampoco la presencia de embalses que modifiquen la conectividad hidrológica. En las demás UH la fragmentación se ve influenciada por la presencia de bocatomas, lagunas represadas y alcantarillas debido a los cruces de vías.
- 2) El indicador de estrés hídrico consuntivo se muestra en la Figura 3(b). Se observa que, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, el mayor estrés hídrico consuntivo ocurre en la cuenca baja, en la UH Bajo Pisco, debido principalmente a la existencia de extensas áreas agrícolas y urbanas que hacen uso intensivo del agua que se extrae del río Pisco, siendo la actividad agrícola la de mayor consumo. La UH Huaytará, ubicada en la cuenca media-alta, también muestra un alto estrés hídrico consuntivo debido a la existencia de áreas agrícolas y centro poblados, que hacen uso del agua que se extrae del río Huaytará, pero en menor medida de lo que sucede en la UH Bajos Pisco. En las UH Santuario y Medio Alto Pisco también existe un uso del agua con fines de riego; sin embargo, debido a la alta producción hídrica, presentan un menor estrés hídrico consuntivo. En las UH Incachaque y Alto Pisco, debido al bajo uso consuntivo de agua que existe, estas UH no presentan estrés hídrico consuntivo.
- 3) El indicador de estrés hídrico humano se muestra en la Figura 3(c). Este indicador mostró una mayor variabilidad a nivel de todas las UH de la cuenca. Se observa, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que el mayor estrés hídrico humano ocurre en la cuenca baja, en la UH Bajo Pisco y Veladero, seguido de la cuenca media alta con las UH Huaytará, Santuario, Medio Alto Pisco, Alto Pisco e Incachaque. El menor estrés hídrico humano ocurre en las UH Medio Bajo Pisco y Medio Pisco, debido a la menor cantidad de población existente y la mayor disponibilidad de agua. Se debe indicar que este valor calculado de estrés hídrico humano es relativo, ya que está en función de los valores determinados en cada UH; sin embargo, si los comparamos con los estándares internacionales, por ejemplo, la clasificación de Moore *et al.* (2015), ninguna de las UH presentaría estrés hídrico humano. Pero este análisis, como se mencionó, permite establecer una escala relativa de este indicador para el cálculo posterior del índice de amenazas ecohidrológicas en la cuenca.
- 4) El indicador de índice de estrés hídrico agrícola se muestra en la Figura 3(d). Este indicador también muestra una alta variabilidad a nivel de todas las UH de la cuenca. Se observó que, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, el mayor estrés hídrico agrícola ocurre en la cuenca baja, en la UH Bajo Pisco y en la cuenca media alta, en las UH Huaytará, Medio Alto Pisco y Santuario; seguido de la cuenca media baja, en las UH Veladero y Medio Bajo Pisco. Las UH Alto Pisco e Incachaque no presentan estrés hídrico agrícola, debido a que no se identificaron áreas agrícolas bajo riego en dichas UH. En general, los valores de este indicador varían en función de la extensión de las áreas bajo riego y la producción hídrica de cada UH.
- 5) El indicador de interrupción de flujo se muestra en la Figura 3(e). Este indicador también mostró una mayor variabilidad en la parte media alta de la cuenca. Se observó conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que la mayor interrupción del flujo ocurre en las UH Huaytará, Alto Pisco y Santuario; seguida por las UH Medio Alto Pisco, Medio Pisco y Medio Bajo Pisco. Las UH Bajo Pisco y Veladero presentan la menor interrupción del flujo, mientras que la UH Incachaque no presenta interrupción del flujo, debido a que no está regulada y forma parte de la cabecera de la cuenca. En general, los valores de este indicador varían en función de la presencia de lagunas reguladas en las UH de la cuenca, así

- como de la distancia e influencia de la red hidrográfica hacia dichas lagunas.
- 6) El indicador de desconectividad de humedales se muestra en la Figura 3(f). Se observa conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que la mayor desconectividad de humedales ocurre en la UH Bajo Pisco, debido principalmente a la existencia de extensas áreas agrícolas y urbanas, las cuales han contribuido a fragmentar los humedales de esta parte de la cuenca. En la parte alta de la cuenca la desconectividad de humedales, de mayor a menor orden, ocurren en las UH Santuario, Incachaque, Alto Pisco, Medio Alto Pisco y Huaytará, y se debe principalmente a la fragmentación que han sufrido los humedales a causa de las vías de comunicación que los cruzan. En el caso de las UH Medio Pisco, Medio Bajo Pisco y Veladero, no se identificó la presencia de humedales.
  - 7) El indicador de contaminación por aguas residuales se muestra en la Figura 4(a). Se observó que, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, la mayor contaminación por vertimientos de aguas residuales a la red hidrográfica de la cuenca ocurre en las UH Bajo Pisco y Santuario, seguido de las UH Huaytará, Medio Bajo Pisco, Medio Pisco y Alto Pisco. Las UH Incachaque, Medio Alto Pisco y Veladero presentan un valor de cero del indicador de contaminación por aguas residuales, debido a que no existe información para su cálculo. En general, los valores de este indicador varían en función de la ubicación de los puntos de vertimientos y del caudal de aguas residuales que se vierte en cada una de las UH de la cuenca del río Pisco.
  - 8) El indicador número de especies no-nativas se muestra en la Figura 5(a). Se observó, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que el mayor número de especies no-nativas o introducidas ocurren en la cuenca baja, en la UH Bajo Pisco. En las demás UH de la cuenca el valor del indicador es cero por la ausencia de información. En general, se puede decir que los valores de este indicador varían en función de la disponibilidad de información existente de especies introducidas, de la presencia de humedales con espejos de agua superficiales o masas de agua abiertas, y de la mayor población a nivel de toda la cuenca, lo cual, en este caso, ocurre en la parte baja de la misma. Los valores de este indicador son referenciales debido a la falta de información y en la medida que se cuente con mayores datos de especies no-nativas, para las demás UH de la cuenca se podrá actualizar su cálculo.
  - 9) El indicador presión acuícola se muestra en la Figura 5(b). Se observó, conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que la mayor

presión acuícola ocurre en la cuenca alta, en las UH Alto Pisco y en la cuenca media alta, en las UH Santuario y Huaytará. En las demás UH de la cuenca no se identificó la presencia de actividad acuícola por lo cual el valor del indicador en estas cuencas es cero. En general, los valores de este indicador varían en función de la ubicación de los derechos acuícolas otorgados y de la existencia de lagunas de extensión considerable para el desarrollo de esta actividad, lo cual ocurre, por lo general, en la parte alta de la cuenca.

#### Cálculo del IAEH

Los resultados del IAEH a nivel de las nueve subcuencas o unidades hidrográficas (UH) de la cuenca del río Pisco se pueden ver en la Figura 6. De acuerdo al IAEH calculado y a la Tabla 3, la UH Bajo Pisco se encuentra en la clase definida como «amenaza moderada», que va del rango de 0.5 a 0.65. Las UH Alto Pisco, Santuario y Huaytará se encuentran en la clase definida como «amenaza baja a moderada», que va del rango de 0.25 a 0.5. Las UH Incachaque, Medio Alto Pisco, Medio Pisco, Medio Bajo Pisco y Veladero se encuentran en la clase definida como «amenaza baja», que va del rango de 0 a 0.25. De acuerdo al IAEH, no existe en la cuenca del río Pisco alguna UH que esté dentro de la clase «amenaza moderada a alta» y «amenaza alta».

**Tabla 3.** Rangos de clasificación y leyenda del IAEH.

Rangos		Leyenda
0.0-0.25		Baja
0.25-0.5		Baja - Moderada
0.5-0.65		Moderada
0.65-0.75		Moderada – Alta
0.75-1.00		Alta

Fuente: Adaptado de Vörösmarty *et al.* (2010) y Sood *et al.* (2017).

A manera de evaluar la sensibilidad del IAEH, se llevó a cabo una regresión de los resultados a nivel de subcuenca considerando el IAEH sin la influencia de los pesos seleccionados como variable independiente y el IAEH con la influencia de dichos pesos como la variable dependiente (Figura 7). Se obtuvo un coeficiente de determinación  $R^2$  de 93.82 % y un  $p < 0.05$ , lo cual indica que existe una fuerte relación entre ambas variables; más detalles se abordan en la sección de discusión. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 6.

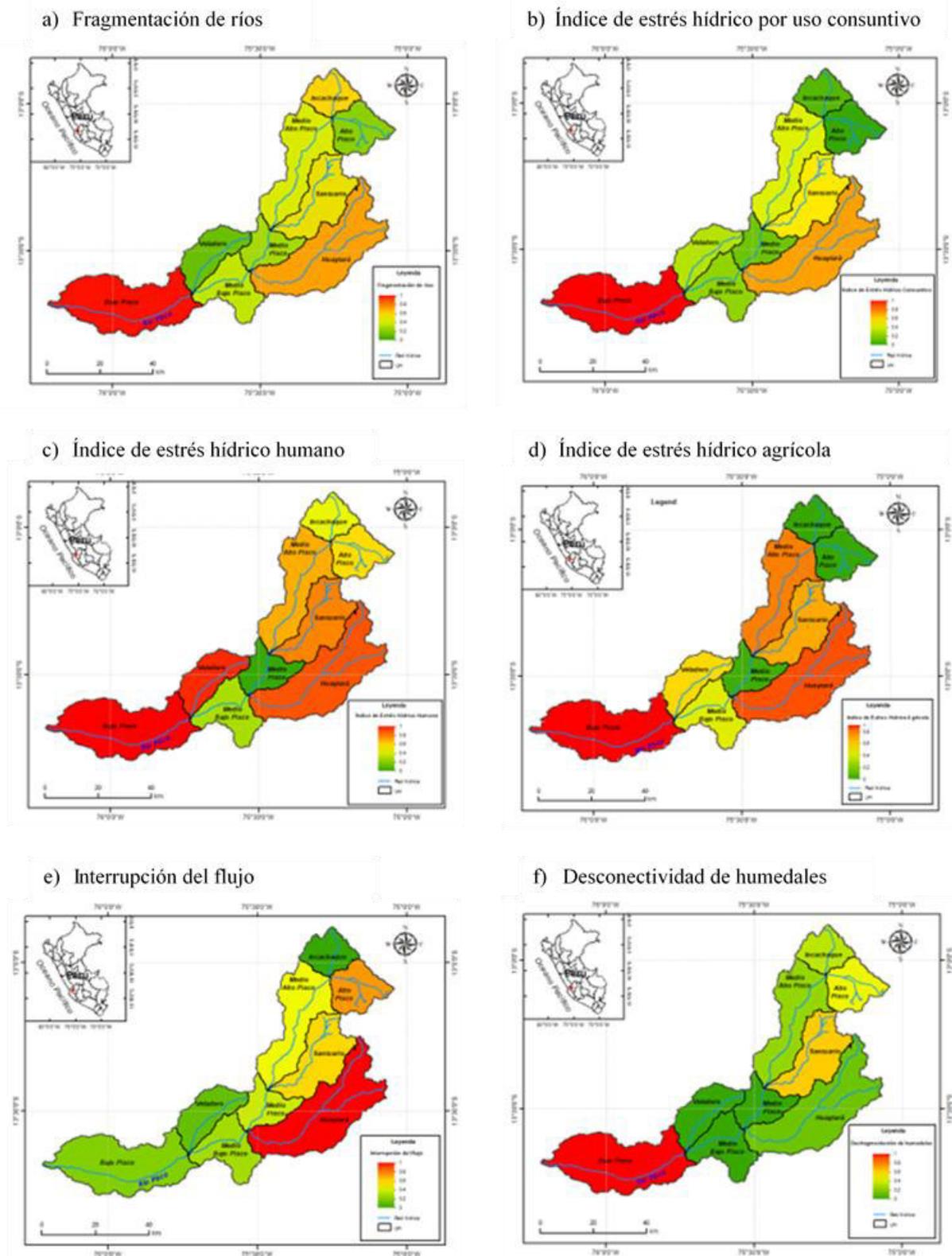


Figura 3. Mapa de los indicadores sobre recursos hídricos - aspectos de cantidad.

**Discusión**

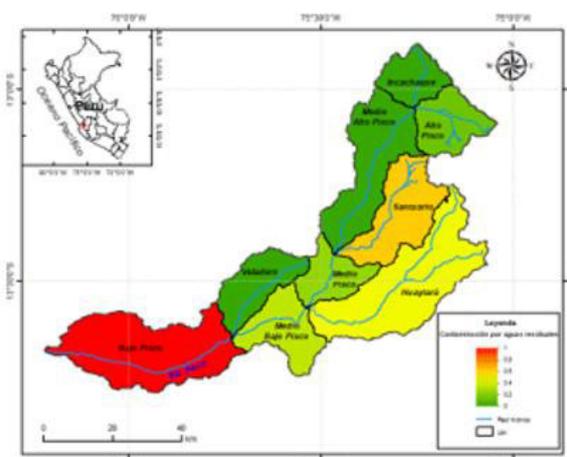
El IAEH calculado en la presente investigación permitió estimar el nivel de amenazas que existe en los ecosistemas acuáticos de las nueve unidades hidrográficas que conforman la cuenca del río Pisco y presentarlos a través de un mapa. Si bien en la cuenca del río Pisco existe una marcada concentración de las actividades antrópicas en las unidades hidrográficas ubicadas en la cuenca baja, como ocurren en todas las cuencas de la vertiente del Pacífico, el método permitió conocer por primera vez cómo se distribuyen estas amenazas a nivel de todas las unidades hidrográficas que conforman la cuenca del río Pisco, lo cual representa una nueva forma de comprender como las intervenciones del ser humano pueden afectar a los recursos hídricos y ecosistemas acuáticos, ya que hasta ahora solo se habían visto en el Perú a nivel de cuenca (ANA, 2016; UNEP-DHI & UNEP, 2016).

De las nueve UH evaluadas, cinco, las UH Veladero, Incachaque, Medio Alto Pisco, Medio Pisco y Medio Bajo Pisco, tienen el menor IAEH (0.0 - 0.25) que se clasifica como “amenaza baja”, debido a que presentan una menor fragmentación de ríos, desconectividad de humedales, estrés hídrico consuntivo, interrupción de flujo, contaminación por aguas residuales, y presión acuícola; tres, las UH Alto Pisco, Huaytará y Santuario, tienen un IAEH entre 0.25 y 0.5, clasificado como “amenaza baja a moderada” debido a que presentan una mayor fragmentación de ríos, desconectividad de humedales, estrés hídrico consuntivo, estrés hídrico humano, estrés hídrico agrícola, interrupción de flujo, contaminación por aguas residuales, y presión acuícola; y la única UH que muestra una “amenaza moderada” (0.5 - 0.65) es la UH Bajo Pisco, debido a que todos los indicadores, a excepción de la interrupción de flujo por embalses y presión acuícola, son los más altos.

El método propuesto para el cálculo del IAEH, a diferencia de otros basados en la asignación de pesos de juicio de expertos (ANA, 2016), el cálculo de los

indicadores primero se estandariza estadísticamente, y en última instancia se asignan los pesos, lo cual vuelve el cálculo en cierto modo objetivo para su replicabilidad en otras cuencas del país. Del análisis estadístico realizado se puede indicar que el resultado final del IAEH no se ve influenciado significativamente por los pesos aplicados ( $p < 0.05$ ), por lo que los valores de las amenazas determinados para cada unidad hidrográfica se deben, primariamente, a los patrones espaciales de los indicadores calculados.

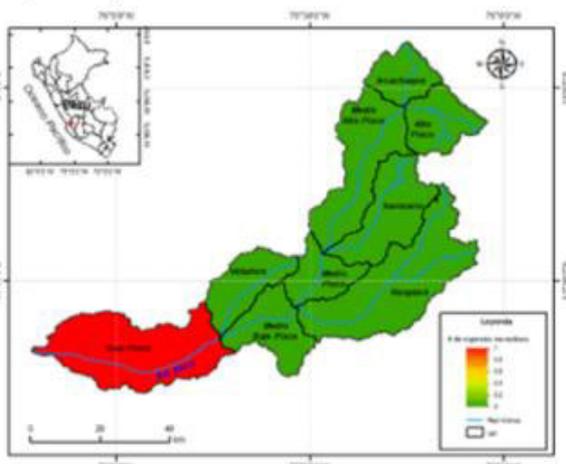
a) Contaminación por aguas residuales



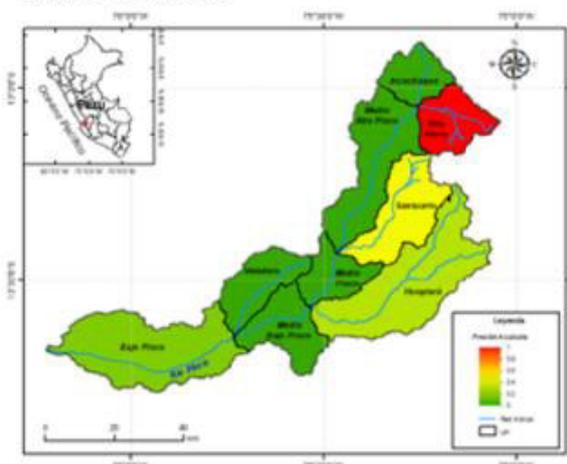
**Figura 4.** Mapa de los indicadores sobre recursos hídricos - aspectos de calidad.

Entre las limitaciones encontradas para la aplicación del IAEH están las brechas de información, sobre todo en lo que respecta a la distribución espacial de las especies hidrobiológicas y del aprovechamiento pesquero que existen en los cuerpos de agua del país, la información de descargas medias mensuales históricas, sea de aforos históricos o simuladas de modelo hidrológico e información de calidad del agua; sin embargo, en la medida que se genere esta información,

a) # de especies no-nativas



b) Presión acuícola



**Figura 5.** Mapa de los indicadores bióticos.

podrá incorporarse al modelo. Se debe mencionar que el cálculo de IAEH es un proceso aditivo; en ese sentido, no representa las interacciones entre las distintas variables y las sinergias que se generan, ya que se basan en los supuestos de que los ecosistemas se encuentran en estado estacionario y la calidad ambiental se puede evaluar considerando a sus variables de forma individual (Sánchez & Quinteros, 2017). Este tipo de análisis aún debe esperar hasta que se desarrollen modelos predictivos que consideren estos impactos interactivos y que sean aplicables a grandes escalas (Vörösmarty *et al.*, 2010).

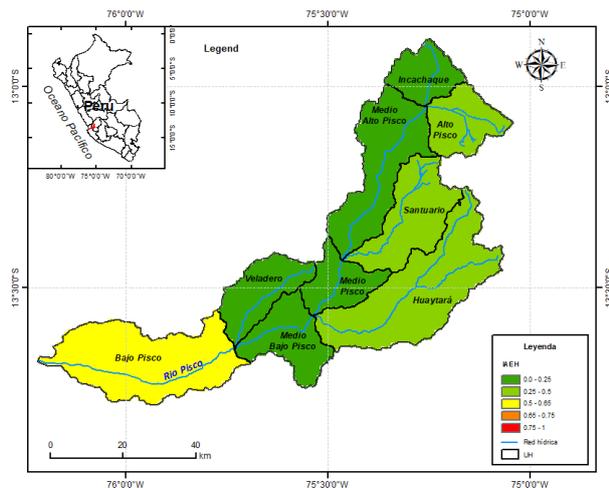


Figura 6. Mapa del IAEH en la cuenca del río Pisco.

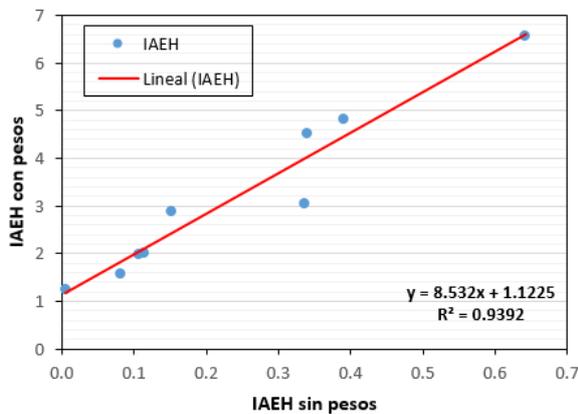


Figura 7. Sensibilidad del IAEH a los pesos establecidos en su cálculo.

### Conclusiones

El Índice de Amenazas Ecohidrológicas (IAEH) propuesto en la presente investigación se calculó a nivel de las nueve unidades hidrográficas (UH) menores que conforman la cuenca del río Pisco, lográndose relacionar los aspectos ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos de cada UH con la finalidad de determinar y jerarquizar el nivel de amenazas relativas hacia los ecosistemas acuáticos de cada cuenca (ríos, lagunas y humedales); en ese sentido, es una alternativa

para llevar a cabo una evaluación rápida y de baja demanda de recursos, y puede aplicarse en otras cuencas del país, particularmente en cuencas donde la mencionada información es limitada.

El IAEH propuesto se puede calcular haciendo usos de distintas fuentes de información espacial, tanto de organismos nacionales como internacionales, procesándolas por medio de herramientas estadísticas y de análisis espacial tanto comerciales como libres, integrándolas finalmente dentro un Sistemas de Información geográfica (SIG) a fin de obtener un mapa que muestre el nivel relativo de las amenazas a los ecosistemas acuáticos. Asimismo, el IAEH, en su formulación es flexible, ya que se puede volver a calcular y actualizar en la medida en que se genere nueva o mejor información.

El rango del IAEH en la cuenca del río Pisco estuvo entre 0 y 0.65, es decir entre «amenaza baja» y «amenaza moderada». De las nueve unidades hidrográficas evaluadas, la UH Bajo Pisco se encuentra en «amenaza moderada», que va del rango de 0.5 a 0.65 y guarda relación directa con las actividades socioeconómicas, principalmente la agricultura, que ocurren en este sector de la cuenca; las UH Alto Pisco, Santuario y Huaytará se encuentran en «amenaza baja a moderada», que va del rango de 0.25 a 0.5; las UH Incachaque, Medio Alto Pisco, Medio Pisco, Medio Bajo Pisco y Veladero se encuentran en «amenaza baja», que va del rango de 0 a 0.25, y se debe a la escasa intervención humana en esta parte de la cuenca. De acuerdo al IAEH, no existe en la cuenca del río Pisco UH en situación de «amenaza moderada a alta» y «amenaza alta». Para posteriores mejoras de los resultados del cálculo del IAEH es necesario que las entidades públicas nacionales que generan información de aspectos ecológicos, hidrológicos y socioeconómicos continúen desarrollando estudio en dichas materias, de manera que se acorten las brechas de información, en particular, en lo que respecta a la información de la distribución de especies hidrobiológicas en cuerpos de agua continentales (ríos, lagunas y humedales), calidad del agua, a nivel de cuenca y subcuenca, así como la generación de caudales, a través de la instalación de más estaciones hidrométricas o la elaboración de modelos hidrológicos semidistribuidos.

### Agradecimientos

A la Autoridad Nacional del Agua-ANA, en especial a la Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos, a la Administración Local de Agua-ALA Pisco, y a la ONG WWF-Peru por la información sobre recursos hídricos de la cuenca del río Pisco cedida para el desarrollo de la presente investigación.

**Literatura citada**

- ANA. 2012. Delimitación y codificación de Unidades Hidrográficas del Perú: Memoria Descriptiva. ANA (Autoridad Nacional del Agua). Lima, Perú. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/597>.
- ANA. 2016. Priorización de cuencas para la gestión de los recursos hídricos. ANA (Autoridad Nacional del Agua). Lima, Perú. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/205>.
- ANA. 2019. Resolución Jefatural N° 267-2019-ANA: Lineamientos Generales para Determinar Caudales Ecológicos. Viernes 06 de diciembre de 2019. El Peruano, XXXVI(1517): 8-9. Lima, Perú. <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/aprueban-los-lineamientos-generales-para-determinar-caudales-resolucion-jefatural-n-267-2019-ana-1834265-1>.
- ANA. 2022. Implementación del Modelo SWAT en la Cuenca del Río Pisco. ANA (Autoridad Nacional del Agua). Lima, Perú. [https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/5209/ANA0003719.pdf\\_1?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/5209/ANA0003719.pdf_1?sequence=1&isAllowed=y).
- ANA. s.f. Visor por Cuencas. ANA (Autoridad Nacional del Agua). Lima, Perú. Consultado el 03 de noviembre de 2023 de: <https://snirh.ana.gob.pe/VisorPorCuenca/>.
- Dickens C., Smakhtin V., Biancalani, R., Villholth K.G., Eriyagama N. & Marinelli M. 2019. Incorporating environmental flows into water stress indicator 6.4.2: guidelines for a minimum standard method for global reporting. SDG 6.4 MONITORING SUSTAINABLE USE OF WATER RESOURCES PAPERS. FAO Rome, Italy.
- Falkenmark M. & Widstrand C. 1992. Population and Water Resources: A Delicate Balance. *Population Bulletin*, Vol. 47, No. 3. [https://www.researchgate.net/publication/11109640\\_Population\\_and\\_Water\\_Resources\\_A\\_Delicate\\_Balance](https://www.researchgate.net/publication/11109640_Population_and_Water_Resources_A_Delicate_Balance).
- Hughes D.A. & Hannart P. 2003. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology*, 270(3-4): 167-181. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00290-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00290-1).
- Hughes D.A. & Münster F. 2000. Hydrological information and techniques to support the determination of the water quantity component of the ecological reserve. Institute for Water Research Rhodes University Grahamstown South Africa (IWR Report No. 3/2000). Report to the Water Research Commission (Report TT 137/00). Pretoria, South Africa. <https://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/TT-137-00.pdf>.
- INEI. 2017. Sistema de Información Geográfica. Sistema de Consulta de Centros Poblados. [Actualizado a la información censal del 2017]. INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). Lima, Perú. <http://sige.inei.gob.pe/test/atlas/>.
- King J. M.; Tharme R. & de Villiers M. (Eds). 2008. Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology (updated Edition). Report to the Water Research Commission by Freshwater Research Unit University of Cape Town. WRC Report No TT 354/08. <https://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/TT%20354-CONSERVATION.pdf>.
- LePrieur F., Beauchard O., Blanchet S., Oberdorff T. & Brosse S. 2008. Fish Invasions in the World's River Systems: When Natural Processes Are Blurred by Human Activities. *PLoS Biology*, 6(2): e28: 0404-0410. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060028>.
- MIDAGRI. s.f. Sistema de Información Agrícola y Pecuaria. MIDAGRI (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego). Lima, Perú. Consultado el 03 de noviembre de 2023 de: <https://siea.midagri.gob.pe/portal/informativos/superfici-e-agricola-peruana>.
- MINEDU. 2020. Descarga de Información Espacial del MED. [Actualizado al 05/02/2020]. MINEDU (Ministerio de Educación). Lima, Perú. <https://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/>.
- Moore B.C., Coleman A.M., Wigmosta M.S., Skaggs R.L. & Venter E.R. 2015. A high spatiotemporal assessment of consumptive water use and water scarcity in the conterminous United States. *Water Resources Management*, 29: 5185–200. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1112-x>.
- MTC. 2023 Descarga de datos espaciales. [Actualizado al martes, 29 agosto 2023]. MTC (Ministerio de Transporte y Comunicaciones). Lima, Perú. <https://portal.mtc.gob.pe/estadisticas/descarga.html>.
- Ortega H., Hidalgo M., Correa E., Espino J., Chocano L., Trevejo G., Meza-Vargas V., Cortijo A. & Quispe R. 2012. Lista anotada de los peces de aguas continentales del Perú: Estado actual del conocimiento, distribución, usos y aspectos de conservación. Segunda edición. Ministerio del Ambiente y Museo de Historia Natural, UNMSM, Lima. [https://www.researchgate.net/publication/314230837\\_Lista\\_anotada\\_de\\_los\\_peces\\_de\\_aguas\\_continentales\\_del\\_Peru\\_estado\\_actual\\_del\\_conocimiento\\_distribucion\\_uso\\_y\\_aspectos\\_de\\_conservacion](https://www.researchgate.net/publication/314230837_Lista_anotada_de_los_peces_de_aguas_continentales_del_Peru_estado_actual_del_conocimiento_distribucion_uso_y_aspectos_de_conservacion).
- Poff N., Tharme R. & Arthington A. 2017. Evolution of Environmental Flows Assessment Science, Principles, and Methodologies. In: Horne A.C., Angus Webb J., Stewardson M.J., Richter B. & Acreman M. *Water for the Environment. from Policy and Science to Implementation and Management*. 203-236. Academic Press. 10.1016/B978-0-12-803907-6.00011-5.
- Pringle C. 2003. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrol. Process.*, 17(13): 2685-2689. <https://doi.org/10.1002/hyp.5145>.
- PRODUCE. s.f. Catastro Acuícola Nacional. PRODUCE (Ministerio de la Producción). Lima, Perú. Consultado el 03 de noviembre de 2023 de: <http://catastroacuicola.produce.gob.pe/web/>.
- Sánchez E. & Quinteros Z. 2017. Pertinencia del concepto de Estándar de Calidad Ambiental (Eca) en la gestión de sistemas ambientales con varios estados alternativos. Estudio de caso de una experiencia peruana. *Ecología Aplicada*, 16(2), 151-164. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v16i2.1019>.
- Smakhtin V. & Anputhas M. 2006. An assessment of environmental flow requirements of Indian river basins. Research Report 107 of the International Water Management Institute. [http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI\\_Research\\_Reports/PDF/PUB107/RR107.pdf](http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/PUB107/RR107.pdf).

- Smakhtin V., Arunachalam M., Behera S., Chatterjee A., Das S., Gautam P., Joshi G.D., Sivaramakrishnan K.G. & Unni K.S. 2007. Developing procedures for assessment of ecological status of Indian river basins in the context of environmental water requirements. IWMI Research Report 114. International Water Management Institute. Colombo, Sri Lanka. [https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI\\_Research\\_Reports/PDF/PUB114/RR114.pdf](https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/PUB114/RR114.pdf).
- Sood A., Smakhtin V., Eriyagama N., Villholth K.G., Liyanage N., Wada Y., Ebrahim G. & Dickens C. 2017. Global environmental flow information for the sustainable development goals. International Water Management Institute (IWMI). (IWMI Research Report 168). Colombo, Sri Lanka. DOI: 10.5337/2017.201.
- Templeton G.F. 2011. A Two-Step Approach for Transforming Continuous Variables to Normal: Implications and Recommendations for IS Research. CAIS (Communications of the Association for Information Systems), 28: Article 4: 41-58. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.02804>.
- UNEP-DHI & UNEP. 2016. Transboundary River Basins: Status and Trends. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi.
- Vörösmarty C., Sharma K.K., Fekete B.M., Copeland A.H., Holden J., Marble J.C. & Lough J.A. 1997. The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio*, 26(4): 210-219. <https://www.jstor.org/stable/4314590>.
- Vörösmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O., Dudgeon D., Prussevitch A., Green P., Glidden S., Bunn S.E., Sullivan C.A., Liermann C.R. & Davies P.M. 2010. Global Threats to Human Water Security and River Biodiversity. *Nature*, 467: 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>.

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Molina s/n La Molina, Lima 12, Lima – Perú.

<sup>2</sup> egeografo@hotmail.com. ORCID: 0009-0004-8901-3138.

<sup>3</sup> jorgetam0@yahoo.com. ORCID: 0000-0001-8224-4313.