



PERÚ

Ministerio
de Desarrollo Agrario
y Riego



EL ÍNDICE DE AMENAZAS ECOHIDROLÓGICAS

UNA GUÍA PARA SU CÁLCULO Y USO



Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego

Ministro de Desarrollo Agrario y Riego

Ángel Manuel Manero Campos

Jefe de la Autoridad Nacional del Agua

Alonzo Zapata Cornejo

Gerente General de la Autoridad Nacional del Agua

Ismael Edwin Salazar Villavicencio

Directora de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos

Flor de María Huamaní Alfaro

Responsable del Equipo de Recursos Hídricos Superficiales

Gastón Pantoja Tapia

Equipo técnico de la ANA:

M.Sc. Erick García Gonzales

M.Sc. Nelson Santillán Portilla

Ing. Humberto Richard Torres Giraldo

Ing. Jesús Rebeca Sinche Huaccha

Equipo técnico de WWF:

Walescka Cachay Jara

Daniela Freundt Montero

La construcción y diagramación de este documento fue posible gracias al apoyo de World Wildlife Fund (WWF).

Título: El índice de amenazas ecohidrológicas: Una guía para su cálculo y uso

Editado por la Autoridad Nacional del Agua - Calle Diecisiete 355, Urb. El Palomar, San Isidro Lima, Perú / T: (511) 224-3298 / <https://www.gob.pe/ana>

Primera edición impresa, mayo de 2024.

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2024-04177

ISBN: 978-612-4273-50-6

Tiraje: 250 ejemplares

Impreso en el taller gráfico: Huisa Quevedo Jimmy E.

RUC: 10106280016

Jr. Carlos Cabrera 519 - S.M.P

Cel.: 988 811 168

Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción de este documento por cualquier medio, total o parcialmente sin permiso expreso.

ISBN: 978-612-4273-50-6



EL ÍNDICE DE AMENAZAS ECOHIDROLÓGICAS

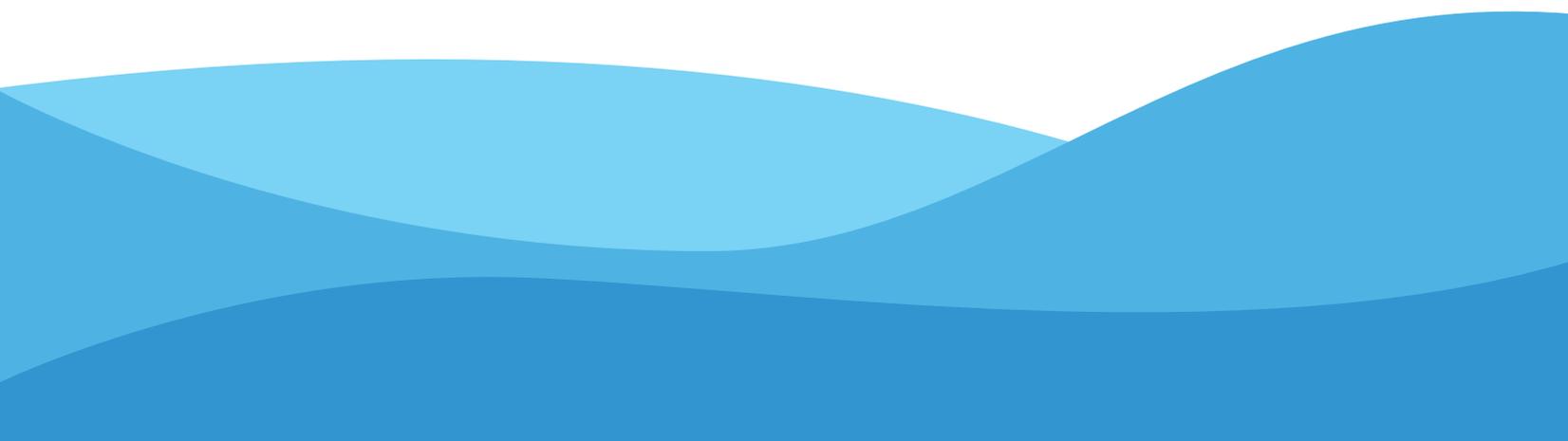
UNA GUÍA PARA SU CÁLCULO Y USO

Cita sugerida: Autoridad Nacional del Agua. (2024). El índice de amenazas ecohidrológicas: Una guía para su cálculo y Uso. (p. 44). Lima, Perú.



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN AL ÍNDICE DE AMENAZAS ECOHIDROLÓGICAS-IAEH	9
¿Qué es el Índice de Amenazas Ecohidrológicas-IAEH?	9
¿A quién está dirigida la presente guía?	10
¿Cómo esta estructurada la presente guía?	10
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN DEL IAEH	11
SELECCIÓN DE TEMAS E INDICADORES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL IAEH	12
Información disponible para la construcción del IAEH	13
Ámbito geográfico y escala	14
Tema I: Recursos Hídricos-Cantidad	16
Indicador 1: Fragmentación de ríos	16
Indicador 2: Estrés hídrico por uso consuntivo	16
Indicador 3: Estrés hídrico por uso humano	17
Indicador 4: Índice de estrés hídrico por área agrícola	17
Indicador 5: Detención del flujo	18
Indicador 6: Desconectividad de lagunas y humedales	19
Tema II: Recursos Hídricos-Calidad	19
Indicador 7: Contaminación por agua residual	19
Tema III: Componente Biótico	20



Indicador 8: Número de especies introducidas	20
Indicador 9: Porcentaje de especies introducidas	21
Indicador 10: Presión acuícola	21
Transformación y estandarización estadística de los indicadores	23
Determinación de pesos de los indicadores	23
Cálculo del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH)	24
CASO DE ESTUDIO: UNIDAD HIDROGRÁFICA PISCO	26
Área de Estudio	26
Fuente de datos	26
Construcción de Indicadores	27
Cálculo del IAEH	28
Resultados	29
Indicadores para el cálculo del IAEH	29
Cálculo del IAEH	34
USO DEL IAEH PARA LA PLANIFICACIÓN Y TOMA DE DECISIONES EN TORNO A LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	35
LIMITACIONES Y RETOS DEL IAEH	36
REFERENCIAS	37



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Temas e indicadores para el cálculo del IAEH.	12
Tabla 2. Información necesaria para el cálculo del IAEH.	13
Tabla 3. Resumen de temas, indicadores y métrica.	22
Tabla 4. Pesos relativos de los temas e indicadores para el cálculo del IAEH.	24
Tabla 5. Rangos y descripción para la clasificación del IAEH.	25
Tabla 6. Rangos de clasificación y leyenda del IAEH.	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma para la construcción del Índice de Amenazas Ecohidrológicas-IAEH	11
Figura 2. Mapa oficial de Unidades Hidrográficas (UH) del Perú.	15
Figura 3. Escala de análisis: UH Pisco de nivel 5 (izquierda) y UH de nivel 6 (derecha).	15
Figura 4. UH delimitadas a nivel nacional y UH menores que conforman la UH Pisco.	27
Figura 5. Modelo para el cálculo del IAEH construido con la herramienta Modelbuilder de ESRI.	28
Figura 6. Mapa de los indicadores del Tema I: Recursos Hídricos - Cantidad.	32
Figura 7. Mapa de los indicadores del Tema II: Recursos Hídricos - Calidad.	33
Figura 8. Mapa de los indicadores del Tema III: Componente Biótico.	33
Figura 9. Mapa, gráfico y tabla de los resultados del IAEH en el ámbito de la UH Pisco.	34

ABREVIATURAS

AAA	Autoridad Administrativa del Agua
ANA	Autoridad Nacional del Agua
IBD	Incidencia de Amenaza a la Biodiversidad
FDA	Función de Distribución Acumulada
GIRH	Gestión Integrada de los Recursos Hídricos
IHWS	Incidencia de Amenazas a la Seguridad Hídrica
IAEH	Índice de Amenazas Ecohidrológicas
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONG	Organización No Gubernamental
SIG	Sistemas de Información Geografía
SWAT	The Soil and Water Assessment Tool
UH	Unidad Hidrográfica
WEAP	Water Evaluation and Planning System
WWF	World Wildlife Fund

INTRODUCCIÓN AL ÍNDICE DE AMENAZAS ECOHIDROLÓGICAS-IAEH

El Índice de Amenazas Ecohidrológicas (IAEH) es una herramienta técnica para medir y mapear el nivel de amenazas antrópicas que existen sobre los ecosistemas acuáticos continentales como ríos, estuarios, lagos, lagunas y humedales, en las unidades hidrográficas, de distinto nivel, delimitadas por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). La presente guía está dirigido a aquellos especialistas y tomadores de decisiones interesados o involucrados en la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), el ordenamiento territorial y la gestión ambiental. Asimismo, la comunidad académica también puede estar interesada en su uso.

¿QUÉ ES EL ÍNDICE DE AMENAZAS ECOHIDROLÓGICAS-IAEH?

El IAEH consiste en la integración de diez indicadores, agrupados en tres temas: I) Recursos Hídricos-Cantidad, II) Recursos Hídricos-Calidad y III) Componente Biótico, que fueron 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 (García y Tam, 2023). El cálculo de los diez indicadores se realiza dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) y se estandarizan estadísticamente, a fin de obtener un valor relativo del índice para cada unidad hidrográfica analizada, de esta manera se puede jerarquizar el nivel de amenazas hacia los ecosistemas acuáticos como ríos, estuarios, lagos, lagunas y humedales. La información generada con el IAEH ofrece una herramienta para la priorización de políticas relacionadas con la conservación y protección de los recursos hídricos y los ecosistemas acuáticos en aspectos claves como la determinación de caudales ecológico, fajas marginales, zonas de protección, así como en la elaboración de los planes de gestión de recursos hídricos por cuencas, entre otros.

El desarrollo del IAEH es el resultado de un esfuerzo llevado a cabo entre la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y la World Wildlife Fund (WWF) - Perú y surge ante la necesidad de implementar el nuevo marco normativo sobre caudales ecológicos en el Perú, que señala que la Autoridad Nacional del Agua (ANA) a través de sus órganos desconcentrados denominados Autoridades Administrativas del Agua (AAA), pueden determinar 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 (ANA, 2019), sin embargo, la ANA aún no cuenta con una metodología para dicho fin 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, estuarios, lagos, laguna y humedales) debido a las intervenciones humanas; de tal manera que esta información sea el punto de partida para su posterior clasificación y asignación de caudales ecológicos.

El IAEH se basa en 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), propuestos por Vörösmarty et al. (2010), adaptados para el Perú por García y Tam (2023), 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 costosas remediaciones, con la finalidad de asegurar la seguridad hídrica global para los seres humanos y la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos continentales. Cabe destacar que una adaptación de los índices de Vörösmarty et al. (2010), hechos por Sood et al. (2017), ha sido considerado por las Naciones Unidas 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).

El IAEH puede aplicarse a cualquier ámbito geográfico y límites territoriales, y a distintas escalas de análisis, lo cual permite realizar una comparación relativa de sus resultados, y su aplicación puede extenderse a varios aspectos de la conservación y protección de cuerpos de agua, ecosistemas acuáticos, cabeceras de cuenca, en el marco de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) y de la gestión territorial y ambiental. Su nivel de desagregación es dependiente de la información con la que se cuenta, pudiéndose aplicar, como se indicó, en distintas escalas espaciales, sin embargo, en el marco de la implementación de la GIRH, se recomienda su uso por unidades hidrográficas (cuencas e intercuena), las cuales han sido delimitadas en el Perú con el método de Pfafstetter. En los siguientes capítulos se explica en detalle su cálculo y se muestra un ejemplo de su aplicación en la cuenca del río Pisco.

¿A QUIÉN ESTÁ DIRIGIDA LA PRESENTE GUÍA?

La presente guía para el cálculo del IAEH está dirigida a un público diverso. El público principal son aquellos especialistas y tomadores de decisiones interesados o involucrados en la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), el ordenamiento territorial y la gestión ambiental, quienes requieren de un método para cuantificar las amenazas antrópicas hacia los ecosistemas acuáticos de una cuenca e intercuenca (ríos, estuarios, lagos, lagunas y humedales) de manera detallada y a escala de subcuenca. Asimismo, la comunidad académica también puede estar interesada en su uso.

¿CÓMO ESTÁ ESTRUCTURADA LA PRESENTE GUÍA?

Las secciones de la presente guía se han organizado para orientar paso a paso al usuario sobre la construcción de los indicadores que se requieren para el cálculo del IAEH. La guía incluye un ejemplo de aplicación en la unidad hidrográfica Pisco, a nivel de las nueve unidades hidrográficas menores que la componen, cinco de tipo cuenca y cuatro de tipo intercuenca.

La guía inicia con una descripción general del proceso de construcción del Índice de Amenazas Ecohidrológicas (IAEH), la cual incluye un flujograma del proceso que involucra el cálculo y la integración de diez indicadores, agrupados en tres temas y la justificación de su selección. Continúa con la descripción de la información necesaria que se requiere para su cálculo, del ámbito geográfico y escala de análisis que se recomienda para su aplicación a nivel nacional. Luego se describe en detalle su aplicación, tomando como ejemplo el caso de estudio en la unidad hidrográfica Pisco en el Perú, en el cual se muestran los resultados obtenidos mediante mapas y tablas, que incluyen un mapa por cada indicador calculado y como resultado final el mapa del IAEH. Por último, la guía señala los usos del IAEH para la planificación y toma de decisiones en torno a la gestión integrada de los recursos hídricos, seguido de las limitaciones y retos que se tienen para mejorar el IAEH.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN DEL IAEH

La construcción del IAEH involucra la integración de diez indicadores, agrupados en tres temas: I) Recursos Hídricos-Cantidad, II) Recursos Hídricos-Calidad y III) Componente Biótico, que se calculan en un Sistemas de Información Geografía (SIG), y se estandarizan estadísticamente a fin de obtener como producto final un mapa que muestre su distribución a nivel de unidades hidrográficas (cuencas e intercuencas).

En la Figura 1 se muestra un resumen general del procedimiento de construcción del IAEH a través del cálculo y combinación de los diez indicadores divididos en tres temas que se han establecido para su cálculo, el cual se realiza mediante el uso de herramientas de análisis espacial de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y del análisis estadístico. El resultado es el IAEH, cuya distribución se muestra espacialmente mediante un mapa. Cada paso será descrito en detalle en las siguientes secciones.

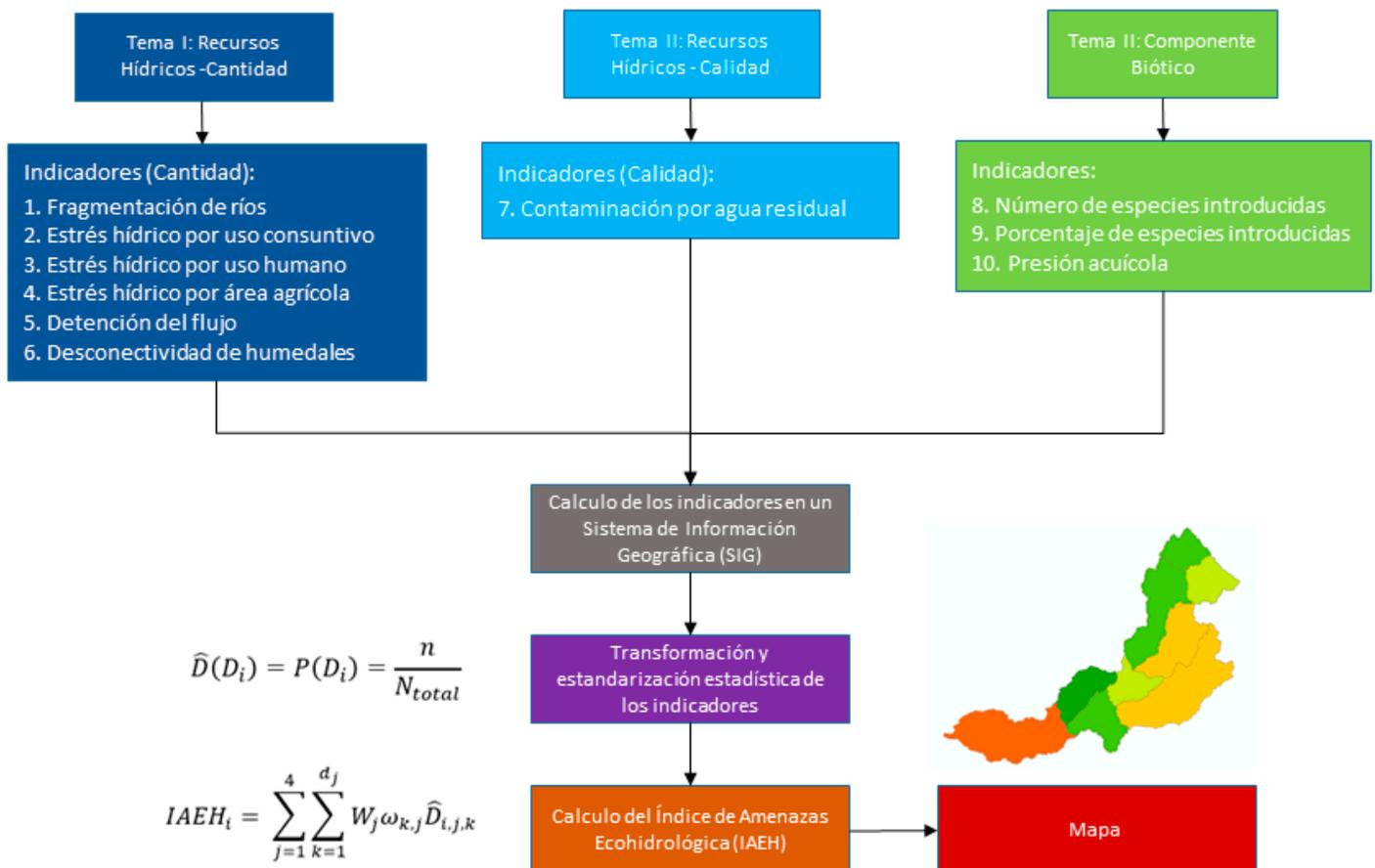


Figura 1. Flujograma para la construcción del Índice de Amenazas Ecohidrológicas-IAEH

SELECCIÓN DE TEMAS E INDICADORES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL IAEH

Para la construcción y cálculo del IAEH se seleccionaron diez indicadores, agrupados en tres temas que incluyen aspectos relacionados con la cantidad y calidad de los recursos hídricos, y una componente biótica. En la selección de los diez indicadores se consideró dos criterios: i) la relevancia de las intervenciones humanas que pueden generar impactos negativos en los ecosistemas acuáticos de la cuenca y ii) la disponibilidad de información libre que existe para su implementación a nivel nacional. Se tomó como referencia las variables incluidas en 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), propuestos por Vörösmarty et al. (2010) y adaptados para el Perú por García y Tam (2023), los cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Temas e indicadores para el cálculo del IAEH.

Tema I: Recursos Hídricos-Cantidad	
Indicadores	1. Fragmentación de ríos 2. Estrés hídrico por usos consuntivos 3. Estrés hídrico humano 4. Estrés hídrico agrícola 5. Detención del flujo 6. Desconectividad de lagunas y humedales
Tema II: Recursos Hídricos-Calidad	
Indicadores	7. Contaminación por aguas residuales
Tema III: Componente Biótico	
Indicadores	8. Número de especies introducidas 9. Porcentaje de especies introducidas 10. Presión acuícola

El cálculo de los indicadores mencionados en la Tabla 1 se realiza en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG) mediante las herramientas de análisis espacial y estadísticos con la finalidad de mostrar su distribución espacial a nivel de cada unidad hidrográfica (de tipo cuenca o intercuenca). Luego de su cálculo, los indicadores se estandarizan estadísticamente de manera que estén todos en el mismo rango de valores de 0 a 1, lo que a su vez, se interpreta que el valor de 0 es «sin amenazas» y el valor de 1 es «amenaza más alta», hacia los cuerpos de agua de la cuenca. Los diez indicadores estandarizados se integran mediante una suma ponderada que será el denominado IAEH. Esto último se hace usando un modelo desarrollado con la herramienta *model builder* de ArcGIS, como se muestra en la Figura 5. A continuación, se describe la información y metodología usada para el cálculo de cada uno de los diez indicadores del IAEH.

INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL IAEH

Unos de los criterios utilizados para la selección de los indicadores que componen cada tema considerado en el cálculo del IAEH fue la disponibilidad de la información que existe para su replicabilidad a nivel nacional. En esta guía se señalan las bases de datos de información, tanto espacial como alfanumérica, que se requieren para el cálculo del IAEH, así como las fuentes u organizaciones que la producen. Asimismo, se señala qué tipo de información por lo general se debe crear o mejorar con base en la experiencia de la aplicación del IAEH en el caso de estudio.

Se usó principalmente la información disponible de manera libre, que incluyó el uso de bases de datos geospaciales de variables hidrológicas, ecológicas y sociales provenientes de distintas fuentes y entidades, cuyo detalle se muestra en la Tabla 2. Las capas espaciales de humedales y áreas impermeables, por lo general, se deben generar para el área de interés, si es que no existe o no es representativa en la escala de análisis. Asimismo, se requiere contar con información de caudales medios mensuales naturalizados y generados en los puntos de salida de las UH de interés, que de no existir, se deben generar mediante modelo hidrológicos como el SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) o WEAP (Water Evaluation and Planning System), entre otros. En lo que respecta a la información de especies introducidas (no nativas), esta es la capa más difícil de conseguir, ya que los datos son mínimos y, por lo general, no están a escala de subcuenca, ya que requiere información de campo; sin embargo, se puede usar inventarios globales, publicaciones oficiales o artículos científicos que existan para el ámbito geográfico de interés o también en una primera aproximación, se puede usar la base de datos del catastro acuicola del Ministerio de la Producción (PRODUCE) y en el mejor de los casos generar dicha información.

Tabla 2. Información necesaria para el cálculo del IAEH.

Información geoespacial	Fuente
Embalses	Autoridad Nacional del Agua
Bocatomas	Autoridad Nacional del Agua
Canales	Autoridad Nacional del Agua
Punto de vertimiento de aguas residuales	Autoridad Nacional del Agua
Punto de salida de caudales	Autoridad Nacional del Agua
Unidades hidrográficas	Autoridad Nacional del Agua
Humedales*	Autoridad Nacional del Agua
Áreas impermeables*	Autoridad Nacional del Agua
Lagunas	Autoridad Nacional del Agua
Caudales de ríos**	Autoridad Nacional del Agua
Usos consuntivos	Autoridad Nacional del Agua
Capacidad de embalses	Autoridad Nacional del Agua
Caudal de vertimiento de aguas residuales	Autoridad Nacional del Agua
Red hidrográfica	Instituto Geográfico Nacional/Ministerio de Educación/Modelos de Elevación Digital
Número de especies introducidas***	Universidad Nacional Mayor de San Marcos/Ministerio de la Producción
Áreas agrícolas	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego
Áreas acuícolas	Ministerio de la Producción
Puentes	Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Red vial	Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Habitantes por centros poblados	Instituto Nacional de Estadística e Informática

* Por lo general, se debe generar con apoyo de imágenes de satélite para el ámbito geográfico de interés.

** Por lo general, se debe generar con apoyo de modelos hidrológicos en el ámbito geográfico de interés.

*** Por lo general, se debe generar con apoyo mediante la revisión de bibliografía o trabajos de campo en el ámbito geográfico de interés.

ÁMBITO GEOGRÁFICO Y ESCALA

Uno de los primeros pasos de la aplicación del IAEH en una unidad hidrográfica de interés es determinar la escala geográfica más apropiada. En ese sentido, se debe tener en consideración la metodología Pfafstetter de codificación de unidades hidrográficas, que fue aprobada para su aplicación en el país (MINAG, 2008) (Resolución Ministerial N° 033-2008-AG), y que constituye la referencia metodológica y cartográfica básica para el desarrollo de procesos de ordenamiento de cuencas hidrográficas en el país, tales como la determinación de la codificación de los cursos y cuerpos de agua: ríos, lagos, lagunas y embalses, estudios hidrológicos, estudios de ordenamiento territorial, entre otros. En ese sentido, conforme a dicha metodología, el Perú cuenta con 159 unidades hidrográficas base, 62 en la vertiente del Pacífico, 84 en la vertiente del Amazonas y 13 en la vertiente del lago Titicaca (Figura 2). Para la aplicación del IAEH a nivel nacional se recomienda la selección de una de las 159 UH base y calcular el IAEH para las unidades hidrográficas del nivel subsiguiente. Por ejemplo, si se selecciona la UH Pisco, dado que esta es de Nivel 5, el IAEH se calculará para las unidades hidrográficas del nivel menor siguiente, es decir, en el Nivel 6, como una primera aproximación para conocer su distribución espacial (Figura 3). Se debe tener en cuenta que a menor extensión de área de la UH de interés, se deberá generar mayor información para la aplicación del IAEH.

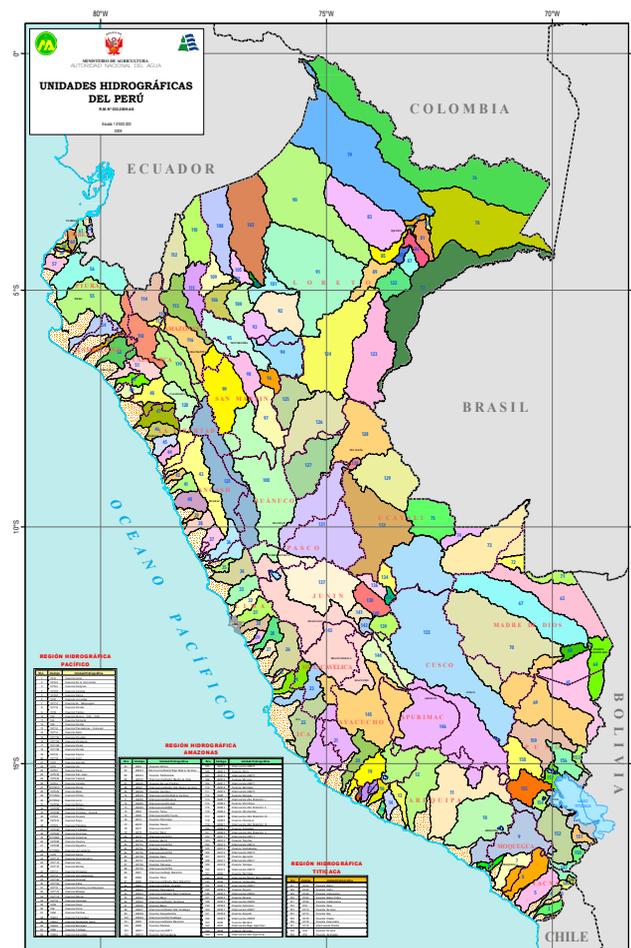


Figura 2. Mapa oficial de Unidades Hidrográficas (UH) del Perú.

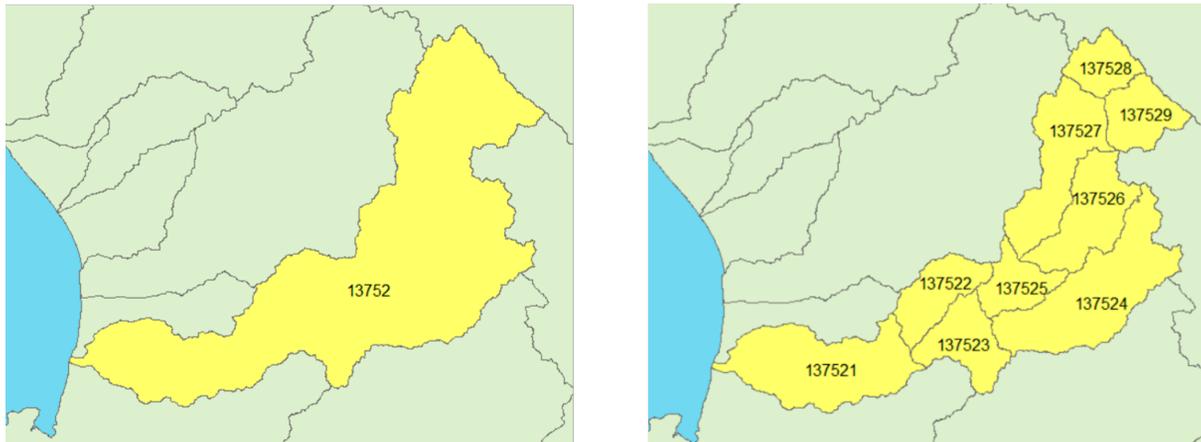


Figura 3. Escala de análisis: UH Pisco de nivel 5 (izquierda) y UH de nivel 6 (derecha).

TEMA I: RECURSOS 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, sin embargo, 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, lo cual se ve incrementado a medida que aumentan dichas intervenciones y los recursos son escasos. Este tema comprende seis indicadores: 1) fragmentación de ríos, 2) estrés hídrico por uso consuntivo, 3) estrés hídrico por uso humano, 4) estrés hídrico por área agrícola, 5) detención del flujo y 6) desconectividad de lagunas y humedales; cuya descripción y método de cálculo se detalla a continuación:

INDICADOR 1: FRAGMENTACIÓN DE RÍOS

Si bien la construcción de embalses o el represamiento de ríos y lagunas es una medida utilizada para el almacenamiento y regulación del agua como parte del afianzamiento hídrico de una cuenca, con el fin de destinarlo a los diferentes usos, sea poblacional o productivo; este tipo de obras de infraestructura tienen un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos, 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 este indicador, los impactos sobre la conectividad hidrológica que causan otras obras de infraestructura menores 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; Cote et al., 2009).

Para el cálculo del indicador se requieren las siguientes capas de información:

- Ubicación espacial de infraestructura (puentes, embalses, bocatomas, alcantarillas)
- Delimitación de unidades hidrográficas
- Red hidrográfica

El indicador se calcula dividiendo la cantidad total de embalses, puentes, bocatomas entre la longitud de la red hidrográfica y se expresa en número de infraestructuras por km de red hidrográfica (#/km). Otra forma más precisa de calcularlo es haciendo uso del algún índice de conectividad, como es el caso del Índice Dendrítico de Conectividad (DCI, por sus siglas en inglés), propuesto por Cote et al. (2009).

$$\text{Fragmentación de ríos} = \frac{\text{Infraestructura hidráulica y vial (\#)}}{\text{Longitud de ríos (km)}}$$

INDICADOR 2: ESTRÉS HÍDRICO POR USO CONSUNTIVO

El uso consuntivo del agua en la agricultura, industria, entre otros, puede poner en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico para los seres humanos y los ecosistemas acuáticos (Vörösmarty et al. 2010); sobre todo cuando el consumo o la asignación de derechos de agua es mayor con relación al caudal que produce la cuenca, lo cual puede poner a la cuenca en un escenario de estrés hídrico.

Para el cálculo el indicador se requieren las siguientes capas de información:

- Caudales medios anuales naturalizados
- Uso consuntivo agrícola e industrial
- Delimitación de unidades hidrográficas

El indicador se calcula dividiendo la cantidad total del volumen de agua correspondiente a los usos consuntivos entre el volumen medio anual naturalizado producido en la UH. Para su cálculo se debe tener en cuenta ir descontando los volúmenes, de aguas arriba a aguas abajo, de ser el caso,. Se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades.

$$\text{Estrés hídrico por uso consuntivo} = \frac{\text{Volumen total de usos consuntivos (hm}^3\text{)}}{\text{Oferta hídrica natural (hm}^3\text{)}}$$

INDICADOR 3: ESTRÉS HÍDRICO POR USO HUMANO

El concepto de estrés hídrico humano fue introducido mediante un índice por Falkenmark y Widstrand (1992) y está basado en el mínimo nivel de agua per cápita necesario para mantener una adecuada calidad de vida. Se resumen en 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 sobre la oferta o producción hídrica de la cuenca de la alta densidad de población humana y la baja disponibilidad natural de agua.

Para el cálculo del indicador se requieren las siguientes capas de información:

- Caudales medios anuales naturalizados
- Cantidad de población
- Delimitación de unidades hidrográficas.

El indicador se calcula dividiendo el volumen medio anual naturalizado entre la cantidad total de población. Se expresa en $\text{hm}^3/\text{persona}$. Los valores del indicador deben invertirse de manera que se siga la misma polaridad de los demás indicadores, es decir, de baja a alta amenaza. Una variante es considerar la dotación de agua poblacional según las recomendaciones nacionales e internacionales.

$$\text{Estrés hídrico por uso humano} = \frac{\text{Oferta hídrica natural (hm}^3\text{)}}{\text{Personas (\#)}}$$

INDICADOR 4: ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO POR ÁREA AGRÍCOLA

Según Vörösmarty et al. (2010), el estrés hídrico por las extensiones de áreas destinadas a la agricultura y es análogo al estrés hídrico por uso humano, y estima la presión que la actividad agrícola impone sobre los recursos hídricos. Por consiguiente, a mayor extensión de áreas dedicada a la agricultura, mayor es la competición potencial por el uso del agua entre la agricultura, que es por lo general, el mayor consumidor de agua, y los demás usos.

Para el cálculo del indicador se requieren las siguientes capas de información:

- Caudales medios anuales naturalizados
- Áreas agrícolas
- Delimitación de unidades hidrográficas.

El indicador se calcula dividiendo el caudal medio anual naturalizado entre la extensión del área agrícola. Se expresa en hm^3/km^2 . Los valores del indicador deben invertirse de manera que se siga la misma polaridad de los demás indicadores, es decir, de baja a alta amenaza.

$$\text{Índice de Estrés Hídrico Agrícola} = \frac{\text{Oferta hídrica natural (hm}^3\text{)}}{\text{Área agrícola (km}^2\text{)}}$$

INDICADOR 5: DETENCIÓN DEL FLUJO

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 (Vörösmarty et al. 2010). Las guías para el cálculo de caudales ecológicos se enfocan en imitar el régimen natural del flujo del río, tanto como sea posible bajo el denominado “paradigma del régimen natural del río” (Poff et al. 1997), para minimizar los impactos en la biodiversidad y los procesos ecológicos.

Para el cálculo del indicador se requieren las siguientes capas de información:

- Caudales medios anuales naturalizados
- Ubicación de embalses
- Ubicación de puntos de salida de las subcuencas
- Capacidad de embalses
- Delimitación de unidades hidrográficas
- Red hidrográfica

El indicador se calcula a través de una estimación del cambio del tiempo de residencia del agua en la red 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).

$$\text{Detención del flujo} = \frac{\text{Capacidad del embalse (hm}^3\text{)}}{\text{Oferta de agua natural (hm}^3\text{)}}$$

INDICADOR 6: DESCONECTIVIDAD DE RÍOS, LAGUNAS Y HUMEDALES

La desconectividad de ríos, lagunas y humedales se define como la proporción de estos cuerpos de agua ubicados en áreas agrícolas, urbanas o impermeables, bajo la asunción de que la ocupación humana perjudica las interconexiones físicas y biológicas entre ríos, lagos, estuarios, llanuras de inundación con sus humedales asociados (Convention on Wetlands, 2022, Vörösmarty et al. 2010). Muchos casos de desconectividad se generan a través del drenaje y destrucción de humedales, a fin de destinar dichas áreas para otros usos. Se debe señalar también que la 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, así como al permitir el relleno y cambio de uso de dichas áreas.

Para el cálculo del indicador se requieren las siguientes capas de información:

- Extensión de ríos, lagunas y humedales
- Extensión de áreas agrícolas
- Extensión de superficies impermeables
- Delimitación de unidades hidrográficas.

El indicador se calcula estimando la fracción de ríos, lagunas y humedales ocupada por áreas agrícolas e impermeables. Se genera un buffer de 90 metros con un enfoque precautorio para la protección de ríos, 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.

$$\text{Desconectividad de humedales} = \frac{\text{Área de ríos, lagunas y humedales (km}^2\text{)}}{\text{Área agrícola e impermeable (km}^2\text{)}}$$

TEMA II: RECURSOS 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 el vertimiento de agua residual. Este indicador se seleccionó con base en la información disponible actualmente sobre calidad del agua a nivel de subcuenca. Sin embargo, en la medida que exista mayor información disponible sobre la calidad del agua, se podrán incluir otros indicadores como los usados en Vörösmarty et al. (2010).

INDICADOR 7: CONTAMINACIÓN POR 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.

Para el cálculo del indicador se requieren las siguientes capas de información:

- Ubicación de fuentes contaminantes y caudal que se vierte hacia el cuerpo de agua
- Caudal medio anual naturalizado
- Delimitación de unidades hidrográficas

El indicador se calcula dividiendo el volumen medio anual de las descargas de agua residual entre el volumen medio anual de descarga en el punto de interés. Se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades. Mientras más detallado el modelo hidrológico se puede obtener una mejor aproximación.

$$\text{Contaminación por aguas residuales} = \frac{\text{Volumen de agua residual descargada (hm}^3\text{)}}{\text{Oferta de agua natural (hm}^3\text{)}}$$

TEMA III: COMPONENTE BIÓTICO

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 tres 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 (introducidas), 2) porcentaje de especies no-nativas y 3) 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 INTRODUCIDAS

Los diversos impactos negativos de las especies introducidas (no-nativas) sobre los ecosistemas acuáticos son una función del número absoluto de especies introducidas en cada UH (Vörösmarty et al., 2010). Del análisis de la información disponible en el Perú sobre peces a nivel nacional (Ortega et al. 2012), se evidencia en el país la falta de datos levantados a nivel de unidades hidrográficas menores (cuencas e intercuencas), lo cual es una limitante para la construcción de indicador. En ese sentido, se recomienda el uso de datos obtenidos de revistas científicas o publicaciones oficiales, usar de manera referencial la información del catastro acuícola de PRODUCE y en el mejor de los casos llevar a cabo estudios específicos. Con base en la clasificación propuesta por LePrieur et al. (2008), se propone reasignar los valores del indicador para que estén en el rango de 0 a 1 al igual que los demás indicadores calculados.

Para el cálculo del indicador se requieren las siguientes capas de información:

- Número de especies introducidas
- Delimitación de unidades hidrográficas.

Considerando la clasificación global propuesta por LePrieur et al. (2008), se adaptó una nueva clasificación teniendo en consideración el total de especies de peces consideradas como introducidas en el Perú (Ortega et al. 2012), obteniéndose las siguientes tres clases: 0-1, 1-5 y 5-19, las cuales se asignan a los valores 0, 0.5, y 1 respectivamente para la obtención final del indicador.

INDICADOR 9: PORCENTAJE DE ESPECIES INTRODUCIDAS

De acuerdo con Vörösmarty et al., (2010), el impacto negativo hacia los ecosistemas acuáticos que ocasionan las especies introducidas son una función también de la proporción que las especies introducidas representan del total de las especies acuáticas. En el caso del IAEH se considera las especies de peces nativos e introducidos. Debido a la falta de información a nivel de UH, para el cálculo de este indicador se usó de la misma manera que en el indicador anterior, la clasificación propuesta de LePrieur et al. (2008), que lo calcula como la ratio de la riqueza de especies acuáticas introducidas y la riqueza total de especies acuáticas. Posteriormente se reasignan los valores del indicador para que estén en el rango de 0 a 1 al igual que los demás indicadores calculados.

Para el cálculo del indicador se requieren las siguientes capas de información:

- número de especies de peces introducidas
- número total de especies de peces
- delimitación de unidades hidrográficas.

El indicador se calcula considerando la clasificación global propuesta por LePrieur et al. (2008), que considera tres clases: 0-5%, 5-25%, y 25-95%, y asignándoles los valores de 0, 0.5, y 1 respectivamente para la obtención del indicador final.

$$\text{Porcentaje de especies introducidas} = \frac{\text{Riqueza de especies introducidas (\#)}}{\text{Riqueza total de especies (\#)}}$$

INDICADOR 10: PRESIÓN ACUÍCOLA

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 (Vörösmarty et al. 2010). Sin embargo, como también lo señalan Vörösmarty et al. (2010), se debe indicar que se reconoce la importancia de la acuicultura para la seguridad alimentaria cuando se realiza adecuadamente. 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 introducidas no-nativas que pueden llegar a ser invasivas. También existe poca información detallada sobre la producción acuícola en los ríos del Perú. En ese sentido, con base en la información nacional que existe en el país, 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. Se consideró las categorías productivas de acuicultura que existen en el país, según la Ley General de Acuicultura de 2015, que incluye AREL, AMYPE y AMYGE, con base en esta información se asignó un peso a cada una en función de los límites de producción establecidos (<3.5, 0.5-150, <150 toneladas), es decir 0.05, 0.25 y 0.7 respectivamente, de esta manera además de incluir el número de derechos se considera el impacto que tiene en función de su producción.

Para el cálculo del indicador se requieren las siguientes capas de información:

- Ubicación de la actividad acuícola por categoría productiva de acuicultura
- Delimitación de unidades hidrográficas

El indicador se calcula mediante una suma ponderada considerando las categorías señaladas (AREL, AMYPE y AMYGE) y se expresa en el rango de 0 a 1 y no tienen unidades.

Tabla 3. Resumen de temas, indicadores y métrica.

Tema	Indicador	Métrica
I. Recursos Hídricos (Cantidad)	1. Fragmentación de ríos	#/km
	2. Estrés hídrico por usos consuntivos	Sin unidades
	3. Estrés hídrico humano	hm ³ /persona
	4. Estrés hídrico agrícola	hm ³ /km ²
	5. Detención del flujo	Años
	6. Desconectividad de ríos, lagunas y humedales	Sin unidades
II. Recursos Hídricos (Calidad)	7. Contaminación por aguas residuales	Sin unidades
III. Componente biótico	8. Número de especies introducidas	# de especies
	9. Porcentaje de especies introducidas	% de especies
	10. Presión acuícola	Sin unidades

TRANSFORMACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS INDICADORES

Sobre cada indicador se realiza una transformación estadística de los datos a fin de ubicarlos en una misma escala numérica. Debido a que los indicadores, por lo general, no siguen una distribución normal, se pueden usar algunas de las transformaciones estadísticas como la log normal, exponencial, gamma, transformación de Johnson o transformación de “Two-step” (Templeton, 2011) para aproximar los datos a una distribución normal, la cual se puede evaluar por medio de las pruebas 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 que, en lugar de calcularlo por celdas, se realice a nivel de subcuencas. La normalización es 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 siguiente

fórmula:

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

Donde \hat{D} es el valor del indicador estandarizado para la UH i , D_i es el valor del indicador normalizado, P es la probabilidad acumulada, n es el rango de D_i relativo a todas las UH ordenadas de modo ascendente, y N_{total} es el número total de UH. Este procedimiento escala los valores de los indicadores en el rango de 0 a 1 (0 sin amenazas y 1 amenaza más alta), reemplazando cada valor inicial del indicador con su percentil dentro de la frecuencia de distribución de valores a través de todas las UH.

Según Vörösmarty et al. (2010), la finalidad de este procedimiento es que todos los indicadores 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 los casos en que el valor de un indicador dado fue estimado con certeza en cero, dicho valor se excluyó de la estandarización FDA en la UH evaluada. Estos procedimientos se pueden aplicar en programas estadísticos como SPSS o Minitab.

DETERMINACIÓN DE PESOS DE LOS INDICADORES

En la presente propuesta metodológica se realizaron algunas modificaciones en la distribución y valores de los pesos considerados por Vörösmarty et al. (2010), conforme a la propuesta de temas e indicadores seleccionados para su uso en el Perú. Se asignó el peso de 0.25 a los temas I y II sobre recursos hídricos, y el peso de 0.5 al tema III, dándose la misma importancia a los temas sobre recursos hídricos y los temas biológicos, que son la base para la determinación de los caudales ecológicos, de manera que los tres temas sumen la unidad, En el caso de los tres indicadores del Tema III, se realizó un prorrateo entre los pesos asignados por Vörösmarty et al. (2010), de manera que sumen la unidad.

Si bien los pesos reflejan las opiniones de los especialistas a nivel global, García y Tam (2023) señalan 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, lo cual vuelve al método en cierto modo objetivo.

Tabla 4. Pesos relativos de los temas e indicadores para el cálculo del IAEH.

Nº	Tema Indicador	IAEH Peso Relativo
I	Recursos hídricos-Cantidad	0.25
1	Fragmentación de ríos	0.30
2	Estrés hídrico por usos consuntivos	0.22
3	Estrés hídrico humano	0.04
4	Estrés hídrico por áreas agrícolas	0.07
5	Detención del flujo	0.12
6	Desconectividad de lagunas y humedales	0.25
II	Recursos hídricos-Calidad	0.25
7	Contaminación por aguas residuales	1
III	Factores bióticos	0.5
8	Número de especies introducidas	0.32
9	Porcentaje de especies introducidas	0.37
10	Presión acuícola	0.30

Fuente: Adaptado de García y Tam (2023)

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE AMENAZA ECOHIDROLÓGICA (IAEH)

El IAEH se calcula usando la siguiente fórmula propuesta por Vörösmarty et al. (2010).

$$IAEH_i = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^{d_j} W_j \omega_{k,j} \hat{D}_{i,j,k}$$

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 $\hat{D}_{i,j,k}$ es el puntaje estandarizado del indicador k dentro del tema j para cada UH. W_j , de $j = 1, 2, \dots, 3$, suma 1, así como $\omega_{k,j}$ de $k = 1, 2, \dots, d_j$.

La integración de los tres temas y diez indicadores se realiza 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 de programación visual o gráficos. Estos modelos son una alternativa a la programación convencional ya que representan de manera visual flujos de trabajo que encadenan secuencias de herramientas de geoprocésamiento y suministran la salida para usarse en otra herramienta como entrada o insumo. El modelo construido para el cálculo del IAEH se muestra en la Figura 5 y es una adaptación del presentado por Garcia y Tam (2023).

Para la interpretación del IAEH los valores calculados en el rango de 0 a 1 se corresponden con un nivel de amenaza específico que se tomó de Kleynhans (1996), siendo 0-0.04 “ninguna” amenaza y de 0.8-1.0 amenaza “crítica”. Estos valores hacen referencia a las características actuales que se espera encontrar en los ecosistemas acuáticos dentro de la UH evaluada. La descripción de estas clases se muestra en detalle en la Tabla 5 y se tomaron de Kleynhans (1996).

Tabla 5. Rangos y descripción para la clasificación del IAEH.

Rango	Leyenda	Descripción
0.0-0.04	 Ninguna	Ningún impacto perceptible, o la modificación está ubicada de tal manera que no afecte la calidad, diversidad, tamaño y variabilidad.
0.04-0.2	 Baja	La modificación se limita a muy pocos sitios y el impacto en la calidad, diversidad, tamaño y variabilidad del hábitat también es muy pequeño.
0.2-0.4	 Moderada	Las modificaciones están presentes en un pequeño número de sitios y el impacto en la calidad, diversidad, tamaño y variabilidad del hábitat son también limitados.
0.4-0.6	 Alta	La modificación generalmente está presente con un impacto claramente perjudicial sobre la calidad, la diversidad, el tamaño y la variabilidad del hábitat. Sin embargo, grandes áreas no se ven influenciadas.
0.6-0.8	 Seria	La modificación está frecuentemente presente y la calidad del hábitat, diversidad, tamaño y variabilidad en casi la totalidad del área definida están afectadas. Sólo pequeñas áreas no se ven afectadas.
0.8-1.0	 Crítica	La modificación está presente en general con una intensidad elevada. La calidad, diversidad, tamaño y variabilidad del hábitat en casi toda el área definida se ven afectados negativamente.

Fuente: Tomado de Kleynhans (1996)

CASO DE ESTUDIO: UNIDAD HIDROGRÁFICA PISCO

La metodología para la construcción del IAEH se aplicó en la unidad hidrográfica Pisco en su siguiente nivel de delimitación que corresponde al nivel 6 de Pfafstetter. Su elección se debió a que cuenta con la información necesaria para el cálculo del IAEH, incluido un modelo hidrológico semidistribuido con caudales mensuales a nivel de unidades hidrográficas usando el modelo SWAT (ANA, 2022). El cálculo del IAEH se apoyó en el uso de herramientas estadísticas y geoespaciales SIG para estimar el nivel relativo de amenazas sobre los ecosistemas acuáticos, a nivel de las nueve unidades hidrográficas menores que la conforman.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es la cuenca del río Pisco, Perú, 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". Tiene una extensión de 4 208.7 km². 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 (Figura 4). 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.

La cuenca del río Pisco presenta distintas características hidrológicas, ecológicas, topográficas y socioeconómicas, con distintos niveles de intervención y usos del agua. En la parte alta de la cuenca predomina el uso del agua para fines ganaderos debido a la disponibilidad de pasturas y la existencia de lagunas y humedales conocidos como bofedales, la presencia de población es mínima. En la parte media, debido a las características topográficas con fuertes pendientes, presenta un limitado desarrollo agrícola en las márgenes del río Pisco, siendo el uso del agua para fines de riego y poblacional, pero no existen grandes ciudades. En la parte baja ocurren los mayores usos del agua debido a la intensa actividad agrícola que existe en el valle de Pisco y las mayores áreas urbanas como la ciudad de Pisco, capital provincial.

De acuerdo con la ANA (2022) en la cuenca existe una gran variación de la distribución espacial de las variables del balance hídrico debido a las características propias de la cuenca. La precipitación, evapotranspiración actual y el rendimiento hídrico fueron mayores en las subcuencas ubicadas en la ecorregión puna y en la serranía esteparia, que corresponde a la parte media y alta de la cuenca, mientras que en las subcuencas de la parte baja, ubicadas en la ecorregión desierto costero, se observó una muy baja precipitación, y una alta evapotranspiración actual y rendimiento hídrico, lo cual es atribuido a la actividad agrícola que existe en el valle de Pisco, y a los flujos de retorno procedentes de los excedentes de riego, debido a la baja eficiencia de riego.

FUENTE DE DATOS

Para el cálculo del IAEH en la UH Pisco se usó principalmente información disponible de manera libre, que incluyó el uso de bases de datos geospaciales de variables hidrológicas, ecológicas y sociales provenientes de distintas fuentes y entidades, conforme a lo señalado en la Tabla 1. En la construcción de los indicadores de cantidad de recursos hídricos, 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). En la construcción de los indicadores bióticos relacionados con la presencia de especies de peces introducidas en las UH se usó la información proporcionada por WWF-Perú.

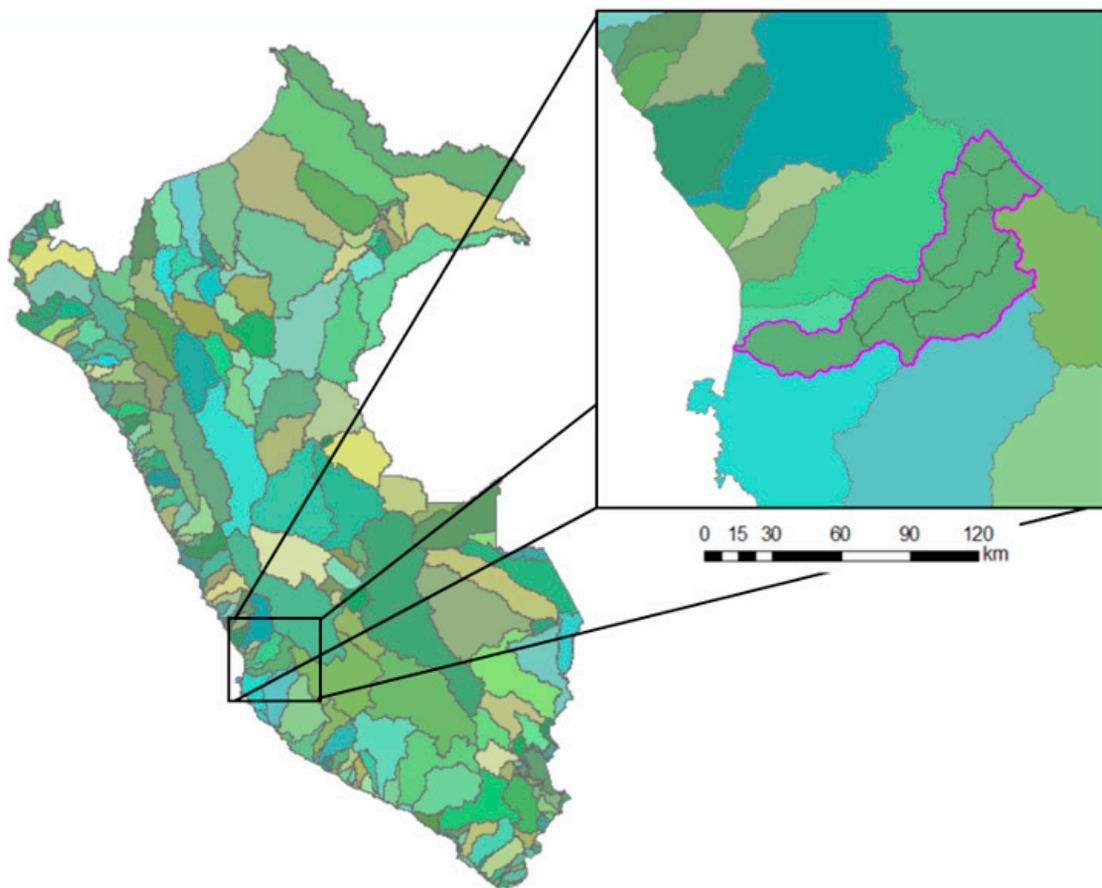


Figura 4. UH delimitadas a nivel nacional y UH menores que conforman la UH Pisco.

CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES

La construcción de los nueve indicadores se realizó usando las herramientas informáticas de análisis espacial del programa de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ArcGIS, el programa estadístico SPSS y el programa Excel. Cada indicador se construyó para las nueve unidades hidrográficas que conforman la cuenca del río Pisco. El procedimiento involucra en una primera etapa el geoprocesamiento de la información espacial que se requiere para construir cada indicador mediante la representación espacial de las variables dentro de cada una de las subcuencas usando el programa ArcGIS. Posteriormente se aplicó las fórmulas definidas en la presente guía para cada indicador con apoyo del programa Excel y el resultado numérico obtenido se llevó al programa SPSS en el cual se realizó la transformación y estandarización estadística de los datos, a fin de llevarlos al rango establecido de 0 a 1 mediante la transformación de dos pasos (Templeton, 2011). De esta manera se tuvo todos los indicadores en la misma escala numérica. Los valores estandarizados se incorporaron en la base de datos espacial SIG de la cuenca, asociando cada valor del indicador determinado con su respectiva unidad hidrográfica. Finalmente, se construyó un mapa por cada indicador conforme se muestra en la Figura 6, 7 y 8, a fin de visualizar espacialmente la variación de cada uno de los indicadores.

CÁLCULO DEL IAEH

Con los mapas de indicadores calculados en la etapa anterior, se procedió a calcular el IAEH. Se utilizó el programa ArcGIS y el modelo construido con la herramienta *Modelbuilder* que se muestra en la Figura 5, a fin de automatizar su cálculo. En dicho modelo se incluyeron los pesos definidos para cada indicador y para cada tema conforme a la Tabla 4 de la presente guía. El modelo se ejecutó y como resultado se obtuvieron los mapas ráster correspondientes a cada tema definido, y como producto final el mapa ráster del IAEH.

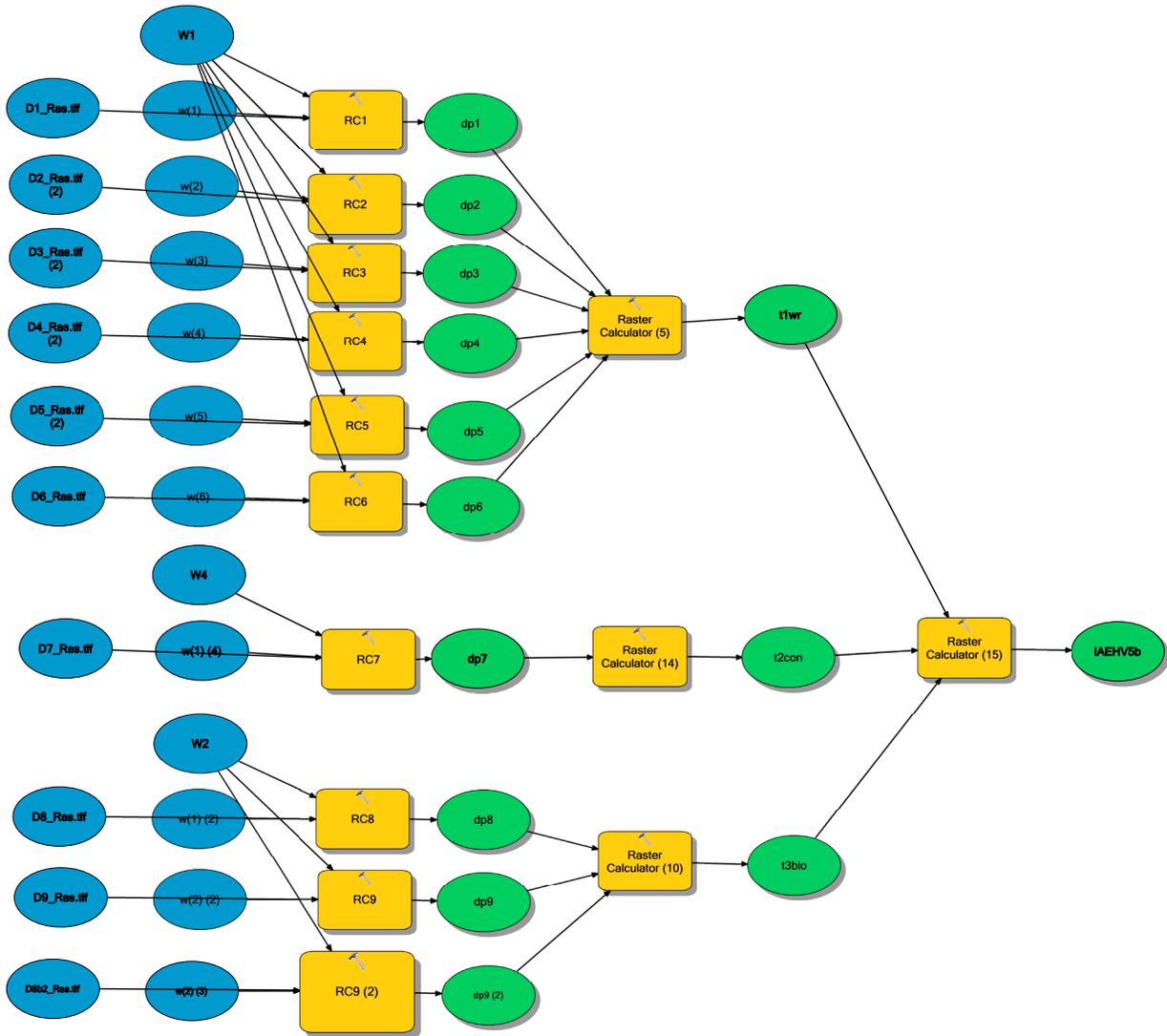


Figura 5. Modelo para el cálculo del IAEH construido con la herramienta Modelbuilder de ESRI.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos para cada uno de los diez indicadores y de su integración que es el denominado IAEH se muestran en la Figura 6, 7, y 8. A continuación, se describe los principales hallazgos encontrados producto de la interpretación de los indicadores conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, y de la leyenda del IAEH de la Tabla 5, construido con la integración de dichos indicadores.

INDICADORES PARA EL CÁLCULO DEL IAEH

- **Fragmentación de ríos**, se observó 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 la UH Huaytará y Incachaque ubicadas en la parte media alta y alta de la cuenca. En esta última, a pesar de ser una zona de baja intervención humana, la presencia de vías ha fragmentado la red hidrográfica, 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, mientras que en 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 (como es el caso de la laguna de 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.
- **Estrés hídrico por usos consuntivos**, se observó que el mayor estrés hídrico por uso consuntivos 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 Bajo 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 en dichas cuencas, presentan un menor estrés hídrico por usos consuntivos. En las UH Incachaque y Alto Pisco, debido al bajo uso consuntivo de agua que existe, estas UH no presentan estrés hídrico por usos consuntivos.

- **Estrés hídrico por usos humano**, se observó que el mayor estrés hídrico por uso humano del agua ocurre en la cuenca baja, en las UH Bajo Pisco y Veladero, seguido de la cuenca media alta en 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 que existe y la mayor oferta de agua. Se debe indicar que el valor calculado de este indicador es relativo, ya que está en función de los valores determinados en cada UH; sin embargo, si los comparamos con los estándares internacionales (Moore et al. 2015), ninguna de las UH presenta estrés hídrico humano. Pero este análisis, permite establecer una escala relativa de este indicador para el cálculo posterior del índice de amenazas ecohidrológicas en la cuenca.
- **Estrés hídrico por áreas agrícola**, se observó que el mayor estrés hídrico por la existencia de áreas 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. Los valores de este indicador varían en función de la extensión de las áreas bajo riego y la producción hídrica de cada UH.
- **Detención del flujo**, se observó que este indicador mostró una mayor variabilidad en la parte media alta de la cuenca. La mayor detención del flujo ocurrió 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 detención del flujo, mientras que la UH Incachaque no presenta detención 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.
- **Desconectividad de ríos, lagunas y humedales**, se observó conforme a la escala estandarizada en el rango de 0-1, que la mayor desconectividad de lagunas y humedales ocurre en la UH Bajo Pisco, debido principalmente a la existencia de extensas áreas agrícolas y urbanas, las cuales han contribuido a fragmentar las lagunas y 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 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. Las lagunas al tener una extensión considerable se han visto menos impactadas su área.

- **Contaminación por aguas residuales**, se observó que 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, 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.
- **Número de especies introducidas**, se observó que el mayor número de especies introducidas ocurre en la parte baja de la cuenca, en la UH Bajo Pisco. En las demás UH el valor del indicador es cero debido a la existencia de una sola especie o la ausencia de información para su cálculo. De manera general, se puede decir que los valores de este indicador variaron 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.
- **Porcentaje de especies introducidas**, se observó que el mayor porcentaje de especies introducidas con base en la riqueza total ocurre en la parte baja de la cuenca, en la UH Bajo Pisco. En las UH Veladero y Medio Bajo Pisco el valor del indicador es cero debido a la ausencia de información y a que no se identificaron especies introducidas respectivamente. En las UH Medio Pisco y Huaytará, el valor del porcentaje es moderado, mientras que en las UH Santuario, Medio Alto Pisco, Incachaque y Alto Pisco, se consideró una clase conservadora (moderada), ya que solo se tienen datos una especie introducida, y no de especies nativas. Del mismo modo que en indicador anterior, de manera general, se puede decir que los valores de este indicador variaron en función de la disponibilidad de información existente de especies introducidas y a la vez de las especies nativas, tanto en ríos, lagunas y humedales, y de las intervenciones antrópicas y de los usos de agua en la cuenca que modifican los hábitats de los ecosistemas acuáticos.
- **Presión acuícola** se observó 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 es cero. Los valores de este indicador variaron en función de la ubicación de los derechos acuícolas otorgados y la extensión de lagunas de área considerable para el desarrollo de esta actividad, lo cual ocurre, por lo general, en la parte alta de la cuenca.

Tabla 6. Rangos de clasificación y leyenda del IAEH.

Código UH	Nombre UH	FR	EHUC	EHUH	EHAA	DF	DLH	CAR	NEI	PEI	PA	IAEH
137521	Bajo Pisco	0.98	0.98	0.86	0.85	0.22	0.97	0.96	0.50	1.00	0.20	0.75
137522	Veladero	0.13	0.42	0.79	0.49	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
137523	Medio Bajo Pisco	0.35	0.35	0.28	0.37	0.30	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.15
137524	Huaytará	0.71	0.71	0.71	0.76	0.98	0.17	0.45	0.00	0.50	0.31	0.41
137525	Medio Pisco	0.28	0.28	0.01	0.02	0.38	0.00	0.26	0.00	0.50	0.00	0.21
137526	Santuario	0.50	0.59	0.64	0.59	0.56	0.58	0.58	0.00	0.50	0.44	0.45
137527	Medio Alto Pisco	0.42	0.50	0.57	0.67	0.46	0.26	0.00	0.00	0.50	0.00	0.20
137528	Incachaque	0.59	0.20	0.40	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.50	0.00	0.17
137529	Alto Pisco	0.20	0.13	0.49	0.00	0.68	0.45	0.16	0.00	0.50	0.92	0.35

FR= Fragmentación de ríos, EHUC= Estrés hídricos por usos consuntivos, EHUH= Estrés hídrico por usos humanos, EHAA= Estrés hídrico por áreas agrícolas, DF=Detención de flujo, DLH= Desconectividad de lagunas y humedales, CAR= Contaminación por aguas residuales, NEI= Número de especies introducidas, PEI= Porcentaje de especies introducidas, PA= Presión acuícola, y IAEH= Índice de Amenazas Ecohídrológicas.

EL ÍNDICE DE AMENAZAS ECOHIDROLÓGICAS

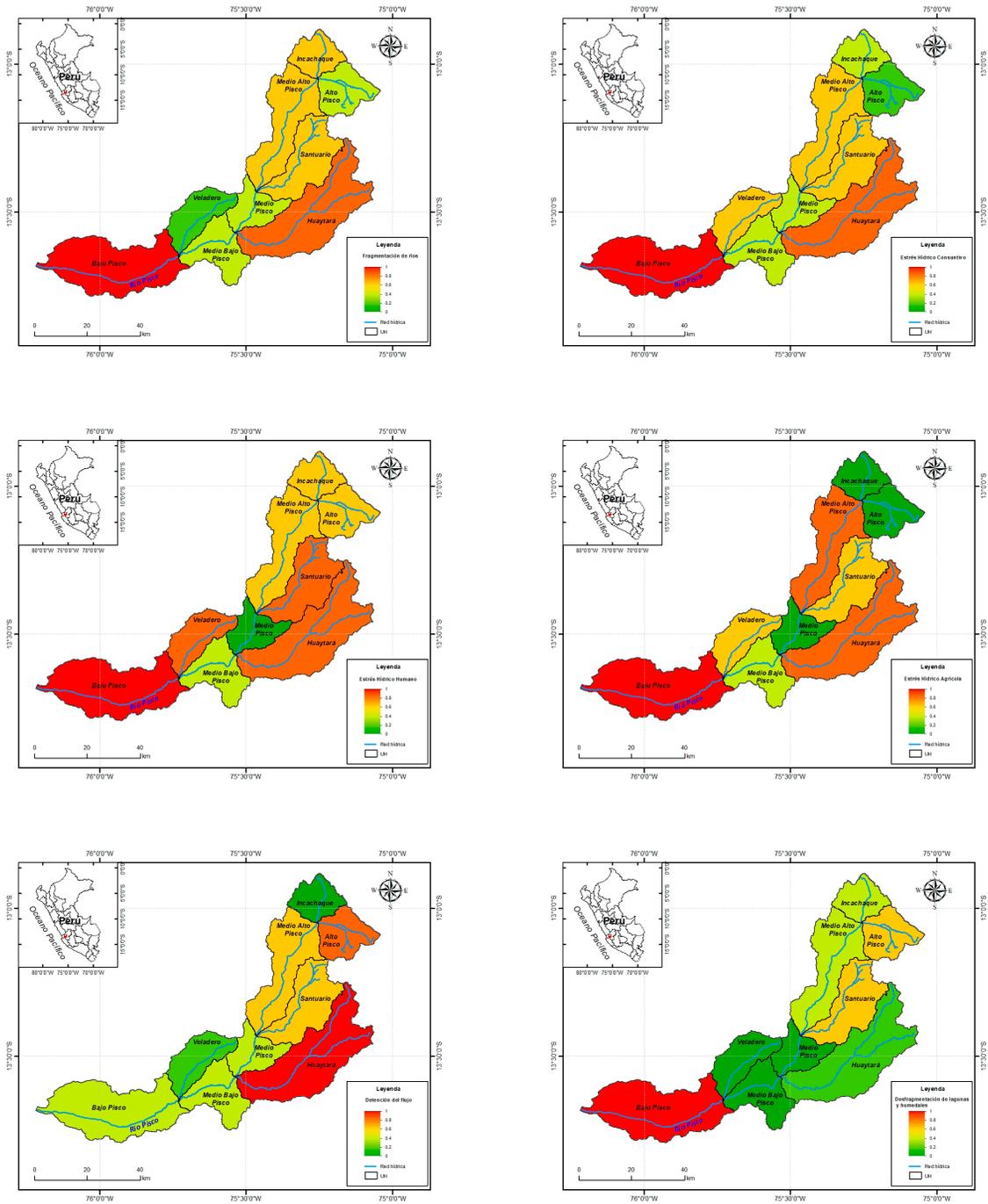


Figura 6. Mapa de los indicadores del Tema I: Recursos Hídricos - Cantidad.

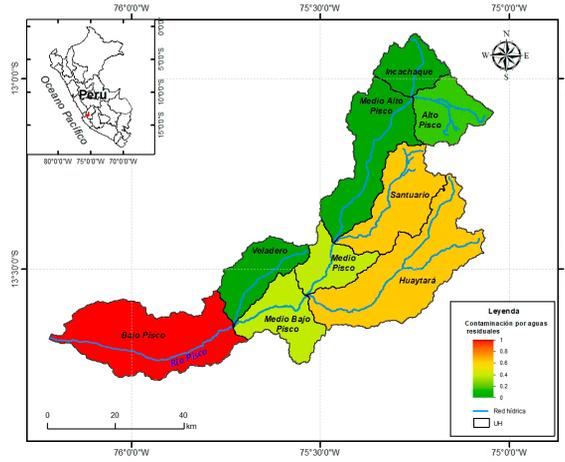


Figura 7. Mapa de los indicadores del Tema II: Recursos Hídricos - Calidad.

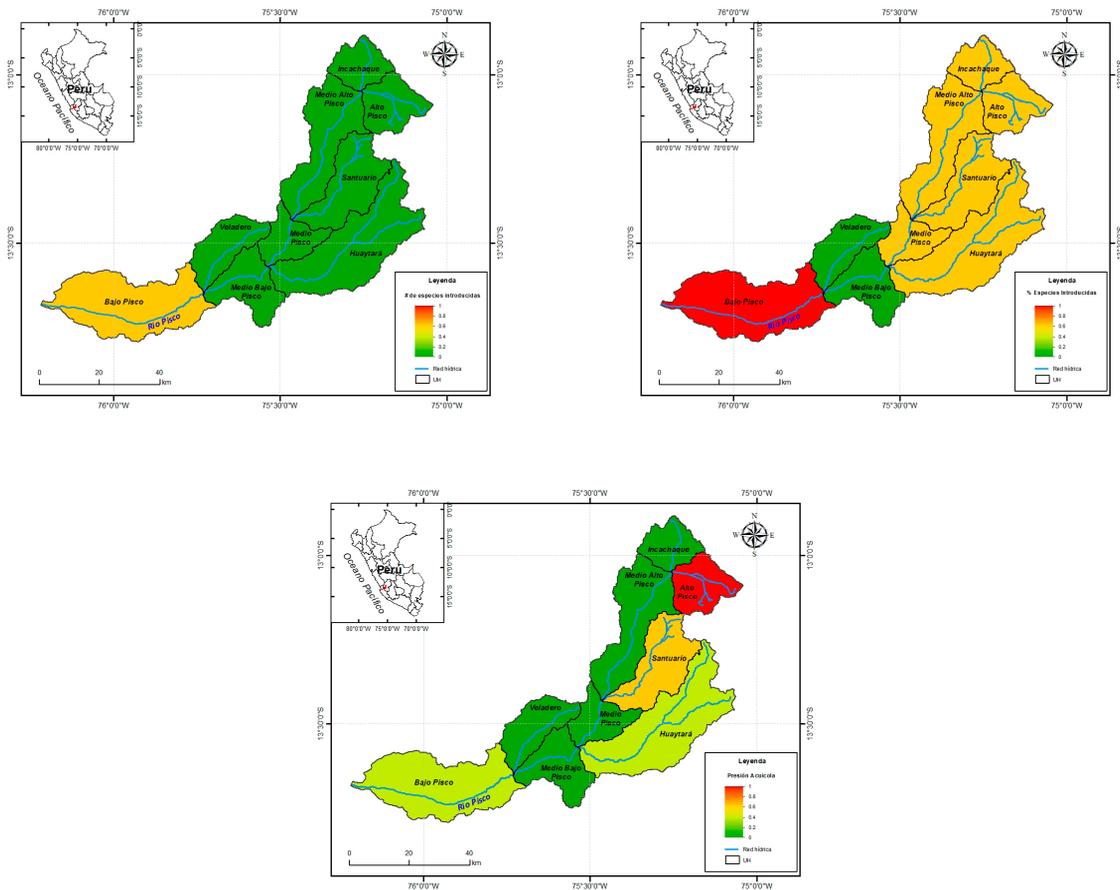


Figura 8. Mapa de los indicadores del Tema III: Componente Biótico.

CÁLCULO DEL IAEH

Los resultados del Índice de Amenaza Ecohidrológica (IAEH) a nivel de las nueve unidades hidrográficas menores de la UH Pisco se pueden ver en la Figura 9. De acuerdo al IAEH calculado, la UH Bajo Pisco se encuentra en la clase definida como amenaza «seria», que va del rango de 0.6 a 0.8. Las UH Santuario y Huaytará se encuentran en la clase definida como amenaza «alta», que va del rango de 0.4 a 0.6. Las UH Medio Pisco y Alto Pisco se encuentran en la clase definida como amenaza «moderada», que va del rango de 0.2 a 0.4. Las UH Medio Alto Pisco, Medio Bajo Pisco e Incachaque se encuentran en la clase definida como amenaza «baja», que va del rango de 0.04 a 0.2. De acuerdo al IAEH, existe una UH sin amenazas (Veladero) y no existen UH que estén dentro de la clase amenaza «crítica». Los resultados del IAEH para la UH Pisco indican que la mayor amenaza hacia los ecosistemas acuáticos ocurre en la parte baja de cuenca, donde se dan las mayores intervenciones antrópicas y los mayores usos del agua principalmente con fines de riego y consumo humano. Sin embargo, el potencial del cálculo del IAEH está en que permite jerarquizar el nivel de amenazas para cada una de las UH menores de nivel 6 que conforman la UH Pisco, mediante un análisis espacial integrado de las variables que influye en su cálculo. El IAEH es clave para la priorización de políticas públicas sobre gestión integrada de los recursos hídricos, medio ambiente, y ordenamiento territorial, de tal manera que las autoridades puedan contar con una herramienta objetiva, que les permita actuar de manera preventiva, y no solo reactiva, en la conservación de las fuentes de agua, sus bienes asociados y ecosistemas relacionados con el agua.

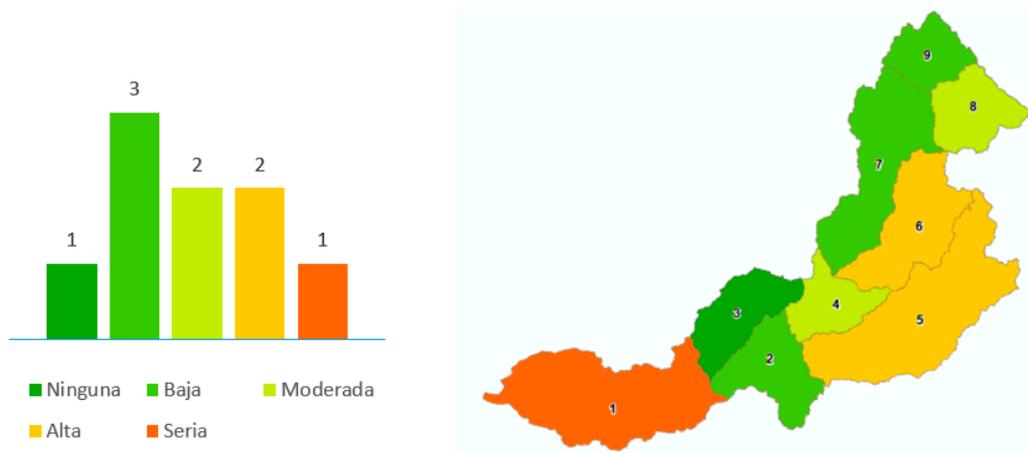


Figura 9. Mapa, gráfico y tabla de los resultados del IAEH en el ámbito de la UH Pisco.

USO DEL IAEH PARA LA PLANIFICACIÓN Y TOMA DE DECISIONES EN TORNO A LA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

El cálculo del IAEH ofrece muchas posibilidades para su uso en el marco de la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), en temas como la priorización detallada de los ámbitos de subcuenca para el cálculo de caudales ecológicos, delimitación de fajas marginales, declaración de zonas de protección de recursos hídricos, en la implementación de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos, y en el cumplimiento como país del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS 6, Metas 6.3, 6.4 y 6.6), entre otros.

El Índice de Amenazas Ecohidrológicas (IAEH) relaciona las características ecológicas, hidrológicas, y los aspectos socioeconómicos mediante el cálculo de diez indicadores a escala de subcuenca, considerando para ello los distintos niveles de delimitación de unidades hidrográficas que existen en el Perú, con la finalidad de determinar y jerarquizar el nivel de amenazas hacia los ecosistemas acuáticos (ríos, estuario, lagos, lagunas y humedales); en ese sentido, debido a que la mayor parte de la información usada es de acceso libre, su implementación puede replicarse en otras cuencas del país.

El IAEH se ha desarrollado principalmente con la finalidad de que pueda usarse como parte de la metodología de determinación de caudales ecológicos con fines de planificación hídrica que viene elaborando la ANA, como lo señala la R.J. N° 267-2019-ANA, en la cual se requiere estimar estado ecohidrológico actual de los ecosistemas acuáticos de las unidades hidrográficas del país, lo cual está directamente relacionado con el nivel de presiones y amenazas que existen en dichos ámbitos geográficos. En ese sentido el IAEH permitirá a la ANA contar con un insumo clave para efectuar la planificación de los recursos hídricos a nivel de cuenca y subcuencas, de tal manera que se use en la determinación de los caudales ecológicos para asegurar la conservación de los ecosistemas acuáticos y de la cuenca en el tiempo.

El cálculo del IAEH ofrece otras posibilidades para su uso en el marco de la implementación de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), por ejemplo, se puede usar en la priorización detallada para intervenciones en ámbitos de subcuenca en aspectos relacionados con la delimitación de fajas marginales, declaración de zonas de protección de recursos hídricos, en la elaboración de los planes de gestión de recursos hídricos por cuencas, en la implementación de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos, conservación de la infraestructura natural, el cumplimiento como país del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS 6, Metas 6.3, 6.4 y 6.6), de la Convención de Ramsar y la Convención de Diversidad Biológica entre otros.

Asimismo, los resultados obtenidos del cálculo del IAEH pueden contribuir con información relevante a los gobiernos regionales y locales para la toma de decisiones sobre la conservación, recuperación y protección de los ecosistemas acuáticos de sus ámbitos, apoyar con información relevante para la gestión territorial y ambiental de sus jurisdicciones. En ese sentido, el IAEH es una herramienta muy versátil, que se puede aplicar a distintas escalas de análisis y adaptarse en función de la información disponible, así como actualizarse en el tiempo cuando se genere mayor información para un área geográfica de interés. Asimismo, el IAEH puede evaluarse en el tiempo a fin de que se cumplan los objetivos deseados de conservación.

LIMITACIONES Y RETOS DEL IAEH

La aplicación del cálculo del IAEH es dependiente de la información que existe en la escala de análisis (cuena, subcuena, unidad hidrográfica menor). En ese sentido, aún hay varios retos que superar con respecto a la generación de información a nivel nacional, principalmente de información de caudales medios mensuales a nivel de unidades hidrográficas menores e información de especies nativas e introducidas. A medida que se vaya generando esta información, el IAEH se puede ir actualizando y mejorando.

El desarrollo y aplicación del Índice de Amenazas Ecohidrológicas (IAEH) representa una alternativa para evaluar las amenazas que actualmente existen sobre las fuentes de agua y sus bienes asociados y ecosistemas acuáticos, bajo el enfoque de gestión integrada de los recursos hídricos y ecosistémico, lo cual está alineado con los marcos internacionales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS6), la Convención de Ramsar y la Convención de Diversidad Biológica. Sin embargo, todavía presenta algunas limitaciones, ya que existen brechas de información que superar, 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, así como en 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, podrán incorporarse al modelo.

Se debe tener en cuenta que el procedimiento usado en el cálculo del IAEH trata de ser lo menos subjetivo al procesar la información mediante la normalización y estandarización estadística de los indicadores. En ese sentido, en última instancia se asignan los pesos a cada uno de los indicadores para así tener en cuenta el denominado juicio de expertos. Sin embargo, según García y Tam (2023) el resultado final del IAEH no se ve influenciado significativamente por estos pesos ($p < 0.05$), por lo que se puede concluir que los valores de las amenazas calculados en cada subcuena se deben, primariamente, a los patrones espaciales de los indicadores, lo cual vuelve al cálculo en cierto modo objetivo para su replicabilidad en otras cuenas del país. Otro aspecto a tener en cuenta es que el cálculo de IAEH es un proceso aditivo (García y Tam, 2023); en ese sentido, no representa las interacciones entre las distintas variables y las sinergias que se generan, ya que considera que los ecosistemas se encuentran en estado estacionario y la calidad ambiental se puede evaluar considerando sus variables de forma individual (Sánchez y Quinteros, 2017).

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 subdivisión de las unidades hidrográficas principales del Perú usando el método de Pfafstetter, información de la distribución de especies hidrobiológicas nativas e introducidas en cuerpos de agua continentales (ríos, lagunas y humedales), calidad del agua, a nivel de cuena y subcuena, así como la generación de caudales, a través de la instalación de más estaciones hidrométricas en las partes media y altas de las UH o la elaboración de modelos hidrológicos semidistribuidos.

REFERENCIAS

Autoridad Nacional del Agua (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.

Autoridad Nacional del Agua (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>.

Autoridad Nacional del Agua (ANA). 2018. Estudio Piloto Inventario de Humedales en el Ámbito de la ALA Pisco. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3310>.

Convention on Wetlands. 2022. Briefing Note No. 13: Wetlands and agriculture: impacts of farming practices and pathways to sustainability. Gland, Switzerland: Secretariat of the Convention on Wetlands. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn13_agriculture_e.pdf

Cote D., Kehler D., Bourne C. y Wiersma Y. 2009. A New Measure of Longitudinal Connectivity for Stream Networks. *Landscape Ecology*. 24. 101-113. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9283-y>.

Dickens C., Smakhtin V., Biancalani, R., Villholth K.G., Eriyagama N. y 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. y 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.

Fundación Peruana para la Conservación de la Naturaleza (ProNaturaleza). 2010. Humedales de la costa peruana. http://www.agrolalibertad.gob.pe/sites/default/files/humedales_de_la_costa_peruanavf.pdf

García Gonzales, E., y Tam Málaga, J. 2023. Propuesta de un Índice de Amenazas Ecohidrológicas para las Unidades Hidrográficas del Perú, Aplicado a la Cuenca del Río Pisco. *Ecología Aplicada*, 22(2), 91-104. <https://doi.org/10.21704/rea.v22i2.2085>

Kleynhans, C. J. 1996. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River (Limpopo system, South Africa). *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 5(1), 41-54. doi:10.1007/bf0069172810.1007/bf00691728

LePrieur F., Beauchard O., Blanchet S., Oberdorff T. y 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>.

Ministerio de Agricultura (MINAG). 2008. Aprueban Metodología de Codificación de Unidades Geográficas de Pfafstetter, Memoria Descriptiva y el Plano de Delimitación y Codificación de las Unidades Hidrográficas del Perú. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normaslegales/resolucionesministeriales/>

RESOLUCION_MINISTERIAL_N_033-2008-AG.pdf

Moore B.C., Coleman A.M., Wigmosta M.S., Skaggs R.L. y Venteris 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>.

Ortega H., Hidalgo M., Correa E., Espino J., Chocano L., Trevejo G., Meza-Vargas V., Cortijo A. y 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_usos_y_aspectos_de_conservacion.

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>.

Poff N., Tharme R. y Arthington A. 2017. Evolution of Environmental Flows Assessment Science, Principles, and Methodologies. In: Horne A.C., Angus Webb J., Stewardson M.J., Richter B. y 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.

Sánchez E. y 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>.

Sood A., Smakhtin V., Eriyagama N., Villholth K.G., Liyanage N., Wada Y., Ebrahim G. y 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>.

Vörösmarty C., Sharma K.K., Fekete B.M., Copeland A.H., Holden J., Marble J.C. y 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. y Davies P.M. 2010. Global Threats to Human Water Security and River Biodiversity. *Nature*, 467: 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>.



Autoridad Nacional del Agua