

MapBiomás Agua - PERÚ

Manual General

SUPERFICIE DE AGUA Y TIPOS DE CUERPOS DE AGUA SEGÚN SU
ORIGEN

Documento de base teórica sobre algoritmos (ATBD)

Colección 3, Versión 1

Equipo Perú:

Sandra Ríos, Nicole Moreno, Joaquin Romualdo, Cristhian Vega, Ricardo Valverde

Julio 2025



Tabla de contenido

1	Introducción	3
1.1.	Alcance y contenido del documento	3
1.2.	Descripción General	3
1.3.	Regionalización	4
1.4.	Ciencia y aplicaciones clave	6
2	Información general y antecedentes	6
2.1.	Contexto e información clave	7
2.2.	Perspectiva histórica: mapas existentes e iniciativas cartográficas	7
3	Metodología.	8
3.1.	Imágenes Landsat	8
3.2.	Algoritmo para la Detección de Superficies de Agua	9
3.2.1.	Análisis de mezcla espectral	9
3.2.2.	Clasificador subpíxel de superficie de agua (SWSC)	9
3.2.3.	Ajustes fundamentados en el uso de máscaras	10
3.2.4.	Obtención de Datos mensuales de agua	11
3.2.5	Obtención de Datos anuales de agua	12
3.2.6	Categorización de cuerpos de agua	12
4	Colección de mapas y análisis	13
4.1.	Área de agua superficial	14
4.2.	Transiciones de superficie de agua	15
4.3.	Tendencia de superficie de agua	16
4.4	Categorías de cuerpos de Agua	20
5	Consideraciones prácticas	20
6	Conclusiones finales y perspectivas	20
7	Referencias	21

1. Introducción

1.1. Alcance y contenido del documento

La finalidad de este Documento Base Teórico de Algoritmos (ATBD, por sus siglas en inglés) es proporcionar a los usuarios una guía detallada sobre los pasos metodológicos, contexto de regionalización y justificación de umbrales, que se utilizaron en la generación de los mapas de superficie de agua del Perú, pertenecientes a la Colección 3 de la iniciativa MapBiomás Agua Perú. En el caso específico del módulo de glaciares, los pasos metodológicos se encuentran descritos en Turpo et al. (2022).

Este documento también presenta una descripción general de la iniciativa MapBiomás Agua, un contexto histórico de la influencia del cambio climático en la dinámica del recurso hídrico, antecedentes en la detección de los cuerpos de agua.

1.2. Descripción General

Mapbiomas Agua es una iniciativa de la red MapBiomás, cuyo objetivo principal es mapear los cuerpos de agua superficiales en todo el territorio peruano (Figura 1) de manera mensual y anual, desde 1985 hasta 2024.

Esta iniciativa surge de un estudio previo realizado por Imazon y WWF-Brasil en el bioma amazónico brasileño, ampliado a la cuenca del Alto Paraguay, en el bioma Chaco, publicado en los últimos años (Souza *et al.* 2019). Este estudio mostró la posibilidad de mejorar la capacidad de la Iniciativa MapBiomás Cobertura y Uso de suelo para detectar y monitorear la dinámica de agua superficial en todos los biomas brasileños. A partir de este contexto, el grupo de trabajo de MapBiomás Agua expandió el mismo enfoque y metodología a todo el territorio brasileño.

Es así como en el 2022, a través de la alianza entre MapBiomás y la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG) se decide adaptar, extender y aplicar la metodología de MapBiomás Agua a los territorios completos de los países amazónicos para poder obtener y comprender la dinámica de agua en los diversos biomas de toda la región.

La metodología para mapear y monitorear el agua superficial se basa en la clasificación a nivel de subpíxel de las imágenes Landsat 5, 7 y 8, junto con el análisis espacial de los cuerpos de agua superficial para identificar los impactos antropogénicos y los efectos potenciales del cambio climático. Todo el procesamiento de datos se realizó en la plataforma en la nube Google Earth Engine.

Como resultado de esta iniciativa, se obtuvo la colección de mapas que incluyen los datos de: superficie de agua de manera mensual y anual, transiciones, tendencia, y como novedad de esta Colección 3, la clasificación de la superficie de agua entre cuerpos naturales y antrópicos.

Otro resultado destacado es que los mapas anuales de superficie de agua se integrarán como transversal en la Colección 3 de Cobertura y Uso de suelo de MapBiomias Perú.

Todos estos datos se encuentran publicados en el módulo de Agua de la plataforma web de Mapbiomas Perú, cuyo acceso es de dominio público. Tras el lanzamiento de esta plataforma, la iniciativa planea capacitar a los usuarios finales, incluidos el sector académico, el sector privado y el gobierno.



Figura 1. Territorio peruano.

1.3. Ciencia y aplicaciones clave

El conjunto de datos sobre la dinámica de los cuerpos de agua superficiales ayuda a comprender los sistemas acuáticos y su interacción con otros componentes del medio ambiente, siendo crucial para la toma de decisiones, aportando en la gestión de los recursos hídricos con enfoque en el desarrollo sostenible.

La información sobre el mapeo de agua superficial puede apoyar en: la planificación territorial integrada, monitoreo de los objetivos de desarrollo sostenible, iniciativas de gestión sostenible de agua, monitoreo de las concesiones de agua y pequeñas represas, apreciación de la calidad de los ecosistemas de agua dulce, investigación y evaluación de cambios en los cuerpos de agua y su relación con el cambio climático.

2. Información general y antecedentes

2.1. Contexto e información clave

Las condiciones de muchos ecosistemas de agua dulce se degradaron por las actividades antrópicas en las últimas décadas. Los cambios drásticos en el uso y la cobertura del suelo, la construcción de represas hidroeléctricas, la contaminación y el uso excesivo de los recursos hídricos para la producción de bienes y servicios han alterado la calidad y disponibilidad de agua en todo el mundo. Evidencia reciente muestra que las especies de agua dulce tienen tasas de extinción dos veces más altas que las terrestres (WWF, 2020). Además, las sequías extremas y las inundaciones relacionadas con el cambio climático han aumentado la presión sobre los depósitos de agua y los ecosistemas acuáticos.

Este escenario tiende a empeorar aún más, dado el aumento de la población mundial -que en 2022 sobrepasó los 8 mil millones de habitantes- y el uso de los recursos; a menos que se desarrollen estrategias integradas de gestión del agua será imposible alcanzar los objetivos globales de desarrollo sostenible. En esta perspectiva, evaluar de manera continua e histórica los cambios en la dinámica de la superficie de agua a escala continental es uno de los principales desafíos en la toma de decisiones sobre este preciado recurso (Oliveira y Souza, 2019).

Estos desafíos se aplican a los países amazónicos, donde existe la mayor proporción de agua per cápita del planeta, pero con una distribución y calidad no homogéneas. Ésto implica la necesidad de una toma de decisiones específicas considerando las diferentes características regionales y los efectos interconectados y acumulativos del uso de agua. Esto sólo será posible a través de datos e información detallada y consistente sobre la dinámica de la superficie de agua.

La novedosa metodología de mapeo de aguas superficiales adoptada por la iniciativa MapBiomás Agua ha permitido previamente identificar y cuantificar la dinámica de la superficie de agua dulce en los países amazónicos, especialmente en los humedales (Souza *et al.* 2019). Estos resultados han sido corroborados por un estudio de NASA-JPL que también apunta a una reducción del vapor de agua en la atmósfera de la cuenca amazónica (Barkhordarian *et al.*, 2019).

2.2. Perspectiva histórica: mapas existentes e iniciativas cartográficas

El uso de datos satelitales revolucionó la capacidad humana para mapear las aguas superficiales continentales y su dinámica. La combinación del acceso gratuito a los datos de Landsat vinculado con capacidades de procesamiento en la nube permitió el lanzamiento de un conjunto de datos globales de varias décadas sobre aguas superficiales:

Global Surface Water (GSW) (Donchyts *et al.* 2016, Pekel *et al.* 2016). Esta iniciativa brinda información sobre la extensión y la dinámica de agua superficial en toda la superficie de la Tierra, basándose en un análisis de más de 30 años de imágenes Landsat a nivel de píxel, con varias aplicaciones científicas y de gestión. Sin embargo, el uso directo de GSW a

nivel nacional sigue siendo un desafío por las limitaciones metodológicas en la detección de agua en llanuras aluviales, humedales y pequeñas masas de agua.

MapBiomás Agua busca superar algunas de estas limitaciones adoptando el mismo enfoque general de combinar datos Landsat con capacidades de computación en la nube, pero agregando algunas innovaciones metodológicas para mejorar la detección y mapeo de aguas superficiales. En particular, la iniciativa adopta un clasificador a nivel de subpíxel de aguas superficiales (SWSC), aplicado inicialmente al bioma de la Amazonía brasileña (Souza *et al.* 2019). En las siguientes secciones se presentan detalles de esta metodología.

3. Metodología.

La combinación de la serie histórica de imágenes Landsat junto con las facilidades del procesamiento en la nube proporcionadas por la plataforma Google Earth Engine, permitió a la iniciativa MapBiomás Agua producir el primer conjunto de datos de agua superficial para todos los países amazónicos. La Figura 2 muestra los principales pasos metodológicos que abarcan un clasificador de agua superficial a nivel de subpíxel (SWSC), árboles de decisión y procedimientos de post-clasificación para generar un conjunto de datos anuales y mensuales de agua superficial.

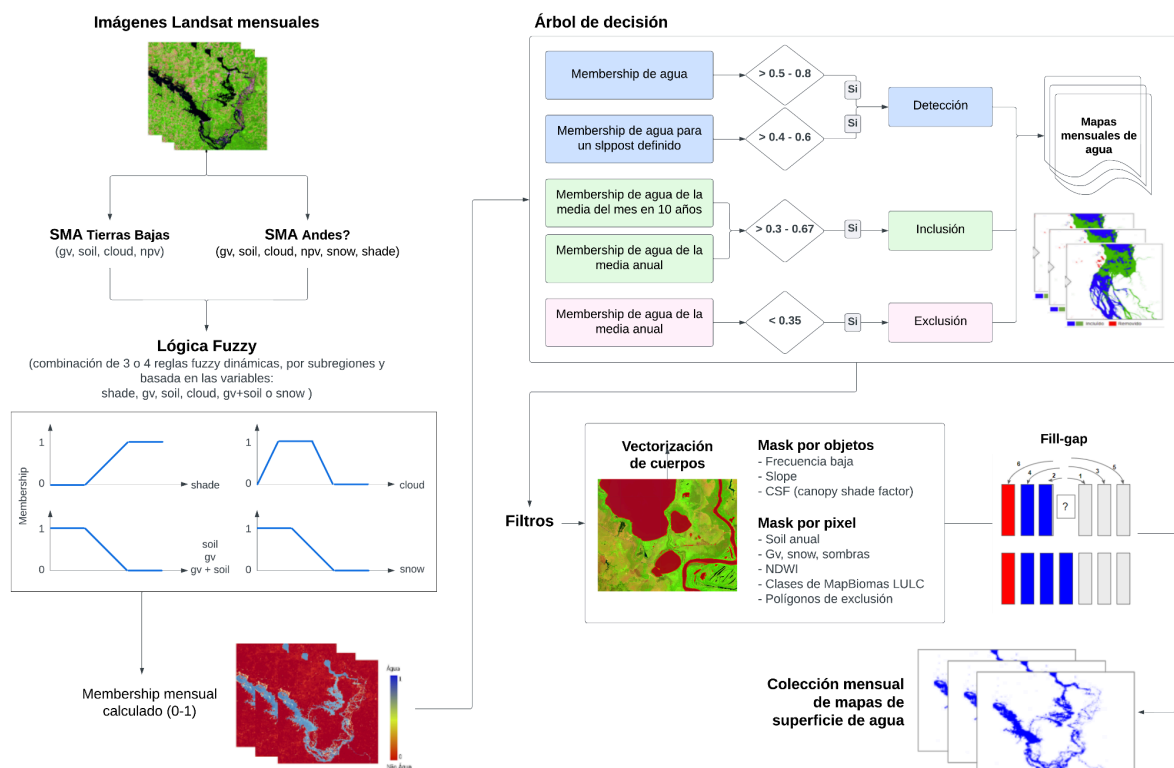


Figura 2. Proceso metodológico para producir los datos de superficie de agua, 1985-2024.

3.1. Imágenes Landsat

El proyecto utilizó imágenes del satélite Landsat, las cuales cuentan con una resolución espacial de 30 metros y están disponibles desde 1972 en la plataforma Google Earth Engine. El tamaño del píxel y su gran alcance temporal facilitan el objetivo de la iniciativa MapBiomás Agua de poder construir una serie histórica de más de 35 años con datos de superficie de agua, por lo que fueron las imágenes apropiadas para utilizarlas de insumo en esta iniciativa.

Es así que se utilizaron las imágenes de la Colección 2 Nivel 1 Surface Reflectance (SR) ortorectificadas a la superficie y los sensores Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Operational Land Imager (OLI), a bordo de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8, respectivamente.

Para mitigar la nubosidad presente en las escenas, se aplicaron los siguientes procedimientos:

- Filtrado de las escenas con una cobertura de nubes menor al 70% basado en el metadato “Cloud Cover” de las imágenes.
- Aplicación del algoritmo Cloud Score, aplicando un umbral de “Cloud Thresh” de 30.
- Aplicación de máscaras en base a las bandas de calidad (“QA Pixel”), seleccionando los bits 3 y 5 (Cloud y Snow respectivamente).

3.2. Regionalización

La regionalización en Perú (representados en la Figura 3) surge debido a la heterogeneidad y particularidad que caracteriza a la geografía de nuestro país, por lo que la metodología de clasificación de cuerpos de agua aplicada por MapBiomás Agua fue adaptada para regiones específicas.

El criterio de división de estas regiones se basó tomando como punto de partida los cuatro biomas más importantes del país: costa, andes, amazonía alta y amazonía baja. Al ver que la heterogeneidad espectral de los cuerpos de agua aún existía incluso dentro de un mismo bioma (un ejemplo se puede apreciar en la Tabla 1), se subregionalizó en base a estos criterios:

Subregión	Código	Cloud	GV	NPV	Shade	Snow	Soil
Costa centro 03	1333	5.51	6.72	0.03	82.50	0.72	2.54
Costa norte 04	1328	2.24	4.65	0.00	88.66	1.03	1.73
Andes centro 04	1320	4.47	7.61	0.01	75.42	0.12	10.17
Andes glaciares	1318	1.06	0	0.02	84.19	12.96	0.01
Amazonía alta norte 03	1304	1.48	12.13	0.09	81.20	0.28	3.05
Amazonía alta sur 03	1309	1.20	8.35	0.01	87.91	0.13	0.87

Tabla 1. Ejemplo de parametrización de algunas regiones de clasificación en distintos biomas.

- Regiones de clasificación propuestas en la iniciativa MapBiomás Cobertura y Uso.
- Criterios propios basados en la distribución geográfica de los cuerpos de agua.
- Criterios específicos basados en una determinada clase de cuerpo de agua, como la región de costa norte camaroneras, costa norte humedales y la región de glaciares.

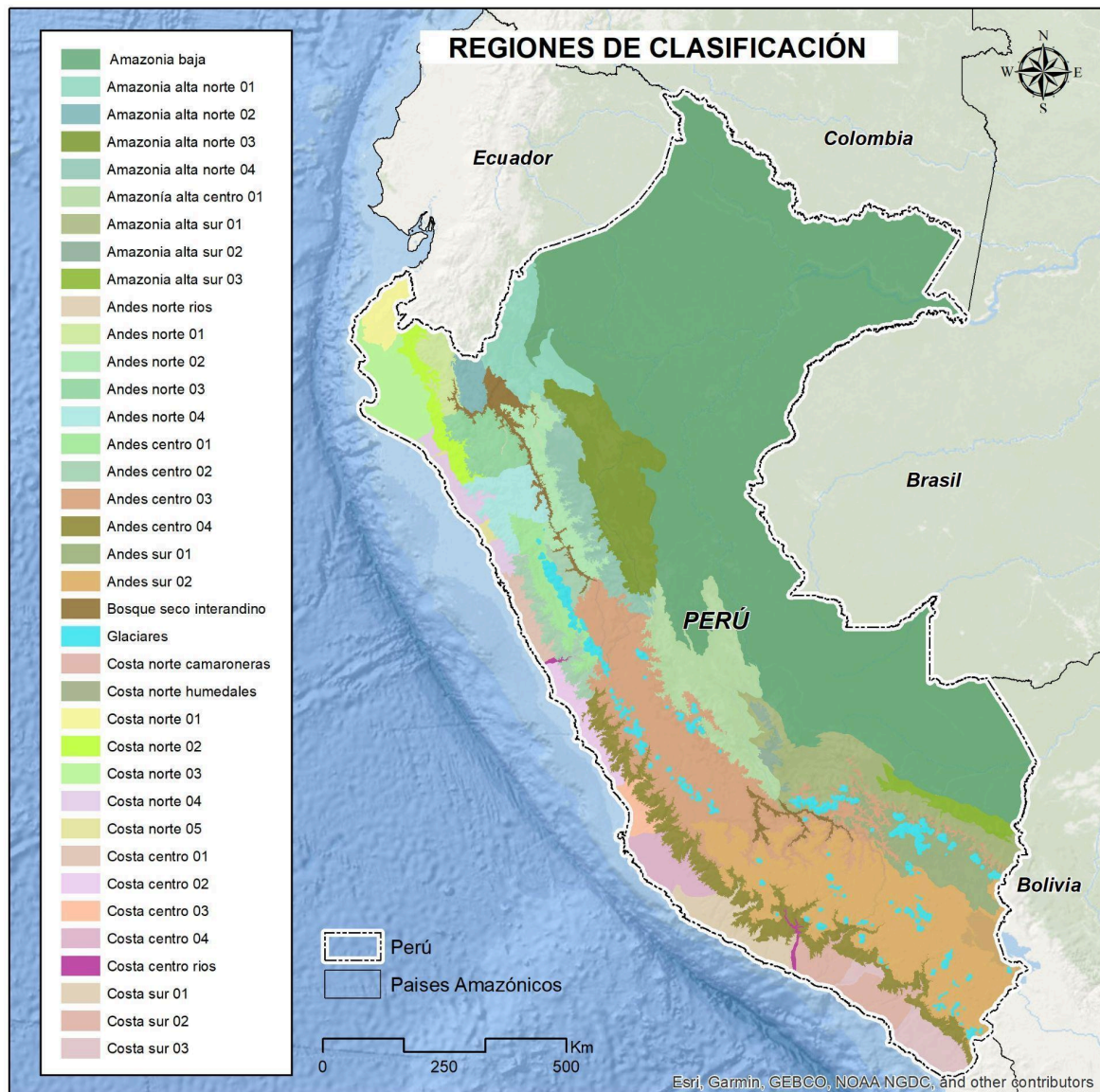


Figura 3. Regionalización de Perú

Para esta Colección 3 se puso mayor énfasis en mejorar la detección de costa y andes, por lo que, como resultado, se obtuvieron un total de 37 subregiones, las cuales son 15 subregiones más respecto a la Colección 1. La distribución de las subregiones por biomasa se puede apreciar en la Tabla 2.

Bioma	# de regiones
Amazonía Baja	1
Amazonía Alta	8
Andes	13
Costa	15

Tabla 2. Número de regiones de clasificación en Perú.

3.2. Algoritmo para la Detección de Superficies de Agua

3.2.1. Análisis de mezcla espectral

El Análisis de Mezcla Espectral (SMA – por sus siglas en inglés) es una técnica que permite estimar la composición fraccional de píxeles en una combinación de endmembers. Los endmembers son firmas espectrales puras de los materiales que componen el píxel. La información a nivel de subpíxel obtenida con SMA es útil para caracterizar el agua superficial con mezcla de otros componentes, por ejemplo, suelo y vegetación, superando así la limitación de los clasificadores de píxeles completos, permitiendo el mapeo de humedales, llanuras aluviales, ríos estrechos y pequeños cuerpos de agua.

Para la iniciativa MapBiomás Agua se utilizaron 6 endmembers: vegetación verde (GV), vegetación no fotosintética (NPV), suelo (Soil), nubes (Cloud), sombra (Shade) y nieve (Snow), los cuales se obtuvieron en base a una librería genérica para las imágenes Landsat, basada en los valores de las bandas: rojo, verde, azul (bandas visibles), infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta 1 e infrarrojo de onda corta 2. Debido a la regionalización, se presentan dos casos:

- i) En las regiones de amazonía/tierras bajas se aplica en cada píxel el SMA utilizando cuatro endmembers para calcular las fracciones de GV, Soil, NPV y Cloud. Para la fracción de shade se utiliza la sombra fotométrica (reflectancia cero en todas las bandas) y se calcula mediante la sustracción de la suma de GV, Soil, Cloud y NPV a 1.
- ii) En las regiones de andes, transición con amazonía y pacífico, se calculan las fracciones directamente utilizando seis endmembers en el SMA (GV, Soil, NPV, Cloud, Snow y Shade).

3.2.2. Clasificador subpíxel de superficie de agua (SWSC)

El algoritmo clasificador subpíxel de agua superficial (SWSC) utiliza reglas de transición (Figura 4) a lo largo de los umbrales fraccionarios de los endmembers, utilizando un conjunto de funciones lineales basadas en lógicas difusas (reglas fuzzy) independientes, en las que se determina el grado de verdad/certeza (membership) de que un píxel Landsat es clasificado como agua.

Los endmembers utilizados para la detección de agua son Shade, Gv, Soil, Cloud y Snow. Debido a que el agua absorbe gran parte de la radiación electromagnética en las bandas visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta de Landsat, el SWSC utiliza la fracción Shade para clasificar la mayoría de los píxeles como agua superficial. En segundo lugar, se utilizan las fracciones de GV y Soil para cuantificar la mezcla de agua superficial con vegetación y suelo. Esta agua superficial mezclada se encuentra a lo largo de los bordes de cuerpos de agua, en ríos estrechos, en ecosistemas de llanuras aluviales y humedales. También, se incluye la fracción de Cloud residual para detectar agua superficial con alta carga de sedimentos. Esta fracción residual de Cloud se debe a la ambigüedad espectral del endmember de Cloudy Soil. De hecho, el modelo de fracción de Cloud residual se debe a la respuesta espectral del endmember de Soil en píxeles libres de nubes. Finalmente, la fracción Snow se usa para detectar las lagunas de origen glaciar, que, a comparación de las lagunas de origen no glaciar, presentan menor absorción en las bandas visibles.

Debido a la regionalización, para cada subregión se utilizan los endmembers y umbrales que mejor se adecúen a la detección de agua. Para seleccionar estos datos, se hizo un muestreo de puntos de agua/no agua en cada subregión para obtener estadísticos como promedio, mediana, desviación estándar y varianza. En base a este análisis se seleccionaron los endmembers que mayor diferencia tenían entre las clases agua/no agua, y en base al valor del promedio se determinaron umbrales que favorezcan la detección de la clase agua, y la no detección de la clase no agua, para así reducir el número de píxeles de falsos positivos (falsa detección de agua).

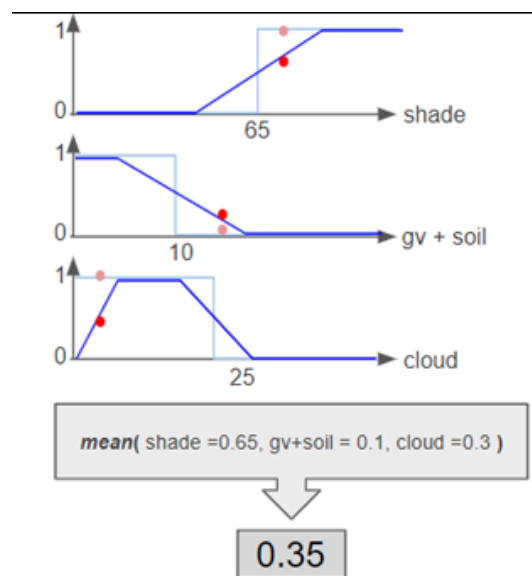


Figura 4. Reglas de transición del clasificador subpíxel de agua superficial. En este ejemplo se aplica una lógica fuzzy para cada endmember y en base a los valores del píxel y los umbrales escogidos, se obtiene la probabilidad final de que sea agua superficial o no.

Luego se calcula el grado de verdad utilizando un peso específico para cada endmember, y finalmente, obtener un mapa continuo de memberships con valores que oscilan entre 0 y 1. En base a estos memberships, se clasifican los píxeles Landsat para producir capas de

agua superficial mensuales en base a un umbral $> 0.5 - 0.68$ que varía dependiendo de cada subregión. Los valores de los umbrales y pesos de cada endmember, así como el umbral de detección de agua se detallan en la Tabla 3: [Nuevos umbrales - c3](#)

3.2.3. Ajustes fundamentados en el uso de máscaras

- **SLPPOST:** Para producir los mapas mensuales de agua superficial, primero se generaron los mapas de memberships mensuales, calculando la mediana de los memberships de los píxeles entre las escenas Landsat disponibles para cada mes. Después, se clasificaron los píxeles como agua en base a condicionales basada en el slppost (pendiente estratificada): si el píxel cumple con ser menor a un determinado umbral de slppost, se utiliza un umbral de detección de agua $> 0.5 - 0.8$ (el valor varía en función de las regiones de clasificación), mientras que, si el píxel es mayor al umbral de slppost, se utiliza un umbral de detección de agua mayor $> 0.8 - 0.9$ (igualmente varía en función de la región de clasificación). Esto con la finalidad de reducir la detección de falsos positivos (sombras provocadas por la pendiente de la zona andina), que comúnmente se confunden con el agua debido a su similitud en su firma espectral. Así, se obtienen las series temporales mensuales de agua desde 1985 a 2024.
- **Pendiente topográfica:** Una vez detectada el agua, se utiliza la pendiente generada del DEM SRTM disponible en Google Earth Engine como una máscara que ayuda a reducir los falsos positivos. Se utiliza un valor variable entre 10 y 30 que varía en función a la región de clasificación para enmascarar píxeles que sean mayores al valor seleccionado.
- **CSF:** Factor de Sombra de Dosel (CSD, por sus siglas en inglés: *Canopy Shade Factor*) es una estimación de la cobertura vegetal y su densidad, basada en la cantidad de luz solar que es interceptada por las copas de los árboles y otras plantas. Este índice en particular es utilizado para enmascarar algunos sitios particulares que clasificaban como agua dentro de áreas con vegetación.
- **NDWI** El Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI, por sus siglas en inglés: *Normalized Difference Water Index*) es un índice espectral ampliamente utilizado en el procesamiento de imágenes satelitales sobre todo en el mapeo de cuerpos de agua. Este índice aprovecha las diferencias en la reflectancia de la luz en las bandas del espectro electromagnético, especialmente en las bandas del verde y del infrarrojo cercano (NIR), para resaltar la presencia de agua. Para el cálculo de este índice se utilizaron imágenes Landsat tope de atmósfera (TOA) para enmascarar y atenuar problemas especialmente por pendientes y sombras de pendientes.
- **Máscaras de cobertura:** A partir de los productos de Cobertura y Uso de suelo de MapBiomás Amazonía (colección 6), MapBiomás Perú (colección 2 y 3), se disponen de un conjunto de clases (como uso urbano, uso agropecuario, etc.) que sirven de insumo para correr un nuevo proceso de enmascaramiento, y así reducir potenciales falsos positivos.

3.2.4. Obtención de Datos mensuales de agua

Los mapas mensuales se complementaron con procedimientos para restaurar falsos negativos y remover falsos positivos, basados en métricas temporales (Figura 5). Primero, se calculó la mediana del membership de agua para todo el año (es decir, la mediana intra anual), además de la mediana decenal de cada mes. Luego se aplicó un relleno de vacíos

para reclasificar como agua aquellos píxeles que eventualmente fueron cubiertos por nubes o dentro de áreas donde no existían escenas Landsat durante un mes determinado, usando una combinación de dos reglas: probabilidad mediana dentro del año $> 0.35 - 0.7$ y la mediana decenal del mes correspondiente $> 0.2 - 0.55$, donde el umbral varía en función de las regiones de clasificación. Por último, la presencia de sombras de nubes u otros objetos oscuros en la escena Landsat también puede producir falsos positivos en la clasificación de agua, por lo que se aplicó un filtro de remoción para reclasificar como no agua aquellos píxeles con una mediana del membership mensual < 0.35 .

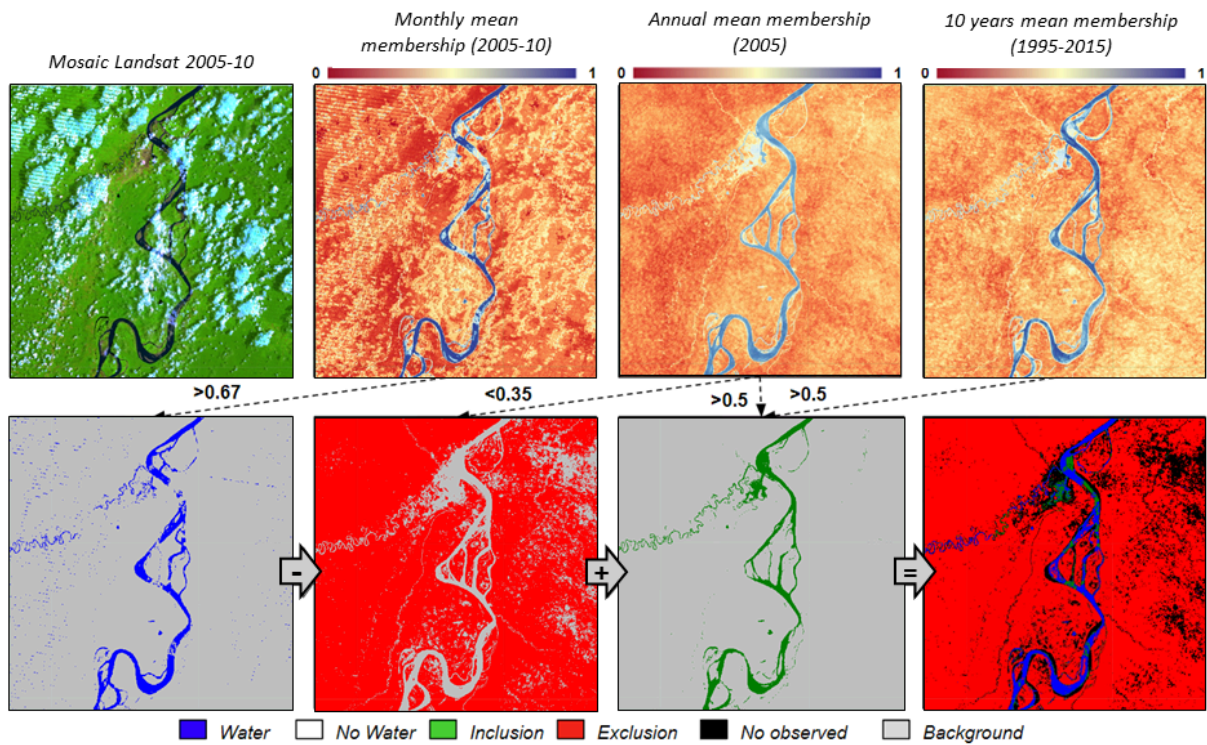


Figura 5. a: Mosaico Landsat mensual; b: Membership mediana mensual de SWSC; c: Membership mediana mensual anual de SWSC; d: Membership mediana mensual decenal de SWSC; e: Clasificación mensual de agua superficial; f: Agua superficial total por decenio; g: Área que probablemente sea agua superficial basado en los umbrales de c y d. h: Mapa final de agua superficial del mes, con inclusión y remoción correspondiente.

3.2.5. Obtención de Datos anuales de agua

Los mapas anuales de agua superficial incluyen una identificación entre agua permanente y estacional. Esta clasificación se basa en umbrales correspondientes al número de meses en que un píxel se clasifica como agua. Para el primer caso se considera una frecuencia ≥ 6 meses, y para el segundo, una frecuencia entre 1 a 5 meses. La definición del umbral de agua permanente se basa en la existencia de una temporada seca y otra húmeda, en gran parte de las regiones, de tal manera que se abarcan todos los cuerpos de agua permanentes que son naturalmente más dinámicos.

3.2.6. Categorización de cuerpos de agua

El mapeo de la superficie de agua se organizó en un esquema de clasificación de cuerpos de agua de 8 categorías: 1) Ríos, lagos, lagunas, 2) Agropecuario y otros, 3) Hidroeléctricas, 4) Agua de minería, 5) Acuicultura y 6) Lagunas reguladas 7) Lagunas de origen glaciar y 8) Falsos positivos, esta última como un subproducto de la clasificación para eliminar algunos casos de falsos positivos no deseados que persistían en las colecciones mensuales y anuales de superficie de agua.

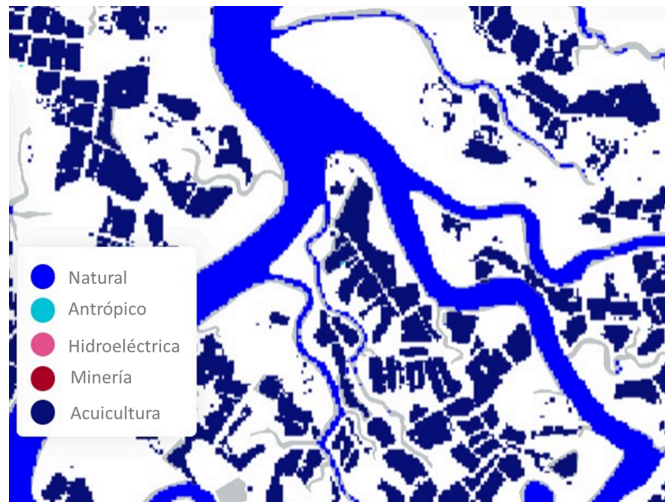


Figura 6. Ejemplo de categorías de cuerpo de agua en Ecuador

La clasificación de los cuerpos de agua incluyó los siguientes pasos:

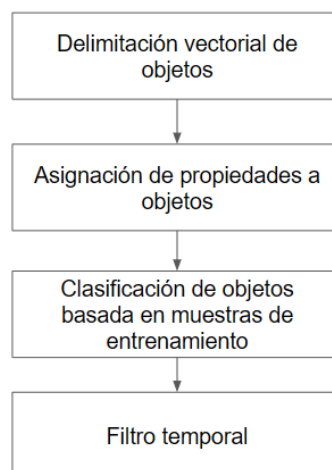


Figura 7. Secuencia de pasos para la clasificación

1. Delimitación vectorial de objetos.

La delimitación vectorial de objetos se denominó vectorización anual, ya que corresponde al proceso de convertir los mapas de frecuencia mensual de la

superficie del agua (datos raster) para cada año en polígonos regulares (datos vectoriales) dentro de la delimitación espacial de los cuerpos de agua.

Este procedimiento se realizó con una herramienta de segmentación, en la que un cuerpo de agua particular pudo haberse convertido en uno o más polígonos. La función SNIC disponible en Google Earth Engine se utilizó para generar segmentos pequeños y relativamente regulares. La figura 8 muestra algunos ejemplos de la segmentación basada en datos de frecuencia mensual para un año determinado.

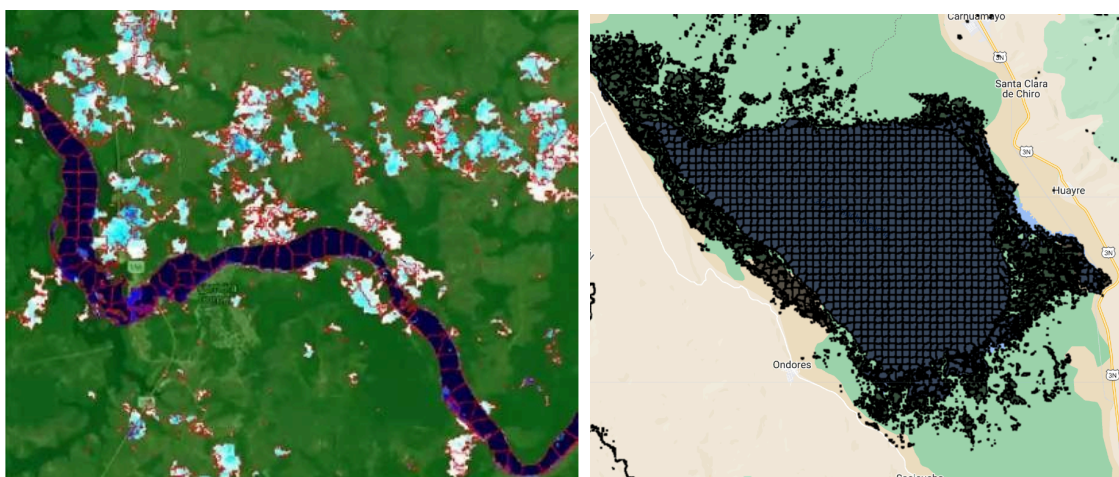


Figura 8. Ejemplos del proceso de segmentación que convierte datos raster (frecuencia mensual dentro de cada año) en una malla de vectores regulares.

2. Asignación de propiedades a objetos.

Después de generar los objetos para cada año, se asignó a cada uno de estos objetos un dataset de características con nuevas propiedades para su posterior uso en la clasificación. Estas propiedades incluyen información relacionada con la morfología del objeto, la geomorfología e información cualitativa de otros estudios sobre clasificación de cuerpos de agua y mapeo de cobertura y uso de la tierra. Las siguientes variables se asociaron a cada objeto: área, perímetro, relación área/perímetro, compacidad, redondez, grado de elongación, relación Laenge-Breite, convexidad, extensión máxima, número de vecinos, número de vecinos dentro de un buffer de 50 metros, clasificación ANA - antrópica, clasificación ANA - hidroeléctrica, clases de cobertura y uso del suelo MapBiomass (urbano, minería, bosque, clase no forestal, pasto), valor máximo SRTM y media de la frecuencia total.

3. Clasificación de objetos basada en muestras de entrenamiento.

La clasificación de los cuerpos de agua se realizó utilizando el algoritmo Random Forest. Las muestras de entrenamiento se recolectaron en los diferentes biomas para cada una de las cinco clases. Las muestras se recolectaron utilizando un conjunto de cuadrículas previamente dibujadas de cada bioma, cubriendo diferentes años de la serie temporal.

4. Filtro temporal.

Después de la clasificación, los resultados se sometieron a una rutina de post-clasificación aplicando un filtro temporal. La lógica del filtro temporal fue eliminar las transiciones improbables entre clases del mismo segmento a lo largo de la serie temporal.

Por último, todos los polígonos clasificados como falsos positivos dentro de cada año se reconvirtieron a formato raster y se utilizaron para filtrar el conjunto de datos de superficie de agua anual y mensual, eliminando los falsos positivos restantes.

4. Colección de mapas y análisis

Los principales resultados de la colección 3 están disponibles en la plataforma web pública: <https://plataforma.peru.mapbiomas.org/agua> donde se incluyen cuatro coberturas de datos: superficie de agua, transiciones, tendencias y clasificación de cuerpos hídricos.

4.1. Área de agua superficial

La capa corresponde a los datos de la cobertura anual de agua superficial. Los datos presentan superficie de agua mapeada considerando los diferentes rangos temporales dentro del intervalo de 1985 al 2024, incluyendo su respectiva frecuencia relativa. Los datos disponibles están enmarcados en diferentes unidades territoriales como bioma, cuenca hidrográfica, departamentos (nivel político-administrativo 1), provincias (nivel político-administrativo 2), áreas protegidas, territorios indígenas. El usuario puede seleccionar diferentes territorios y rangos temporales, haciendo que el mapa, gráficos y estadísticas se actualicen (Figura 9).



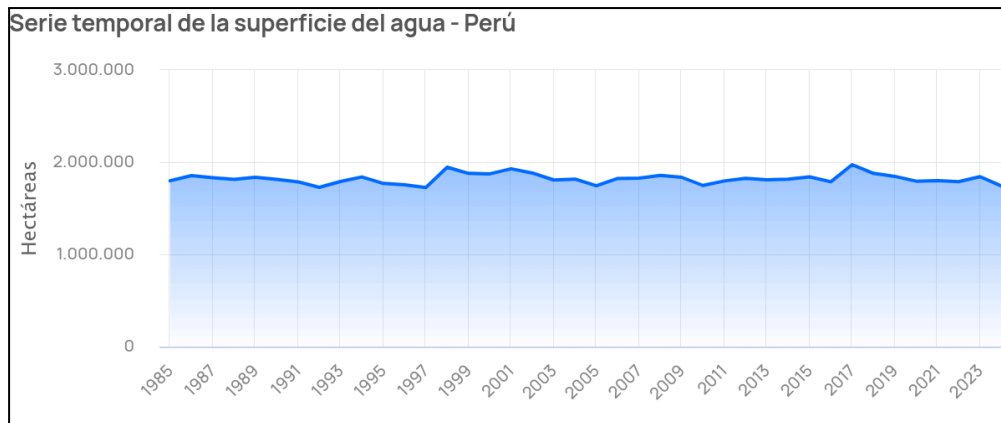


Figura 9. Ejemplo de visualización de los datos de la capa de superficie de agua (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomias Agua.

4.2. Transiciones de superficie de agua

Esta capa representa la superficie de agua que ha disminuido, que ha incrementado, que se ha mantenido constante o que se presenta de manera esporádica a lo largo de la serie temporal. Fue posible identificar estas áreas utilizando el número total de píxeles clasificados como agua en toda la serie anual (i.e., 40 años). Se elaboró una composición de color en RGB para facilitar la visualización e identificación de estas categorías (Figura 10). Primero, para caracterizar la persistencia se asignó el color azul al total de años clasificados como superficie de agua. Segundo, se seleccionó el número de años desde el principio de la serie temporal hasta la aparición de la primera clasificación de agua y se le asignó el color verde para caracterizar el incremento. Finalmente, se seleccionó el número de años desde la última observación de superficie de agua hasta el final de la serie temporal, para indicar la disminución de la superficie de agua en color rojo. De este modo, las superficies de agua permanentes aparecerán predominantemente azules, las superficies de agua temporales aparecerán negras si éstas ocurrieron de manera esporádica, la pérdida de superficie de agua en color rojo y superficies nuevas en color verde (Figura 11).

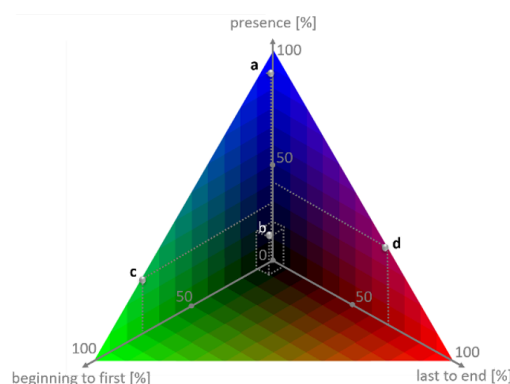


Figura 10. Dinámica de superficie de agua RGB. El color azul indica persistencia, ya que el total de años fueron clasificados como superficie de agua; verde, incremento (los años desde el principio de la serie temporal hasta la primera clasificación); y rojo disminución. Los colores negros y oscuros indican superficies de agua esporádicas o no permanentes.

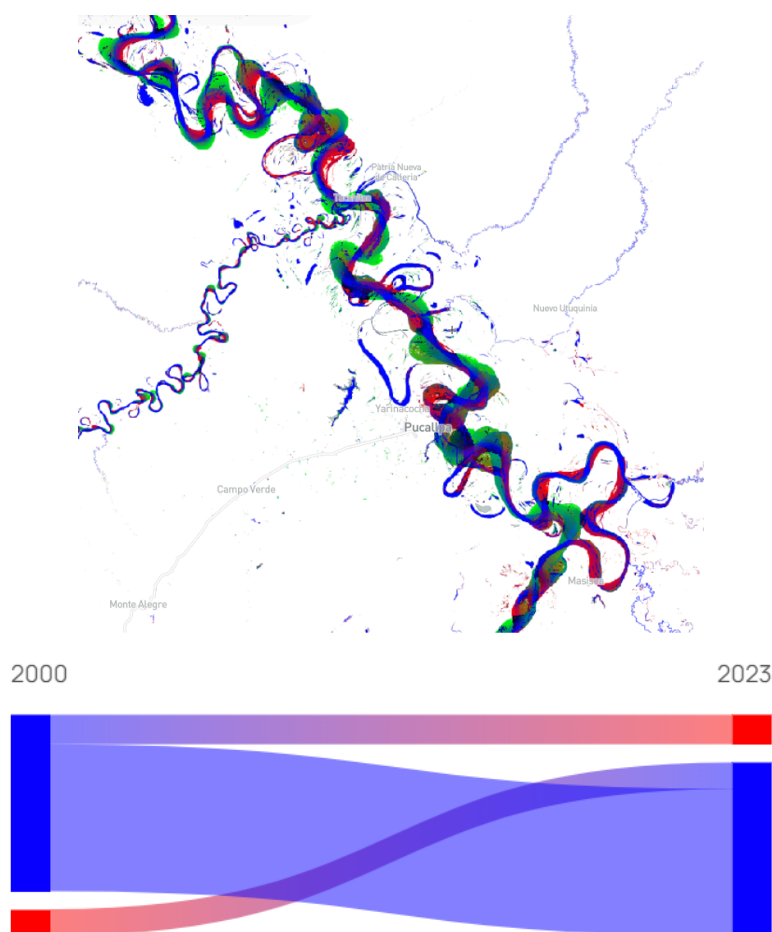


Figura 11. Ejemplo de transición de superficie de agua en “ríos danzantes” en Pucallpa, Ucayali, Amazonía peruana. El color verde en el mapa indica el incremento de agua en los últimos años debido a la dinámica natural del flujo de agua y cómo este ha cambiado el curso del río; en rojo, se observa dónde ha disminuido el agua debido al mismo fenómeno. El gráfico (azul y rojo) indica las transiciones entre los años seleccionados, de acuerdo con el área de superficie mapeada.

4.3. Tendencia de superficie de agua

El análisis de la tendencia de superficie de agua fue realizado utilizando la base de datos de agua mensual.

4.3.1. Ajuste de un modelo armónico

Para describir y probar cambios en los patrones de variación estacional, relacionados con cambios de fase, amplitud y tasa de variación, buscando patrones estacionales y posibles tendencias en referencia a los datos mensuales del mapeo de la superficie de agua para la serie temporal 1985-2024, se utilizó el modelo armónico descrito por Shumway y Stoffer (2006). (Figura 12).

Siendo $x_1, x_2, \dots, x_n$ un conjunto de n datos donde x_t representa el valor del área variable de la superficie de agua en la serie de tiempo, para $t \in [1, n]$, en el dato $n = 480$ (meses). Se ha calculado el valor armónico para cada elemento de la serie siguiendo la siguiente fórmula:

$$x_t = \beta_0 + \beta_1 * t + \beta_2 * \cos(2\pi * t) + \beta_3 * \sin(2\pi * t)$$

Los coeficientes estimados β_0 , β_1 , β_2 , β_3 fueron calculados usando el método de mínimos cuadrados ordinarios. (Shumway y Stoffer, 2006).

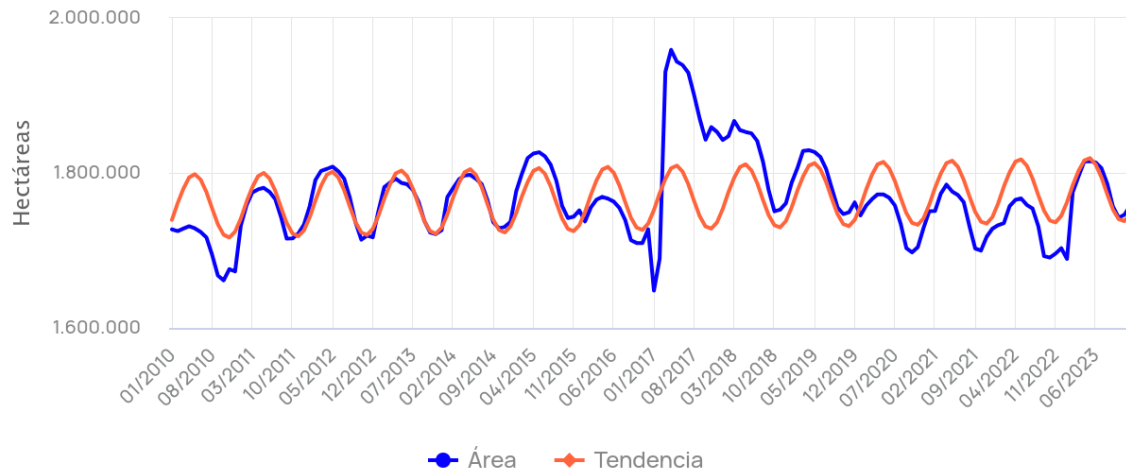


Figura 12. Ejemplo de ajuste de serie armónica a los resultados de superficie de agua mapeada mensualmente. La línea azul corresponde a la superficie de agua mapeada, la línea roja indica el ajuste del modelo armónico.

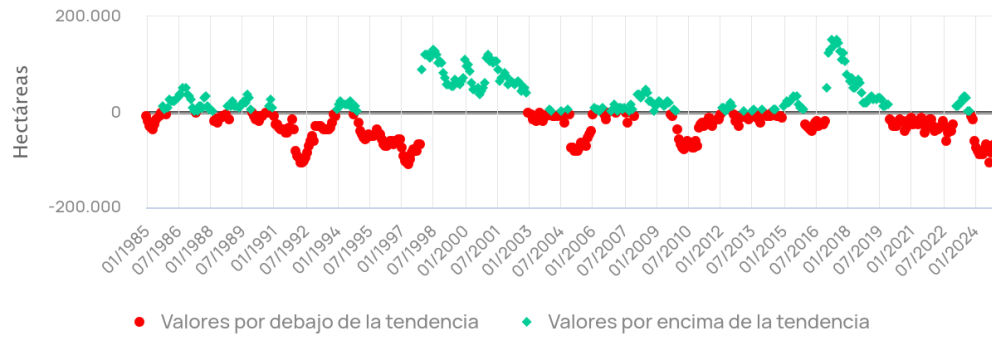
4.3.2. Diferencias entre el modelo armónico y los datos observados

Para detectar el comportamiento de aumento o disminución a lo largo de la serie de tiempo, se ha calculado la diferencia entre el modelo armónico y la superficie de agua mapeada. Este análisis pretende señalar con mayor claridad qué periodos mensuales presentaron salidas más intensas según lo esperado por el modelo.

4.3.3. Tendencias temporales

Se buscaron tendencias de aumento, disminución o permanencia en la superficie de agua mapeada a lo largo de la serie temporal de 1985-2024. El ensayo se realizó utilizando la prueba estacional de Mann Kendall (MK test), que se usa para analizar los datos recopilados a lo largo del tiempo en busca de tendencias crecientes o decrecientes con comportamiento monótono en los valores del eje Y (Figura 13). No es paramétrico, por lo que no es necesario que los datos cumplan con los supuestos de normalidad, que analiza los datos en busca de tendencias monótonas en los datos estacionales (Hirsch *et al.*, 1982; Hirsch *et al.*, 1984; Gilbert, 1987; Helsel y Hirsch, 1995, Morell y Fried, 2009).

Serie de tiempo mensual de residuos



Principales residuos a lo largo de la serie temporal



Figura 13. Ejemplo de las diferencias entre el modelo ajustado y los datos observados. Los puntos y barras verdes indican valores de aumento, mientras que los puntos y barras rojas indican valores de disminución en relación a lo esperado por el modelo armónico.

Para realizar la prueba sobre la serie temporal, los valores se consideran una serie temporal ordenada. Cada valor de la serie se compara con el resto de los elementos posteriores de la serie. En la estadística de Kendall se considera como 0, cuando $S = 0$. Si el valor de S para todo el conjunto de elementos es mayor que 0, significa que la tendencia de los datos de la serie está disminuyendo. De lo contrario, significa que la serie está aumentando.

Se consideraron los siguientes pasos para calcular la estadística de Mann-Kendall:

Siendo $x_1, x_2, \dots, x_n$ un conjunto de n datos donde x_j representa el valor de la variable tiempo j para todo $j < [1, n] \in \mathbb{N}$, entonces se calcula:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k)$$

la función es:

$$\begin{aligned} \text{sign}(x_j - x_k) &= 1 & \text{se } x_j - x_k &> 0 \\ \text{sign}(x_j - x_k) &= 0 & \text{se } x_j - x_k &= 0 \\ \text{sign}(x_j - x_k) &= -1 & \text{se } x_j - x_k &< 0 \end{aligned}$$

Cada valor añadido a S significa un aumento o una disminución del valor respecto del siguiente de la serie.

En las series temporales de datos de área para recolectar mapas de cuerpos de agua, fue necesario considerar el cálculo de Kendall para una serie con comportamiento estacional. La serie de superficies de cuerpos de agua corresponde a una serie temporal de 12 meses a lo largo de 40 años. Dada esta estructura para el cálculo de la estadística S, los datos se dividieron en 12 subconjuntos, donde el primer subconjunto corresponde a todos los valores correspondientes al mes de enero de la serie, el segundo a todos los valores correspondientes a febrero de la serie, y así sucesivamente, hasta diciembre. Entonces el valor de S será la suma de todos los S_j donde $J = [1.12]$ (Helsel y Hirsch, 1995).

$$S = \sum_{j=1}^{12} S_j$$

El valor de Kendall para cada mes se calcula como se describe anteriormente.

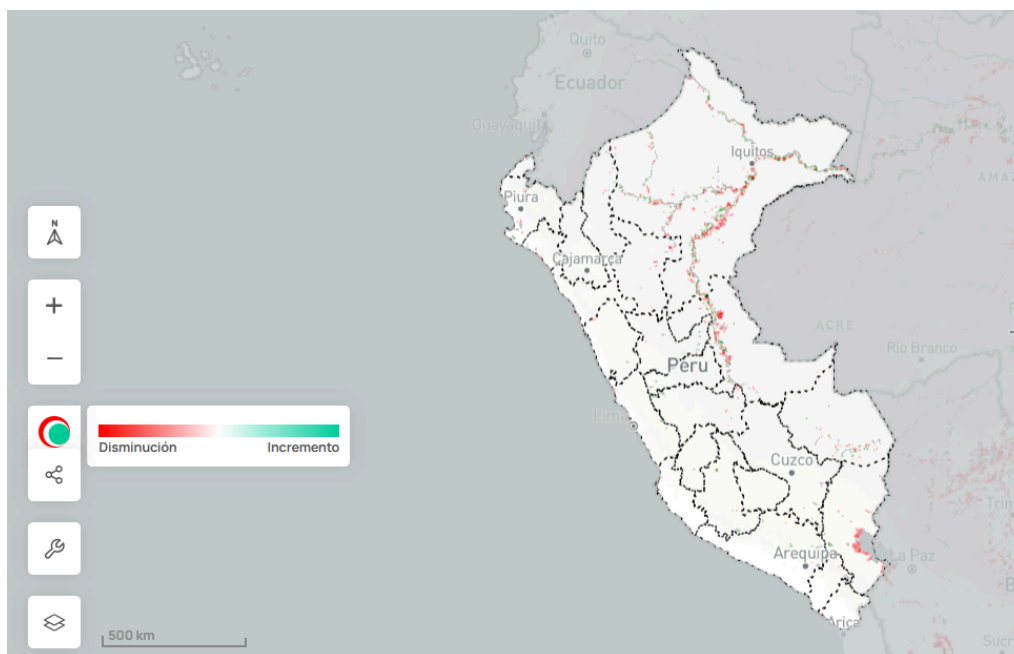


Figura 12. Ejemplo de resultados de cálculo de tendencias utilizando la prueba estacional de Mann Kendall. Los datos en rojo indican una disminución, los datos en verde un aumento y los datos en blanco, estabilidad. Sólo se presentan datos con valores significativos.

4.4. Categorías de cuerpos de Agua

La capa corresponde a los datos de la clasificación de naturalidad del agua superficial, incluyendo 7 clases: 1. Ríos, Lagos, lagunas; 2. Agropecuario y otros, 3. Hidroeléctricas, 4. Minería, 5. Acuicultura, 6. Lagunas reguladas y 7. Lagunas de origen glaciar. La clasificación es anual, y el rango de la serie temporal es del 2000 al 2024. Las estadísticas disponibles incluyen el área de la superficie del agua en cada una de las clases de cuerpos de agua cartografiados para el año de interés y considerando la unidad espacial seleccionada en la interfaz, junto con un gráfico con las áreas a lo largo de toda la serie temporal.

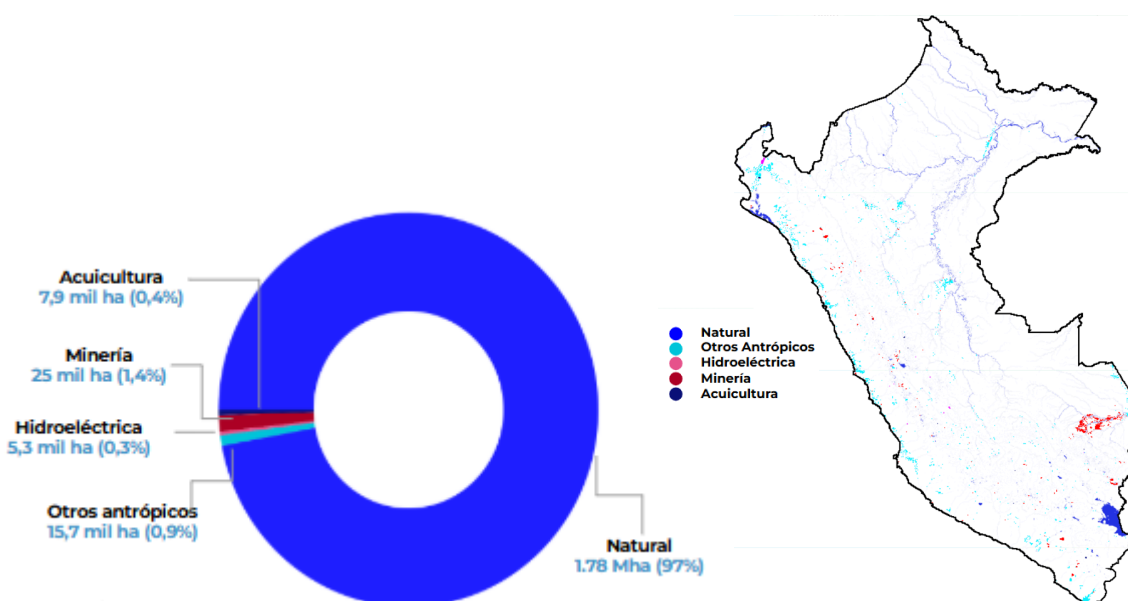


Figura 15. Clasificación de cuerpos de agua del Perú.

5. Consideraciones prácticas

La tercera versión de este producto representa un avance significativo hacia la mejora continua y responde a observaciones y sugerencias realizadas durante el uso y análisis de la primera versión. Este nuevo producto se concibe como una herramienta dinámica, que no solo está diseñada para proporcionar datos relevantes, sino también para evolucionar en respuesta a las necesidades de los usuarios y las mejoras tecnológicas disponibles.

Todos los datos generados están disponibles públicamente, fomentando la transparencia y el acceso abierto. Este enfoque facilita que los usuarios puedan revisar el contenido, identificar aciertos y proponer ajustes necesarios. Las contribuciones y retroalimentaciones de los usuarios son fundamentales para garantizar que las próximas versiones sigan un proceso iterativo de perfeccionamiento y que el producto se mantenga actualizado y relevante.

Es importante que los usuarios consideren que la aplicación de los datos cuantitativos presentados debe ir acompañada de una revisión rigurosa de los niveles de precisión y las métricas de incertidumbre asociadas. Esto permitirá una interpretación más robusta y una evaluación adecuada de su aplicabilidad en diferentes contextos. Los datos deben confrontarse con otras fuentes o estudios complementarios para confirmar su aceptación o señalar limitaciones potenciales.

Este enfoque de mejora continua refuerza el compromiso de los desarrolladores con la calidad y utilidad del producto, promoviendo la colaboración entre la comunidad científica y otros usuarios para maximizar el impacto positivo del conjunto de datos.

6. Conclusiones finales y perspectivas

La Colección 3 de MapBiomás Agua se consolida como un producto fundamental de cartografía para la superficie de agua en los países amazónicos. Su aporte es significativo para comprender la dinámica espacial y temporal de los ecosistemas de agua dulce, proporcionando datos detallados que permiten analizar patrones de cambio, ciclos de aumento o disminución, y estimar ganancias o pérdidas de superficie de agua. Este producto también ha demostrado ser una herramienta clave para asociar estas transformaciones con actividades humanas, generando conocimiento valioso sobre las interacciones entre los sistemas naturales y las presiones antropogénicas.

El logro de este resultado fortalece los objetivos planteados por la iniciativa de MapBiomás Agua y RAISG, destacándose como un esfuerzo colaborativo que contribuye tanto al entendimiento científico como al desarrollo de estrategias de manejo sostenible. La disponibilidad pública de los datos fomenta su uso por parte de investigadores, tomadores de decisiones y comunidades locales, quienes pueden utilizarlos para planificar acciones de conservación, restauración y uso racional del recurso hídrico.

7 Referencias

- Barkhordarian, A., Saatchi, S.S, Behrangi, A., Loikith, PC. and Mechoso, C.R. 2019. A Recent Systematic Increase in Vapor Pressure Deficit over Tropical South America. *Sci Rep* 9, 15331.
- Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H., Gorelick, N., Kwadijk, J. and van de Giesen, N. 2016. Earth's surface water change over the past 30 years. *Nat. Clim. Chang.*, 6, 810–813.
- Gilbert, R.O. 1987. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Wiley, NY.
- Helsel, D.R. and R.M. Hirsch. 1995. *Statistical Methods in Water Resources*. Elsevier, NY, 338-340.
- Hirsch, R.M. and J.R. Slack. 1984. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research* 20(6):727-732.
- Hirsch, R.M., J.R. Slack and R.A. Smith. 1982. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. *Water Resources Research* 18(1):107-121.
- Morell and Fried 2009. *On Nonparametric Tests for Trend Detection in Seasonal Time Series*
- Oliveira, B.C., Souza, C.M. 2019. A novel approach to monitor water in Brazil with satellite images - a concept note. WWF Report 2019.
- Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N. and Belward, A.S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 2016, 540, 418–422.
- Souza, C.M., Kirchhoff, F.T., Oliveira, B.C., Ribeiro, J.G. and Sales, M.H. 2019. Long-Term Annual Surface Water Change in the Brazilian Amazon Biome: Potential Links with Deforestation, Infrastructure Development and Climate Change. *Water*, 11, 566.
- WWF. 2020. *Living Planet Report 2020: Bending the curve of biodiversity loss*. Almond, R.E.A., Grooten, M., & Petersen, T. (Eds). World Wide Fund for Nature, Gland, Switzerland.