



MAPBIOMAS
[AGUA]

MapBiomás Agua - VENEZUELA

Manual General

Documento de base teórica sobre algoritmos (ATBD)

Colección 3, Versión 1

Coordinación:

Anderson Albarran

Líder técnico:

Nelly Rivero

Equipo Técnico:

Yurmerys Bolaño, Angel Acosta, Gilberto Hernandez, Juan Carlos Amilibia

Diciembre 2025



MAPBIOMAS
[AGUA]



MAPBIOMAS
VENEZUELA

RAISG

RED AMAZÓNICA DE INFORMACIÓN
SOCIOAMBIENTAL GEORREFERENCIADA



Tabla de contenido

1 Introducción	3
1.1. Alcance y contenido del documento	3
1.2. Descripción general	4
1.3. Regionalización	5
1.4. Ciencia y aplicaciones clave	7
2 Información general y antecedentes	7
2.1. Contexto e información clave	7
2.2. Perspectiva histórica: mapas existentes e iniciativas cartográficas	8
3 Metodología	9
3.1. Imágenes Landsat	10
3.2. Algoritmo para la Detección de Superficies de Agua	11
3.2.1. Análisis de mezcla espectral	11
3.2.2. Clasificador subpíxel de superficie de agua (SWSC)	11
3.2.3. Ajustes fundamentados en el uso de máscaras	13
3.2.4. Obtención de datos mensuales de agua	13
3.2.5. Obtención de datos anuales de agua	14
3.2.6. Categorización de cuerpos de agua	15
4. Colección de mapas y análisis	24
4.1. Área de agua superficial anual	24
4.2. Área de agua superficial mensual	25
4.3. Frecuencia de agua anual	25
4.4. Cuerpos de agua anual	26
5. Consideraciones prácticas	27
6. Conclusiones finales y perspectivas	29
7. Referencias	30

1 Introducción

1.1. Alcance y contenido del documento

MapBiomias Agua – Venezuela tiene como objetivo principal el mapeo de la dinámica del agua superficial en el territorio venezolano (Figura 1), mediante una serie temporal mensual y anual que abarca el período 2000 – 2024. Además, el proyecto incluye la identificación del tipo de cuerpos de agua según su origen (natural o antrópico), su uso y el mapeo del agua en estado sólido (nieve y hielo) presente en el país.

Los resultados generados se encuentran disponibles en el módulo de agua de la plataforma web MapBiomias Venezuela. Toda la información es de acceso público, con el propósito de facilitar su uso por parte de instituciones gubernamentales, organizaciones académicas, centros educativos y otros actores interesados a nivel nacional, promoviendo un mayor entendimiento de estos sistemas hidrológicos, sus dinámicas, usos y procesos de gestión.

El objetivo de este Documento Base Teórico de Algoritmos o Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) es ofrecer una descripción detallada y transparente de los procedimientos metodológicos aplicados para la generación de los datos mensuales y anuales de agua superficial en Venezuela, así como del enfoque utilizado para determinar el origen de los cuerpos de agua. En el caso del mapeo de glaciares, su metodología será presentada en un ATBD independiente, específicamente elaborado para este caso de uso, el cual se fundamenta en los lineamientos y procedimientos descritos por Turpo et al. (2022).



Figura 1. Territorio venezolano.

1.2. Descripción general

La iniciativa MapBiomás Agua tiene su origen en un estudio previo desarrollado por Imazon y WWF-Brasil en el bioma amazónico brasileño, posteriormente ampliado a la cuenca del Alto Paraguay, en el bioma Chaco (Souza et al., 2019). Este trabajo demostró el potencial de fortalecer la capacidad de la Iniciativa MapBiomás para detectar y monitorear la dinámica del agua superficial en todos los biomas de Brasil. A partir de estos resultados, el grupo de trabajo de MapBiomás Agua extendió el enfoque y la metodología al conjunto del territorio brasileño.

En el año 2022, MapBiomás y la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG) establecieron una alianza para adaptar y aplicar la metodología de MapBiomás Agua a todos los países amazónicos, con el objetivo de generar información comparable que permita analizar y comprender la dinámica hídrica en toda la región. La Colección 1 de esta iniciativa fue publicada en septiembre de 2023.

La metodología para mapear y monitorear el agua superficial se fundamenta en la clasificación a nivel de subpíxel de imágenes satelitales de los sensores Landsat 5, 7, 8 y 9. Este enfoque permite evaluar los cambios ocurridos durante los últimos 25 años (2000 - 2024), asociados tanto a la dinámica hidromorfológica natural como a las presiones antrópicas y los posibles efectos de la aceleración del cambio climático. Asimismo, todos los cuerpos de agua mapeados fueron clasificados según su origen en naturales o antrópicos y según su uso. El procesamiento fue realizado íntegramente en el entorno de Google Earth

Engine (GEE), y los resultados, incluidas las dinámicas mensuales y tendencias temporales, se encuentran disponibles en la plataforma interactiva de [MapBiomás Agua Venezuela](#), orientada al uso por parte de diversos actores.

Con esta actualización y la publicación de la Colección 3, la iniciativa MapBiomás Agua – Venezuela promoverá actividades de capacitación dirigidas a diversos usuarios, entre los que se incluyen representantes del ámbito académico, el sector privado y entidades gubernamentales. De esta manera, la disponibilidad de información robusta y estandarizada sobre los recursos hídricos del país se consolida como un insumo esencial para orientar acciones estratégicas de conservación, recuperación y gestión sostenible del agua y de los ecosistemas de agua dulce.

1.3. Regionalización

Para la ejecución de los procesos de cálculo de la superficie de agua, el territorio venezolano fue sometido a un proceso de regionalización, motivado por la alta heterogeneidad fisiográfica, climática e hidrológica que caracteriza al país. En este contexto, la metodología de clasificación de los cuerpos de agua desarrollada por MapBiomás Agua fue adaptada a regiones específicas, con el fin de representar de manera más precisa la dinámica espacial y temporal del agua superficial. En la Colección 3 de MapBiomás Agua – Venezuela, esta regionalización se realizó a nivel de cuencas hidrográficas, las cuales integran y reflejan las particularidades ambientales de los principales sistemas amazónicos, deltaicos, andinos, llaneros y caribeños (figura 2).

De forma consistente con el enfoque regional de la iniciativa, cada país amazónico definió sus propios criterios de regionalización, atendiendo a las características biofísicas, hidrológicas y socioambientales de su territorio. Este enfoque permitió profundizar en la comprensión de la dinámica de los cuerpos de agua superficiales y mejorar la robustez y comparabilidad de los resultados a escala regional y nacional.

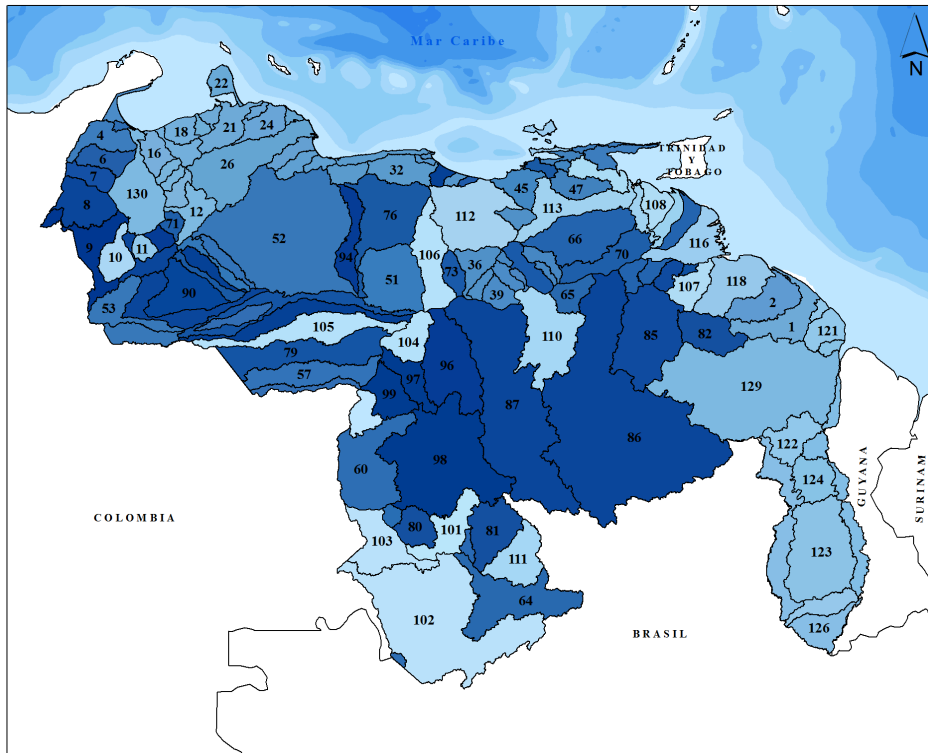


Figura 2. Regionalización de Venezuela

LEYENDA				
100 Orinoco	128 Esequibo	37 Aragua	64 Mavaca	91 Pagüey
101 Cuncunuma	129 Cuyuní	38 Claro	65 Orocopiche	92 Guapo
102 Casiquiare - Río Negro	12 Motán	39 Mapire	66 Morichal Largo	93 Matiyure
103 Atabapo	130 Lago de Maracaibo	3 Carraipia - Paraguachón	67 Mariusa	94 Tiznado
104 Chaviripa	13 Motán de los Negros	40 Cabrutica	68 Manaco	95 Tucaní
105 Arauca	14 Machango	41 El Perro	69 Uputa	96 Cuchivero
106 Manapire	15 Chiquito	42 Aribi	6 El Palmar	97 Suapure
107 Aganre	16 Pueblo Viejo	43 Limo	70 Uracoa	98 Ventuari
108 Capure	17 Matucora	44 Caris	71 Caús	99 Villacoa
109 San Juan	18 Capatárida	45 Neverí	72 Uchire	9 Catatumbo
10 Escalante	19 Lagarto	46 Carinucua	73 Aracay	
110 Aro	1 Barama	47 Guarapiche	74 Pao	
111 Ocamo	20 Arajó	48 Golfo de Cariaco	75 Manzanares	
112 Unare	21 Mitare	49 Norte de la Península de Paría	76 Guárico	
113 Amana	22 Península de Paraguana	4 Guasare	77 Canaguá	
114 Manamo	23 Ricoa	50 Caño Guariquén	78 Apure	
115 Macareo	24 Hueque	51 Guariquito	79 Capanaparo	
116 Grande	25 Don Diego	52 Portuguesa	7 Apón	
117 Norte de la Península de Araya	26 Tocuyo	53 Uribante	80 Yagua	
118 Amacuro	27 Aroa	54 Sanare	81 Panamo	
119 Kuyuwini	28 Yaracuy	55 Santo Domingo	82 Corumo	
11 Mucujaje	29 Morón	56 Masparro	83 Aroy	
120 Maruca	2 Barima	57 Cinaruco	84 Candelaria	
121 Pomerun	30 Lago de Valencia	58 Meta	85 Yuruán	
122 Potaro	31 Litoral Central	59 Caño Guariquito	86 Caroní	
123 Rupununi	32 Tuy	5 El Limón	87 Caura	
124 Siparuní	33 Curiepe	60 Sipapo	88 Chama	
125 Superman	34 Cúpira	61 Guainía	89 Alto Apure	
126 Kassikaityu	35 Capaya	62 Mucuruco	8 Santa Ana	
127 Icabarú	36 Zuata	63 Iguapo	90 Suripa	

Tabla 1. Leyenda regiones de clasificación para Venezuela

Nota: Para el territorio correspondiente al estado Guayana Esequiba, la regionalización metodológica siguió una caracterización diferenciada. Esta condición responde a que se trata de un territorio sujeto a disputa internacional, cuyo procesamiento técnico fue realizado por el equipo especializado de MapBiomás Agua Venezuela, en el marco de la iniciativa MapBiomás Agua a escala amazónica.

No obstante, mediante acto legislativo del 3 de abril de 2024, el [estado Guayana Esequiba](#) fue incorporado formalmente al ordenamiento jurídico de la República Bolivariana de Venezuela. En consecuencia, dicho territorio es considerado parte integrante del ámbito nacional y debe ser incluido en los procesos de detección y monitoreo de la dinámica del agua superficial desarrollados por MapBiomás Agua Venezuela.

Sin perjuicio de su actual condición de controversia internacional, los resultados correspondientes al estado Guayana Esequiba serán integrados y visualizados en la plataforma MapBiomás Venezuela, garantizando la coherencia territorial y la cobertura nacional de la información producida.

1.4. Ciencia y aplicaciones clave

El conjunto de datos sobre la dinámica de los cuerpos de agua superficiales en Venezuela constituye un insumo fundamental para la comprensión de los sistemas acuáticos y de su interacción con otros componentes del medio ambiente. Esta información resulta clave para sustentar la toma de decisiones informadas y fortalecer la gestión integral de los recursos hídricos, con un enfoque orientado al desarrollo sostenible.

En particular, el mapeo sistemático del agua superficial aporta evidencia técnica para apoyar la planificación territorial integrada, el monitoreo del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el diseño e implementación de iniciativas de gestión sostenible del agua, así como el seguimiento de concesiones de uso del recurso hídrico y de pequeñas infraestructuras hidráulicas. Asimismo, permite evaluar el estado de los ecosistemas de agua dulce, promover investigaciones científicas y analizar los cambios espacio-temporales de los cuerpos de agua en relación con los impactos antrópicos y los efectos del cambio climático.

2 Información general y antecedentes

2.1. Contexto e información clave

Las condiciones de numerosos ecosistemas de agua dulce se han visto deterioradas de manera significativa por las actividades humanas en las últimas décadas. Los cambios acelerados en el uso y la cobertura del suelo, la construcción de infraestructuras hidráulicas —en particular represas hidroeléctricas—, la contaminación y la sobreexplotación de los recursos hídricos para la producción de bienes y servicios han modificado de forma sustancial la calidad, disponibilidad y conectividad del agua a escala global. Evidencia

científica reciente indica que las especies de agua dulce presentan tasas de extinción aproximadamente dos veces superiores a las de los ecosistemas terrestres. A ello se suma el incremento en la frecuencia e intensidad de sequías e inundaciones asociadas al cambio climático, lo que intensifica la presión sobre los reservorios de agua y los ecosistemas acuáticos.

Este escenario resulta especialmente preocupante en un contexto de crecimiento demográfico sostenido. La población mundial supera actualmente los 8 mil millones de habitantes, lo que implica una demanda creciente de agua para consumo humano, producción de alimentos, energía e industria. En Venezuela, con una población estimada cercana a los 29 millones de habitantes, el agua constituye un recurso estratégico tanto para el bienestar social como para el desarrollo económico, particularmente por su relación con la generación hidroeléctrica, la seguridad alimentaria y la conservación de ecosistemas clave. Sin la implementación de estrategias integradas y basadas en evidencia para la gestión del agua, será inviable alcanzar los objetivos globales de desarrollo sostenible. En este contexto, la evaluación continua e histórica de los cambios en la dinámica de la superficie de agua a escalas nacionales y continentales representa uno de los principales desafíos para la toma de decisiones informadas sobre este recurso esencial (Oliveira y Souza, 2019).

Estos desafíos son especialmente relevantes en los países amazónicos, región que concentra la mayor disponibilidad de agua dulce per cápita del planeta, aunque con una distribución espacial y una calidad altamente heterogéneas. Esta situación demanda la adopción de acciones y decisiones diferenciadas, que consideren las particularidades regionales, así como los efectos interconectados y acumulativos del uso del agua sobre los ecosistemas y las sociedades. Abordar esta complejidad solo es posible mediante el acceso a datos consistentes, detallados y comparables sobre la dinámica de la superficie de agua.

En este marco, la metodología de mapeo de aguas superficiales adoptada por la iniciativa MapBiomás Agua ha demostrado su capacidad para identificar, cuantificar y analizar la dinámica espacio-temporal de la superficie de agua dulce en los países amazónicos, con especial énfasis en los humedales y otros ecosistemas acuáticos estratégicos (Souza et al., 2019).

2.2. Perspectiva histórica: mapas existentes e iniciativas cartográficas

El uso de datos satelitales ha transformado de manera sustancial la capacidad para mapear, cuantificar y analizar la distribución espacial y la dinámica temporal de las aguas superficiales continentales a escala regional, nacional y global. En particular, la disponibilidad gratuita y continua de la serie histórica de imágenes Landsat, combinada con el desarrollo de infraestructuras de computación en la nube, permitió por primera vez la generación de conjuntos de datos globales de múltiples décadas sobre la dinámica del agua superficial.

En este contexto, se destaca el conjunto de datos Global Surface Water (GSW), desarrollado por el Joint Research Centre de la Comisión Europea (Donchyts et al., 2016; Pekel et al., 2016) que proporciona información sobre la extensión, recurrencia y cambios

de las aguas superficiales a nivel global, a partir del análisis de más de 30 años de imágenes Landsat procesadas a nivel de píxel. Este producto ha sido ampliamente utilizado en estudios científicos y aplicaciones de gestión del agua, evaluación de riesgos hidrológicos y análisis de cambios ambientales a gran escala.

No obstante, el uso directo de GSW para análisis nacionales o subnacionales presenta limitaciones relevantes, particularmente en regiones caracterizadas por llanuras aluviales extensas, humedales complejos y cuerpos de agua de pequeña dimensión o con alta variabilidad intraanual. Estas limitaciones se asocian principalmente al enfoque de clasificación a nivel de píxel, que puede subestimar la presencia de agua en ambientes con mezcla espectral, vegetación emergente o dinámica hidrológica estacional pronunciada.

Con el objetivo de superar parte de estas restricciones, la iniciativa MapBiomás Agua adopta el mismo paradigma general de integración entre imágenes Landsat y computación en la nube, pero incorpora innovaciones metodológicas orientadas a mejorar la detección, cuantificación y caracterización de las aguas superficiales. Entre estas innovaciones se destaca la aplicación de un clasificador de agua superficial a nivel de subpíxel (Surface Water Subpixel Classifier, SWSC), desarrollado inicialmente para el bioma amazónico brasileño y posteriormente ampliado a otros contextos regionales (Souza et al., 2019).

Este enfoque permite una representación más precisa de la fracción de agua dentro de cada píxel, mejorando significativamente la detección de cuerpos de agua pequeños, zonas inundables, humedales y áreas con vegetación acuática. En las secciones siguientes de este ATBD se describen en detalle los fundamentos conceptuales, los insumos de datos y los procedimientos metodológicos asociados a la implementación de este clasificador en el contexto de MapBiomás Agua – Venezuela.

3 Metodología

La integración de la serie histórica de imágenes Landsat con las capacidades de procesamiento en la nube de la plataforma Google Earth Engine permitió a la iniciativa MapBiomás Agua generar un conjunto de datos sistemático y consistente sobre la dinámica del agua superficial para todos los países amazónicos. Este enfoque permitió el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de información satelital y el análisis temporal continuo de la superficie de agua a múltiples escalas.

La figura 3 sintetiza los principales pasos metodológicos del proceso, que incluyen la aplicación de un clasificador de agua superficial a nivel de subpíxel (Surface Water Subpixel Classifier, SWSC), el uso de árboles de decisión para la discriminación de clases y una serie de procedimientos de post-clasificación orientados a refinar los resultados. Como producto final, se generan conjuntos de datos de agua superficial con resolución temporal mensual y anual, adecuados para el análisis de tendencias, transiciones y patrones espaciales de la dinámica hídrica continental.

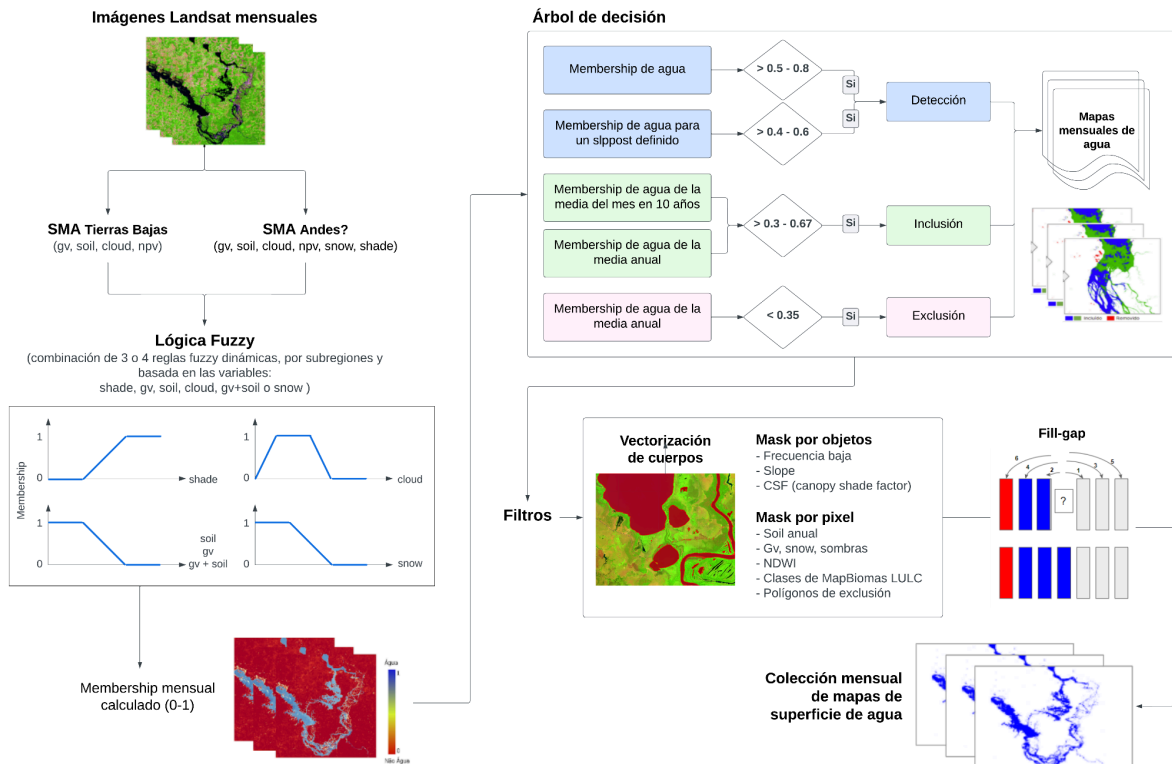


Figura 3. Proceso metodológico para producir los datos de superficie de agua, 1996 - 2023.

3.1. Imágenes Landsat

La iniciativa MapBiomias Agua utilizó imágenes del archivo Landsat disponibles en la plataforma Google Earth Engine (GEE), incorporando datos de los sensores Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Operational Land Imager (OLI), correspondientes a los satélites Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8.. Estas imágenes presentan una resolución espacial de 30 metros, adecuada para el análisis sistemático de la dinámica de las aguas superficiales a escala nacional.

Se empleó la Colección 2 de Landsat, Nivel 1, compuesta por imágenes ortorrectificadas y calibradas radiométricamente, lo que garantiza consistencia espacial y temporal a lo largo de toda la serie histórica. Para el procesamiento, se consideraron todas las escenas Landsat que cubren el territorio venezolano durante el período de análisis, aplicando un filtrado basado en los metadatos para excluir escenas con alta cobertura de nubes (superior al 70 %), con el fin de optimizar la calidad de la información utilizada en la clasificación.

El uso de esta serie histórica multitemporal permitió caracterizar de manera robusta la dinámica mensual y anual de la superficie de agua en Venezuela, constituyendo la base de datos fundamental para la aplicación del clasificador de agua superficial a nivel de subpíxel y los posteriores procesos de post-clasificación desarrollados por la iniciativa MapBiomias Agua en Venezuela.

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) permite estimar la composición fraccional de píxeles puros (endmembers) de vegetación verde (GV), vegetación no fotosintética (NPV), suelo (Soil), nubes (Cloud), sombra (Shade) y nieve (Snow). La información obtenida a nivel de subpíxel mediante SMA es especialmente útil para caracterizar cuerpos de agua que se encuentran mezclados con otros componentes, como suelo y vegetación, superando así las limitaciones de los clasificadores basados en píxeles completos. Esta capacidad es fundamental para mapear humedales, llanuras aluviales, ríos estrechos y pequeños cuerpos de agua.

Para la aplicación del SMA se utiliza una librería genérica de endmembers para imágenes Landsat, que permite calcular el porcentaje de cada componente mediante el algoritmo de desmezcla espectral implementado en Google Earth Engine. Se presentan dos casos de aplicación:

- i) Regiones de Amazonía y tierras bajas: el SMA se aplica a cada píxel utilizando cuatro endmembers: GV, Soil, NPV y Cloud. La fracción de Shade se calcula como sombra fotométrica (reflectancia cero en todas las bandas), mediante la sustracción de la suma de GV, Soil, Cloud y NPV a 1.
- ii) Regiones de los Andes, transición con Amazonía y Pacífico: en estas regiones se calculan las fracciones directamente utilizando seis endmembers en el SMA: GV, Soil, NPV, Cloud, Snow y Shade.

Este enfoque asegura una estimación precisa de la composición subpíxel en distintas regiones del territorio, permitiendo la detección confiable de agua superficial mezclada con otros componentes, crucial para la caracterización de ecosistemas complejos como humedales y llanuras aluviales.

3.2.2. Clasificador subpíxel de superficie de agua (SWSC)

El clasificador subpíxel de agua superficial (SWSC, por sus siglas en inglés) se basa en tres reglas jerárquicas de decisión binaria (verdadero/falso), que utilizan información fraccional de Shade, GV, Soil y Cloud obtenida mediante el SMA.

- Absorción de radiación por el agua: 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, los píxeles con fracción de Shade > 65 % se clasifican inicialmente como agua superficial.

- Mezcla con vegetación y suelo: Las fracciones combinadas de GV y Soil menores al 10 % permiten identificar agua superficial mezclada con vegetación y suelo, típica en bordes de cuerpos de agua, ríos estrechos, humedales y llanuras aluviales.
- Fracción residual de Cloud: Se incorpora una fracción residual de Cloud < 25 % para detectar agua superficial con alta carga de sedimentos. Esta fracción tiene en cuenta la ambigüedad espectral del endmember de Cloudy Soil, causada por la respuesta espectral del Soil en píxeles libres de nubes.

Adaptación regional del SWSC: La información fraccional utilizada en el SWSC proviene del SMA, que se ajusta según la región:

- En Amazonía y tierras bajas, el SMA utiliza cuatro endmembers (GV, Soil, NPV, Cloud) con la fracción de Shade calculada como sombra fotométrica.
- En Andes, transición con Amazonía y Pacífico, el SMA emplea seis endmembers (GV, Soil, NPV, Cloud, Snow y Shade) para capturar con precisión la composición subpíxel en regiones con nieve y complejidad topográfica.

Evaluaciones empíricas demostraron que los umbrales binarios iniciales aún excluían cierta agua superficial. Para resolver esto, se definieron reglas de transición (Figura 4) mediante funciones lineales, transformando la lógica binaria en tres lógicas difusas (fuzzy) independientes. Cada píxel recibe un grado de pertenencia (membership) que indica la certeza de ser clasificado como agua, con valores entre 0 y 1. Posteriormente, se calcula el promedio de los memberships para generar un mapa continuo de agua superficial, a partir del cual se derivan las capas mensuales de superficie de agua..

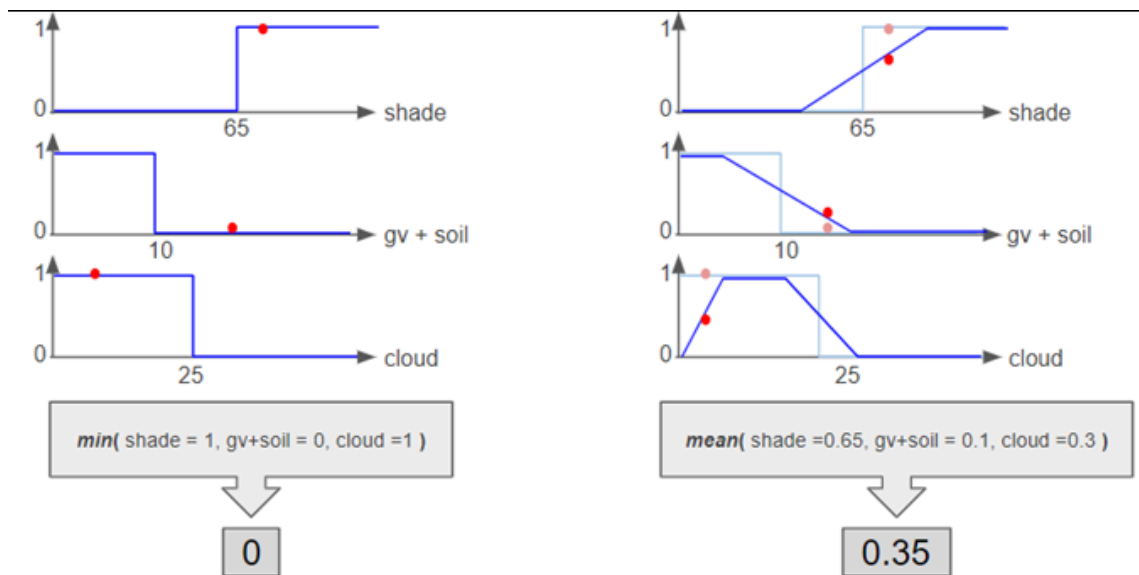


Figura 4. Reglas binarias del clasificador subpíxel de agua superficial. El esquema de la izquierda muestra un ejemplo de agua superficial no detectada para un píxel con valores de fracción indicados por los puntos rojos (el valor de gv + soil está por encima del umbral > 10 para ser clasificado como agua). El ejemplo de la derecha aplica una lógica fuzzy lineal a la variable y el valor medio permite clasificar correctamente el píxel (punto rojo) como agua superficial.

3.2.3. Ajustes fundamentados en el uso de máscaras

- **Pendiente:** Para generar los mapas mensuales de agua superficial de Venezuela, se produjeron inicialmente los mapas de *memberships* mensuales, calculando la mediana de los *memberships* de los píxeles a partir de todas las escenas Landsat disponibles para cada mes entre 2000 y 2024. Posteriormente, los píxeles se clasificaron como agua en función de umbrales definidos para el *membership* (0,5–0,8), los cuales varían según la región de clasificación. En algunas zonas, se aplicó adicionalmente una máscara basada en valores bajos de pendiente estratificada (*SLPPOST*), ajustando el umbral a 0,4–0,6, con el fin de ampliar la detección de ríos estrechos y cuerpos de agua con mezcla significativa de suelo y vegetación. Este procedimiento permitió construir series temporales mensuales de agua superficial para todo el período 2000–2024.
- **CSF (Canopy Shade Factor / Factor de Sombra de Dose):** Este índice estima la cobertura vegetal y su densidad, basada en la cantidad de luz solar interceptada por las copas de los árboles y otras plantas. En Venezuela, se utilizó como máscara adicional para eliminar falsos positivos, evitando que áreas densamente vegetadas fueran clasificadas erróneamente como agua superficial.
- **NDWI (Normalized Difference Water Index / Índice de Diferencia Normalizada de Agua):** Este índice espectral es ampliamente empleado en el mapeo de cuerpos de agua, aprovechando las diferencias de reflectancia en las bandas verde e infrarrojo cercano (NIR) para resaltar la presencia de agua. Para Venezuela (y el resto de países amazónicos), se utilizó la reflectancia de superficie de imágenes Landsat como insumo para el cálculo del NDWI.
- **Máscaras de cobertura:** A partir del producto de cobertura y uso del suelo de MapBiomás Venezuela (Colección 2), se definieron clases temáticas (por ejemplo, áreas urbanas o agrícolas) que sirvieron como insumo para generar máscaras, reduciendo espacialmente la incidencia de falsos positivos y mejorando la precisión de la detección de cuerpos de agua.

3.2.4. Obtención de datos mensuales de agua

La generación de los mapas mensuales de agua superficial incluyó procedimientos específicos para restaurar falsos negativos y eliminar falsos positivos, basados en métricas temporales (Figura 5).

En primer lugar, se calculó la mediana anual del *membership* de agua para cada píxel (mediana intra-anual), así como la mediana decenal correspondiente a cada mes. Estos valores se utilizaron para implementar un relleno de vacíos, que permite reclasificar como agua aquellos píxeles que temporalmente estuvieron cubiertos por nubes o que no contaban con escenas Landsat durante un mes determinado. La reclasificación se aplicó utilizando una combinación de dos reglas:

- La probabilidad mediana dentro del año $> 0,3-0,67$.
- La mediana decenal del mes correspondiente $> 0,3-0,67$.

El rango de umbrales se ajusta según la región de clasificación para reflejar la heterogeneidad geográfica y las características hidromorfológicas de cada área.

Adicionalmente, se aplicó un filtro de remoción de falsos positivos, destinado a corregir la clasificación de agua superficial afectada por sombras de nubes u otros objetos oscuros presentes en las imágenes Landsat. En este paso, los píxeles con un membership mensual mediano $< 0,35$ fueron reclasificados como no agua, garantizando mayor precisión en la identificación de cuerpos de agua superficiales.

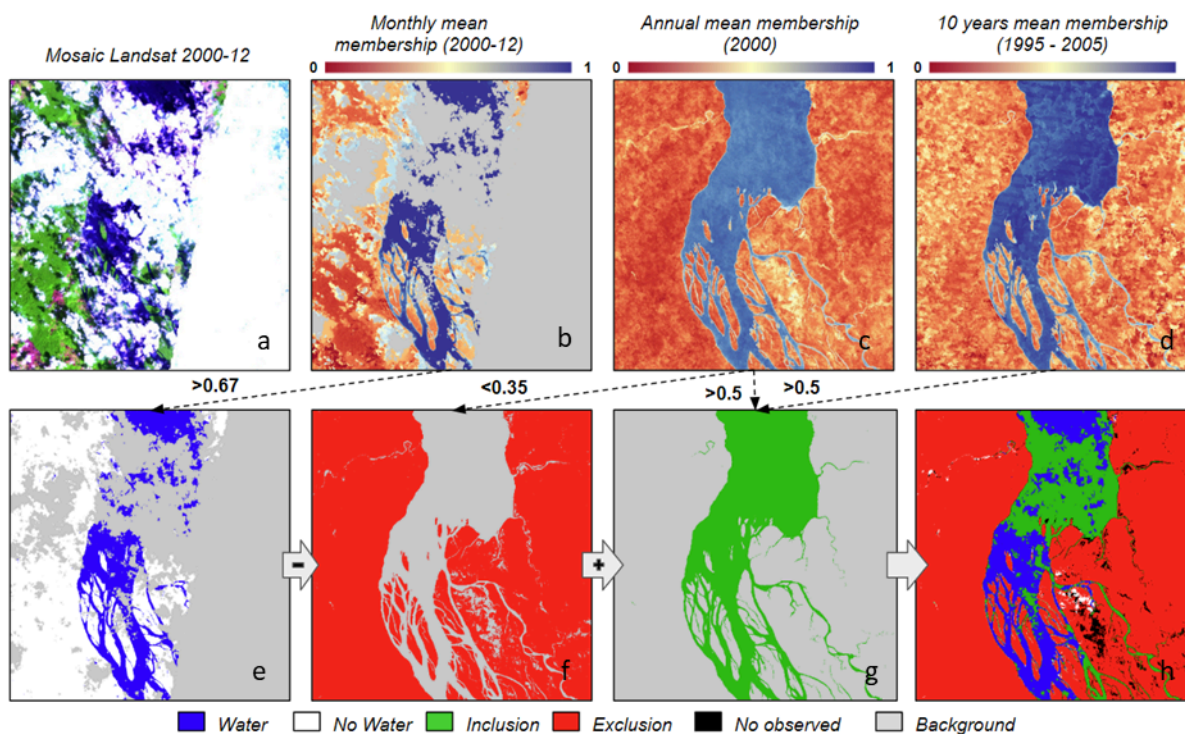


Figura 5. a: Mosaico Landsat mensual; b: Membership mediana mensual de SWSC; c: Membership mediana mensual anual de SWSC; d: Membership mediana mensual decenal de SWSC; e: Clasificación mensual de agua superficial; f: Agua superficial total por decenio; g: Área que probablemente sea agua superficial 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 la clasificación de cuerpos de agua en permanentes y estacionales, basada en la frecuencia con la que un píxel es clasificado como agua a lo largo del año.

- Agua permanente: píxeles con frecuencia ≥ 6 meses al año.
- Agua estacional: píxeles con frecuencia entre 1 y 5 meses al año.

El umbral para identificar agua permanente considera la existencia de temporadas seca y húmeda en la mayoría de las regiones del país, garantizando que todos los cuerpos de agua que mantienen flujo o almacenamiento durante la estación seca, pero que presentan cierta variabilidad natural, sean correctamente clasificados como permanentes. Esta

distinción permite reflejar con precisión la dinámica hidrológica anual de ríos, lagos, humedales y otros ecosistemas acuáticos de Venezuela.

3.2.6. Categorización de cuerpos de agua

El mapeo de la superficie de agua en Venezuela se estructuró en un esquema de clasificación de dos niveles, que considera tanto el origen como el uso de los cuerpos de agua:

Según su origen:

1. Natural: cuerpos de agua que se formaron de manera natural.
2. Antrópico: cuerpos de agua creados o modificados por actividades humanas.

Según su uso:

1. Naturales:
 - a. Ríos, lagos y océanos.
 - b. Lagunas de origen glacial.
2. Antrópicos:
 - a. Cuerpos de agua asociados a actividades mineras.
 - b. Cuerpos de agua vinculados a la explotación de petróleo.
 - c. Cuerpos de agua vinculados a la extracción de gases.
 - d. Acuicultura.
 - e. Embalses para abastecimiento de agua potable.
 - f. Embalses para riego agrícola.
 - g. Embalses de uso mixto.
 - h. Hidroeléctricas.
 - i. Otros usos.

Adicionalmente, se incorporó una categoría de falsos positivos como subproducto del proceso de clasificación, destinada a eliminar los casos residuales de detecciones erróneas que podían persistir en las capas mensuales y anuales de superficie de agua.

Este enfoque multinivel permite no solo identificar la presencia de agua superficial, sino también caracterizarla según su origen y función, facilitando análisis hidrológicos, gestión de recursos hídricos y planificación territorial.

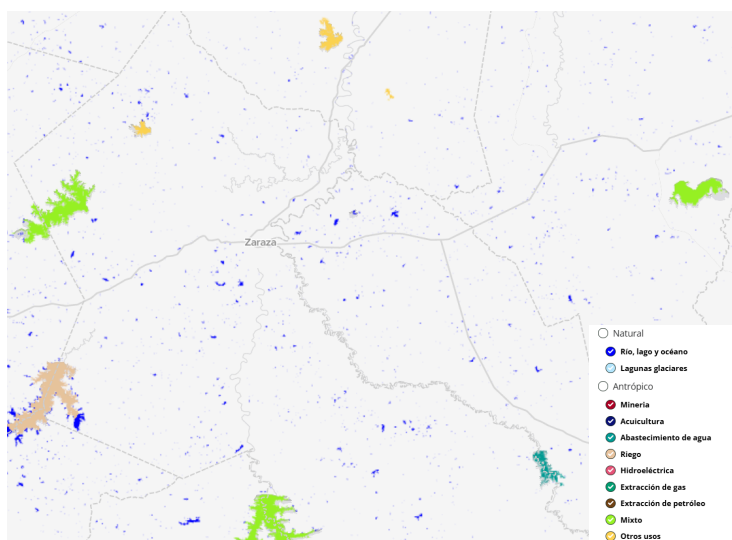


Figura N° 6. Ejemplo de categorías de cuerpos de agua según su origen y uso, bioma orinoquia

3.2.6.1. Delimitación de objetos

La delimitación vectorial de los cuerpos de agua se realizó a través de un proceso denominado vectorización anual, que consiste en convertir los mapas raster de frecuencia mensual de superficie de agua en polígonos regulares (datos vectoriales) correspondientes a cada año, respetando la delimitación espacial de los cuerpos de agua identificados.

Para este procedimiento se utilizó una herramienta de segmentación, en la cual un cuerpo de agua determinado podía generar uno o varios polígonos, dependiendo de su forma y dinámica espacial. En particular, se empleó la función SNIC (Simple Non-Iterative Clustering) disponible en Google Earth Engine, que permite generar segmentos pequeños, regulares y coherentes con la morfología de los cuerpos de agua.

La Figura 7 presenta ejemplos de la segmentación anual basada en los datos de frecuencia mensual, ilustrando cómo la vectorización transforma los mapas raster en polígonos vectoriales listos para análisis hidrológicos, planificación territorial y gestión de recursos hídricos.

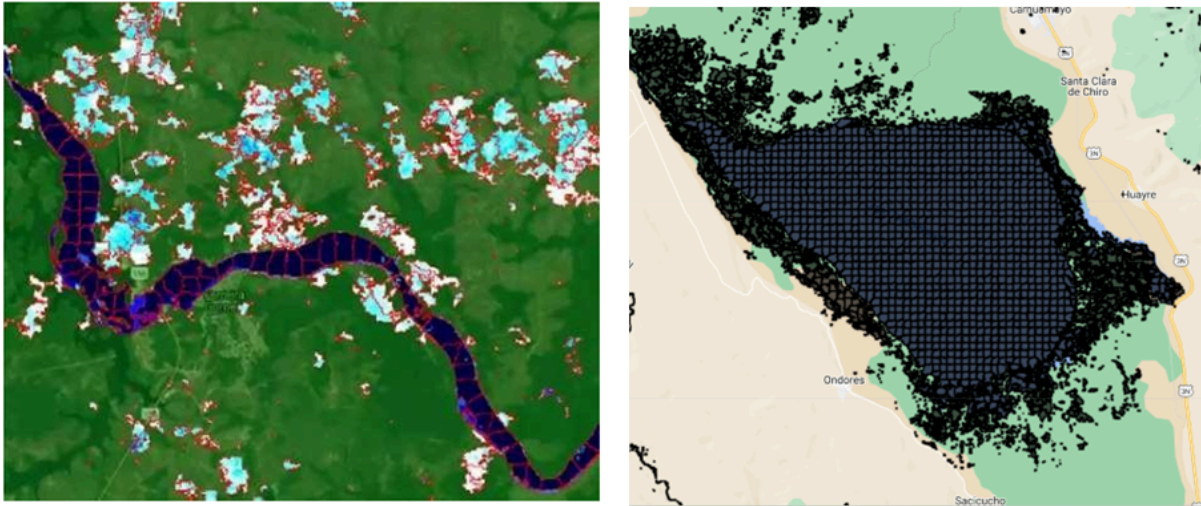


Figura N° 7. Ejemplos del proceso de segmentación que convierte datos raster (frecuencia mensual dentro de cada año) en una malla de vectores regulares

3.2.6.2. Asignación de propiedades de objetos (SNIC - properties)

Tras la generación de los objetos vectoriales para cada año, se asignó a cada uno un conjunto de atributos con propiedades relevantes para su posterior uso en la clasificación y análisis de los cuerpos de agua. Estas propiedades incluyen información relacionada con la morfología del objeto, la geomorfología y datos cualitativos provenientes de otros estudios sobre clasificación de cuerpos de agua y mapeo de cobertura y uso del suelo.

Entre las variables asignadas a cada objeto se incluyen:

1. Morfométricas: área, perímetro, relación área/perímetro, compacidad, redondez, grado de elongación, relación Laenge-Breite, convexidad, extensión máxima.
2. Espaciales: número de vecinos, número de vecinos dentro de un buffer de 50 metros.
3. Clasificación de origen y uso: clasificación ANA (antrópica), clasificación ANA (hidroeléctrica).
4. Cobertura y uso del suelo: clases MapBiomias (urbano, minería, bosque, clase no forestal, pasto).
5. Otras variables: valor máximo del modelo SRTM y media de la frecuencia total de agua.

La integración de estas propiedades permite caracterizar de manera detallada cada cuerpo de agua, facilitando análisis morfométricos, espaciales y funcionales, así como la implementación de procesos de clasificación más precisos y consistentes a lo largo de las series temporales.

3.2.6.3. Clasificación de objetos basada en muestras de entrenamiento

La clasificación de los cuerpos de agua se llevó a cabo mediante el algoritmo Random Forest, un clasificador de ensamble basado en árboles de decisión que permite manejar grandes volúmenes de datos y variables correlacionadas, garantizando alta precisión y robustez en la predicción.

Las muestras de entrenamiento se recolectaron de manera representativa en los distintos biomas del país, abarcando cinco de las 11 clases definidas para la clasificación. Para asegurar la cobertura espacial y temporal, las muestras se seleccionaron utilizando un conjunto de cuadrículas predefinidas en cada bioma, incluyendo diferentes años dentro de la serie temporal analizada (2000–2024). Este enfoque permitió capturar la variabilidad espectral y morfológica de los cuerpos de agua, optimizando el desempeño del clasificador y garantizando la consistencia de los resultados a lo largo de los distintos ecosistemas y periodos analizados.

Para su uso, todas las colecciones de muestras disponibles fueron agrupadas en un único asset, garantizando que todos los puntos de referencia estén centralizados y listos para su análisis.

Posteriormente, cada muestra se enriqueció con propiedades derivadas de los objetos segmentados (SNIC), como información morfológica y espacial de los cuerpos de agua circundantes. Esto permite que cada punto de muestra represente no solo su ubicación, sino también características relevantes de los cuerpos de agua, facilitando la capacitación del clasificador y la validación de los resultados.

Finalmente, las muestras preparadas se emplean directamente en el entrenamiento del algoritmo Random Forest, asegurando que la clasificación capture correctamente las diferencias entre agua natural y antrópica y reduciendo errores de falsos positivos y negativos.

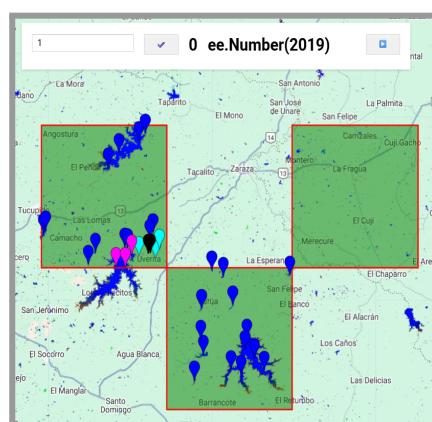


Figura N° 8. Toma de muestras.

3.2.6.4. Filtro temporal

Posterior a la clasificación de los cuerpos de agua, los resultados fueron sometidos a una rutina de post-clasificación, mediante la aplicación de un filtro temporal. La lógica de este filtro consistió en eliminar transiciones improbables entre clases dentro de un mismo segmento a lo largo de la serie temporal, garantizando la coherencia espacial y temporal de la información.

Adicionalmente, todos los polígonos clasificados como falsos positivos en cada año fueron reconvertidos a formato raster y utilizados para depurar los conjuntos de datos anuales y mensuales de superficie de agua. Este procedimiento permitió eliminar los falsos positivos residuales, mejorando la precisión y consistencia de los productos finales de MapBiomás Agua Venezuela.

3.2.6.5. Filtro post-clasificación

Durante la post-clasificación de los cuerpos de agua, se implementaron filtros secuenciales para mejorar la consistencia y precisión de la clasificación anual. Estos filtros tienen como objetivo principal eliminar falsos positivos, corregir transiciones improbables y ajustar la clasificación según la dinámica real de los cuerpos de agua.

1. Filtro de frecuencia de falsos positivos:
 - a. Se calculó la frecuencia de aparición de falsos positivos a lo largo de la serie temporal (2000 - 2024).
 - b. Los píxeles con frecuencia de falsos positivos superior al umbral ($\geq 40\%$) fueron reclasificados, asegurando que las detecciones persistentes de clases erróneas fueran corregidas.
2. Filtros basados en secuencias temporales:
 - a. Se evaluaron las secuencias de aparición de agua natural y antrópica en los distintos años, utilizando los primeros años de detección como referencia.
 - b. Esta información permitió reclasificar píxeles inconsistentes, evitando asignaciones incorrectas de agua natural como agua antrópica y viceversa.
3. Filtro de coherencia con mapas anuales integrados:
 - a. Se compararon los resultados de la clasificación con los mapas anuales de frecuencia de agua (píxeles clasificados como agua ≥ 6 meses por año).
 - b. Los píxeles que no coincidían con esta frecuencia fueron ajustados, eliminando detecciones de agua poco consistentes o temporales que podrían corresponder a falsos positivos.
4. Filtro de porcentaje de presencia de agua:
 - a. Se calculó la proporción de detecciones de agua por píxel a lo largo de la serie temporal.
 - b. Aquellos píxeles con presencia superior a un umbral definido ($\geq 75\%$) se consolidaron como agua natural, mientras que los píxeles con menor consistencia fueron reclasificados para evitar errores residuales.

Estos filtros integran información de frecuencia, secuencias temporales y mapas anuales, asegurando que la clasificación final de los cuerpos de agua sea coherente, precisa y

representativa de la dinámica hidrológica real, permitiendo su uso confiable en análisis hidrológicos, gestión de recursos hídricos y planificación territorial.

3.2.6.6. Enmascaramiento de clases antrópicas

En esta fase, se aplicaron máscaras específicas para identificar y clasificar los cuerpos de agua de origen antrópico, diferenciando su tipología según uso: embalses de agua potable, riego y mixtos, cuerpos asociados a extracción de petróleo y gas, acuicultura, hidroeléctricas y otros usos.

Para ello, se utilizaron capas auxiliares vectoriales y raster que representan la ubicación de cada tipología. Estas capas se reproyectaron, bufferizaron y convirtieron a raster, generando máscaras binarias que se integraron con los objetos segmentados y la clasificación base de MapBiomias Agua.

El enmascaramiento permitió asignar correctamente los píxeles a su categoría antrópica correspondiente y evitar la reclasificación incorrecta de cuerpos de agua naturales. De esta manera, la clasificación final combina información de origen y uso, asegurando consistencia espacial y temporal en la serie de 2000 a 2024.

3.2.6.7. Clases de cuerpos de agua

La clasificación de cuerpos de agua en MapBiomias Agua se estructura en dos niveles jerárquicos: por origen (natural vs. antrópico) y por uso, permitiendo una caracterización funcional y ecológica de las masas de agua identificadas en el territorio venezolano. Esta clasificación se basa en definiciones recogidas en literatura científica y guías de gestión de recursos hídricos que consideran criterios hidrológicos, geomorfológicos y funcionales de los cuerpos de agua.

Nivel 1: Origen de los cuerpos de agua

1. Natural: Son formaciones hídricas que existen en el paisaje sin intervención directa del ser humano, producto de procesos hidrológicos y geomorfológicos propios del sistema terrestre. Estos cuerpos de agua se generan por la acumulación, flujo o almacenamiento de agua superficial y desempeñan funciones ecológicas esenciales en los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos.
2. Antrópico: son aquellos creados, modificados o mantenidos por actividades humanas, como la construcción de estructuras hidráulicas, la modificación de cauces, la explotación de recursos o el diseño de unidades productivas. Estas masas de agua pueden no existir de forma natural en ausencia de intervención humana, o pueden presentar alteraciones significativas en su hidromorfología original.

Nivel 2: Clasificación según uso

1. Cuerpos de agua naturales: Estas clases corresponden a cuerpos de agua cuya existencia y dinámica esencial responden a procesos naturales del entorno físico y biológico.
 - 1.1. Ríos, lagos y océanos: Cuerpos de agua superficiales con flujo continuo o periódico a lo largo de un cauce determinado, transportando agua desde zonas altas hacia zonas bajas o hacia otros cuerpos de agua receptores (lagos, lagunas u océanos). Representan sistemas lóticos característicos de redes hidrográficas continentales.
 - 1.2. Laguna de origen glaciar: Son cuerpos de agua superficiales formados como resultado de la actividad glacial, típicamente en depresiones generadas por la erosión de glaciares o en zonas de morrenas. Estas lagunas se caracterizan por su origen geológico reciente, aguas frías y baja carga de nutrientes, y suelen encontrarse en regiones montañosas o en altas latitudes. Desempeñan un papel ecológico e hidrológico crucial, sirviendo como reservorios de agua dulce y reguladores de caudales en ríos afluentes. (Glasser et al., 2016)
2. Cuerpos de agua antrópicos: Las siguientes clases se utilizan para tipificar cuerpos de agua cuya presencia, forma o función están directamente asociadas con actividades humanas:
 - 2.1. Embalses para abastecimiento de agua potable: Cuerpos de agua almacenados artificialmente mediante estructuras (presas, diques) destinados a la captación, regulación y suministro de agua para consumo humano. La creación de embalses responde a la gestión del recurso hídrico para garantizar disponibilidad en períodos secos o de alta demanda.
 - 2.2. Embalses para riego agrícola: Reservorios construidos con el objetivo principal de almacenar agua para su uso en sistemas de riego, apoyando actividades agropecuarias. Su operación está alineada con necesidades estacionales de humedad
 - 2.3. Embalses de uso mixto: Estructuras de almacenamiento de agua que combinan múltiples propósitos, como abastecimiento humano, riego, control de inundaciones, recreación o generación energética.
 - 2.4. Hidroeléctricas: Cuerpos de agua represados y gestionados con fines de generación eléctrica, donde la regulación del flujo y el nivel del agua está orientada a la producción de energía.
 - 2.5. Acuicultura: Cuerpos de agua diseñados y mantenidos para la crianza y producción de organismos acuáticos, como peces y camarones, en sistemas productivos controlados. Este uso modifica el sistema acuático original y genera un cuerpo de agua gestionado con fines productivos.
 - 2.6. Cuerpos de agua asociados a actividades mineras: son aquellos cuya formación o alteración está vinculada con la extracción de minerales, depósitos o materiales, donde los procesos extractivos inciden en la hidromorfología y calidad del agua.
 - 2.7. Cuerpos de agua vinculados a la explotación de petróleo: son masas de agua superficiales que resultan o se encuentran afectadas por actividades de extracción de hidrocarburos, incluyendo pozos y zonas de operación asociadas, con potencial impacto hidrológico y químico.

- 2.8. Cuerpos de agua vinculados a la extracción de gases: Con características similares a los cuerpos destinados a explotación petrolera, estos cuerpos de agua están asociados a actividades de extracción de gas, cuyos mecanismos operacionales pueden modificar el entorno acuático local.
- 2.9. Otros usos antrópicos: Incluye cuerpos de agua creados o mantenidos para actividades diversas que no encajan en las categorías anteriores, tales como almacenamiento para uso industrial, recreativo u otros fines socioeconómicos específicos.

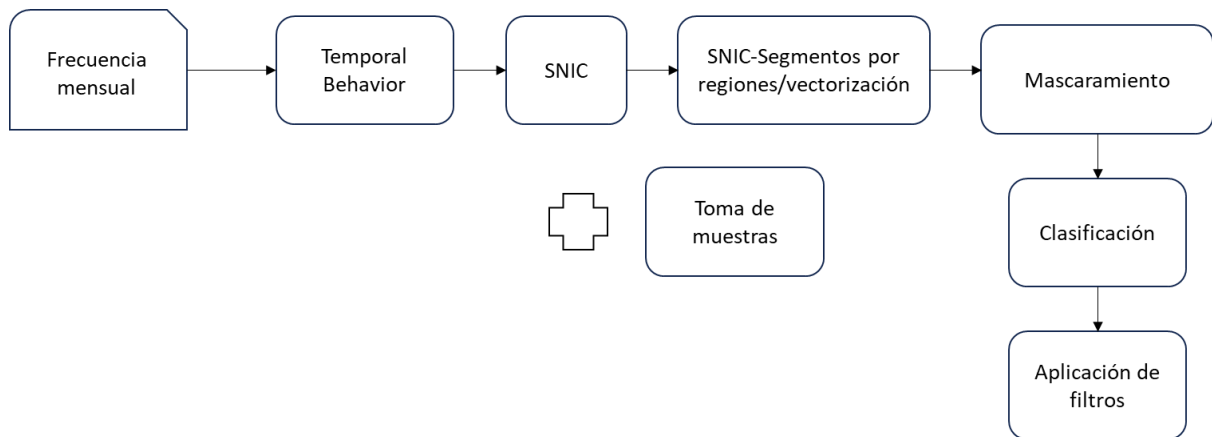


Figura N° 9. Diagrama general de categorización de cuerpos de agua

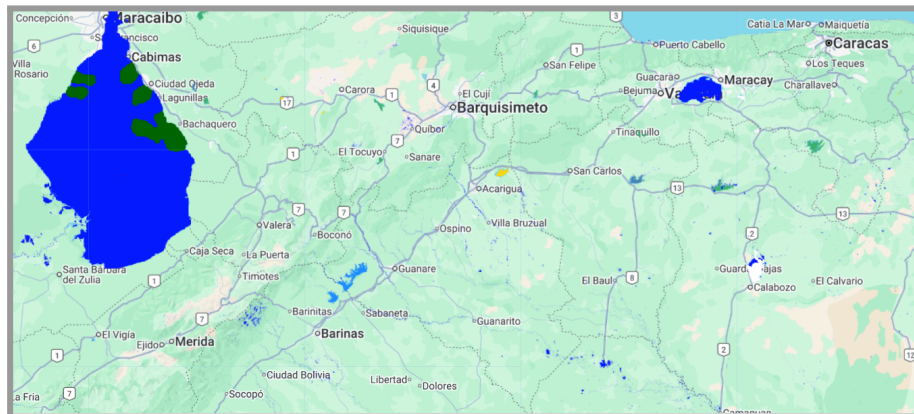


Figura N° 10. Resultado preliminar de la clasificación de cuerpos de agua

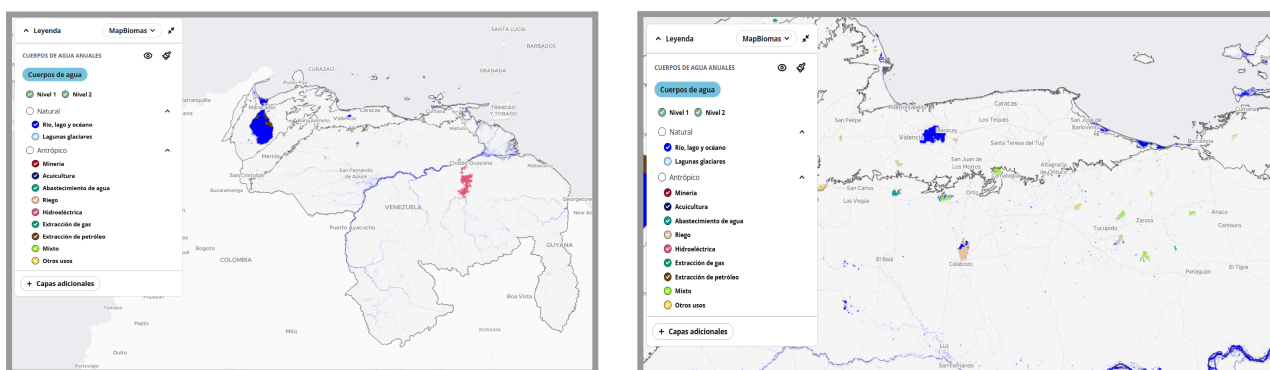


Figura N° 11. Resultados obtenidos para Venezuela.

Códigos de las clases de los cuerpos hídricos y paleta de colores utilizadas en la Colección 3 de MapBiomos Agua Venezuela				
Nivel 1				
2. The classification of bodies of water according to their origin	2. La clasificación de los cuerpos hídricos según su origen			
2.1. Natural	2.1 Natural	1	#0000ff	
2.2 Anthropics	2.2 Antrópico	2	#00D7EE	
Nivel 2				
The classification of bodies of water according to their use	La clasificación de los cuerpos de agua según su uso			
1. Rivers, lakes and oceans	1. Ríos, lagos y océanos	1	#0000ff	
Glacial lagoons	1.1. Lagunas Glaciares	4	#b3e5fc	
2. Anthropics	2. Antrópicos			
2.1. Mining	2.1. Minería	2	#AC0024	
2.2. Aquaculture	2.2. Acuicultura	3	#091077	
2.3. Water supply	2.3. Abastecimiento de agua	5	#009b94	
2.4. Irrigation	2.4. Riego	6	#e8c39e	
2.5. Mixed	2.5. Mixto	7	#97f425	
2.6. Hydroelectric	2.6. Hidroeléctrica	8	#E65277	
2.7. Other uses	2.7. Otros usos	9	#fed353	
2.8. Gas extraction	2.8. Extracción de gas	10	#009d71	
2.9. Oil extraction	2.9. Extracción de petróleo	11	#704214	

Table 2. Leyenda Nivel 1 y 2 de los cuerpos hídricos de la colección de MapBiomos Agua.

4. Colección de mapas y análisis

La Colección 3 del mapeo de superficie de agua, tanto líquida como sólida, se encuentra disponible en la plataforma web pública de MapBiomias Agua Venezuela: <https://plataforma.venezuela.mapbiomas.org/agua>

Esta plataforma integra cuatro coberturas principales de información: (i) superficie de agua, (ii) Cuerpos de agua anuales clasificados según su origen y tipo de uso, (iii) Glaciar, y (iv) Superficie de agua mensual, (V) frecuencia de agua

4.1. Área de agua superficial anual

La capa de agua superficial corresponde a la cobertura anual mapeada para todo el territorio venezolano, incluyendo las 26 entidades federales. Los datos abarcan el período 2000–2024 y presenta la presencia de agua

La información también se encuentra estructurada por diferentes límites administrativos y ecológicos, tales como: país, biomas, estado, municipio, cuencas hidrográficas, regiones administrativas, regiones fisiográficas y territorios indígenas. Esto permite al usuario seleccionar la forma de agrupación territorial de interés y definir rangos temporales específicos, actualizando de manera dinámica los mapas, gráficos y estadísticas de acuerdo con sus preferencias de análisis.

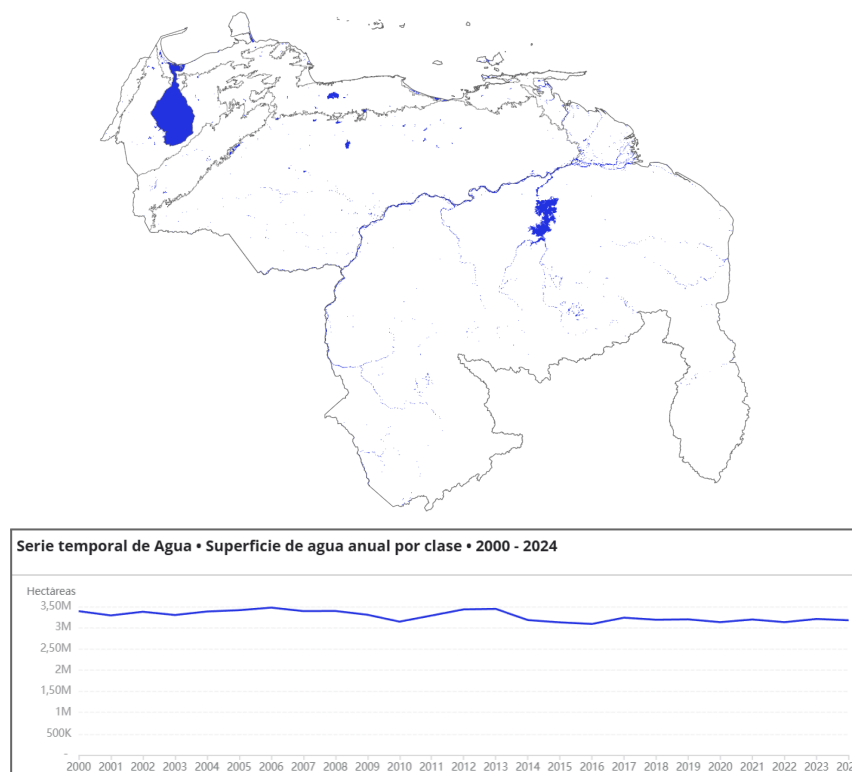


Figura N° 12. Ejemplo de visualización de los datos de la capa de superficie de agua (mapa y gráfico) en la plataforma de MapBiomias Agua Venezuela.

4.2. Área de agua superficial mensual

La capa de agua superficial mensual ofrece información detallada sobre la dinámica temporal de los cuerpos de agua en Venezuela, abarcando el período 2000–2024. Esta capa proporciona la superficie de agua para cada mes del año, permitiendo identificar con precisión los meses de máxima y mínima extensión de agua dentro del año seleccionado.

Además de la visualización espacial, la plataforma incorpora gráficos mensuales que muestran la variación de la superficie de agua a lo largo del año, así como tendencias mensuales calculadas para todo el período de análisis. Esta funcionalidad permite evaluar patrones estacionales y detectar cambios significativos en la disponibilidad de agua superficial a nivel temporal.

Al igual que la capa anual, la información mensual puede visualizarse y analizarse según diferentes agrupaciones territoriales, país, biomas, estado, municipio, cuencas hidrográficas, regiones administrativas, regiones fisiográficas y territorios indígenas. Esto facilita un análisis comparativo y detallado de la dinámica hídrica a diferentes escalas espaciales y temporales, adaptándose a las necesidades específicas del usuario.

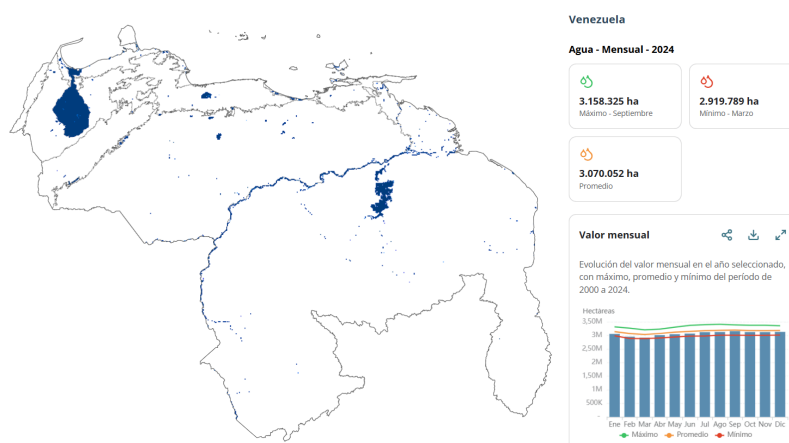


Figura N° 13. Visualización de los datos de la capa de superficie de agua mensual en la plataforma de MapBiomos Agua Venezuela.

4.3. Frecuencia de agua anual

La capa de frecuencia de agua proporciona información anual sobre la persistencia de la superficie de agua en el territorio venezolano, considerando el período 2000–2024. Esta capa representa la frecuencia con la que un píxel es detectado como agua a lo largo del año, mostrando valores que van desde 1 vez hasta 25 veces o más, dependiendo de la constancia y permanencia de los cuerpos de agua.

Los datos se presentan de manera geoespacial y pueden agruparse según diferentes límites territoriales, incluyendo país, biomas, estado, municipio, cuencas hidrográficas, regiones administrativas, regiones fisiográficas y territorios indígenas, permitiendo análisis a

distintas escalas espaciales y facilitando la comparación entre regiones y tipos de cuerpos de agua.

Adicionalmente, el panel lateral derecho de la plataforma proporciona un gráfico de frecuencia por clases, mostrando la distribución de píxeles según el número de veces que se detecta agua. Este gráfico incluye los valores numéricos de cada clase de frecuencia, lo que permite al usuario cuantificar y analizar la persistencia de los cuerpos de agua en cada unidad territorial o categoría seleccionada.

Esta información es fundamental para estudios de dinámica hídrica, gestión de recursos hídricos, conservación de ecosistemas acuáticos y planificación territorial, ya que permite identificar zonas de agua permanente, estacional o transitoria.

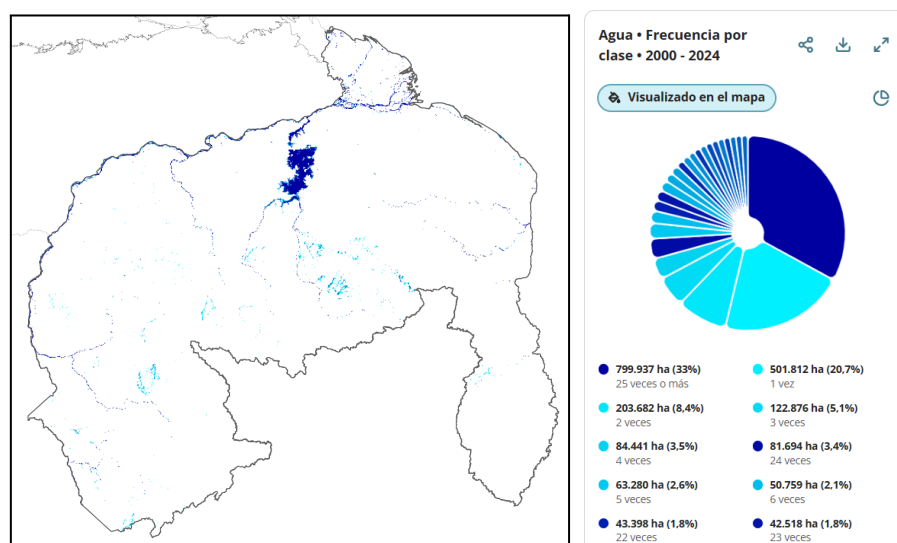


Figura N° 11. Visualización de los datos de la capa de frecuencia de agua en la plataforma de MapBiomás Agua Venezuela.

4.4. Cuerpos de agua anual

La capa de cuerpos de agua anuales presenta la clasificación detallada de los cuerpos de agua en Venezuela, mostrando las diferentes categorías según su origen y uso, incluyendo cuerpos de agua naturales (ríos, lagos, océanos y lagunas de origen glaciar) y antrópicos (embalses para abastecimiento de agua potable, riego, uso mixto, hidroeléctricas, acuicultura, extracción de petróleo y gas, minería y otros usos).

Los datos se encuentran disponibles para cada año de la serie 2000–2024, permitiendo evaluar la dinámica temporal de cada tipo de cuerpo de agua. La visualización puede realizarse mediante distintas agrupaciones territoriales, tal como en los casos anteriores, ofreciendo de esta manera un análisis flexible a diferentes escalas espaciales.

El panel lateral derecho de la plataforma proporciona gráficos que permiten explorar tanto la superficie ocupada por cada tipo de cuerpo de agua como la tendencia temporal asociada, facilitando la identificación de patrones de expansión, contracción o estabilidad de los distintos cuerpos de agua a lo largo de los años.

Esta capa es esencial para la gestión de recursos hídricos, planificación territorial, monitoreo de impactos antrópicos y conservación de ecosistemas acuáticos, al proporcionar información precisa y categorizada sobre la distribución y comportamiento anual de los cuerpos de agua en Venezuela.

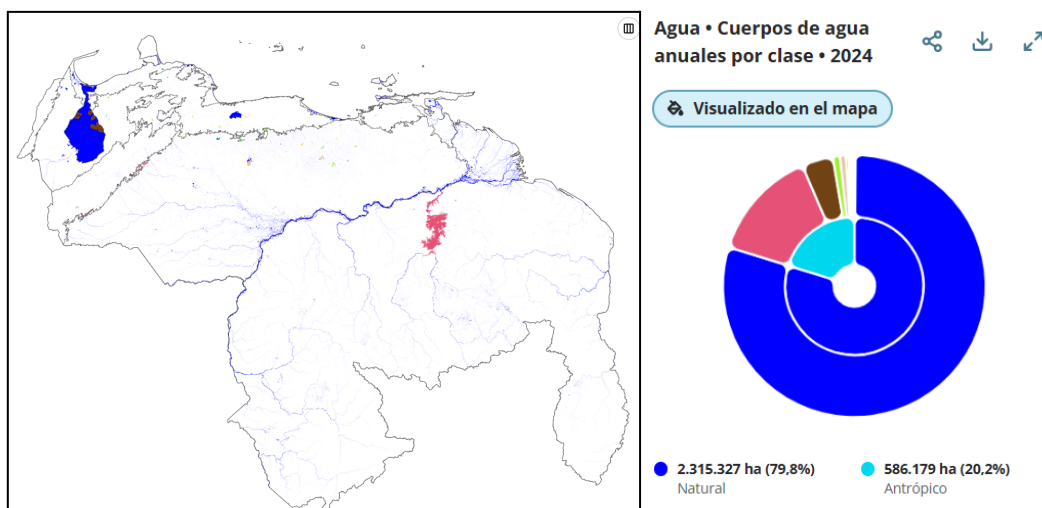


Figura N° 12. Visualización de los datos de tipos de cuerpos de agua en la plataforma de MapBiomias Agua Venezuela.

5. Consideraciones prácticas

La tercera versión de este producto constituye un avance significativo en el marco de la mejora continua, incorporando observaciones y sugerencias derivadas del uso y análisis de la primera versión. Este producto se concibe como una herramienta dinámica, diseñada no sólo para proporcionar datos confiables y relevantes, sino también para evolucionar en función de las necesidades de los usuarios y de las innovaciones tecnológicas disponibles.

Todos los datos generados se encuentran disponibles públicamente, promoviendo la transparencia y el acceso abierto. Este enfoque permite a los usuarios revisar el contenido, evaluar su precisión e identificar posibles ajustes, facilitando un proceso iterativo de retroalimentación que fortalece la actualización y relevancia del producto. Las contribuciones de la comunidad científica y de otros usuarios son fundamentales para garantizar que las futuras versiones continúen mejorando y ajustándose a los requerimientos prácticos y analíticos.

Se recomienda que los usuarios consideren que la aplicación de los datos cuantitativos debe acompañarse de una revisión rigurosa de los niveles de precisión y de las métricas de incertidumbre asociadas (esta colección incluye en la nota informativa detalles sobre la precisión del dato en andes y tepuyes). Esto asegura una interpretación robusta y una evaluación adecuada de su aplicabilidad en distintos contextos. Los datos deben

contrastarse con otras fuentes o estudios complementarios para validar sus resultados y detectar posibles limitaciones.

Este enfoque adaptativo refuerza el compromiso de los desarrolladores con la calidad y utilidad del producto, promoviendo la colaboración entre la comunidad científica y los usuarios, y maximizando el impacto positivo de este conjunto de datos en la investigación, la gestión de recursos hídricos y la toma de decisiones basada en evidencia.

6. Conclusiones finales y perspectivas

La Colección 3 de MapBiomias Agua constituye un producto fundamental de cartografía de la superficie de agua para los países amazónicos, consolidando los avances logrados en la Colección 2. Este producto representa un aporte significativo para la comprensión de la dinámica espacial y temporal de los ecosistemas de agua dulce, proporcionando información detallada sobre patrones de cambio, ciclos de incremento o disminución, y permitiendo estimar ganancias o pérdidas de superficie de agua a lo largo del tiempo.

Los resultados obtenidos permiten asociar los cambios observados con actividades humanas, como el uso agrícola, la generación de embalses, la explotación minera o energética, y otras presiones antrópicas, generando conocimiento valioso sobre las interacciones entre los sistemas naturales y las intervenciones humanas. De esta manera, la cartografía no solo ofrece una descripción cuantitativa de la superficie de agua, sino que también se convierte en una herramienta para analizar procesos y tendencias críticas para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

El desarrollo de este producto fortalece los objetivos de la iniciativa MapBiomias Agua y RAISG, destacando el valor del trabajo colaborativo entre instituciones, investigadores y comunidades locales. La disponibilidad pública de los datos promueve la transparencia, facilita el acceso abierto y permite su utilización por parte de tomadores de decisiones, gestores ambientales, investigadores y comunidades, quienes pueden emplear la información para la planificación de acciones de conservación, restauración y uso racional del recurso hídrico.

Se enfatiza que, para la adecuada interpretación de los datos, los usuarios deben considerar los niveles de precisión y las métricas de incertidumbre asociadas, confrontando la información con otras fuentes o estudios complementarios cuando sea necesario. Este enfoque garantiza un uso responsable y una evaluación robusta de la aplicabilidad de los datos en distintos contextos ambientales y de gestión.

En términos generales, la Colección 3 de MapBiomias Agua representa un avance tecnológico y científico significativo, consolidando un producto dinámico y actualizado que contribuye al entendimiento integral de los cuerpos de agua en la región amazónica, promoviendo la mejora continua, la colaboración científica y la generación de conocimiento que respalde la gestión sostenible y la conservación de los ecosistemas acuáticos.

7. Referencias

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2018). Manual de Usos Consuntivos e Não Consuntivos da Água. Brasília, Brasil.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2021). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília, Brasil.

Copernicus Programme. (2019). Water Bodies Mapping – Product User Manual. European Union, Copernicus Land Monitoring Service.

Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H., Gorelick, N., Kwadijk, J., & van de Giesen, N. (2016). Earth's surface water change over the past 30 years. *Nature Climate Change*, 6, 810–813.

European Environment Agency (EEA). (2018). European waters — Assessment of status and pressures. EEA Report No 7/2018. Copenhagen.

Gilbert, R. O. (1987). *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. John Wiley & Sons, New York.

Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., et al. (2019). Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 569, 215–221.

Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (1995). *Statistical Methods in Water Resources*. Elsevier, New York.

Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20(6), 727–732.

Hirsch, R. M., Slack, J. R., & Smith, R. A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1), 107–121.

IPBES – Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2019). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn, Germany.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

Junk, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, 106, 110–127.

MEA – Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.

Morell, J., & Fried, R. (2009). On nonparametric tests for trend detection in seasonal time series. *Computational Statistics & Data Analysis*, 53(7), 2401–2411.

Oliveira, B. C., & Souza, C. M. (2019). A novel approach to monitor water in Brazil with satellite images – a concept note. WWF Report, Brasil.

Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418–422.

RAISG – Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada. (2020). *Amazonía bajo presión*. São Paulo.

Souza, C. M., Kirchhoff, F. T., Oliveira, B. C., Ribeiro, J. G., & 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.

UNEP – United Nations Environment Programme. (2021). *Freshwater ecosystems under pressure*. Nairobi.

UNESCO – World Water Assessment Programme. (2023). *United Nations World Water Development Report*. Paris.

World Bank. (2020). *High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy*. Washington, DC.

World Wildlife Fund (WWF). (2018). *Living Planet Report: Aiming Higher*. Gland, Switzerland.