MAPBIOMAS

PERÚ

Cobertura y uso del suelo

Mapa general

Documento de base teórica sobre algoritmos (ATBD)

Colección 4.0

2026

Responsable técnica de la Iniciativa Cobertura y Uso del Suelo

Zuley Cáceres

Equipo de Especialistas

Valeria Llactayo

Lucy Flores

Silvana Di Liberto

Sergio Campos

Milagros Miguel

Pedro Fuentes

Aleli Ivala

Jefa de proyectos MapBiomas Perú

Andrea Bravo

Coordinadora general de MapBiomas Perú

Marybel Torres

Institución

Instituto del Bien Común

Jr. Mayta Cápac 1329
Jesús María, Lima 11. Perú
Teléfonos: (51-1) 3732268 - (51-1) 3732296 - (51-1) 373-2284
www.ibcperu.org

Resumen Ejecutivo

MapBiomas Perú – Cobertura y Uso del Suelo es una iniciativa coordinada por el Instituto del Bien Común (IBC) que genera información anual, consistente y de libre acceso sobre las transformaciones de la cobertura y el uso del suelo en el territorio peruano. El IBC, miembro de la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG), cuenta con una amplia trayectoria en monitoreo territorial mediante sensores remotos. Esta experiencia se fortaleció con MapBiomas Amazonía, iniciativa desarrollada por la RAISG en articulación con la Red MapBiomas, en cuyo marco el IBC participó en seis colecciones de mapas que incluyeron el mapeo de la cuenca amazónica peruana. Posteriormente, este trabajo se amplió a escala nacional con la creación de MapBiomas Perú.

La Colección 4.0 proporciona mapas anuales de cobertura y uso del suelo para el período 1985–2025, con una resolución espacial de 30 metros. Este Documento de Base Teórica sobre Algoritmos (ATBD) describe los fundamentos conceptuales y metodológicos utilizados para su producción, desde la generación de mosaicos y la clasificación hasta la posclasificación, integración, análisis de transiciones, estadísticas y validación. El mapeo comprende el territorio nacional y considera los biomas Amazonía, Andes, Bosque Seco Ecuatorial y Desierto Costero.

La metodología se basa principalmente en imágenes de la serie Landsat, procesadas en Google Earth Engine, y en variables espectrales, temporales, texturales y topográficas. La clasificación se realiza mediante el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest, complementado con conocimiento experto y una regionalización del territorio que permite ajustar los procedimientos a las particularidades ambientales y a las dinámicas de cambio de cada zona. La clasificación general se complementa con temas transversales para aquellas coberturas que requieren metodologías específicas.

Los resultados son sometidos a procedimientos de posclasificación orientados a reducir inconsistencias espaciales y temporales y mejorar la coherencia de la serie histórica. Posteriormente, las clasificaciones regionales y los temas transversales se integran mediante reglas de prevalencia. A partir de los mapas integrados se generan también mapas de transición y estadísticas para distintas unidades territoriales y ambientales, mientras que la calidad temática de los productos es evaluada mediante procedimientos independientes de validación.

De esta manera, MapBiomas Perú proporciona una base de información de alcance nacional para analizar las transformaciones de la cobertura y el uso del suelo en el país. Sus productos contribuyen a la investigación, el monitoreo ambiental, la planificación territorial y la toma de decisiones, mientras que el acceso abierto a los mapas, estadísticas, métodos y algoritmos favorece la transparencia, la reproducibilidad y el uso público de la información geoespacial.

ÍNDICE

Lista de Tablas **5**
Lista de Figuras **5**
1. Introducción **6**
1.1. Alcance y contenido del documento 6
1.2. Visión general 6
1.3. Área de estudio 7
1.4. Aplicaciones 10
2. Información básica y antecedentes **11**
2.1 Contexto institucional 11
2.1.1. Instituto del Bien Común - IBC 11
2.2 Datos de Percepción Remota 12
2.3. Google Earth Engine y MapBiomas Perú 12
2.4. Otras iniciativas de mapeo 12
2.4.1. Fuentes mundiales 13
2.4.2. Fuentes para la región Amazónica 13
2.4.3. Fuentes para el territorio nacional 14
3. Metodología **14**
3.1 Generación de mosaicos anuales 15
3.1.1. División del espacio de análisis en cartas 15
3.1.2. Parametrización de mosaicos anuales 19
3.2. Variables de clasificación o feature space 21
3.3 Clasificación 26
3.3.1. Leyenda 26
3.3.2. Regiones de clasificación 35
3.3.3. Algoritmo de clasificación 37
3.3.4. Colecta de muestras 38
3.3.5. Temas transversales 38
3.4. Posclasificación 40
3.4.1 Llenado de vacíos de información (Gap Fill) 40
3.4.2 Filtro Temporal 41
3.4.3 Filtro Espacial 42
3.4.4 Filtro de frecuencia 43
3.4.5 Filtro de incidencia 43
3.4.6. Reclasificación 44
3.5. Integración 44
3.6 Mapas de transiciones 46
3.7 Estadísticas 46
4. Validación **47**
4.1. Diseño de muestreo 47
4.2. Interpretación de los puntos 48
4.3. Análisis de precisión 49
4.4. Resultados de la validación 50
4.4.1. Nivel 1: Precisión nacional y desempeño por clase 50
4.4.2. Nivel 2: Precisión regional y desempeño por clase 53
5. Consideraciones prácticas, desafíos y limitaciones metodológicas **54**
6. Referencias **55**

Lista de Tablas

Tabla 1. Características de la cobertura y uso del suelo de los biomas peruanos 9
Tabla 2. Resumen del número de cartas MapBiomas por región 17
Tabla 3. Resumen de parámetros utilizados en la construcción de los mosaicos 20
Tabla 4. Descripción de bandas y variables empleadas para la Colección 4.0. 22
Tabla 5. Leyenda general de cobertura y uso del suelo en la Colección 4.0. 27
Tabla 6. Memoria descriptiva para la leyenda 29
Tabla 7. Regiones de clasificación definidas en el marco del proyecto 35
Tabla 8. Parámetros utilizados en el clasificador Random Forest 38
Tabla 9. Reglas generales de prevalencia por bioma para la fase de integración 45
Tabla 10. Número de puntos de muestreo por región 47
Tabla 11. Indicadores usados en el análisis de precisión 49
Tabla 12. Precisión nacional, variación anual y precisión del año 2025 por nivel de clasificación 50
Tabla 13. Distribución de puntos de muestreo en las regiones del Perú 50
Tabla 14. Precisiones y errores por año para el Nivel 1 52
Tabla 15. Precisión general a nivel de región de validación. 53
Tabla 16. Clases robustas del Nivel 2 53
Tabla 17. Clases del Nivel 2 con alta omisión y baja comisión 54
Tabla 18. Clases del Nivel 2 con alta comisión y baja omisión 54
Tabla 19. Clases del Nivel 2 con oportunidades de mejora 54

Lista de Figuras

Figura 1. Límite de biomas identificados para Perú 8
Figura 2. Síntesis metodológica de la Colección 4.0. 15
Figura 3. Grilla de cartas MapBiomas, grilla de imágenes Landsat y límite nacional 16
Figura 4. Mapa de las cartas-región para la generación de mosaicos de imágenes para el Perú 18
Figura 5. Esquema de la aplicación de un reductor a una colección de imágenes 19
Figura 6. Proceso de cálculo de bandas que componen los mosaicos anuales de imágenes Landsat 22
Figura 7. Mapa de regiones de clasificación para la Colección 4.0. 37
Figura 8. Esquema de funcionalidad de filtro Gap Fill 41
Figura 9. Esquema de funcionalidad de filtro temporal 42
Figura 10. Esquema de funcionalidad de filtro espacial 43
Figura 11. Esquema de funcionalidad de filtro frecuencia 43
Figura 12. Esquema de funcionalidad de filtro incidencia 44
Figura 13. Ecuación de Cochran 47
Figura 14. Ecuación de Variabilidad por clase 47
Figura 15. Ecuación de Desviación estándar objetivo 47
Figura 16. Distribución de puntos de muestreo en las regiones del Perú 48
Figura 17. Protocolo de Validación 49
Figura 18. Evolución de la precisión global anual del Nivel 1, 1985-2025 51
Figura 19. Error de omisión por clase nivel L1 51
Figura 20. Error de Comisión por clase nivel L1 51

1. Introducción

1.1. Alcance y contenido del documento

El objetivo de este documento es describir la base teórica, la justificación y los métodos aplicados para producir mapas anuales de cobertura y uso del suelo desde el año 1985 hasta 2025 de la Colección 4.0. de Mapas Anuales de Cobertura y Uso de suelo de MapBiomas Perú.

Este documento cubre los métodos de clasificación de imágenes Landsat (L4, L5, L7, L8, L9), la arquitectura de procesamiento de imágenes y el enfoque para integrar los biomas y regiones presentes en el país. También se presenta un contexto histórico y antecedentes, así como una descripción general del conjunto de datos de imágenes satelitales y del método de evaluación de precisión aplicado.

Los procedimientos específicos aplicados en cada tema transversal se encuentran en los apéndices (https://peru.mapbiomas.org/iniciativas-y-productos/cobertura-y-uso-del-suelo/cobertura/). Los algoritmos de clasificación están disponibles en el Github de MapBiomas Perú (https://github.com/mapbiomas-peru).

1.2. Visión general

El proyecto MapBiomas Perú inicia en julio de 2021 con el propósito de apoyar el entendimiento de la dinámica de la cobertura y uso del suelo (LULC, por sus siglas en inglés) en todo el territorio nacional. El proyecto se desarrolla gracias a: i) avances tecnológicos que permiten el procesamiento en la nube de grandes cantidades de datos espaciales mediante algoritmos albergados en la plataforma Google Earth Engine; ii) la implementación de métodos de procesamiento de imágenes enfocados en el monitoreo de LULC de MapBiomas; iii) el equipo técnico multidisciplinario que con su experiencia lleva a cabo el mapeo del territorio; y iv) el apoyo de instituciones y financiadores visionarios que respaldan el proyecto.

Los productos de MapBiomas Perú están compuestos de mapas temáticos anuales de 30 metros de resolución espacial para todo el país, en su metodología utiliza mosaicos anuales de imágenes de satélite conformadas por capas de información (bandas espectrales, índices derivados, variables físicas); también se obtienen estadísticas derivadas de los mapas por departamento, provincia, distrito, bioma, cuenca hidrográfica, territorios indígenas, unidades de conservación, entre otros.

El mapeo de MapBiomas Perú, a la fecha, presenta su cuarta colección de mapas anuales; la cual irá evolucionando en metodología, período de análisis, detalle de coberturas mapeadas en el tiempo y una mejora en calidad de los mismos.

Colección 4.0: Mapeo de coberturas y usos entre los años **1985 y 2025.** La metodología utilizada fue *machine learning (Random Forest)*, con 163 capas de información (bandas landsat originales, información fraccional y de textura derivada de las mismas e índices). Se utilizó la imágenes Landsat C que presenta la versión más actualizada del reprocesamiento de los archivos de Landsat. Los mapas generados cuentan con un total de **26 clases temáticas** más una clase de No observado.

Las colecciones MapBiomas pretenden contribuir al desarrollo de un método rápido, fiable colaborativo y de bajo coste para procesar conjuntos de datos a gran escala y generar series temporales históricas de mapas anuales de cobertura y uso del suelo. Todos los datos, mapas de

clasificación, códigos estadísticas y otros análisis son de libre acceso a través de la plataforma MapBiomas Perú (https://peru.mapbiomas.org/)

Los productos de la Colección 4.0 son los siguientes:

- Rasters anuales de clasificación de todo el territorio peruano;
- Rasters de transiciones anuales entre las clases y años elegidos por el usuario;
- Mosaicos preprocesados generados a partir de colecciones de archivos Landsat (Landsat 4, Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y Landsat 9);
- Infraestructura y algoritmos de procesamiento de imágenes (scripts en Google Earth Engine y código fuente);
- Estadísticas anuales y de transición LULC con diversas unidades de análisis;
- Evaluación de la calidad de los mosaicos Landsat. Cada escena puede tener una proporción de nubes y otras interferencias. Así, cada píxel de un año determinado se clasifica según el número de observaciones disponibles, variando de 0 a 40 observaciones por año. La evaluación de la calidad de los mosaicos Landsat está disponible en el sitio web de MapBiomas.
- Mapa mural de Cobertura y Uso del suelo en el Perú al 2025;
- Infografía nacional sobre las coberturas y usos de la tierra;
- Documento de hallazgos claves en el análisis de los resultados;
- Documentos técnicos para conocimiento de los procesos por temática.

1.3. Área de estudio

El ámbito de trabajo es toda la extensión territorial del Perú, excluyendo la superficie insular (0.01%). Esto contempla una extensión aproximada de 1 '294,306.15 km2. Dentro de este, se definieron cuatro biomas: el bioma Amazonía, bioma Andes, el bioma Desierto Costero y el bioma Bosque Seco Ecuatorial.(ver Figura 1).

Figura 1. Límite de biomas identificados para Perú.

Para ello se emplearon criterios técnicos sobre la distribución de ecosistemas a partir de mapas nacionales de referencia y a la experiencia de las colecciones anteriores. Las coberturas utilizadas fueron:

- Mapa de cobertura vegetal (MINAM, 2015)
- Mapa de Ecorregiones del Perú (SIGMINAM-DGOTA, 2017)
- Mapa Fisiográfico del Perú (INRENA, 2002)
- Mapa de Regiones Hidrográficas del Perú (MINAM-ANA)
- Mapa de Vegetación Natural Remanente de los Andes del Norte y Centro (Comunidad Andina - CAN)
- Modelo digital de elevación SRTM de 90 m
- Mapa de humedales del Perú (MINAM, 2010)

Tabla 1. Características de la cobertura y uso del suelo de los biomas peruanos.

Bioma	Área (km2) (% país)	Descripción	Amenazas
Bosque seco ecuatorial	46,026.95 (3,55%)	La extensión de este bioma se define en primer lugar por la extensión del bosque seco, tanto de llanura como de colina y montaña, por la costa noroeste del país. Aproximándose a la ecorregión "Bosque Seco Ecuatorial" de Brack, está sujeto a la influencia del Mar Tropical y corrientes marinas cálidas, relacionados al fenómeno del Niño. El bioma se caracteriza por un clima mixto tropical/subtropical con vegetación de bosques secos latifoliados, además de contar con la presencia de los únicos manglares del Perú.	Sobre los bosques secos existe una presión fuerte que no se ha visualizado a nivel nacional por falta de información. Están sujetos a la extracción forestal (tala de algarrobos para leña y carbón), el sobrepastoreo (principalmente ganado caprino) y cada vez a mayor medida deforestados para permitir la expansión agrícola, sobre todo en manos de la industria agroexportadora. También aumenta la presión sobre el agua del subsuelo por la creciente construcción de pozos para la agricultura. A la vez, años de sequía amenazan a los bosques secos cuya regeneración está ligada al fenómeno del Niño y la presencia de lluvias.
Desierto costero	84,991.20 (6,57%)	Fuertemente influenciado por la corriente fría de Humboldt que proviene de Chile, el clima subtropical árido de la costa centro-sur peruana solamente permite poca vegetación y predomina el desierto. A pesar de ello, se suele formar neblina que favorece ecosistemas únicos como las lomas y tillandsiales. La mayor parte de la vegetación y uso agropecuario se concentra en los valles fluviales, dependientes de los ríos que se forman en las partes altas de los Andes.	En la parte desértica, una fuerte presión sobre ecosistemas como los humedales costeros, las lomas y tillandsiales proviene de la expansión urbana descontrolada de las ciudades ubicadas a lo largo del litoral. Otra amenaza constante es la falta de agua para la agricultura en los valles fluviales, tanto por la ausencia de lluvias debido a cambios climáticos que afectan las reservas acuáticas, como también por la creciente demanda a causa de la expansión de la agroindustria.
Andes	378,533.71 (29,25%)	Esta región geográfica divide al Perú en dos vertientes, la del atlántico (oriental) y la del pacífico (occidental). En la vertiente occidental, los Andes comienzan desde los 750 aproximadamente hasta los 6788 msnm para luego descender por la vertiente oriental hasta los 3500 msnm para dar paso a la Selva Alta. Selva Alta o Yunga. Predominan las formaciones	Se ve fuertemente amenazado por la compactación de suelos que genera la crianza de ganado, así como la extracción de turba de los humedales altoandinos y la agricultura extensiva que abastece de productos de primera necesidad a los principales centros poblados y ciudades del país. Las quemas agrícolas e incendios forestales son escenarios frecuentes en un bioma donde los ecosistemas predominantes se caracterizan por

		herbáceas, con pequeñas inclusiones de arbustales y de pequeños bosques. Resalta en este bioma la ocurrencia de glaciares, como las principales fuentes de agua para las cuencas de las vertientes atlántico y pacífico del Perú que originan, además, lagos y coberturas altoandinas inundadas como los bofedales. También resaltan los valles interandinos conocidos por su alta productividad agrícola.	climas con un bajo contenido de humedad relativa y vegetación con alto potencial combustible.
Amazonía	784,754.29 (60,63 %)	De acuerdo con la ecorregiones de Brack, este bioma alberga en su mayoría las extensiones de la Selva Alta y Selva Baja; caracterizadas por presentar una variedad de paisajes boscosos que difieren en su composición en función a su ubicación, altitud, relieve, clima y vegetación.	Principalmente por la agricultura extensiva, la ganadería, la tala y la minería a tajo abierto. Cultivos industriales como la palma aceitera reportan su crecimiento en la zona norte y centro del bioma, ocasionando la tala de bosques primarios. Por su parte, la zona sur del país se ve afectada principalmente por la expansión de la minería aurífera en los ríos caudalosos de la llanura amazónica.

Fuente: Elaboración propia.

1.4. Aplicaciones

Las aplicaciones científicas pueden derivarse de un historial anual de series temporales de los mapas de LULC producidos, incluyendo:

Los productos de MapBiomas Perú muestran un potencial en el monitoreo anual de áreas amenazadas por la conversión de la cobertura y con riesgo de deforestación. Asimismo, la serie temporal de mapas pueden ser de utilidad como complemento de estudios de estimación de emisión de gases de efecto invernadero por cambio de uso y cobertura del suelo en el país. Otros ejemplos de aplicación son la caracterización de dinámicas de uso del suelo, la cuantificación de transiciones de cobertura y uso del suelo, de pérdidas y ganancias de bosques, el monitoreo de la regeneración, de cambios en los recursos hídricos, de la expansión urbana y agropecuaria, la planificación regional, y la gestión de áreas protegidas.

MapBiomas Perú no sólo complementa los esfuerzos ya existentes nacional y globalmente, trae consigo ventajas adicionales como son: 1) los mapas de MapBiomas Perú han sido construidos empleando la colección completa de datos Landsat (41 años) con una temporalidad anual; 2) el producto entero comparte una misma metodología, leyenda, resolución temporal y espacial, permitiendo así comparaciones entre regiones; 3) el producto es preparado por expertos conocedores de la realidad nacional, generando un producto con miras a aplicaciones de carácter local; 4) MapBiomas Perú pone a disposición del público sus métodos, herramientas y productos a través de una plataforma de consulta pública en internet.

2. Información básica y antecedentes

2.1 Contexto institucional

2.1.1. Instituto del Bien Común - IBC

El Instituto del Bien Común es una asociación civil peruana sin fines de lucro fundada en 1998 que trabaja para lograr el cuidado de los bienes comunes. Por bienes comunes entendemos los recursos y espacios de propiedad o uso compartido, tales como ríos, lagos, bosques, recursos pesqueros, áreas naturales protegidas y territorios de las comunidades. Como estos recursos y espacios son cruciales para el bienestar de los pueblos amazónicos, particularmente en la actual era de cambio climático, nuestro trabajo en pro de la conservación y el uso sostenible contribuye al bienestar de estas comunidades y de todos los peruanos.

Toda la información sobre los proyectos del IBC y las publicaciones generadas desde los inicios de la institución están disponibles en la página web https://ibcperu.org/.

2.1.2. MapBiomas

La Red Global MapBiomas (MapBiomas Network) actualmente está compuesta por seis iniciativas que mapean la cobertura y el uso del suelo en Brasil, en el Amazonas, Chaco, Bosque Atlántico Trinacional, Pampa Trinacional y también en Indonesia. Estas iniciativas son redes colaborativas multi institucionales, conformada por ONG, universidades y empresas de tecnología que utilizan procesamiento en la nube y clasificadores automatizados desarrollados y operados con la plataforma Google Earth Engine para contribuir a la comprensión de los cambios en la cobertura y uso del suelo. Todos los datos y métodos generados por el proyecto son públicos, transparentes y están disponibles en las plataformas https://mapbiomas.org/.

El objetivo de la Red Global MapBiomas es producir y promover el uso de información calificada para la custodia del uso y cobertura del suelo en América del Sur y otras regiones tropicales y subtropicales. Esta Red presenta una serie de prácticas comunes en todas sus iniciativas y productos de MapBiomas:

- Plataforma de datos fácil de usar, de fácil acceso y uso para aplicaciones
- Transparencia metodología y tecnología
- Datos abiertos y gratuitos
- Experiencia local y conocimiento temático de Uso y Cobertura del Suelo
- Procesamiento en la nube (Plataformas Google Earth Engine)
- Conocimientos técnicos en teledetección y programación
- Independencia para la publicación de datos
- Colecciones que permiten una evolución y mejora constante
- Redes distribuidas y descentralizadas
- Espíritu colaborativo
- Comprometidos con la solidez técnico-científica
- Promoción del desarrollo de capacidades

2.2 Datos de Percepción Remota

Los datos para mapeo de la Colección 4.0. fueron obtenidos de las imágenes satelitales del periodo 1985 a 2025 de los sensores Landsat Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor (OLI-TIRS) y Operational Land Imager 2 and Thermal Infrared Sensor 2 (OLI-2 - TIRS 2), a bordo de los satélites Landsat 4 (L4, para cobertura de vacíos de información al inicio de la serie y en 1988 principalmente), Landsat 5 (L5, para los años 1985-2012 de la serie), Landsat 7 (L7, para los años 2000-2021), Landsat 8 (L8, 2013 en adelante) y Landsat 9 (L9, 2021 en adelante).

Las imágenes de reflectancia de superficie (Surface Reflectance) pertenecen al catálogo de datos Landsat[1] C2 con nivel de corrección Tier 1, que fueron sometidas a calibración radiométrica, ortorrectificación basada en puntos de control en tierra y modelos de elevación digital para asegurar un registro a nivel de píxel y una corrección atmosférica. El catálogo de imágenes Landsat de 30 metros de resolución espacial fueron accedidas a través de la plataforma Google Earth Engine, provistas por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

2.3. Google Earth Engine y MapBiomas Perú

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma en la nube para el análisis científico de conjuntos de datos geoespaciales a escala global. Los principales componentes de GEE son: 1) Catálogos de datos de sensoramiento remoto públicamente disponibles, 2) Infraestructura de procesamiento computacional en la nube a escala petabyte, 3) APIs para JavaScript y Python para interactuar con los servidores del GEE, y 4) y un ambiente de desarrollo integrado (IDE) en línea que permite el desenvolvimiento de aplicaciones mediante scripts[2] denominado el Code Editor[3].

Los componentes mencionados hacen de GEE la herramienta idónea para el procesamiento de grandes cantidades de datos que requiere la clasificación de imágenes satelitales con fines de mapeo de la cobertura, uso y cambio del uso del suelo. Adicionalmente, GEE provee un ambiente que facilita la colaboración entre equipos regionales (como en el caso de la RAISG) y la aplicación de metodologías compartidas a un mismo set de datos, y la replicación de procesos por terceros interesados en evaluar conceptos o metodologías.

La cadena de procesamiento de MapBiomas está basada enteramente en tecnología de Google y, como tal, la iniciativa MapBiomas Perú se ha apoyado en GEE para 1) procesar imágenes satelitales en infraestructura computacional en la nube, 2) desarrollar códigos (scripts) en Javascript y Python, 3) almacenar los datos generados usando almacenamiento en la nube, y 4) desplegar los resultados (mosaicos, mapas anuales de uso del suelo, análisis de transición, estadísticas por clase y por transición, información metodológica, entre otros) a través de una plataforma web de consulta pública accesible en http://plataforma.peru.mapbiomas.org.

2.4. Otras iniciativas de mapeo

En los últimos años se han desarrollado diversas herramientas para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en la Amazonía, algunas de ellas de alcance global, con enfoques cada vez más robustos. Todos tienen en común su interés en aportar en uno de los temas más urgentes actualmente: conocer el estado actual de los tipos de cobertura terrestre y el monitoreo de los cambios en los mismos. Estas

[1] https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat/
[2] https://developers.google.com/earth-engine/
[3] code.earthengine.google.com

iniciativas han aportado a la detección de la deforestación, el monitoreo de los ecosistemas terrestres y acuáticos, y a fortalecer la detección de la degradación forestal, la conservación, la detección de focos de calor, etc. A continuación enlistamos las iniciativas más relevantes.

2.4.1. Fuentes mundiales

- GLC 2000 (JRC / CE): Base de datos global de cobertura terrestre para el año 2000 integrada por 30 grupos de investigación, que combina mapas regionales detallados en una leyenda global coherente.
- Intact Forest Landscapes (IFL): Cartografía espacial (escala 1:1,000,000) que monitorea la extensión de paisajes forestales intactos para los años 2000, 2013 y 2016, liderada por Greenpeace, UMD, WCS y Global Forest Watch.
- Global Forest Watch (GFW - UMD / Google / USGS / NASA): Serie temporal a resolución de 30 m basada en Landsat que mide la pérdida y ganancia anual de cobertura arbórea a nivel global entre los años 2000 y 2020.
- GlobeLand30 (NGCC): Cobertura global a 30 m de resolución para los años 2000 y 2010 que clasifica 10 tipos de coberturas terrestres a partir de imágenes Landsat y del satélite chino HJ-1.
- ESA CCI Land Cover: Mapas globales anuales de cobertura terrestre producidos por la Agencia Espacial Europea (1992–2018) estructurados en 22 clases temáticas.
- CORINE Land Cover (EEA): Inventario europeo de cobertura del suelo producido para 1990, 2000, 2006, 2012 y 2018. Cuenta con 44 clases y una Unidad Mínima de Mapeo (MMU) de 25 ha para polígonos y 5 ha para capas de cambio.
- ESRI 2020 Global LULC: Mapa global de uso y cobertura del suelo para el año 2020 a 10 m de resolución, derivado de Sentinel-2 mediante modelos de aprendizaje profundo (*deep learning*) entrenados con más de 5 mil millones de píxeles etiquetados.
- ESA WorldCover (2020/2021): Producto de referencia global a 10 m de resolución derivado de la fusión de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2, con 11 clases genéricas de cobertura y una precisión global del 75%.
- Dynamic World (Google / WRI): Dataset global en tiempo casi real a 10 m de resolución derivado de Sentinel-2 mediante *deep learning*, que provee probabilidades por píxel para 9 clases de cobertura terrestre.

2.4.2. Fuentes para la región Amazónica

- Ecological Systems of Latin America and the Caribbean (NatureServe / TNC): Presenta una clasificación de mesoescala para sistemas ecológicos terrestres basada en comunidades biológicas, entorno físico y procesos dinámicos (incendios, inundaciones), diseñada para ser identificable en campo y mapeable mediante imágenes de satélite.
- Land Cover Map of South America (GLC 2000): Mapa digital de cobertura terrestre para América del Sur a resolución de 1 km, generado a partir de imágenes satelitales obtenidas entre 1995 y 2000.
- Mapa de Cobertura Terrestre de ALC (SERENA, 2008): Elaborado para el año 2008 utilizando series temporales MODIS, clasificadores de árboles de decisión y validación de expertos locales, integrando estimaciones de membresía de clase para abordar la heterogeneidad de píxeles.
- Deforestación en la Amazonía (RAISG, 2000-2015): Análisis de tendencias quinquenales de deforestación regional a partir de una metodología estandarizada entre socios, evaluando pérdidas en áreas protegidas, territorios indígenas y cuencas hidrográficas.
- Radar Mining Monitoring 2025 (ACCA): Plataforma de monitoreo satelital para la detección de actividad minera y deforestación en la Amazonía peruana, basada principalmente en imágenes de radar Sentinel-1 detectando en tiempo real áreas de minería ilegal.

- MAAP #108: Palma Aceitera en la Amazonía Peruana, 2019: Mapeo espacial de plantaciones de palma aceitera a gran y pequeña escala en la Amazonía peruana.

2.4.3. Fuentes para el territorio nacional

- Mapa Fisiográfico del Perú (INRENA, 2002): Cartografía fisiográfica nacional publicada a escala 1:250,000 con una leyenda estructurada en 21 clases.
- Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro (CAN et al., 2009): Cobertura regional (escala 1:4'100,000) que identifica unidades de vegetación natural remanente, áreas intervenidas y áreas naturales protegidas para la región andina.
- Mapa de Humedales del Perú (MINAM, 2010): Cartografía temática nacional (escala 1:1'000,000) dividida en cuatro grandes unidades: aguajales/pantanos, manglares, bofedales y humedales costeros.
- Mapa del Patrimonio Forestal Nacional (MINAM, 2010): Delimitación espacial del patrimonio forestal del país desarrollada a escala 1:2'000,000.
- Mapa de Bosque - No Bosque y Pérdida de Bosque Húmedo Amazónico 2000–2014 (PNCBMCC, 2015): Evaluación de cobertura y deforestación amazónica a escala 1:6'000,000 categorizada en 4 clases.
- Mapa de Cobertura Vegetal del Perú (MINAM, 2015): Cartografía nacional detallada a escala 1:100,000 con una leyenda temáticamente fina de 76 clases.
- Mapas de Uso y Cambio de Uso del Suelo (GeoBosques / MINAM): Series multitemporales (2000–2016) bajo el esquema de clasificación del IPCC y subclases detalladas, disponibles en formato ráster y vectorial.
- Mapa Nacional de Ecosistemas (MINAM / DMERNT, 2018): Clasificación y mapa de referencia de los ecosistemas del territorio peruano publicado a escala 1:2'000,000.
- Mapa de Bosque Estacionalmente Seco (GeoBosques / MINAM, 2018): Línea de base cartográfica para los bosques secos de la costa norte del Perú.
- Mapa de Lomas Costeras (Moat et al., 2020): Mapeo de los oasis de neblina en Perú y Chile derivado de series temporales de 20 años de imágenes MODIS.
- Superficie Agrícola Nacional (MIDAGRI / GEOMIDAGRI, 2020): Delimitación espacial oficial de las tierras agrícolas a nivel nacional.
- Monitoreo de Cultivos de Arroz (MIDAGRI / GEOMIDAGRI, 2021): Capa temática orientada al seguimiento espacial del cultivo de arroz en el país.

3. Metodología

La cadena de procesamiento adoptada para la generación de la Colección 4.0. MapBiomas Perú se encuentra sintetizada en la Figura 2 y es detallada en las siguientes secciones: Generación de mosaicos anuales (sección 3.1), Variables de clasificación (sección 3.2), Clasificación (sección 3.3), Posclasificación (sección 3.4), Integración (sección 3.5), Transiciones (sección 3.6), Estadísticas (sección 3.7) y Validación (sección 4).

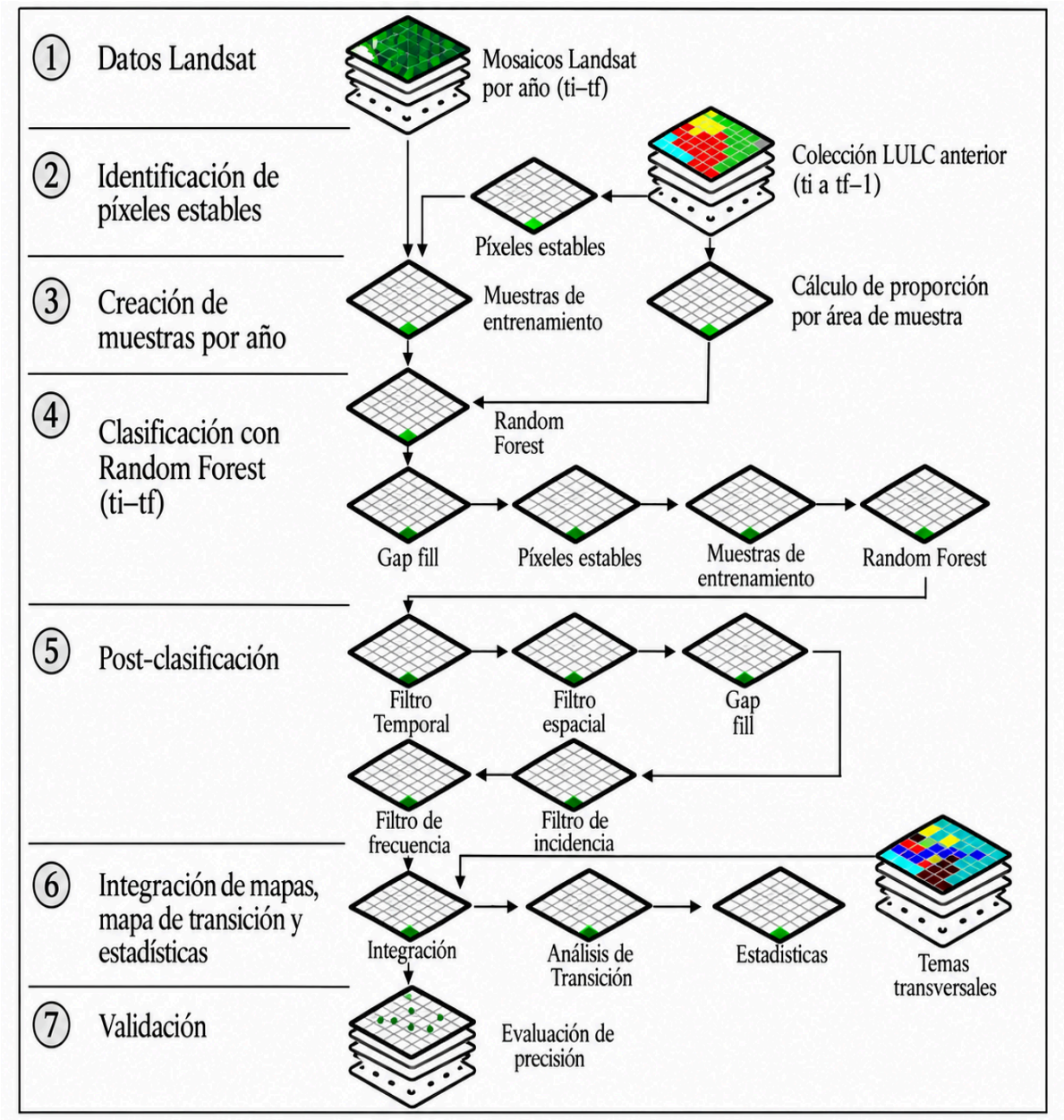

Figura 2. Síntesis metodológica de la Colección 4 En donde "ti" representa el primer año de la serie temporal y "tf" representa el último año

3.1 Generación de mosaicos anuales

3.1.1. División del espacio de análisis en cartas

La metodología de MapBiomas divide el área del proyecto en una grilla de cartas regulares definidas con base a la grilla de las Cartas Internacionales del Mundo a la Millonésima, a escala de 1:250.000. Cada carta rectangular cubre un área de 1°30' de longitud por 1° de latitud. Un total de 107 cartas cubren el territorio peruano.

La división regular del espacio producto de la aplicación de la grilla de Cartas Internacionales, implica que cada carta requiera de una combinación total o parcial de imágenes Landsat, dado que la grilla de imágenes Landsat es oblicua a la grilla de cartas de MapBiomas (ver Figura 3).

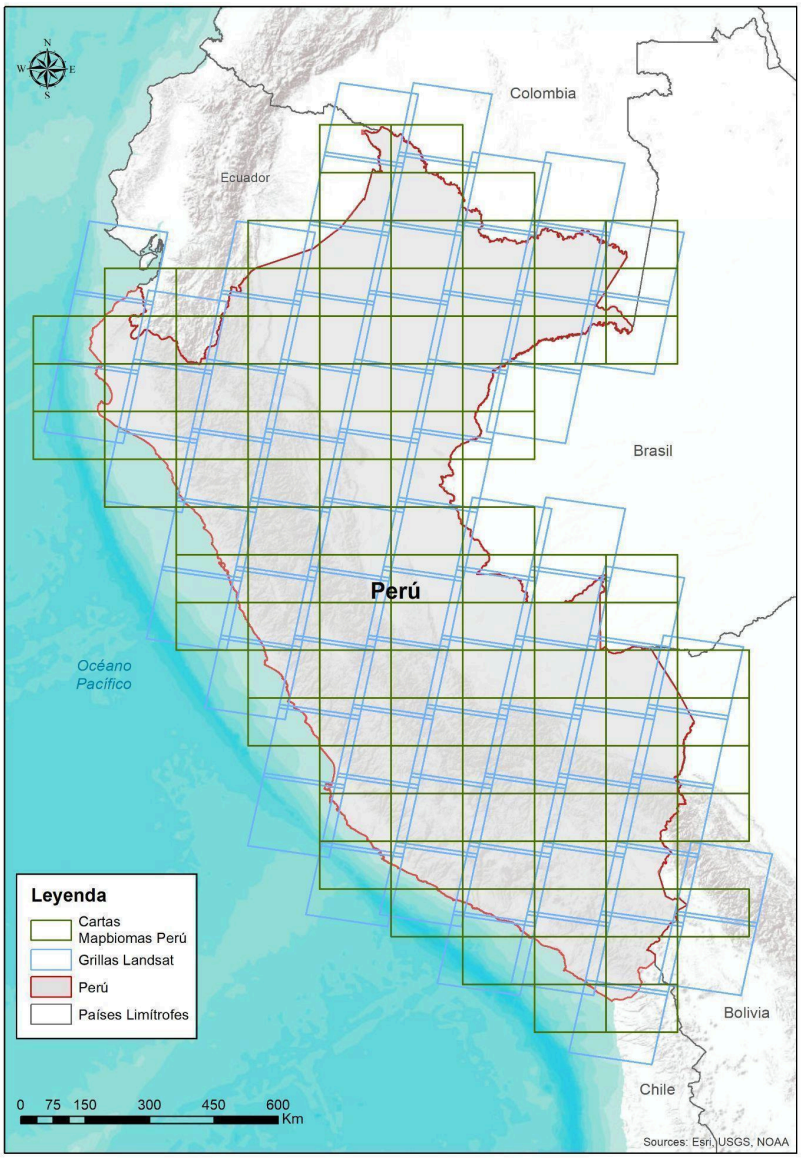

Figura 3. Grilla de cartas MapBiomas Perú (verde) y grilla de imágenes Landsat (azul) y límite nacional (rojo).

Fue imprescindible subdividir las cartas por regiones de mosaico[4] (ver Figura 4) para facilitar la construcción de los mosaicos mediante una parametrización ajustada a las especificidades de cada porción. Como consecuencia, se generaron mosaicos anuales de píxeles de imágenes Landsat independientes para cada carta o subdivisión, cada uno de los cuales fue procesado por separado. La Tabla 2 resume el número de cartas existentes a nivel país (sin subdivisión), el número final de subdivisiones (cartas/región) y el total de mosaicos procesados y generados.

[4] Las "**regiones de mosaicos**" se usan específicamente en la construcción de mosaicos y son diferentes a las "**regiones de clasificación**" que son usadas específicamente para el proceso de clasificación.

Tabla 2. Resumen del número de cartas MapBiomas Perú por región.

Región de mosaico	Biomas que abarca	Cartas/Región de mosaico	Total de mosaicos (x41 años)
Región 701	Amazonía (zona montañosa de selva alta)	31	1271
Región 702	Amazonía (zona de planicie de selva baja)	59	2419
Región 703	Andes (cuenca del atlántico)	32	1312
Región 704	Andes (cuenca del pacifico y titicaca)	35	1435
Región 705	Bosque seco ecuatorial y desierto costero	35	1435
Total		192	7872

Fuente: Elaboración propia.

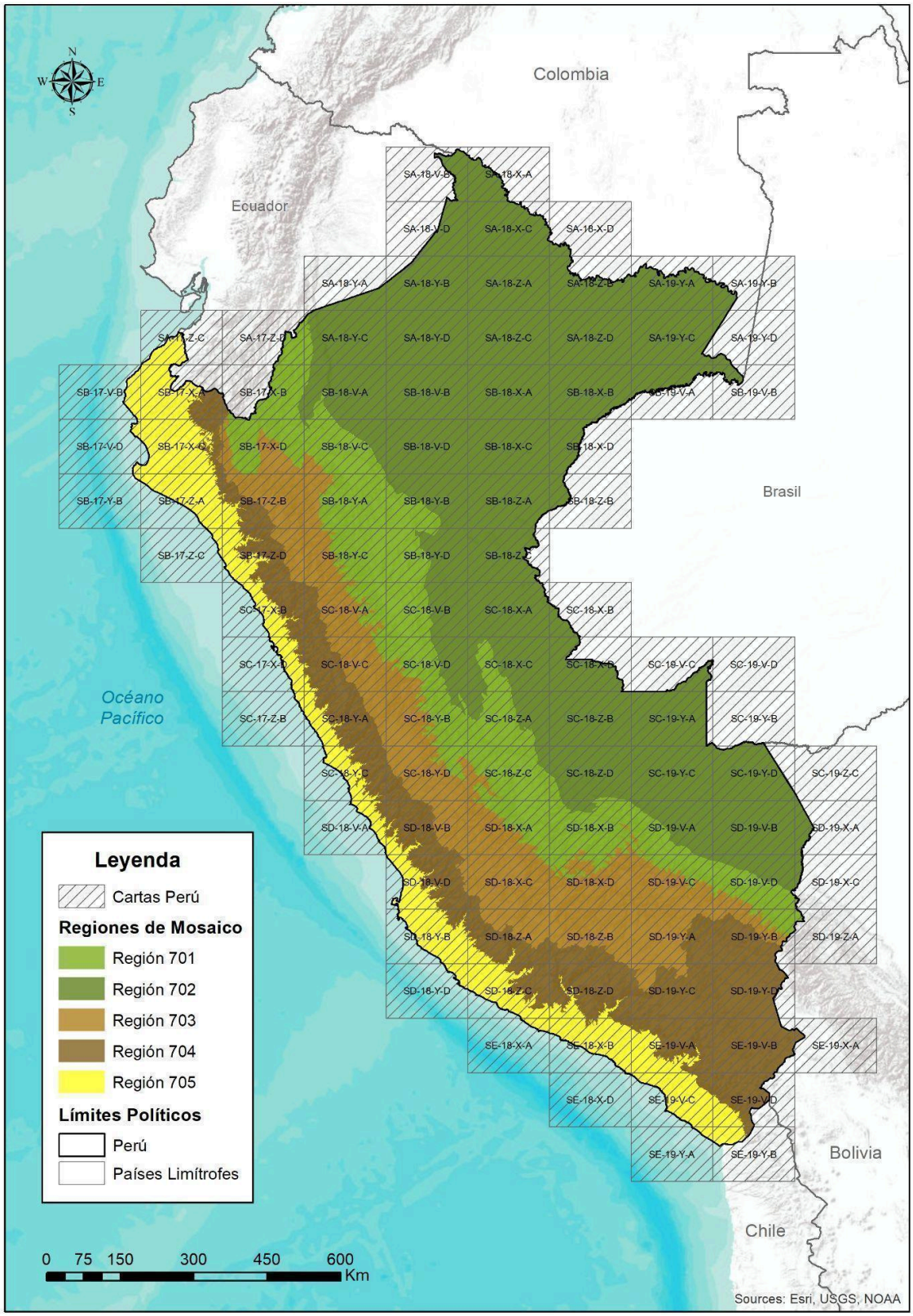

Figura 4. Mapa de las cartas-región para la generación de mosaicos de imágenes para el Perú.

3.1.2. Parametrización de mosaicos anuales

Un mosaico anual es la agregación de píxeles de varias imágenes Landsat a partir de los que se genera un mosaico representativo para un año, construido a partir de los siguientes parámetros:

- ID: Identificador único de la unidad carta-región
- Año: Año de la serie (1985 a 2025) al que corresponde el mosaico.
- Carta: Código identificador de la carta
- Fecha inicial/ Fecha final: Periodo del año (fecha de inicio y final) para la selección de imágenes del catálogo de datos de imágenes Landsat de Google Earth Engine.
- Sensor: El satélite y su respectivo sensor: Landsat 4 TM, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI o una combinación de Landsat 5 y Landsat 7, Landsat 9 OLI-2 TIRS-2 .
- Nubosidad: Porcentaje máximo de cobertura de nubes aceptado de cada imagen Landsat que será usado para construir el mosaico de imágenes. Este dato proviene de la metadata de las imágenes Landsat.
- shadowSum: Es un parámetro de TDOM para detección de sombra de nube. Un número inferior enmascara menos píxeles con nube.
- cloudThresh: Es un parámetro de CloudScore para detección de nubes. Los números más bajos aumentan el enmascaramiento, los números más altos disminuyen el enmascaramiento. La disminución del enmascaramiento puede ser útil en zonas de suelo descubierto cuya alta reflectancia genera una detección errónea de nubes.
- Blacklist: Imágenes que por su calidad son excluidas de la construcción del mosaico. Algunos problemas de calidad están relacionados con píxeles de nieve en regiones no glaciares, nubes que no han sido enmascaradas

Los parámetros de construcción de mosaicos anuales son definidos por el intérprete y representan los criterios de selección de imágenes disponibles en el catálogo de datos Landsat a partir de los cuales se construye el mosaico anual. Las imágenes seleccionadas por año fueron *reducidas* a una imagen individual, o mosaico anual, empleando operadores llamados *reductores* existentes en Google Earth Engine, como se ilustra en la Figura 5.

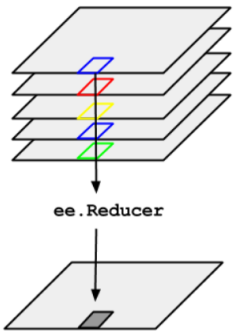

Figura 5. Esquema de la aplicación de un reductor a un set de imágenes (Google, 2020[5]).

Al momento de parametrizar los mosaicos se consideró que se puede alcanzar valores de precisión mayores al utilizar mosaicos de imágenes satelitales cuyos datos cuenten con la menor cantidad de ruidos. Es por ello que se buscó que cada mosaico tenga la menor presencia de nubes e interferencias posible y la mayor extensión de cobertura de datos Landsat disponible dentro del periodo definido. En casos excepcionales se dio el caso de que no hubo imágenes disponibles para el período seleccionado, donde se optó por extender el periodo de búsqueda de imágenes.

[5] Tomado de: https://developers.google.com/earth-engine/guides/reducers_image_collection

Nubes y sombras de nubes son enmascaradas previamente para que únicamente píxeles libres de nubes y sombra de nubes sean seleccionados de las imágenes disponibles. Los métodos de enmascaramiento de nube y sombra de nube fueron el Cfmask y CloudScore.

La Tabla 3 presenta un resumen de los parámetros más frecuentemente utilizados por cada región por bioma.

Tabla 3. Resumen de los parámetros utilizados en la construcción de los mosaicos

Región	Satélite	Año	Período	Max % nube
Región 701	L5	1985-1999, 2003-2011	15 junio - 15 noviembre	20 - 90
	L7	2002, 2012		
Amazonía (zona montañosa de selva alta)	L5/L7	2000-2001		
	L8	2013-2021		
	L9	2022-2025		
Región 702	L5	1985-1999, 2000, 2003-2011	01 junio - 31 octubre	10 - 80
	L7	2002, 2012		
Amazonía (zona de planicie de selva baja)	L5/L7	2001		
	L8	2013-2021		
	L9	2022-2025		
Región 703	L5	1985-2001,2003-2011	01 abril - 30 agosto	30 - 95
	L7	2002,2009,2010,2012		
Andes (cuenca del atlántico)	L8	2013-2021		
	L9	2022-2025		
Región 704	L5	1985-2001,2003-2011	01 abril - 30 agosto	30 - 95
Andes (cuenca del pacifico y titicaca)	L7	2002,2009,2010,2012		
	L8	2013-2021		
	L9	2022-2025		
Región 705	L5	1985-1999	01 enero- 31 diciembre	20-90
	L7	2000-2012		
(B.S. ecuatorial y desierto costero)	L8	2013-2021		
	L9	2022-2025		

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Variables de clasificación o feature space

Se calcularon variables (*feature space*) a partir del mosaico anual que representan los insumos del proceso de clasificación. Las bandas Landsat, junto con las variables de clasificación se encuentran consolidados en archivos ráster compuestos por 156 bandas en total[6] que incluyen: las bandas landsat espectrales, índices espectrales, información fraccional y de textura derivada de las mismas e índices de las fracciones espectrales.

Adicionalmente se usaron 7 variables estáticas: HAND, shademask2, slppost, altitud, pendiente, latitud y longitud; que ayudaron a la clasificación de clases que espectralmente son muy similares pero se logran diferenciar por estos aspectos topográficos.

A las imágenes disponibles en cada año, se aplicó el cálculo de reductores estadísticos para generar los valores de cada píxel. El proceso de representa en la Figura 6. Estos reductores son:

- Mediana: Mediana[7] de todos los valores disponibles en el mosaico anual para esa ubicación (píxel).
- Mediana época seca: Cálculo de la mediana estadística aplicada a los píxeles del cuartil 25 (con los menores valores) de NDVI (proxy de época seca).
- Mediana época húmeda: Cálculo de mediana estadística aplicada a los píxeles del cuartil 75 (con los mayores valores) de NDVI (proxy de época lluviosa).
- Amplitud: Extensión de la variación entre todos los píxeles disponibles en el mosaico anual.
- Desviación estándar: Desviación estándar de los valores de todos los píxeles disponibles en el mosaico anual para una ubicación determinada.
- Mínimo: Menor valor de todos los píxeles disponibles en el mosaico anual en una ubicación determinada.
- Máximo: Mayor valor de todos los píxeles disponibles en el mosaico anual en una ubicación determinada.
- Mínimo del periodo seco: Cálculo del menor valor de todos los píxeles disponibles de las imágenes del cuartil con los menores valores de NDVI (proxy de época seca).
- Mínimo del periodo húmedo: Cálculo del menor valor de todos los píxeles disponibles de las imágenes del cuartil con los mayores valores de NDVI (proxy de época lluviosa).
- Máximo del periodo seco: Cálculo del mayor valor de todos los píxeles disponibles de las imágenes del cuartil con los menores valores de NDVI (proxy de época seca).
- Máximo del periodo húmedo: Cálculo del mayor valor de todos los píxeles disponibles de las imágenes del cuartil con los mayores valores de NDVI (proxy de época lluviosa).
- QMO del periodo seco: El valor más alto que tiene la banda en el índice evi2 en la estación seca.
- QMO del periodo lluvioso: El valor más alto que tiene la banda en el índice evi2 en la estación húmeda.

[6] Disponibles para descarga en la plataforma MapBiomas Perú.
[7] Mediana es el valor que separa la mitad superior de la mitad inferior de una muestra de datos o una población. Documentación de la herramienta en Google Earth Engine.

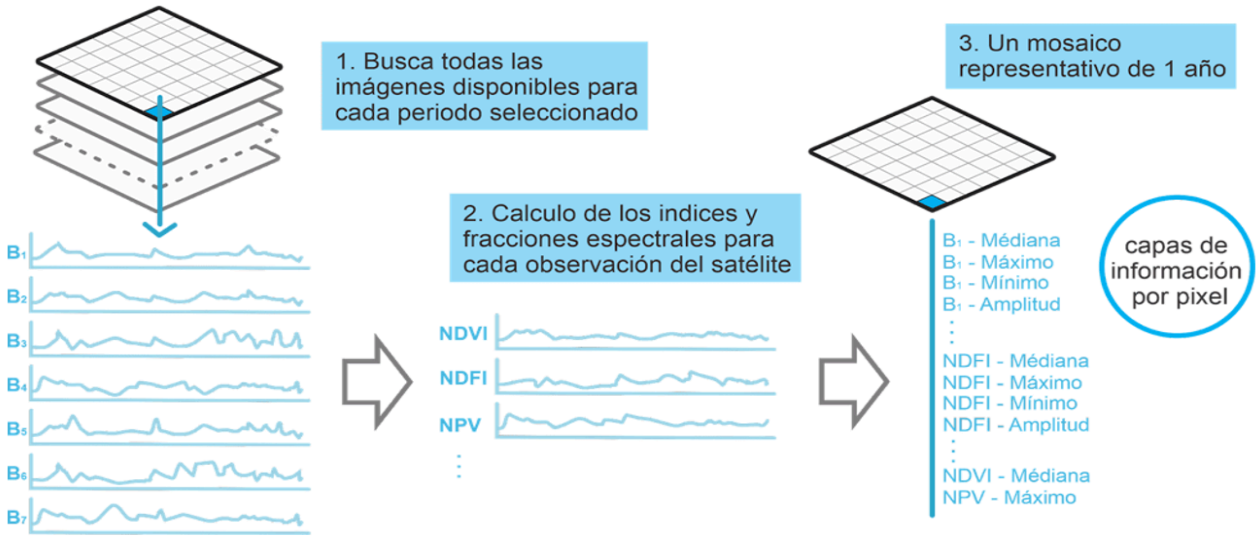

Figura 6. Proceso de cálculo de bandas que componen los mosaicos anuales de imágenes Landsat.

La Tabla 4 muestra el listado completo de bandas de los mosaicos finales o *feature space*. Cada banda representa una variable de entrenamiento del clasificador.

Tabla 4. Descripción de bandas y variables empleadas para la Colección 4 MapBiomas Perú.

Tipo	Nombre	Fórmula	Descripción	Reductor[8]											Banda de Calidad [*9]	
				Median	Median_dry	Median_wet	amp	stdDev	Mín	Max	Dry_min	Dry_max	Wet_min	Wet_max	Dry_qmo	Wet_qmo
Banda	blue	B1 (L5 y L7); B2 (L8)	Espectro visible azul	X												
	green	B2 (L5 y L7); B3 (L8)	Espectro visible verde	X	X				X				X		X	X
	red	B3 (L5 y L7); B4 (L8)	Espectro visible rojo	X	X	X			X		X	X		X	X	
	nir	B4 (L5 y L7); B5 (L8	Infrarrojo cercano	X	X	X		X	X						X	X
	swir1	B5 (L5 y L7); B6 (L8)	Infrarrojo de onda corta 1	X	X	X			X			X	X	X	X	X
	swir2	B7 (L5); B8 (L7); B7(L8)	Infrarrojo de onda corta 2	X	X	X			X		X			X	X	X
Índices	ndvi	(nir - red)/(nir + red)	Índice de vegetación de diferencia normalizada	X	X	X	X	X								
	evi2	(2.5 * (nir - red)/(nir + 2.4 * red + 1)	Modificación del Índice de Vegetación Mejorado	X	X	X	X	X								

[8] Cada producto calculado con los reductores estadísticos compone una banda del producto integrado.
[9] Compone todas las imágenes de una colección, utilizando una banda de calidad (evi2) como función de ordenación por píxel.

			(EVI) que solo utiliza NIR y Red, obviando la banda azul.													
	ndwi_gao	(nir - swir)/(nir + swir)	Índice de agua de diferencia normalizada (gao)	X	X	X	X				X		X	X		X
	ndwi_mcfeeters	(green - nir)/(green +nir)	Índice de agua de diferencia normalizada (mcfeeters)	X			X									
	gcvi	(nir/green) - 1	Relaciones entre bandas infrarrojo cercano y verde	X	X	X										
	hallcover	(-red * 0.017) - (nir * 0.007) - (swir2 * 0.079) + 5.22	Índice espectral de cubierta terrestre	X												
	pri	(blue - green)/(blue + green)	Índice de reflectancia fotoquímica (*Photochemical Reflectance Index*)	X	X											
	savi	(1 + L) * (nir - red)/(nir + red + 0,5)	Índice de vegetación ajustada al suelo	X	X	X		X								
	textG	('median_green') .entropy(ee.Kernel .square({radius: 5}))	Entropía en la banda Azul	X												
	nuaci	$UNTL*(1-\sqrt{(NDWIi-aNDWI)2+(NDVIi-aNDVI)2+(NDBIi-aNDBI)2})$	Índice Normalizado Compuesto de Áreas Urbanas	X												
	ndsi	(green-swir1)/(green+swir1)	Índice Diferencial Normalizado de Nieve	X					X							
	cai	(swir2 / swir1)	Índice de Alteración del Color	X					X	X			X			
	gli	((2 * green)	Índice de	X	X				X	X						

		- red - blue) / ((2 * green) + red + blue)	hoja verde													
	mndwi	(green - nir) / (green + nir)	Índice de agua de diferencia normalizada	X	X	X				X						
	ndbi	(swir1 - nir) / (swir1 + nir)	Índice acumulado de diferencia normalizada	X	X				X	X						
	ndgb	(green - blue) / (green + blue)	Diferencia normalizada Verde Azul	X	X	X		X		X						
	ndmi	(nir - swir1) / (nir + swir1)	Índice Normalizado de la Diferencia de Humedad	X	X					X						
	mdmir	(swir1 - swir2) / (swir1 + swir2)	Índice de infrarrojo medio de diferencia normalizada	X		X		X	X	X						
	ndrb	(red - blue) / (red + blue)	Diferencia Normalizada Rojo Azul			X		X	X							
	ndsi2	(swir1 - nir) / (swir1 + nir)	Diferencia Normalizada de suelo 1	X	X	X			X	X						
Fracción MME[10]	gv		Abundancia fraccional de vegetación verde dentro del píxel	X			X	X								
	npv		Abundancia fraccional de vegetación no fotosintética dentro del píxel	X				X								
	soil		Abundancia fraccional de suelo dentro del pixel	X			X	X								
	shade	100 - (gv + npv + soil	Abundancia fraccional	X												

[10] MME = Modelo de Mezcla Espectral

		+cloud)	de sombra dentro del pixel													
	snow		Abundancia fraccional de nieve dentro del pixel	X					X							
	cloud		Abundancia fraccional de nubes dentro del píxel	X												
Índice MEM	gvs	gv / (gv + npv + soil + cloud)	Vegetación verde normalizada por sombra	X	X	X		X								
	ndfi	(gvs - (npv + soil)) /(gvs + (npv + soil))	Índice de fracción de diferencia normalizada	X	X	X	X	X								
	sefi	(gv+npv -soil) /(gv+npv + soil)	Índice de fracción del ecosistema de sabana	X	X			X								
	wefi	((gv+npv)-(soil+shade))/(gv+npv)+(soil+shade)	Índice de fracciones del ecosistema de humedales			X	X	X								
	fns	((gv+shade) - soil) / ((gv+shade) + soil)	Índice basada en fracciones gv, shade y soil		X			X								
	ndfib	GV-(NPV+Soil+Snow)/ GV+(NPV+Soil+Snow)	Adaptación del NDFI para los Andes	X			X									
Variables estáticas y/o topográficas	shade mask2		Mapa de sombras													
	slppost		Pendiente Estratificada													
	altitude		Altitud													
	slope		Pendiente													
	latitude		Latitud													
	longitude		Longitud													

	HAND (Height Above the Nearest Drainage)	hand30_100 hand30_1000 hand30_5000 hand90_1000 water_HAND_0m water_HAND_10m water_HAND_1m water_HAND_2m water_HAND_5m	Índice-Altura por encima del drenaje más cercano	

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Clasificación

3.3.1. Leyenda

La clasificación semi automatizada se desarrolló a través de la metodología basada en random forest. La colección mapea específicamente 25 clases: 1.1. Bosque (ID 3), 1.2. Bosque seco (ID 4), 1.3. Manglar (ID 5), 1.4. Bosque inundable (ID 6), 2.1.1. Herbazal inundable de tierras bajas (ID 51), 2.1.2. Herbazal inundable altoandino (ID 82), 2.2. Formación herbácea (ID 12), 2.3.1. Matorral y otros arbustales (ID 66), 2.3.2. Loma costera (ID 70), 3.1. Mosaico agropecuario (ID 21), 3.2. Plantación forestal (ID 9), 3.3. Palma aceitera (ID 35), 3.4. Arroz (ID 40), 3.5. Pasto (ID 15), 4.1. Infraestructura urbana (ID 24), 4.2. Minería (ID 30), 4.3. Playa (ID 23), 4.4. Superficie rocosa (ID 92), 4.5. Superficie salina costera (ID 52), 4.6. Superficie de salar (61), 4.7. Otra área natural sin vegetación (ID 68), 4.8. Otra área antrópica sin vegetación (ID 25), 5.1. Río, lago u océano (ID 33), 5.2. Acuicultura (ID 31), 5.3. Glaciar (ID 34).

Tabla 5. Leyenda general de cobertura y uso del suelo en la Colección 4.0

ID	Clase	Hexadecimal code	Color	Natural/antrópico
1	1. Formación boscosa	#1f8d49		
3	1.1. Bosque	#1f8d49		Natural
4	1.2. Bosque seco	#7dc975		Natural
5	1.3. Manglar	#04381d		Natural
6	1.4. Bosque inundable	#007785		Natural
10	2. Formación natural no boscosa	#d6bc74		
11	2.1. Formación herbácea inundable	#519799		Natural
51	2.1.1. Herbazal inundable de tierras bajas	#5faf92		Natural
82	2.1.2. Herbazal inundable altoandino	#26abab		Natural
12	2.2. Formación herbácea	#d6bc74		Natural
13	2.3. Formaciones arbustivas y otras	#d89f5c		Natural
66	2.3.1. Matorral y otros arbustales	#a89358		Natural
70	2.3.2. Loma costera (beta)	#be9e00		Natural
14	3. Área agropecuaria	#ffefc3		
21	3.1. Mosaico agropecuario	#ffefc3		Antrópico
9	3.2. Plantación forestal	#7a6c00		Antrópico
35	3.3. Palma aceitera	#9065d0		Antrópico
40	3.4. Arroz (beta)	#c71585		Antrópico
15	3.5 Pasto (beta)	#edde8e		Antrópico
22	4. Área sin vegetación	#d4271e		
24	4.1. Infraestructura urbana	#d4271e		Antrópico
30	4.2. Minería	#9c0027		Antrópico
23	4.3. Playa	#ffa07a		Natural
92	4.4. Superficie rocosa	#d98a45		Natural
52	4.5. Superficie salina costera	#f0b4a8		Natural
61	4.6. Superficie de salar	#f5d5d5		Natural
68	4.7. Otra área natural sin vegetación	#e97a7a		Natural
25	4.8. Otra área antrópica sin vegetación	#db4d4f		Antrópico
26	5. Cuerpo de agua	#2532e4		
33	5.1. Río, lago u océano	#2532e4		Natural
31	5.2. Acuicultura	#091077		Antrópico
34	5.3. Glaciar	#93dfe6		Natural
27	6. No observado	#ffffff		No definido

Fuente: Elaboración propia.

Como parte del proceso de descripción de las clases, se elaboró una tabla de correspondencia entre las clases de la leyenda MapBiomas y el Mapa de Cobertura Vegetal (MINAM, 2015). También se realizó un taller entre distintas entidades estatales y/o educativas que permitió el intercambio de información y la aprobación de la leyenda. Con ello se presenta la siguiente memoria descriptiva y criterios de interpretación (Tabla 6) de cada clase de la leyenda MapBiomas Perú, dentro del ámbito de las coberturas del Perú.

Tabla 6. Memoria descriptiva para la leyenda MapBiomas Perú.

ID	MapBiomas CLASE (ID)	Bioma	Homologación MAPA DE COBERTURA VEGETAL (MINAM, 2015)	Descripción de la clase	Criterios de interpretación (RGB 543)
1	**Bosque (ID:3)**	Amazonía	Bosques basimontanos y montanos; Plantación forestal Bosques de terrazas bajas y altas; Vegetación esclerófila de arena blanca (varillal); Bosques de colinas altas y bajas; Pacales; Plantación forestal	Cobertura arbórea densa de follaje perenne con árboles de 45 m en la Amazonía Baja (hasta 500 msnm), cuya altura disminuye hasta los 3800 msnm en la Amazonía Alta. Ocupa terrazas, colinas y montañas. Incluye pacales (puros o mixtos) y plantaciones forestales; excluye bosques inundables en suelos de mal drenaje.	- En bosques densos: alta rugosidad; tonalidad verde oscura; - En bosques ralos: baja rugosidad; tonalidad verde clara;
		Andes	Bosques relictos; Bosques secos de montaña; Bosques sub húmedo de montaña;	Cobertura arbórea de dos tipos: bosques muy húmedos al norte, siempre verdes, densos y de hasta 20 m; y relictos al centro y sur, con árboles dispersos de porte bajo (hasta 10 m). Estos últimos se ubican en laderas montañosas de difícil acceso entre los 2800 y 3800 msnm o en el límite de la frontera agrícola.	- En bosques ralos: baja rugosidad; tonalidad verde clara; - En bosques semideciduos: rugosidad media; tonos verde-morado.
		B. S. Ecuatorial	Bosque subhúmedo de montaña	Cobertura arbórea reducida en las alturas de Tumbes (600 a 1200 msnm). Mezcla especies del bosque seco y amazónico, con predominio de vegetación perennifolia sobre la caducifolia.	Alta rugosidad; tonalidad verde oscura en épocas húmedas o morado oscuro en épocas secas.
	Bosque seco (ID: 4)	Amazonía	Bosques semideciduos de montaña, bosque de montaña	Vegetación arbórea y arbustiva de dosel discontinuo, adaptada a una marcada estacionalidad climática con especies caducifolias. Destaca por su alta diversidad biológica y nivel de endemismo.	Rugosidad media, cuando pierden sus hojas tiene a tener tonalidad fucsia-naranja.
		Andes	Sabanas xéricas interandinas; Bosques xéricos interandinos;	Bosque seco interandino de árboles dispersos o arbustivos (< 8 m), ubicado en valles profundos y laderas. Sus especies son caducifolias durante la temporada seca.	Bosques ralos, varía de textura y color según la latitud. Al norte tienden al tono marrón-verde, hacia al centro y sur, tonos marrón-rosado .

			B. S. Ecuatorial	Bosque seco tipo sabana; Bosque seco ribereño; Bosque seco de piedemonte; Bosque seco de lomada ; Bosque seco de colina baja; Bosque seco de colina alta; Bosque seco de montaña	Cobertura arbórea baja y mayormente caducifolia con sotobosque arbustivo-herbáceo. Incluye: a) bosques secos tipo sabana dominados por algarrobos (5-8 m) hasta los 800 msnm; b) bosques secos de colina y montaña, semidensos (hasta 12 m) entre los 400 y 2000 msnm; y c) bosques secos ribereños de algarrobo, densos (hasta 12 m) por la humedad de los cauces de agua.	- En bosques ralos de sabana: baja rugosidad; tonalidad rosado-morado ; - En bosques semi-densos de colina y montaña: alta rugosidad; tonalidad verde en épocas húmedas o morado oscuro en épocas secas:
			Desierto costero	Bosque seco ribereño	Cobertura arbórea que se ubica en las zonas aledañas a los cauces de agua, dominado por árboles tipo “algarrobo” (hasta 12 m de alto) de forma densa debido a las mejores condiciones de humedad.	Zonas cercanas al agua con tonalidad verde intenso hacia verde oscuro-morado.
	Manglar (ID: 5)		B. S. Ecuatorial	Manglar	Cobertura arbórea densa de hoja perenne que crece en aguas costeras salinas o salobres.	Características uniformes de textura y color, de verde oscuro a verde claro.
	Bosque inundable (ID:6)		Amazonía	Bosque inundable de palmeras (aguajal); Bosques basimontanos y de terrazas inundables; Bosque de llanura meándrica	Cobertura arbórea de la llanura aluvial y terrazas inundables (estacionales o permanentes). Desarrollada en suelos de mal drenaje y abundante materia orgánica, está dominada por palmeras junto a especies como "renacales" y "pungales".	Presentan características uniformes de textura y color, tienden a verde-morado.
2	**Formación herbácea inundable (ID: 11)**	**Herbazal inundable de tierras bajas (ID: 51)**	Amazonía	Herbazal Hidrofítico; Sabana hidrofítica de palmeras	Cobertura vegetal de llanura aluvial inundable (herbazales y sabanas hidrofíticas) sobre suelos hidromórficos. Tras bajar la inundación prolongada, surge un denso tapiz herbáceo bajo. Incluye las sabanas de palmeras de Pampas del Heath.	Áreas húmedas naturales con variaciones de borde y color (presencia de sedimentos); Cercanía a cursos de agua.
			B. S. Ecuatorial Desierto costero	Albúfera; Estero; Estuario de virillá; Humedal costero	Vegetación herbácea sujeta a inundaciones periódicas de agua dulce, salobre o salada. Incluye zonas pantanosas inundadas temporalmente por El Niño.	Variaciones periódicas, colores varían según humedad entre verde brillante, morado-marrón.
		Herbazal inundable altoandino (ID: 82)	Andes	Bofedal	Vegetación siempre verde, compacta y almohadillada, ubicada en fondos de valles, conos volcánicos y planicies altoandinas (>3800 msnm) sobre suelos permanentemente inundados y de	- Cercanía a cuerpos de agua (lagunas). - Variaciones anual de extensión.

					mal drenaje.	- Tienden a verde-morado.
	Formación herbácea (ID: 12)		Amazonía	Jalca;Páramo;Pajonalandino	En la región Amazonía Alta, se considera a la vegetación de tipo herbácea. En el límite transicional con Andes, incluye vegetación graminosa altoandina en ecosistemas de jalca y páramo.	- Color rosa intenso - Rugosidad baja - Diferencia de color porperíodo (seco: fucsia / húmedo: verde).
			Andes	Pajonal andino	Pajonales compuestos por vigorosas gramíneas y césped de puna de poca altura o casi al raz del suelo. Esta cobertura se encuentra aproximadamente entre 3000 y 4800 msnm.	- Rosado intenso, se confunde con suelo desnudo (pasto seco). - Cerca a zona de bofedales es un verde muy claro o amarillo.
	Formaciones arbustivas y otras (ID:13)	**Matorral y otros arbustales (ID:66)**	Amazonía	Área de no bosque amazónico	Cobertura vegetal con predominancia de arbustos y árboles enanos de hojas coriáceas, ubicada en las mesetas de la Cordillera del Cóndor (>1800 msnm) y en zonas altimontanas (>3500 msnm) en contacto con el pajonal andino.	Rugosidad baja o media. Color rosa intenso. Puede tener diferencia de color en períodos secos y lluviosos. Baja densidad de árboles o solo arbustos pequeños.
			Andes	Matorral arbustivo; Matorral arbustivo altimontano; Matorral esclerófilo de montaña montano	Cobertura vegetal predominantemente arbustiva (densa o dispersa) con estratos herbáceos, ubicada entre los 1500 y 3800 msnm, con flora especializada. Incluye matorrales del norte (desde 1500 msnm) en suelos áridos; de piso medio y alto (2500–3800 msnm) caducifolios y perennifolios subhúmedos; y de nivel superior interandino (2000–3800 msnm), más húmedos y fríos.	Rugosidad baja o media. Color rosa intenso. Puede tener diferencia de color en períodos secos y lluviosos. Baja densidad de árboles o solo arbustos pequeños.
			Bosque seco ecuatorial	Matorral arbustivo	Predomina el matorral xérico, vegetación abierta (30-60 %), espinosa y achaparrada de arbustos y cactáceas columnares (hasta 4 m) con un herbazal efímero. Posee baja diversidad pero alto endemismo. Se ubica en valles y laderas empinadas entre los 300 y 2000 msnm.	
			Desierto Costero	Cardonal	Comprende matorral xérico al sur (arbustos, cactáceas y herbazal efímero en laderas de hasta 2000 msnm) y tillandsiales costeros (monogenéricos, con plantas rastreras del género Tillandsia).	- Rugosidad baja o media. Color rosa intenso. Puede tener diferencia de color en períodos secos y lluviosos. Baja densidad de árboles o solo

						arbustos pequeños. - Tillandsial presenta colores morados en zonas desérticas.
		Loma costera (beta) (ID:70)	Desierto costero	Lomas	a) Lomas, vegetación estacional (arbórea, arbustiva y herbácea) surgida por neblinas invernales entre los 100 y 1000 msnm; y b) Tillandsial, formación monogenérica dispersa en la costa (mayor densidad al sur) compuesta por plantas rastreras (Tillandsia).	- Presentan colores oscuros de tonalidad morada-guinda-marrón-verde con rugosidad media. - Tillandsial presenta colores morados en zonas desérticas.
3	**Mosaico agropecuario (ID: 21)**		Todos los biomas	Área de no bosque amazónico Agricultura costera y andina	Áreas agropecuarias no diferenciadas entre agricultura y pastos, además de áreas verdes urbanas. Según el bioma, predominan: en el Bosque Seco Ecuatorial y Desierto Costero, cereales, hortalizas y frutales; en la Amazonía, ganadería, cereales y palma aceitera; y en los Andes, ganadería, cereales, tubérculos y hortalizas en valles interandinos.	- Presentan colores mezclados de fucsia, guinda y verde con tonos claros. - Plantaciones agroindustriales de color verde claro similar a las purmas y bosques secundarios jóvenes.
	Plantación forestal (ID: 9)		Andes	Plantación forestal	Plantaciones de especies exóticas (Pinus sp. y Eucalyptus sp.) con diseño y fines específicos (como producción), ubicadas en tierras de aptitud forestal de la región andina entre los 3000 y 3800 msnm.	Color verde claro.
	Palma aceitera (ID: 35)		Amazonía	Área de no bosque amazónico	Áreas donde la cobertura original ha sido modificada o reemplazada por cultivos permanentes de palma aceitera, principalmente de la especie Elaeis guineensis.	Colores de verdes claros intensos de estructuras geométricas delimitadas.
	Arroz (beta) (ID:40)		Todos los biomas	Área de no bosque amazónico Agricultura costera y andina	Áreas donde la cobertura original ha sido modificada o reemplazada por cultivos permanentes de arroz. Principalmente de la especie Oryza sativa.	Estructuras geométricas delimitadas, intermitencia entre verdes claros y cuerpos de agua.
	Pasto (beta) (ID: 15)		Amazonía Andes	Área de no bosque amazónico Agricultura costera y andina	Áreas de pasto, plantado o natural, vinculadas a la actividad pecuaria.	- En Amazonía baja presenta colores naranja y amarillo intenso. - En Amazonía alta y Andes presenta colores verdes bajos y tonos de

					amarillos, melon.
4	**Infraestructura urbana (ID: 24)**	Todos los biomas	Área urbana; Infraestructura	Constituida por espacios cubiertos por infraestructura urbana y todas aquellas áreas verdes y vías de comunicación asociadas con ellas. Excluye infraestructura rural de pequeña escala que no es percibida por la resolución de las imágenes Landsat.	Rosado intenso. En algunos casos blanco (infraestructura reflectiva).
	Minería (ID: 30)	Todos los biomas	Centro minero; área de no bosque amazónico	Comprende las áreas donde se extraen o acumulan materiales de la actividad minera a tajo abierto y minería fluvial.	Presentan colores fucsia, guinda y morado con tonos intensos. Así como cuerpos de agua turquesas (extracción de sal).
	Playa (ID: 23)	Amazonía Andes	Banco de arena	Áreas con presencia de coberturas arenosas o nula vegetación que es transportada por los ríos.	Rosado-morado en diferentes tonalidades
	Superficie rocosa (ID:92)	Andes	Área con escasa y sin vegetación;	Rocas naturalmente expuestas sin cobertura de suelo con presencia de vegetación rupícola y fuertes pendientes. Se encuentran principalmente en las zonas periglaciares o los bosques de piedra	Rosado-morado en diferentes tonalidades, fuerte presencia de sombras debido a las pendientes
	Superficie salina costera (ID: 52)	Desierto costero	Humedal Costero	Áreas naturales estacionarias y producto de la acumulación de sales debido a procesos de evaporación y/o infiltración de agua de mar en el litoral.	Tonos celestes o turquesas
	Superficie de salar (ID:61)	Andes	No aplica	Humedal altoandino (>3000 msnm) donde la evaporación supera a la precipitación, acumulando sales transportadas por escorrentía, viento o agua subterránea. Puede albergar lagunas u ojos de agua en su interior.	Coloración celeste claro y coloración azul con la presencia o ausencia de agua respectivamente
	Otra área natural sin vegetación (ID:68)	Amazonía	Áreas de no bosque amazónico	Áreas naturales de escasa o nula vegetación. Incluye los deslizamientos en las laderas ocasionados por actividad tectónica, fuertes lluvias, etc	Rosado-morado en diferentes tonalidades, incluyendo áreas de color blanco en zonas más secas
		Andes	Áreas de no bosque amazónico	Áreas naturales de escasa o nula vegetación no mapeadas en otras clases. Incluye suelos expuestos, conos de deyección, bordes de río, depósitos volcánicos, etc.	Tonalidades rosado-morado, incluyendo áreas de color blanco en zonas más secas.

		B.S. Ecuatorial	Bancos de arena	Áreas naturales de escasa o nula vegetación no mapeadas en otras clases. Se comprende el desierto, conos de deyección, colinas de suelos áridos, etc.	Rosado-morado en diferentes tonalidades, incluyendo áreas de color blanco en zonas más secas
		Desierto costero	Bancos de arena Desierto Costero	Áreas naturales de escasa o nula vegetación no mapeadas en otras clases. En costa se comprende los bancos de arena, conos de deyección, dunas, desierto, estribaciones ubicadas en la transición de los biomas costa y andes, etc.	Rosado-morado en diferentes tonalidades, incluyendo áreas de color blanco en zonas más secas
	Otra área antrópica sin vegetación (ID: 25)	Amazonía Andes B.S. Ecuatorial	Área de no bosque amazónico	Áreas antrópicas de poca o nula vegetación. Incluye, áreas de transición de cultivos, desmonte, roca/suelo expuesto en zonas de intervención antrópica, zonas de expansión urbana y vial, caminos de tipo trocha.	Rosado-morado en diferentes tonalidades, incluyendo áreas de color blanco en zonas más secas. Variación en rugosidad.
		Desierto costero	No aplica	Incluye instalaciones destinadas a la crianza y producción intensiva de aves, principalmente pollos y gallinas, caracterizadas por estructuras alargadas y de disposición regular asociadas a actividades avícolas	Tonos blancos, incluye tonalidades negras a grisáceas dependientes del material que lo compone. Textura lisa
5	**Río, lago u océano (ID: 33)**	All biomes	Lagunas, lagos y cochas Río	Es cualquier extensión de agua que se encuentra en la superficie terrestre ya sean naturales como artificiales). Comprende ríos, lagos, represas, depósitos y otros cuerpos de agua.	Dependiendo del contenido de sedimentos y la profundidad de la fuente podrían encontrarse de color negro, azul oscuro o azul claro.
	Acuicultura (ID: 31)	B.S. Ecuatorial	Lagunas, lagos y cochas	Cuerpos de agua artificiales destinados a la cría de langostinos con agua marina. Esta cobertura se conforma por una serie de piscinas adyacentes por lo que se caracterizan por contar con patrón geométrico regular.	Color azul oscuro, variando a distintos tonos de azul según el uso o a color rosado en años sin actividad.
	Glaciar (ID: 34)	Andes	Glaciar	Cobertura de hielo que se genera en la Cordillera de los Andes a partir de los 4800 hasta los 6768 msnm. Masa de hielo producto de la acumulación, compactación y recristalización de la nieve por miles de años. Principal fuente de recursos hídricos para las cuencas hidrográficas.	Tonos celestes y turquesas

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Regiones de clasificación

Para efectos de facilitar el mapeo de la diversidad de paisajes comprendidos en el área de estudio, se definieron sesenta (60) regiones de mapeo o clasificación. Cada región fue trabajada independientemente para cada año de la serie temporal.

Las regiones fueron definidas siguiendo criterios ecosistémicos y ocurrencia de intervención antropogénica, basados en mapas de referencia como los mencionados en el apartado '*Otras iniciativas nacionales de mapeo*'. Las regiones resultantes se presentan en la Figura 7 y se detallan en la tabla 7.

Tabla 7. Regiones de clasificación definidas en el marco del proyecto MapBiomas Perú.

Región de mosaico	Región de mosaico	Identificador	Códigos	Motivo de separación
Región 701	Amazonía Alta	1	70101	Zona norte de transición con intervención media, alrededor de Cajamarca
		2	70102	Zona norte de intervención media alrededor de Amazonas
		3	70103	Zona norte de poca intervención alrededor del Amazonas
		4	70104	Zona norte de poca intervención alrededor de Alto Mayo y Colán
		5	70105	Zona central de alta intervención a lo largo de San Martín, Huánuco, Pasco y Junín
		6	70106	Zona central de transición con poca intervención. San Martín , Huánuco y Pasco
		7	70107	Zona central de poca intervención y muchos deslizamientos
		8	70108	Zona central de transición con poca intervención en Junín
		9	70109	Zona central de alta intervención en Junín
		10	70110	Zona central de intervención media en Pasco
		11	70111	Zona central de transición con alta intervención
		12	70112	Zona central de transición con poca intervención alrededor de Otishi
		13	70113	Zona sur de alta intervención alrededor de Quincemil y Pillcopata
		14	70114	Zona sur de poca intervención alrededor del Manu y Bahuaja Sonene
		15	70115	Zona sur de transición con alta intervención en Puno
Región 702	Amazonía Baja	1	70201	Zona norte de poca intervención alrededor del río Putumayo
		2	70202	Zona norte de intervención media alrededor de ríos Amazonas y Nanay
		3	70203	Zona norte de poca intervención alrededor del Pastaza y Pacaya Samiria
		4	70204	Zona norte de alta intervención en Yurimaguas
		5	70205	Zona central de poca intervención por Sierra del Divisor
		6	70206	Zona central de poca intervención con muchos deslizamientos
		7	70207	Zona central de alta intervención Pachitea
		8	70208	Zona central de poca intervención alrededor del Imiria
		9	70209	Zona central de alta intervención en Ucayali
		10	70210	Zona sur de poca intervención cerca al Purús
		11	70211	Zona sur de alta intervención en alrededor de Tambopata
		12	70212	Zona norte de vegetación no boscosa en continuidad con Ecuador.
Región 703	Andes Alto	1	70301	Zona centro norte de la vertiente del atlántico sobre 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
		2	70302	Zona centro de la vertiente del atlántico sobre 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
		3	70303	Zona centro sur de la vertiente del atlántico sobre 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
		4	70304	Zona sur sobre de la vertiente del Titicaca (este) sobre 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
	Andes Bajo	1	70305	Zona norte de la vertiente del atlántico, bosques húmedos con intervención.
		2	70306	Zona centro norte de la vertiente del atlántico debajo de los 3800 msnm aprox.

		3	70307	Zona centro de la vertiente del atlántico debajo de los 3800 msnm aprox.
		4	70308	Zona sur de la vertiente del atlántico debajo de los 3800 msnm aprox.
		5	70309	Zona sur de la vertiente del atlántico debajo de los 3800 msnm aprox.
	Andes Bosque Seco Interandino	1	70310	Zona norte de la vertiente del atlántico de bosques secos y montes espinosos
		2	70311	Zona norte de la vertiente del atlántico que combina bosques húmedos, matorrales y una fuerte intervención
		3	70312	Zona centro-sur de la vertiente del atlántico, bosques secos y matorrales
	Sabana Xérica Interandina		70313	Zona sur de la vertiente del atlántico, bosques secos y estepas espinosas
Región 704	Andes Pacífico Alto	1	70401	Zona centro norte sobre la vertiente del pacífico, sobre los 800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
		2	70402	Zona centro de la vertiente del pacífico sobre los 3800 msnm aprox., presencia de glaciares, bofedales.
		3	70403	Zona sur sobre de la vertiente del Titicaca (oeste) sobre los 3800 msnm aprox., presencia de alta intervención antrópica
	Andes Pacífico Bajo	1	70404	Zona sur de la vertiente del pacífico debajo de los 3800 msnm aprox. Colinda con la costa (Tacna, Moquegua, Arequipa).
		2	70405	Zona norte de la vertiente del pacífico, presencia de bosques secos, colinda con el Bosque seco Ecuatorial.
		3	70406	Zona norte de la vertiente del pacífico, zona de regular intervención agropecuaria.
		4	70407	Zona centro de la vertiente del pacífico debajo de los 3800 msnm aprox.
		5	70408	Zona centro sur de la vertiente del pacífico debajo de los 3800 msnm aprox.
	Andes Pacífico Alto	4	70409	Zona sur de la vertiente del Titicaca (oeste) sobre los 3800 msnm aprox. Presencia de pajonales y bofedales
		5	70410	Zona sur de la vertiente del Titicaca (oeste) sobre los 3800 msnm aprox. Presencia de pajonales y bofedales y glaciares
Región 705	Costa Norte	1	70501	Zona norte del litoral límite con Ecuador con presencia de manglares y bosques secos.
		2	70502	Zona norte límite con Ecuador con presencia de bosque húmedo tropical de Tumbes.
		3	70503	Zona norte del litoral con presencia de bosques secos y con alta intervención urbana y agrícola.
		4	70504	Desierto de Sechura con presencia de lagunas, salinas y humedales que surgen estacionalmente a partir de los impactos temporales por el fenómeno del Niño sobre la zona.
		5	70505	Zona límite con Ecuador con presencia de bosques secos y regular intervención agropecuaria.
		6	70506	Zona de transición de bosque seco hacía la parte andina, con regular intervención agropecuaria.
	Costa Centro	1	70507	Zona centro-norte del litoral, presencia esporádica de bosques secos y alta intervención agrícola
		2	70508	Zona central del litoral, poca vegetación natural pero alta intervención urbana y agrícola.
	Costa Sur	1	70509	Zona sur del litoral, poca vegetación natural pero alta intervención agrícola. Presencia de matorrales en zonas de transición hacia parte andina.
		2	70510	Zona sur del litoral, poca vegetación natural pero alta intervención urbana y agrícola. Presencia de matorrales en zonas de transición hacia parte andina.

Fuente: Elaboración propia.

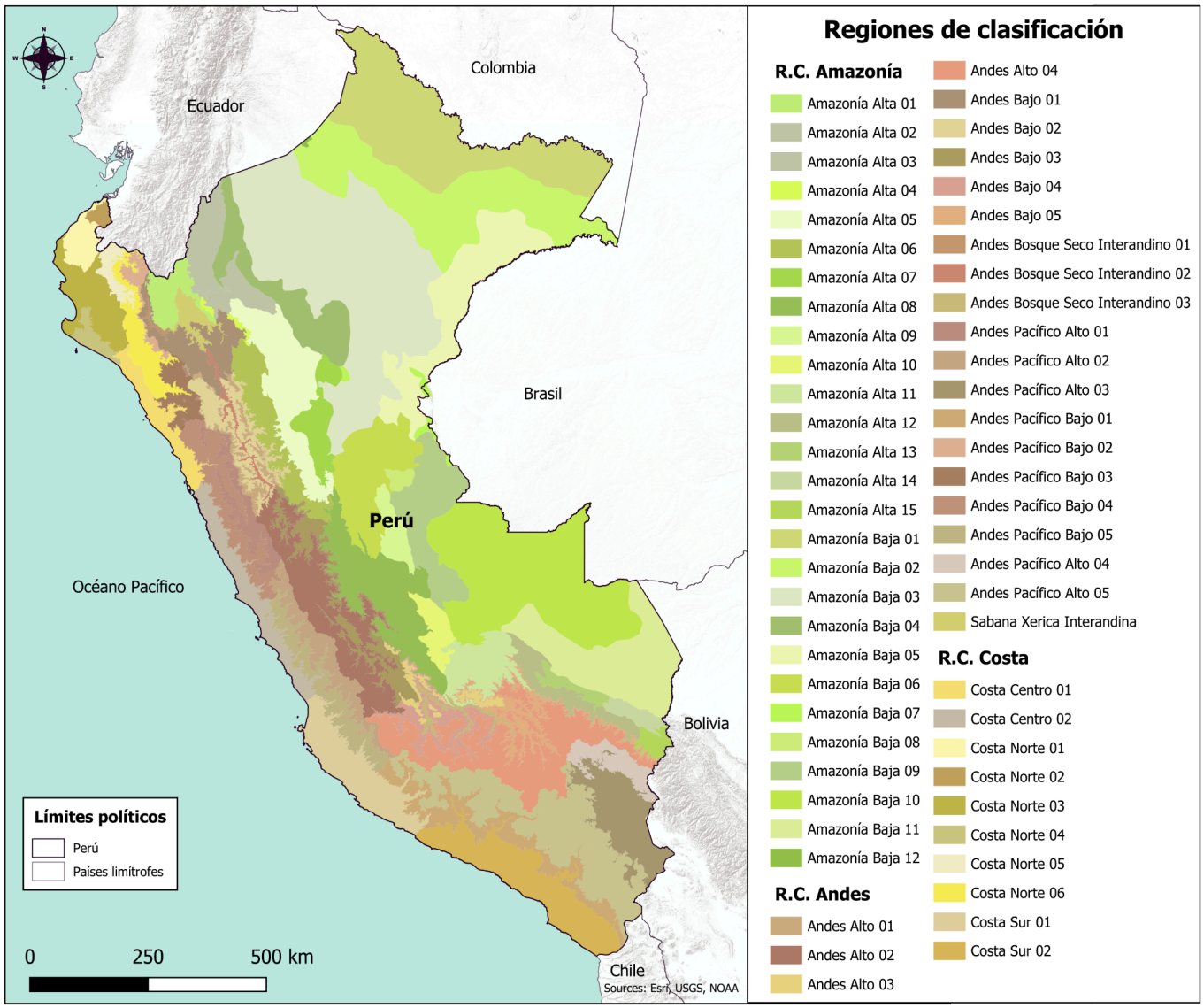

Figura 7. Mapa de regiones de clasificación para la Colección 4.0

3.3.3. Algoritmo de clasificación

Random forest[11] Es un método de clasificación que utiliza un algoritmo de aprendizaje de máquina (*machine learning*) y que reporta valores elevados de precisión, inclusive frente a escenarios complejos por su heterogeneidad. La base conceptual de Random Forest se basa en lo que Tumer y Ghosh (1996) encontraron al demostrar que el producto resultante de la combinación de múltiples clasificadores alcanza precisiones elevadas. Random forest utiliza datos de entrenamiento para construir múltiples árboles de decisión a partir de los cuales se asigna una clase a cada píxel. Random Forest ha ganado importancia en los últimos años, debido a su robustez frente a ruidos y valores atípicos. El algoritmo Random Forest forma parte del paquete de clasificadores de *machine learning* disponibles en la plataforma EE de Google. La metodología aplica un criterio de clasificación basado en píxeles.

Uno de los parámetros que Random Forest requiere es un número definido de árboles. Además requiere de una lista de variables (ver sección "Variables"), y contar con datos de entrenamiento (ver

[11] Leo Breiman, "Random Forests," *Machine Learning* 45, no. 1 (October 1, 2001): 5–32, https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

sección “Colecta espectral”). Para la Colección 4.0, el número de árboles varió según las necesidades y características de cada subregión de clasificación.

3.3.4. Colecta de muestras

El método de clasificación empleado fue el de random forest y utilizó fuentes de muestras distintas dependiendo de la región a clasificar.

Para las regiones de mosaico 701, 702 y 703 se realizó una colecta de muestras estables (misma clase a lo largo de la serie temporal), para cada una de las categorías de la leyenda que se buscaba mapear, a partir de los productos de MapBiomas Perú. A continuación se generó una clasificación preliminar para los 41 años. De este producto se vuelven a extraer muestras estables (por 41 años) para ser utilizadas como insumo de una nueva clasificación. El intérprete contribuye con la exclusión y/o inclusión de muestras para la mejora de las mismas.

Para las regiones de mosaico 704 y 705 se utilizaron las referencias nacionales disponibles. Se partió de la homologación de clases MapBiomas con las clases del mapa nacional de ecosistemas. Luego se hizo un sorteo aleatorio de muestras por clase dentro de cada región de clasificación, asumiendo preliminarmente la estabilidad temporal de estos puntos durante los años de análisis, para lograr una clasificación preliminar. A partir de este resultado preliminar, y con la participación del intérprete, se excluyen las muestras inestables. Al igual que en el primer caso, el sorteo de puntos aleatorios está balanceado según la extensión de cada clase dentro de esa región de clasificación. Opcionalmente, se incluyó manualmente muestras adicionales a las cuales se les denominó *muestras complementarias,* empleando las herramientas para creación de geometrías directamente en el EE de Google.
La Tabla 8 presenta el resumen de muestras estables empleadas por región como insumo de los 50 a 65 árboles aplicados al clasificador.

Tabla 8. Parámetros utilizados en el clasificador Random Forest.

Región de mosaico	Región de clasificación	Número de muestras estables exportadas		Número de árboles Random Forest
		Mínimo	Máximo	
Región 701	70101 a 70115	Entre 800 y 3000	Entre 4000 y 5000	50
Región 702	70201 a 70212	Entre 500 y 2500	Entre 3000 y 5000	50
Región 703	70301 a 70313	Entre 300 y 500	Entre 4000 y 5000	50 y 60
Región 704	70401 a 70410	Entre 300 y 500	Entre 4000 y 5000	60 y 65
Región 705	70501 a 70510	Entre 100 y 500	Entre 3000 y 5000	50 y 60

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. Temas transversales

Durante las diferentes pruebas de clasificación se identificaron determinadas clases cuya diferenciación mediante el mapa general presentaba limitaciones, principalmente asociadas a sus características espectrales, espaciales o a su distribución particular en determinados biomas. Por este motivo, se estableció una estrategia de clasificación independiente para estas clases, denominadas Temas transversales, mediante algoritmos de clasificación binaria, considerando una clase de interés y una clase de “No observado”. Este enfoque permitió desarrollar modelos específicos para aquellas clases que requerían un tratamiento diferenciado respecto al proceso de clasificación del mapa general.

La aplicación de esta estrategia no se realizó necesariamente de manera uniforme en todo el territorio nacional. De acuerdo con las características de cada clase y las particularidades de los biomas, algunas fueron clasificadas mediante el enfoque transversal únicamente en determinados ámbitos, mientras que en otros fueron obtenidas mediante el mapa general. Esta diferenciación permitió seleccionar la estrategia metodológica más adecuada para cada clase y bioma, considerando su comportamiento espectral, espacial y las condiciones particulares de representación de cada cobertura.

Dentro del ámbito de MapBiomas Perú, se consideraron como Temas transversales las siguientes clases:

- Manglar (ID = 5);
- Bosque inundable (ID = 6);
- Plantación forestal (ID = 9);
- Formación herbácea inundable (ID = 11);
- Pasto (ID = 15);
- Mosaico agropecuario (ID = 21);
- Playas (ID = 23);
- Infraestructura urbana (ID = 24);
- Minería (ID = 30);
- Acuicultura (ID = 31);
- Superficie salina costera (ID = 52);
- Palma aceitera (ID = 35);
- Río, Lago y Océano (ID = 33)*;
- Glaciar (ID = 34)*;
- Arroz (ID = 40);
- Superficie de salar (ID = 61);
- Lomas (ID = 70);
- Otra área antrópica sin vegetación (ID = 25).

La aplicación de estas estrategias presentó particularidades según el bioma y, en algunos casos, implicó procesos posteriores de integración y subdivisión. Por ejemplo, Bosque inundable (ID = 6) fue clasificado mediante el enfoque transversal, siguiendo los criterios metodológicos establecidos en el ATBD específico de Inundables. De manera similar, la Superficie salina costera (ID = 52) fue abordada mediante una clasificación transversal en el Desierto Costero, mientras que en Amazonía y Andes su representación se obtuvo mediante el mapa general.

Un caso particular corresponde a la Formación herbácea inundable (ID = 11). Durante la etapa inicial de clasificación, esta clase fue abordada mediante estrategias diferenciadas según el bioma. En el Desierto Costero, su clasificación se realizó mediante el enfoque de tema transversal, mientras que en los demás biomas se obtuvo mediante el mapa general. Posteriormente, los resultados de ambas estrategias fueron integrados para obtener una representación nacional de la clase 11.

Una vez realizada esta integración, se aplicó un criterio de subdivisión topográfica basado en la altitud, utilizando un umbral de 3800 m s. n. m. Los píxeles pertenecientes a la clase 11 están ubicados a altitudes mayores o iguales a 3800 m s. n. m. fueron asignados a la clase 82, Herbazal inundable altoandino, mientras que aquellos ubicados a altitudes inferiores a 3800 m s. n. m. fueron asignados a la clase 51, Herbazal inundable de tierras bajas. Por lo tanto, las clases 51 y 82 corresponden a una subdivisión posterior de la clase 11, realizada después de la integración de las clasificaciones iniciales mediante un criterio topográfico, y no a clases independientes durante la etapa inicial del proceso.

Asimismo, Otra área antrópica sin vegetación (ID = 25) fue clasificada mediante el enfoque transversal en el Desierto Costero y Bosque Seco Ecuatorial, de acuerdo con la metodología establecida en el ATBD específico de esta clase. En estos ámbitos, el mapeo transversal estuvo orientado a identificar

superficies antrópicas específicas asociadas a determinadas actividades productivas, incluyendo instalaciones destinadas a la crianza intensiva de aves. En contraste, en Andes y Amazonía, la clase 25 fue representada mediante el mapa general, donde comprende un conjunto más amplio de superficies de origen antrópico sin cobertura vegetal y no necesariamente asociadas a las instalaciones específicas consideradas en el mapeo transversal.

Estas diferencias evidencian que la denominación de Tema transversal se refiere a la estrategia metodológica aplicada para una determinada clase y ámbito de clasificación, y no implica necesariamente que dicha clase haya sido procesada mediante un modelo transversal en todos los biomas. En consecuencia, una misma clase puede presentar diferentes estrategias de clasificación según el bioma, pudiendo ser obtenida mediante un modelo transversal en un ámbito y mediante el mapa general en otro.

Finalmente, los resultados obtenidos mediante los diferentes enfoques fueron integrados para conformar la representación nacional de las clases correspondientes, aplicando, cuando fue necesario, procesos posteriores de remapeo, integración y subdivisión de acuerdo con los criterios metodológicos definidos para cada temática.

Los detalles de las metodologías específicas, los algoritmos utilizados y los criterios establecidos para determinar el ámbito de aplicación de cada tema transversal se presentan en los respectivos ATBD de cada clase.

*Clases transversales que han sido mapeadas en otras iniciativas como MapBiomas Agua.

3.4. Posclasificación

El resultado preliminar de clasificación fue sometido a la aplicación de una secuencia de filtros con el propósito de reducir inconsistencias temporales, reducir ruidos de clasificación menores a la unidad mínima de mapeo[12] y llenar vacíos de información. El proceso de Posclasificación en esta colección no tiene un orden específico en la aplicación de los filtros, la sucesión de los mismos fue de acuerdo a la necesidad de cada región de clasificación e incluso se facilitó hacer uso repetido de los filtros; a la vez, se incluyeron excepciones dentro de cada filtro como exclusión de años y clases. Todas estas herramientas fueron implementadas en la plataforma EE de Google, empleando scripts escritos en Javascript. A continuación presentamos cada una de estas herramientas a mayor detalle.

3.4.1 Llenado de vacíos de información (Gap Fill)

Ciertas áreas del territorio peruano se caracterizan por ser una región que debido a sus condiciones atmosféricas y climáticas resultan en una presencia casi permanente de nubes a lo largo del año en varias partes del territorio. Como producto de ello, la composición de mosaicos anuales contienen píxeles sin observaciones o datos (*No data*).

El filtro de relleno de vacíos o Gap fill tiene la capacidad de reducir estos vacíos residuales al asignar valores a píxeles sin datos debido a ausencias de observación del satélite (“gaps”).

Los píxeles sin información en las clasificaciones anuales son completados mediante un procedimiento de relleno temporal en dos direcciones. En un primer barrido, realizado desde el inicio hacia el final de la serie temporal (1985–2025), los píxeles sin datos son rellenados utilizando el valor válido más reciente disponible en los años precedentes. De esta manera, cuando existen vacíos consecutivos, se propaga hacia adelante el último valor válido observado. Posteriormente, se realiza un segundo barrido desde el final hacia el inicio de la serie temporal (2025–1985), mediante el cual los vacíos que no pudieron ser completados en el primer barrido son rellenados utilizando el valor válido

[12] 5 píxeles = aproximadamente media hectárea.

posterior más próximo. Este segundo procedimiento permite principalmente completar vacíos localizados al inicio de la serie, antes de la primera observación válida disponible. Los píxeles que permanecen sin información después de ambos barridos son asignados a la clase No observado (ID 27). Asimismo, se genera una capa de metadatos que registra el año de origen del valor utilizado para completar cada píxel. (ver Figura 8).

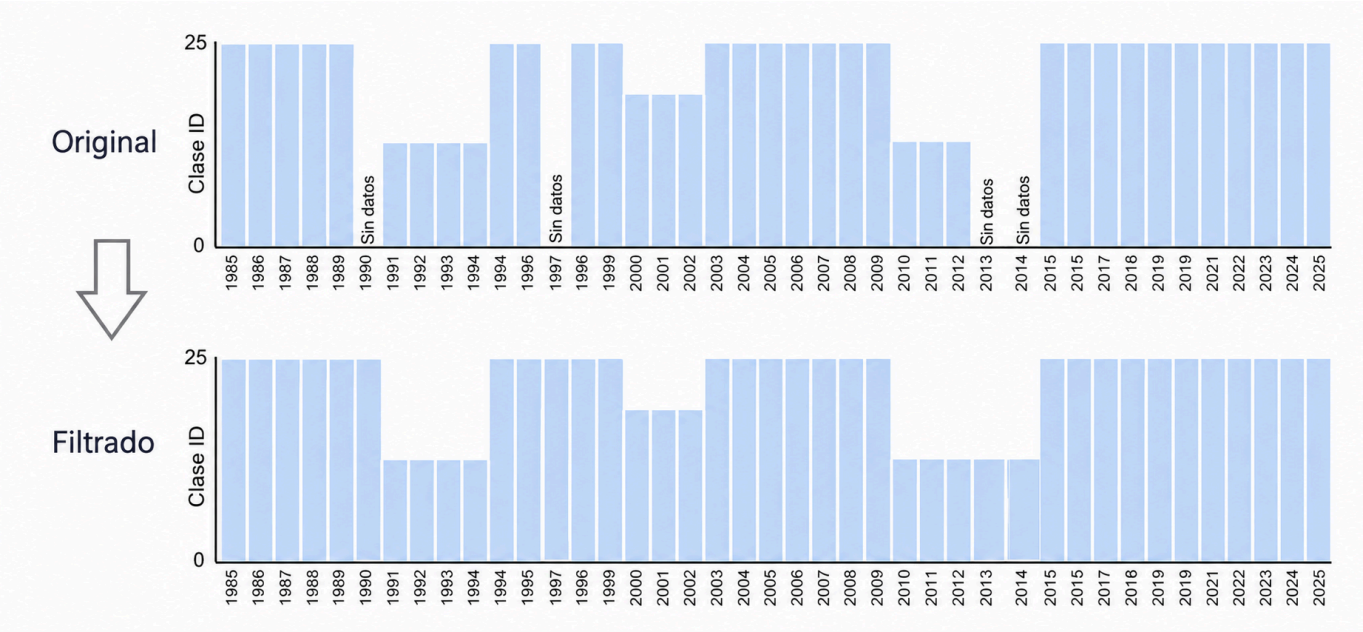

Figura 8. Esquema de funcionalidad de filtro Gap Fill.

3.4.2 Filtro Temporal

El filtro temporal inspecciona el valor de cada píxel clasificado en relación al valor de ese píxel en clasificaciones temporalmente consecutivas. Para ello emplea una ventana móvil unidireccional que toma en consideración secuencias de clasificaciones de 3 a 5 años e identifica transiciones temporales no permitidas. El filtro temporal se aplica a cada píxel de todos los años de la colección.

Dependiendo del año que la regla modificará, existen tres tipos de reglas:

- Reglas generales (RG). Aplicadas a píxeles de años en posiciones intermedias en secuencias de 3 a 5 años. Esta regla se aplica únicamente en casos donde hay una inconsistencia temporal; por ejemplo, cuando secuencias de años consecutivos tienen valores idénticos a excepción del píxel en posición central. En estos casos, el filtro modificará el valor del píxel central para que guarde consistencia con los píxeles que le anteceden y suceden. En el caso de secuencias de 3 años, solo existe una opción de posición central o año intermedio. En el caso de secuencias de 4 o 5 años, existen dos o tres alternativas de posiciones centrales. Esta regla modifica los valores de las clasificaciones de los años 1986 al 2024.
- Reglas de primer año (RP). Aplicadas únicamente al primer año de la serie temporal. Esta regla modifica los valores de la clasificación del año 1985.
- Reglas de último año (RU). Aplicada al último año de la clasificación. Esta regla modifica los valores de la clasificación del año 2025.

De este modo, los filtros temporales reducen vacíos de información e inconsistencias temporales o cambios que no son posibles o no están permitidos (ver Figura 9). Por ejemplo, si en tres años consecutivos un píxel tiene los siguientes valores: Formación Forestal > Área No Vegetada > Formación Forestal, el filtro corregirá el año intermedio. Este caso es un típico error de clasificación debido a la presencia de bruma de nubes en el mosaico del año intermedio.

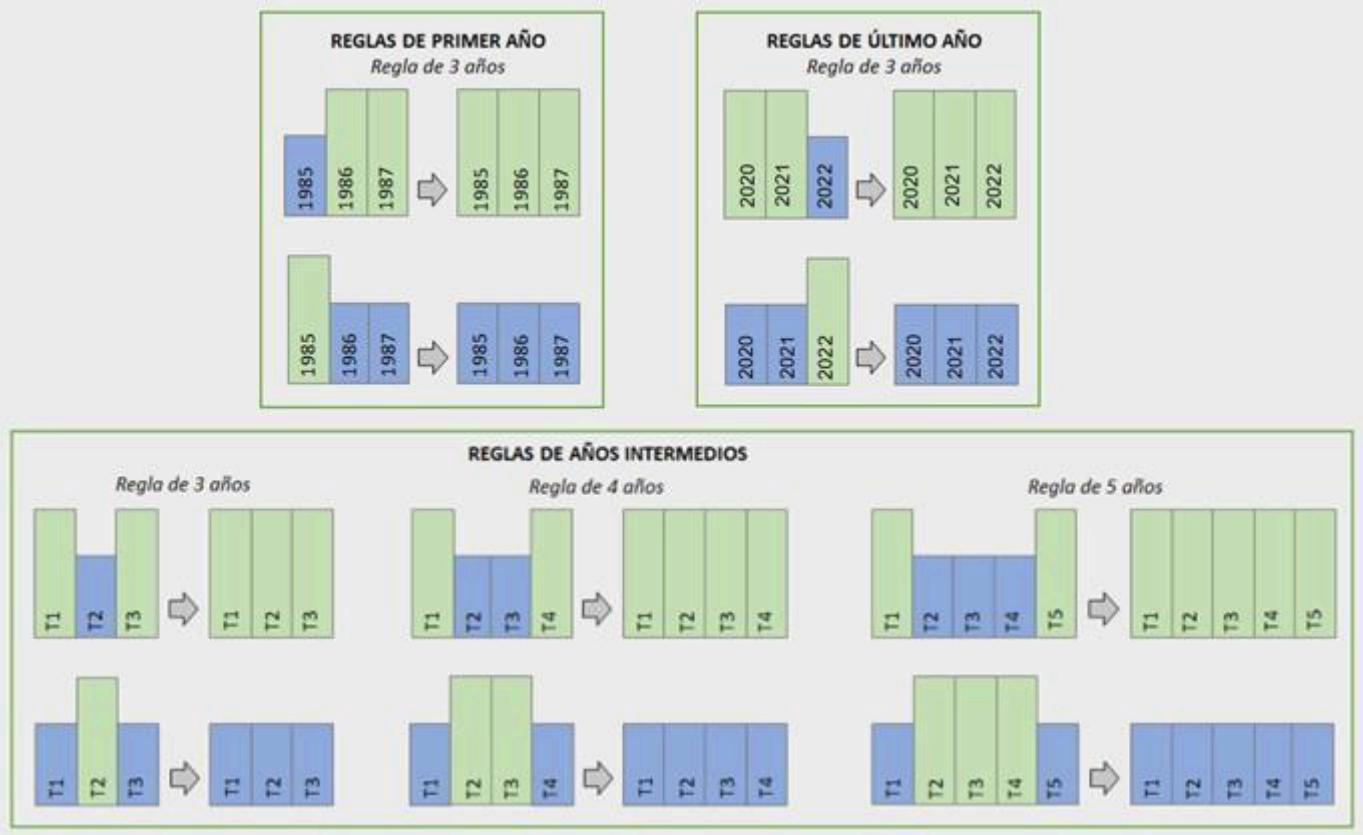

Figura 9. Esquema de funcionalidad de filtro temporal.

3.4.3 Filtro Espacial

El filtro espacial se basa en la función "connectedPixelCount", nativa del GEE. Esta función localiza píxeles conectados (vecinos) que comparten el mismo valor empleando una ventana móvil. Únicamente los píxeles que no comparten una conexión con un número predefinido de vecinos idénticos son considerados como píxeles aislados. En el caso de MapBiomas Perú, la unidad mínima de mapeo fue definida como aproximadamente 0.5 ha (5 píxeles). Consecuentemente, se requirió que por lo menos cinco píxeles estén conectados para cumplir con el criterio de conexión mínima. De este modo, el filtro espacial allana (suaviza) diferencias locales al eliminar píxeles aislados o de borde menores a 0.5 ha, incrementando la consistencia espacial de las calificaciones (ver Figura 10). Cabe resaltar que algunas regiones de clasificación tuvieron excepciones de unidad mínima de 3 píxeles.

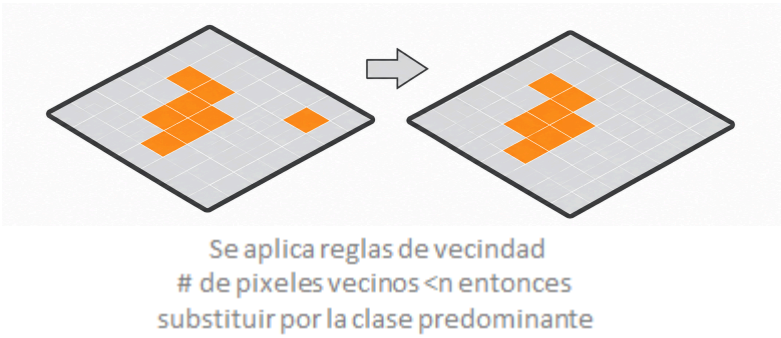

Figura 10. Esquema de funcionalidad de filtro espacial.

3.4.4 Filtro de frecuencia

Este filtro toma en consideración la frecuencia de ocurrencia de clases naturales en toda la serie temporal. Por lo tanto, clases con ocurrencias menores a un porcentaje definido por el/la intérprete son reemplazadas por el valor de la clase más frecuente. Este mecanismo contribuye a reducir la oscilación temporal asociada a una clase natural, disminuyendo la frecuencia de falsos positivos y preservando trayectorias consolidadas (ver Figura 11). De acuerdo a las necesidades de cada subregión y/o tema transversal, se adecuaron los criterios del filtro por región de clasificación. Se descartó su aplicación en varias subregiones, su aplicación fue definida según las necesidades de cada región de clasificación y/o tema transversal.

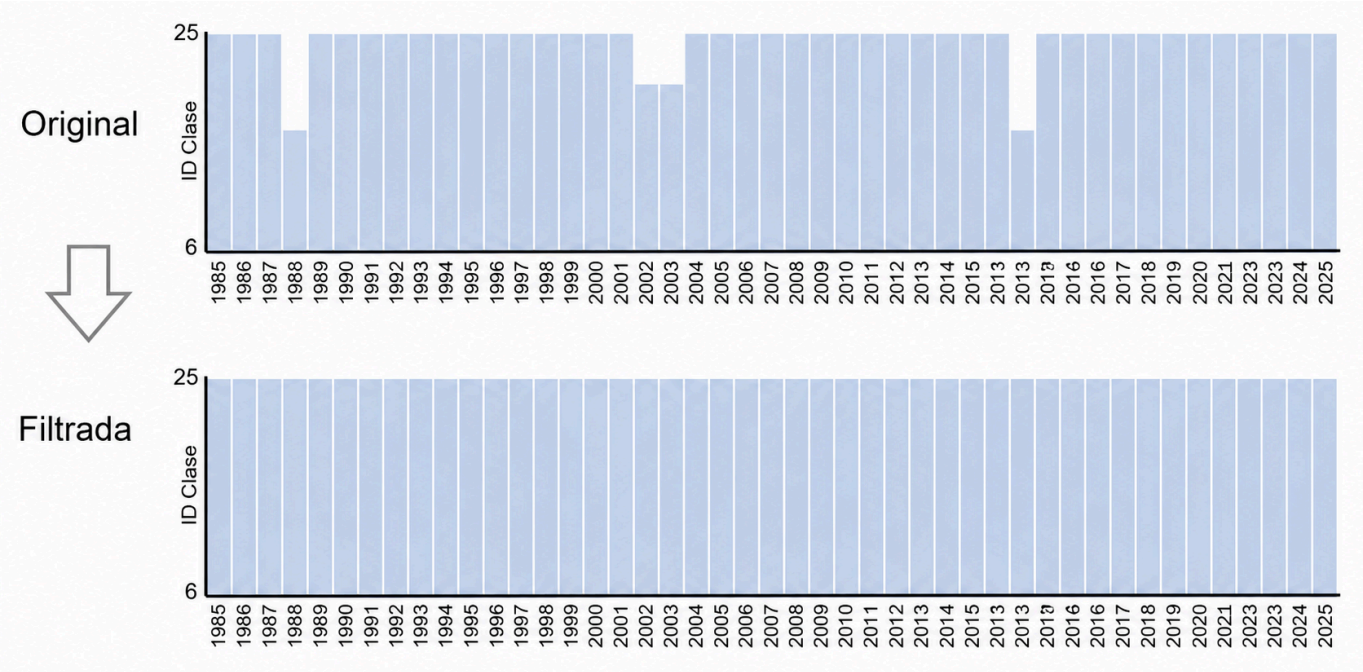

Figura 11. Esquema de funcionalidad de filtro frecuencia.

3.4.5 Filtro de incidencia

El filtro de incidencia estabiliza el valor de píxeles de clase natural que cambiaron de clase demasiadas veces a lo largo de la serie temporal de 41 años. Todos los píxeles que cambian más de una cantidad de veces definida por el usuario y que están conectados con por lo menos *n* píxeles, fueron reemplazados por el valor de la clase de moda de ese píxel. Esto reduce cambios a lo largo de los bordes de las clases y ayuda a estabilizar las transiciones erradas por ruidos. De acuerdo a las necesidades de cada subregión y/o tema transversal, se adecuaron los criterios del filtro (ver Figura 12). Se descartó su aplicación en varias subregiones, su aplicación fue definida según las necesidades de cada región de clasificación y/o tema transversal.

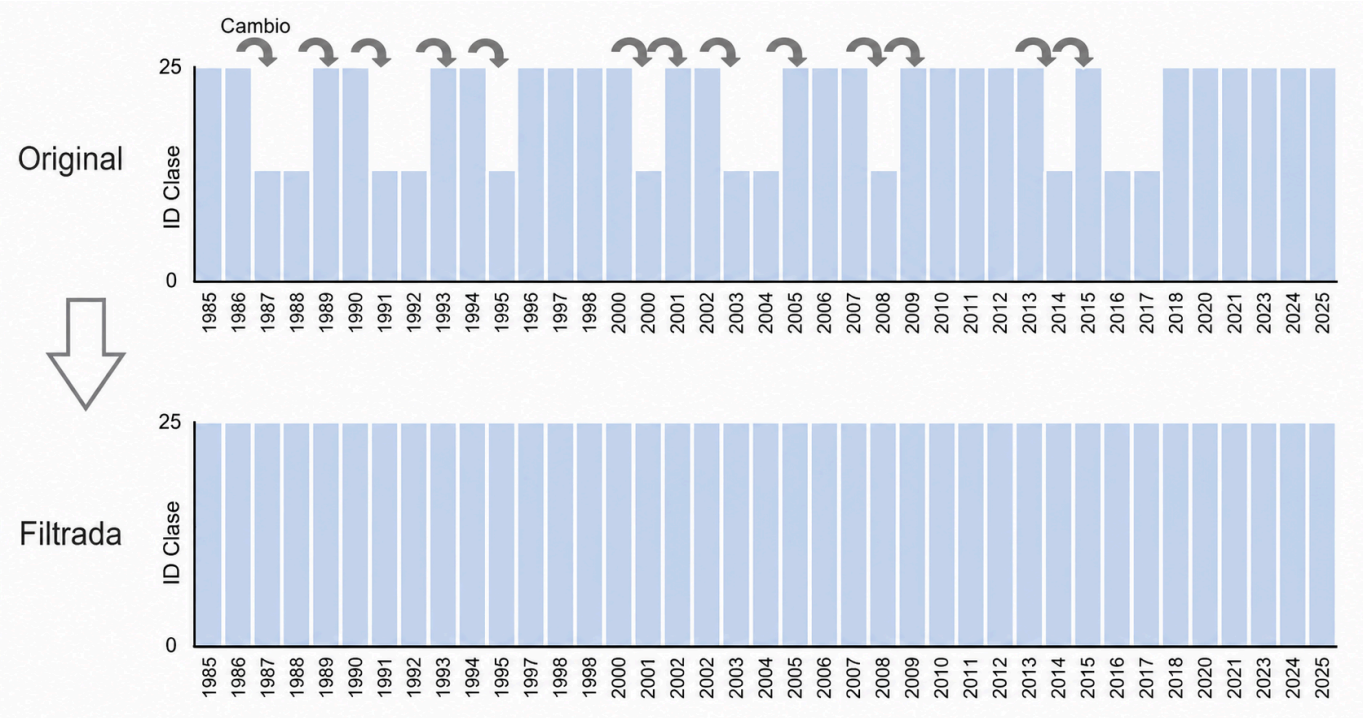

Figura 12. Esquema de funcionalidad de filtro incidencia.

3.4.6. Reclasificación

En casos muy particulares, donde no hubo continuidad de clase, se optó por verificar con capas de referencia o información secundaria y así reclasificar la clase errónea y obtener una correcta continuidad entre biomas.

3.5. Integración

Los resultados de las clasificaciones anuales obtenidos para cada una de las regiones de clasificación constituyen sectores del mapa base general, los cuales requieren ser integrados en un único mapa nacional anual con los temas transversales; siguiendo reglas de prevalencia o de orden de integración que definen la prevalencia de clases donde ocurra superposición de distintos valores.

La integración para Perú fue realizada por región de clasificación, mediante reglas de prevalencia definidas de acuerdo con las características de cada región y bioma. La Tabla 9 resume los órdenes generales de prevalencia aplicados durante esta etapa. No obstante, en determinadas regiones de clasificación del Bosque Seco Ecuatorial y de los Andes occidentales se utilizaron esquemas específicos de integración, distintos de los órdenes generales presentados para sus respectivos biomas. Estas variaciones responden a la parametrización particular establecida para cada región de clasificación durante la integración de los mapas generales y los temas transversales. Estas particularidades se detallan en la nota de la Tabla 9.

Tabla 9. Reglas generales de prevalencia por bioma para la fase de integración.

Colección 4.0.	CLASE ID	FUENTE	ORDEN DE PREVALENCIA			
			AMAZONIA	ANDES	BOSQUE SECO ECUATORIAL	DESIERTO COSTERO
Plantación Forestal	9	Transversal	-	2	-	-
Playa	23	Transversal	1	4	11	9
Playa	23	General	2	4	16	14
Acuicultura	31	Transversal	-	-	6	-
Agua	33	General	3	5	1	1
Minería	30	Transversal	4	6	4	4
Infraestructura Urbana	24	Transversal	5	7	5	5
Lomas	70	Transversal	-	-	12	10
Superficie salina costera	52	Transversal	-	-	15	13
Superficie de salar	61	Transversal	-	3	-	-
Superficie rocosa	92	General	-	17	-	-
Otra área natural sin vegetación	68	General	6	16	17	15
Otra área antrópica sin vegetación	25	Transversal	-	17	3	3
Otra área antrópica sin vegetación	25	General	7	17	14	12
Formación herbácea	12	General	8	15	-	-
Formación herbácea inundable	11	General	9	8	-	-
Formación herbácea inundable	11	Transversal	9	8	9	7
Matorral y otros arbustales	66	General	10	14	13	11
Palma aceitera	35	Transversal	11	-	-	-
Arroz	40	Transversal	12	11	8	6
Pasto	15	Transversal	13	12	-	-
Pasto	15	General	-	12	-	-
Mosaico agropecuario	21	Transversal	14	13	-	-
Mosaico agropecuario	21	General	15	13	10	8
Bosque inundable	6	Transversal	16	-	-	-
Bosque inundable	6	General	17	-	-	-
Manglar	5	General	-	-	-	-
Manglar	5	Transversal	-	-	7	-
Bosque seco	4	General	-	9	18	16
Bosque seco	4	Transversal	18	9	-	-
Bosque	3	General	19	10	12	12
Agua	33	Transversal			2	2
Glaciar (MAPBIOMAS AGUA)	34	Transversal	-	1	-	-

Agua (MAPBIOMAS AGUA)	33	Transversal	21	5	2	2

Nota: *El orden de prevalencia se estableció de acuerdo con los criterios de clasificación definidos para cada región de clasificación. Si bien se partió de un orden general de prevalencia para cada bioma, este fue ajustado en determinados casos cuando las características del área requerían priorizar algunas clases sobre otras. Estos ajustes permitieron considerar la interacción entre clases generales y transversales y asegurar una asignación coherente de las coberturas y usos del suelo en cada contexto. El valor 1 representa la máxima prioridad de integración. A medida que aumenta el número asignado, disminuye la prioridad. En caso de superposición, prevalece la clase con el menor valor numérico del orden de prevalencia.*

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Mapas de transiciones

Con base a los mapas anuales de cobertura y uso integrados, se calculan las transiciones. Estas representan los cambios entre pares (2) de mapas, es decir, entre dos periodos. Los resultados están disponibles en la plataforma de MapBiomas Perú. Las transiciones son calculadas para diferentes periodos, como por ejemplo:

- (A) años consecutivos, anuales (por ejemplo, de 2001 a 2002, o de 2013 a 2014, etc)
- (B) períodos de cinco años (por ejemplo, 2000-2005)
- (C) períodos de diez años (por ejemplo, 2000-2010)
- (D) serie temporal completa (1985 - 2025)
- (E) períodos especiales (por ejemplo, 2000-2025)

3.7 Estadísticas

Con base a los mapas anuales de cobertura y uso integrados, se calculan las estadísticas de superficie en hectáreas (Ha) tanto zonales como anuales, de las clases mapeadas. Las unidades espaciales consideradas para el cálculo de las estadísticas son:

- País
- Bioma
- Departamento
- Provincia
- Distrito
- Cuenca hidrográfica
- Territorios indígenas
- Áreas naturales protegidas
- Región geográfica

4. Validación

La precisión temática de los mapas anuales de cobertura y uso del suelo de la Colección 4.0. de MapBiomas Perú para el periodo 1985–2025 fue evaluada mediante un proceso de validación ejecutado por el Laboratorio de Gestión del Territorio de la Escuela Profesional de Geografía de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, con el apoyo administrativo de la Fundación San Marcos y la asesoría técnica del equipo de MapBiomas Perú. El proceso tuvo como finalidad evaluar la correspondencia entre las clases representadas en los mapas y la información de referencia obtenida mediante interpretación visual independiente.

[13]La validación se desarrolló en tres fases: diseño de muestreo, interpretación de los puntos de referencia y análisis de precisión.

4.1. Diseño de muestreo

Para la selección de los puntos de validación se aplicó un muestreo aleatorio estratificado, considerando cada clase de cobertura y uso del suelo como un estrato. El tamaño de muestra se determinó a partir de la metodología de Cochran (1977), utilizando un margen de error global permitido de 2 %, un nivel de confianza de 95 % (Z=1.96), una precisión global esperada de 0.8 y un mínimo de 30 puntos por estrato. El cálculo del tamaño de muestra se realizó mediante la ecuación 5.47 de Cochran (1977), considerando la variabilidad de cada clase y la desviación estándar objetivo.

$$n = \frac{\left(\sum W_h S_h\right)^2}{s(\theta)^2 + \frac{1}{N}\sum W_h S_h^2}$$

Figura 13. Ecuación de Cochran, (Cochran, 1977).

$$S_h = \sqrt{U_h(1 - U_h)}$$

Figura 14. Ecuación de Variabilidad por clase, (Cochran, 1977).

$$s(\theta) = \frac{d}{Z} = \frac{0.02}{1.96}$$

Figura 15. Ecuación de Desviación estándar objetivo, (Cochran, 1977).

Para garantizar la reproducibilidad del sorteo de los puntos se utilizó una semilla (seed) de 1234. Las coordenadas de los puntos de validación se almacenaron en el sistema de referencia WGS 84 (EPSG:4326). Los puntos seleccionados para la validación corresponden a un conjunto independiente de las muestras utilizadas para el entrenamiento y ajuste de las clasificaciones, por lo que no fueron empleados como muestras de entrenamiento.

La distribución de los puntos consideró la proporcionalidad de la superficie ocupada por cada clase y un tratamiento específico para clases con baja representatividad espacial. Cuando el número de puntos sorteados para una clase poco frecuente superaba el 25 % de los píxeles disponibles de dicha clase, se realizaba una revisión adicional de su distribución. Asimismo, para reducir el efecto de borde entre coberturas se aplicó una erosión binaria mediante una matriz de 3 × 3 píxeles, priorizando la

[13] Puede acceder a los resultados de validación en la sección de Análisis de precisión en el siguiente enlace: https://peru.mapbiomas.org/iniciativas-y-productos/cobertura-y-uso-del-suelo/cobertura/

selección de píxeles ubicados al interior de cada clase. El diseño resultó en un total de 11 684 puntos de validación distribuidos en el territorio nacional, como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 10. Número de puntos de muestreo por región.

Región	N° de puntos
Costa	2 227
Andes	2 106
Andes pacífico	2 226
Amazonía baja	2 711
Amazonía alta	2 374
Total	**11 684**

Fuente: Elaboración propia.

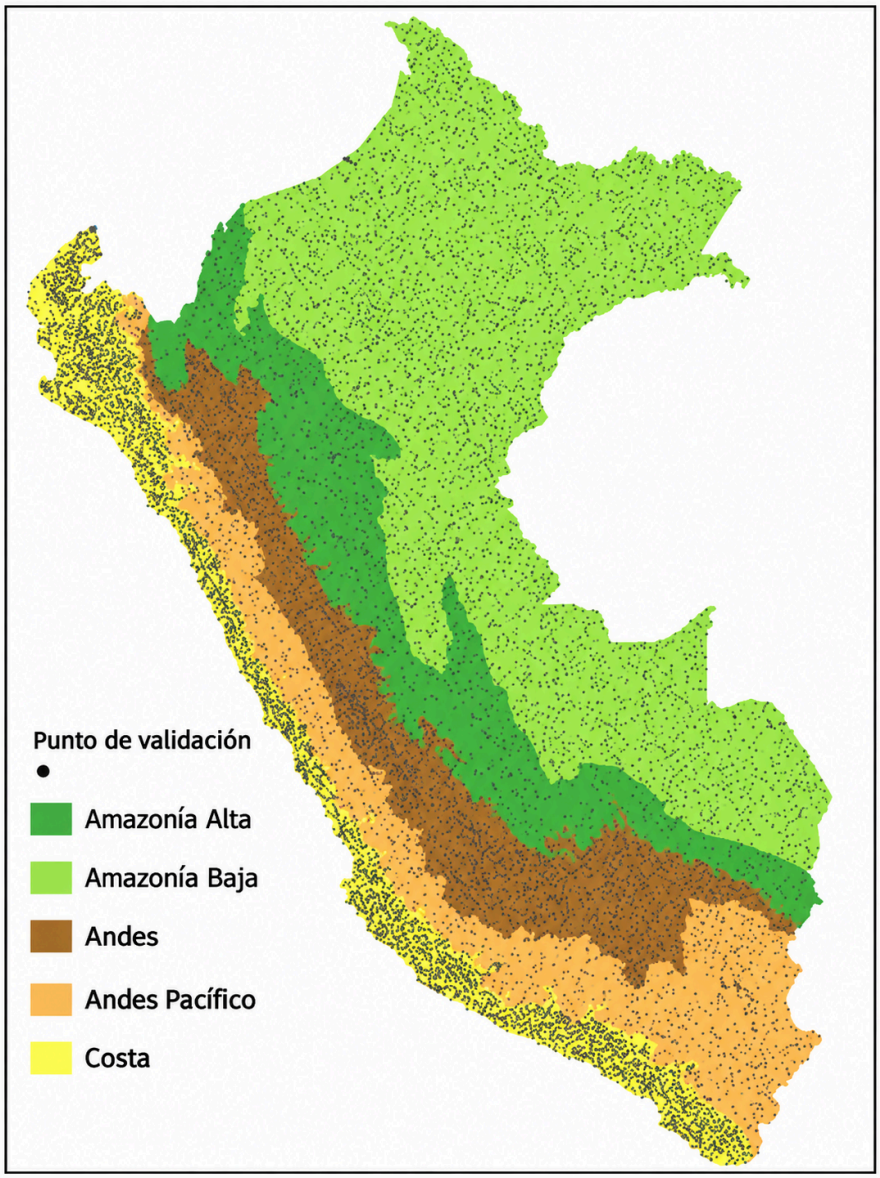

Figura 16. Distribución de puntos de muestreo en las regiones del Perú.

4.2. Interpretación de los puntos

La interpretación de los puntos de validación se realizó mediante la plataforma TVI-LAPIG, desarrollada por el Laboratorio de Procesamiento de Imágenes y Geoprocesamiento de la Universidad Federal de Goiás. Para cada punto se efectuaron tres interpretaciones independientes. Cuando existieron discrepancias entre los intérpretes, el caso fue sometido a revisión por un supervisor, quien realizó una interpretación adicional para establecer la clase de referencia definitiva.

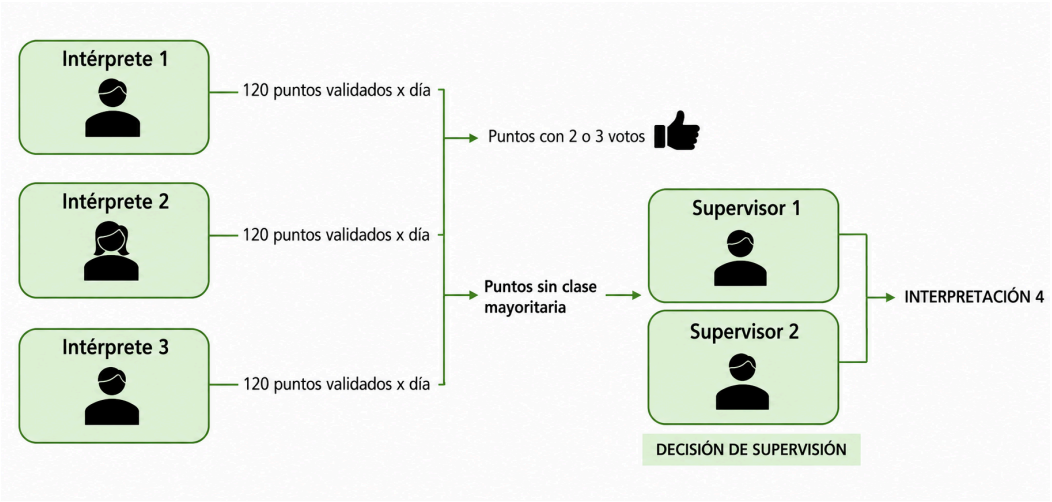

Figura 17. Protocolo de validación

La asignación de las clases se apoyó en criterios de fotointerpretación como forma, tamaño, color, textura y contexto espacial, complementados con el análisis multitemporal de la respuesta espectral, el conocimiento de campo y del contexto territorial y la consulta de imágenes de mayor resolución disponibles principalmente en Google Earth Pro.

4.3. Análisis de precisión

Los puntos interpretados constituyeron la información de referencia para evaluar las clasificaciones de MapBiomas Perú. Para cada punto se extrajo en Google Earth Engine el valor de la clasificación correspondiente a cada año de la serie 1985–2025, a una resolución espacial de 30 m. Posteriormente, los datos fueron procesados usando lenguaje R (R Core Team , 2026) , incorporando la información de estratificación, la población de cada estrato y los pesos derivados del diseño muestral.

La evaluación se realizó para los niveles de clasificación Nivel 1 (L1) y Nivel 2 (L2) mediante matrices de confusión y el cálculo de la precisión global (OA), precisión del productor (PA), precisión del usuario (UA), error de omisión y error de comisión. También se calcularon los errores estándar e intervalos de confianza al 95 %, así como los desacuerdos de cantidad y asignación, considerando la variación temporal y espacial de los resultados.

El error de omisión representa la proporción de elementos pertenecientes a una clase de referencia que no fueron correctamente identificados en el mapa y es complementario a la precisión del productor. Por su parte, el error de comisión representa la proporción de píxeles asignados a una clase en el mapa que corresponden a otras clases en la información de referencia y es complementario a la precisión del usuario.

Tabla 11. Indicadores usados en el análisis de precisión.

Indicador	Interpretación
Precisión global (OA)	Proporción total de observaciones correctamente clasificadas respecto del total evaluado.
Precisión del productor (PA)	Capacidad del mapa para recuperar correctamente los elementos que realmente pertenecen a una clase. Su complemento es el error de omisión.
Error de omisión	Proporción de elementos de una clase de referencia que no fueron identificados correctamente en el mapa.
Precisión del usuario (UA)	Probabilidad de que un píxel asignado por el mapa a una clase corresponda efectivamente a esa clase en la referencia. Su complemento es el error de comisión.
Error de comisión	Proporción de píxeles asignados a una clase en el mapa que pertenecen a otras clases en referencia.
Kappa	Medida de concordancia entre la clasificación y la información de referencia, considerando la concordancia esperada por azar.
Desacuerdo de cantidad	Componente del error asociado a diferencias en la cantidad o proporción de cada clase.
Desacuerdo de asignación	Componente del error asociado a diferencias en la localización espacial de las clases.

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Resultados de la validación

A nivel nacional, la Colección 4.0 presentó una precisión global consolidada de 90.12 % para el Nivel 1, con un intervalo de confianza al 95 % de 90.05 a 90.20 %. El error estuvo compuesto por un 5.94 % de desacuerdo de asignación y un 3.94 % de desacuerdo de cantidad. La precisión anual mostró poca variación durante la serie: entre 89.24 % en 1985 y 90.57 % en 2022, alcanzando 90.34 % en 2025.

Para el Nivel 2, la precisión general promedio anual fue de 86.54 %, equivalente a un error global promedio de 13.46 %. La variación temporal también fue reducida, con valores comprendidos entre 86.00 % en 1985 y 86.97 % en 2010; para 2025 la precisión alcanzó 86.67 % (ver Tabla 12).

Tabla 12. Precisión nacional, variación anual y precisión del año 2025 por nivel de clasificación.

Nivel de clasificación	Precisión nacional	Variación anual	Precisión 2025
Nivel 1	**90.12 %**	89.24–90.57 %	**90.34 %**
Nivel 2	**86.54 %***	86.00–86.97 %	**86.67 %**

Fuente: Elaboración propia.
*Precisión general promedio anual.

4.4.1. Nivel 1: Precisión nacional y desempeño por clase

En el Nivel 1, la precisión global anual se mantuvo en un intervalo estrecho a lo largo de las cuatro décadas evaluadas: el mínimo se registró en 1985 (89,24 %), el máximo en 2022 (90,57 %) y en 2025

alcanzó 90,34 %. Esta baja variación evidencia una estabilidad temporal importante de la clasificación a escala nacional.

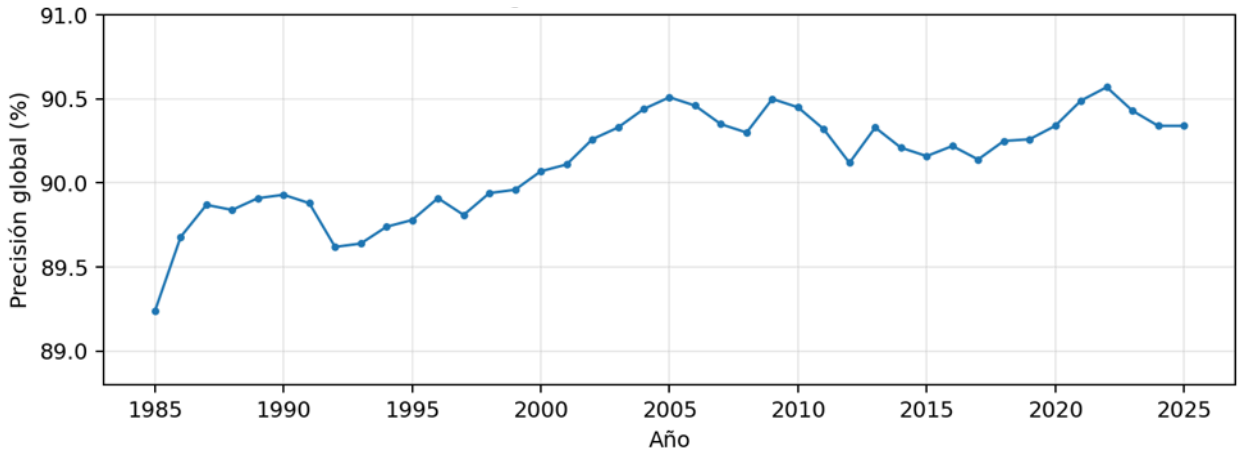

Figura 18. Evolución de la precisión global anual del Nivel 1, 1985-2025.

Tabla 13. Precisión del productor, usuario y errores por clases del Nivel 1 (promedio 1985-2025).

Nivel 1	Precisión productor	Error omisión	Precisión usuario	Error comisión
Formación boscosa	96,67 %	3,33 %	97,57 %	2,43 %
Formación natural no boscosa	85,38 %	14,62 %	72,88 %	27,12 %
Área agropecuaria	80,50 %	19,50 %	72,11 %	27,89 %
Área sin vegetación	74,08 %	25,92 %	95,19 %	4,81 %
Cuerpo de agua	96,28 %	3,72 %	89,05 %	10,95 %

La desagregación de los errores por clase permite identificar con mayor claridad la naturaleza de las confusiones del Nivel 1. Las Figuras 15 y 16 resumen los componentes de error de omisión y comisión para el periodo 1985-2025.

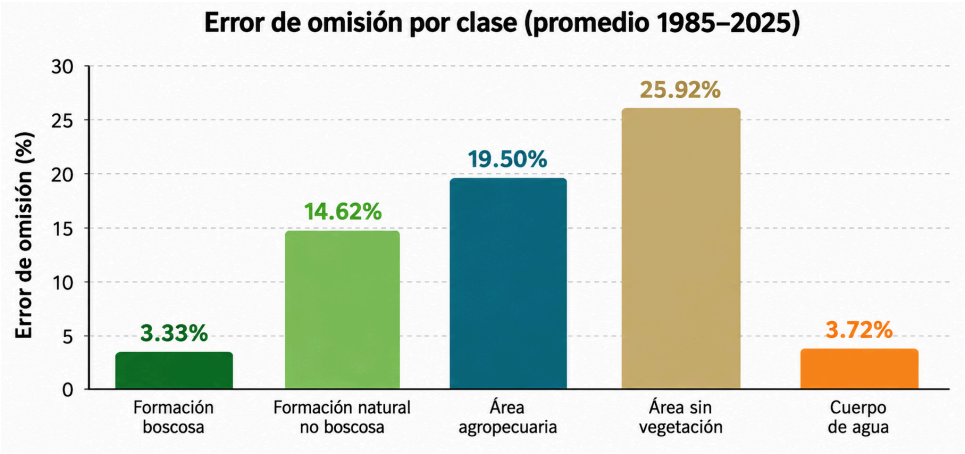

Figura 19. Error de omisión por clase nivel L1.

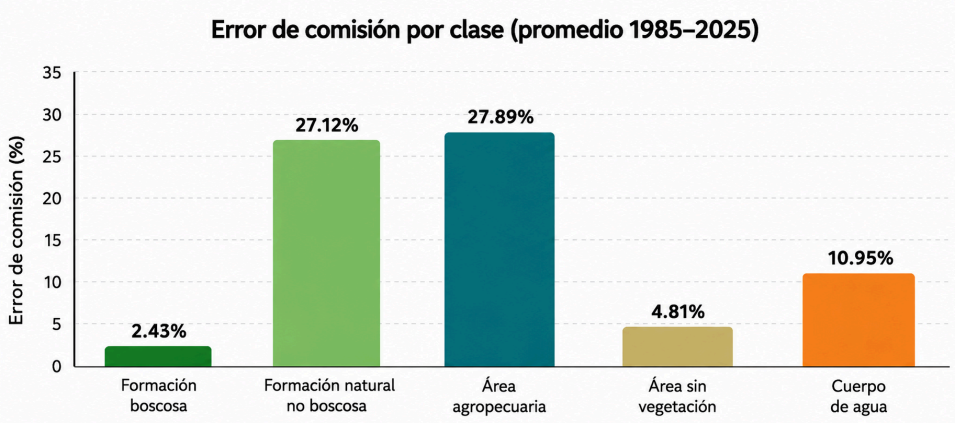

Figura 20. Error de Comisión por clase nivel L1.

Los gráficos confirman diferencias importantes entre clases. Formación boscosa presentó el desempeño más consistente, con 96,67 % de precisión del productor y 97,57 % de precisión del usuario. Las principales fuentes de confusión se concentraron entre Formación natural no boscosa, Área agropecuaria y Área sin vegetación. Área sin vegetación registró la mayor omisión (25,92 %), mientras que Formación natural no boscosa y Área agropecuaria presentaron los mayores errores de comisión (27,12 % y 27,89 %, respectivamente). Entre las confusiones dominantes se identificó la asignación de una parte de la referencia de Área sin vegetación a Formación natural no boscosa.

La Tabla 14 presenta la serie anual completa de los principales indicadores del Nivel 1. Además de la estabilidad de la precisión global, se observa una mejora gradual de la precisión del productor respecto a los primeros años de la serie, mientras que la precisión del usuario presenta oscilaciones moderadas sin cambios abruptos.

Tabla 14. Precisiones y errores por año para el Nivel 1.

Año	Precisión global	Precisión productor	Error omisión	Precisión usuario	Error comisión
1985	89.24 %	83.97 %	16.03 %	83.06 %	16.94 %
1986	89.68 %	84.81 %	15.19 %	83.17 %	16.83 %
1987	89.87 %	85.34 %	14.66 %	83.67 %	16.33 %
1988	89.84 %	85.53 %	14.47 %	83.95 %	16.05 %
1989	89.91 %	85.55 %	14.45 %	84.15 %	15.85 %
1990	89.93 %	85.70 %	14.30 %	84.50 %	15.50 %
1991	89.88 %	85.79 %	14.21 %	84.46 %	15.54 %
1992	89.62 %	85.17 %	14.83 %	83.83 %	16.17 %
1993	89.64 %	84.52 %	15.48 %	83.91 %	16.09 %
1994	89.74 %	85.21 %	14.79 %	83.70 %	16.30 %
1995	89.78 %	85.58 %	14.42 %	84.61 %	15.39 %
1996	89.91 %	86.07 %	13.93 %	85.09 %	14.91 %
1997	89.81 %	85.79 %	14.21 %	84.09 %	15.91 %
1998	89.94 %	86.24 %	13.76 %	84.17 %	15.83 %
1999	89.96 %	85.94 %	14.06 %	84.27 %	15.73 %
2000	90.07 %	86.28 %	13.72 %	84.72 %	15.28 %
2001	90.11 %	86.36 %	13.64 %	83.88 %	16.12 %
2002	90.26 %	86.79 %	13.21 %	84.72 %	15.28 %
2003	90.33 %	86.92 %	13.08 %	85.13 %	14.87 %
2004	90.44 %	86.99 %	13.01 %	85.74 %	14.26 %
2005	90.51 %	87.24 %	12.76 %	86.05 %	13.95 %

2006	90.46 %	87.20 %	12.80 %	85.81 %	14.19 %
2007	90.35 %	87.00 %	13.00 %	85.63 %	14.37 %
2008	90.30 %	86.59 %	13.41 %	86.04 %	13.96 %
2009	90.50 %	86.91 %	13.09 %	86.31 %	13.69 %
2010	90.45 %	86.94 %	13.06 %	86.61 %	13.39 %
2011	90.32 %	86.75 %	13.25 %	86.15 %	13.85 %
2012	90.12 %	86.94 %	13.06 %	85.54 %	14.46 %
2013	90.33 %	87.32 %	12.68 %	86.36 %	13.64 %
2014	90.21 %	87.35 %	12.65 %	86.53 %	13.47 %
2015	90.16 %	87.13 %	12.87 %	86.46 %	13.54 %
2016	90.22 %	87.17 %	12.83 %	86.68 %	13.32 %
2017	90.14 %	86.99 %	13.01 %	85.42 %	14.58 %
2018	90.25 %	87.29 %	12.71 %	86.15 %	13.85 %
2019	90.26 %	87.31 %	12.69 %	86.16 %	13.84 %
2020	90.34 %	87.49 %	12.51 %	86.07 %	13.93 %
2021	90.49 %	87.69 %	12.31 %	87.01 %	12.99 %
2022	90.57 %	87.72 %	12.28 %	87.44 %	12.56 %
2023	90.43 %	87.58 %	12.42 %	86.86 %	13.14 %
2024	90.34 %	87.25 %	12.75 %	85.96 %	14.04 %
2025	90.34 %	87.46 %	12.54 %	86.38 %	13.62 %

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Nivel 2: Precisión regional y desempeño por clase

La precisión temática del Nivel 2 mostró diferencias espaciales marcadas. La Amazonía presentó el mejor desempeño general (97,92 %), seguida de Amazonía Alta (91,66 %) y Pacífico (82,25 %). Los valores más bajos correspondieron a Andes (69,21 %) y Andes Pacífico (67,45 %), evidenciando mayores dificultades de discriminación temática en regiones caracterizadas por alta heterogeneidad espacial, relieve complejo, estacionalidad y coexistencia de coberturas espectralmente similares.

Tabla 15. Precisión general a nivel de región de validación.

Región de validación	Precisión general
Amazonía	**97.92 %**
Amazonía Alta	**91.66 %**
Costa	**82.25 %**
Andes	**69.21 %**
Andes Pacífico	**67.45 %**

Fuente: Elaboración propia.

La Amazonía registró el mayor nivel de precisión, mientras que Andes y Andes Pacífico presentaron los valores más bajos, lo que evidencia mayores dificultades en la discriminación temática en estos ámbitos. Estas diferencias estuvieron asociadas principalmente con la heterogeneidad y similitud espectral de determinadas coberturas y con la menor representatividad espacial de algunas clases.

La mayor desagregación temática del Nivel 2 incrementó la heterogeneidad de los resultados entre clases. El análisis del informe agrupó las clases según el comportamiento conjunto de los errores de

omisión y comisión, utilizando un umbral de 20 % para distinguir clases robustas, clases con un tipo de error predominante y clases con oportunidades de mejora.

Tabla 16. Clases robustas del Nivel 2.

Nivel 2	Precisión productor	Error omisión	Precisión usuario	Error comisión
Bosque	97,89 %	2,11 %	99,17 %	0,83 %
Afloramiento rocoso	93,89 %	6,11 %	98,49 %	1,51 %
Bosque inundable	93,37 %	6,63 %	99,43 %	0,57 %
Río, lago u océano	97,71 %	2,29 %	88,47 %	11,53 %
Playa	95,82 %	4,18 %	86,98 %	13,02 %
Glaciar	83,38 %	16,62 %	97,83 %	2,17 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Clases del Nivel 2 con alta omisión y baja comisión.

Unidad L2	Precisión productor	Error omisión	Precisión usuario	Error comisión
Superficie de salar	17,73 %	82,27 %	98,56 %	1,44 %
Minería	36,34 %	63,66 %	87,04 %	12,96 %
Acuicultura	59,16 %	40,84 %	95,49 %	4,51 %
Otra área natural sin vegetación	70,03 %	29,97 %	94,37 %	5,63 %
Infraestructura urbana	70,94 %	29,06 %	88,34 %	11,66 %
Manglar	78,23 %	21,77 %	92,55 %	7,45 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Clases del Nivel 2 con alta comisión y baja omisión.

Unidad L2	Precisión productor	Error omisión	Precisión usuario	Error comisión
Mosaico agropecuario	86,20 %	13,80 %	69,67 %	30,33 %
Formación herbácea inundable	83,06 %	16,94 %	78,98 %	21,02 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Clases del Nivel 2 con oportunidades de mejora.

Unidad L2	Precisión productor	Error omisión	Precisión usuario	Error comisión
Otra área antrópica sin vegetación	23,69 %	76,31 %	19,35 %	80,65 %
Superficie salina costera	18,42 %	81,58 %	33,32 %	66,68 %
Arroz	38,69 %	61,31 %	35,26 %	64,74 %
Formaciones arbustivas y otras	46,10 %	53,90 %	40,27 %	59,73 %
Plantación forestal	29,72 %	70,28 %	70,66 %	29,34 %
Pastos	42,22 %	57,78 %	72,68 %	27,32 %
Palma aceitera	59,70 %	40,30 %	62,21 %	37,79 %

Formación herbácea	75,67 %	24,33 %	62,47 %	37,53 %
Bosque seco	79,02 %	20,98 %	64,75 %	35,25 %

Fuente: Elaboración propia.

5. Consideraciones prácticas, desafíos y limitaciones metodológicas

La Colección 4.0 de MapBiomas Perú constituye un instrumento estratégico de monitoreo espacial que sintetiza más de cuatro décadas de dinámica territorial a escala nacional mediante un procesamiento masivo en Google Earth Engine y el algoritmo Random Forest. En este contexto, existen características de los datos satelitales y de la escala del análisis que orientan la correcta interpretación y uso de la información.

En primer lugar, el pilar metodológico del mapeo se basa en la construcción de mosaicos anuales generados a partir de la mediana de las imágenes satelitales del año. Esta síntesis es fundamental para filtrar ruidos atmosféricos y consolidar la condición física dominante de la superficie. En coberturas con marcada dinámica intraanual, como formaciones arbustivas, salinas costeras, cultivos de ciclo corto como el arroz o cuerpos de agua temporales, la variación entre la época seca y húmeda no siempre queda representada en un único compuesto anual, por lo que el mapa refleja la tendencia anual antes que variaciones de corta duración.

En segundo lugar, la disponibilidad de imágenes varía según la geografía y a lo largo de la serie histórica. Esto responde a la nubosidad persistente en regiones como la Amazonía Alta u otros ámbitos nacionales, así como a la menor densidad de datos en los años iniciales del registro satelital. Para asegurar la información necesaria durante la clasificación en áreas complejas como el Bosque Seco Ecuatorial, en ocasiones se decide priorizar la inclusión de mosaicos que conservan anomalías visuales como el efecto bandeado, evitando así vacíos de información prolongados en la serie temporal a costa de mantener algunas inconsistencias espectrales.

En tercer lugar, para solucionar las brechas dejadas por la nubosidad o la baja cobertura de datos, la metodología aplica algoritmos de relleno de vacíos (gap-fill) y filtros temporales de postclasificación. En secuencias con varios años consecutivos de alta nubosidad, el algoritmo reconstruye los píxeles faltantes apoyándose en la información de años anteriores o posteriores, garantizando la continuidad espacial y temporal del mapa.

Asimismo, los análisis de validación de la Colección 4.0 identifican una mayor complejidad de clasificación en los Andes y la vertiente del Pacífico, donde el relieve y la estacionalidad dificultan la diferenciación entre formaciones naturales no boscosas, áreas agropecuarias y zonas sin vegetación.

Estas condicionantes enmarcan el alcance técnico del producto: los mapas están diseñados para caracterizar patrones de cambio y tendencias a escala anual y multianual, definiendo al mismo tiempo la ruta de mejora continua para las próximas colecciones.

6. Referencias

Autoridad Nacional del Agua. sf. Mapa de Unidades Hidrográficas. Lima. Perú. https://sinia.minam.gob.pe/repositorio-de-mapas?page=11

Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Comunidad Andina. Mapa de Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. 2009
https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-vegetacion-natural-remanente-andes-norte-centro

DGOTA-MINAM. Mapa Nacional de Ecosistemas. 2018
http://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/

DGOTA-MINAM. Mapa de Ecorregiones del Perú. 2017
http://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/

Fosnight, E. A., Shaw, J., Masek, J. G., and Roy, D. P. (2016). The global Landsat archive: Status, consolidation,and direction. Remote Sensing of Environment, Vol. 185, 271-283.

Google (2019, Marzo 01). Landat Collections. Accedido en
https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat/

Google (2019, Marzo 01). Google Earth Engine API. Accedido en
https://developers.google.com/earth-engine/

Gorelick, Noel; Hancher, Matt; Dixon, Mike; Ilyushchenko, Simon; Thau, David; Moore, Rebecca. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, Vol. 202, 18-27.

Instituto Nacional de Recursos Naturales - Oficina de Gestión Ambiental Transectorial, Evaluación e Información de Recursos Naturales. 2000. Mapa de regiones naturales del Perú. Lima. Perú.

Instituto Nacional de Recursos Naturales. 2002. Mapa fisiográfico del Perú. Lima. Perú.

Kalliola, R., Puhakka, M. y Danjoy, W. (ed.) (1993). Amazonía Peruana: Vegetación húmeda tropical en el llano subandino. Proyecto Amazonía Universidad de Turku-Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales.

LAMPRECHT, H. 1990. Selvicultura en los trópicos. Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas; posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido. Trad. de Antonio Carrillo. Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ). 335 pp.

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. 2020. Superficie agrícola nacional oficial.
https://siea.midagri.gob.pe/portal/index.php/normas

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. 2021. Monitoreo de cultivos de arroz. GEOMIDAGRI.
https://minagri-geoespacial.users.earthengine.app/view/monitoreoarrozv1

Ministerio del Ambiente. 2009. Mapa de humedales del Perú. Lima. Perú.
https://sinia.minam.gob.pe/repositorio-de-mapas?page=11

Ministerio del Ambiente. 2015. Mapa de Cobertura Vegetal del Perú. Memoria Descriptiva - Perú. 108p.
https://sinia.minam.gob.pe/repositorio-de-mapas?page=11

Ministerio del Ambiente. 2022. Programa de Conservación de Bosques y Mitigación del Cambio Climático. Mapa de Bosque y no bosque 2000 Pérdida de bosque 2001 - 2021. Lima. Perú.

Ministerio del Ambiente. 2018. Programa de Conservación de Bosques y Mitigación del Cambio Climático. Mapeo de los bosques estacionalmente secos y no bosque estacionalmente secos de la costa norte del Perú. Tumbes • Piura • Lambayeque. Memoria Descriptiva.
http://www.bosques.gob.pe/archivo/Memoria-descriptiva_Bosques-secos-interiores-final.pdf

Moat et al. 2020. Seeing through the clouds - Mapping desert fog oasis ecosystems using 20 years of MODIS imagery over Peru and Chile. Consulte el mapa en Earth Engine:
https://gistin.users.earthengine.app/view/fogoasis. Consulte el artículo en:
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243421001756

Nature Server, IIAP, CDC-UNALM (2007). Sistemas ecológicos de la cuenca amazónica de Perú y Bolivia. Clasificación y mapeo. Lima: Nature Server, IIAP, CDC-UNALM.

Olson, David; Dinerstein, Eric; Wikramanayake, Eric; Burgess, Neil; V. N. Powell, George; C. Underwood, Emma; A. D'amico, Jennifer; Itoua, Illanga; E. Strand, Holly; Morrison, John; J. Loucks, Colby; F. Allnutt, Thomas; Ricketts, Taylor; Kura, Yumiko; Lamoreux, John; W. Wettengel, Wesley; Hedao, Prashant ; Kassem, Kenneth. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. BioScience. Vol 51, No 11. 933-938.

Programa Nacional de Conservación de Bosques y Mitigación del Cambio Climático. 2016. Rasters de uso y cambio de la tierra en Amazonía. Perú.

R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. R Project for Statistical Computing

Souza, Carlos; Roberts, Dar A.; Cochrane Mark A. (2005). Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. Remote Sensing of Environment, Vol. 98, p329-343.

Souza, Carlos; Siqueira, J.V.(2013). ImgTools: a software for optical remotely sensed data analysis. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 1571-1578.