



Documento de base teórica sobre algoritmos (ATBD)

Apéndice - Nieve

MapBiomias Agua – Ecuador Colección 4, Versión 1

Directora Ejecutiva EcoCiencia
Carmen Josse

Coordinador MapBiomias Ecuador
Wagner Holguín

Coordinador MapBiomias Agua Ecuador
Juan Espinosa

Septiembre 2026

Tabla de contenido

1. Introducción	3
1.1. Alcance y uso de los datos	4
2. Área de estudio.....	4
3. Mosaicos de imágenes	5
4. Clasificación.....	6
4.1. Análisis de Mezcla Espectral (SMA)	8
4.2. Lógica de Clasificación Espectral (Jerarquía de Umbrales).....	8
4.3. Variables de clasificación	9
5. Post-Clasificación	11
5.1. Llenado de vacíos de información (Gap Fill).....	11
5.2. Filtro espacial	12
5.3. Filtro de persistencia	14
5.4. Filtro de consistencia.....	16
5.5. Filtro correctivo	17
6. Discusión y limitaciones de los datos	18
7. Conclusiones	20
8. Referencias.....	22

1. Introducción

El presente Documento de Base Teórica sobre Algoritmos (ATBD, por sus siglas en inglés) comprende una adaptación de la metodología propuesta por el equipo de MapBiomás Agua y Glaciares de Perú.

El documento describe de manera detallada, la cadena de procesamiento de las imágenes con características correspondientes épocas húmedas o a detecciones posteriores a altas precipitaciones (conjunto de datos denominado "*wet*"), del grupo de algoritmos de detección de cobertura nival y glaciar para el territorio ecuatoriano. El objetivo del uso de imágenes con estas características "*wet*" es generar una serie temporal de mapas anuales que representen la extensión máxima de la cobertura de nieve de cada año durante el período 1985–2025, utilizando como insumo principal mosaicos de reflectividad superficial derivados de la constelación Landsat (TM, ETM+ y OLI).

Es importante señalar que este producto no debe interpretarse como un mapa de glaciares permanentes. La cobertura de nieve mapeada incluye tanto el hielo glaciar expuesto como la nieve fresca y estacional que se deposita sobre las cumbres andinas durante los períodos de mayor precipitación sólida. En las latitudes tropicales de los Andes ecuatorianos, dicha nieve estacional es un fenómeno meteorológicamente esporádico y de rápido derretimiento, por lo que su captura mediante sensores ópticos requiere un tratamiento metodológico específico, orientado a maximizar la probabilidad de detección durante los picos de acumulación.

La estrategia general del método de mapeo de nieve y glaciares se fundamenta en un enfoque de doble criterio estacional:

Criterio húmedo ("*wet*"): Documentado en este ATBD, detecta la máxima extensión de la superficie nevada, aprovechando los percentiles de reflectividad asociados a nieve fresca, nieve húmeda y hielo saturado. Incluye tanto glaciares como nieve estacional sobre afloramientos de roca de los flancos de los edificios volcánicos.

Criterio seco ("*dry*"): Procesado de manera paralela y complementaria, utiliza los percentiles de reflectividad correspondientes a condiciones de estiaje, cuando la nieve estacional se ha derretido y solo permanece expuesta la masa de hielo glaciar propiamente dicha.

La comparación espacial y temporal entre los productos húmedo y seco (*wet* y *dry*) es lo que permite, en última instancia, discriminar la cobertura nival estacional de la masa glaciar permanente, y constituye la base para la generación de mapas de glaciares para la región andina.

Por tanto, los algoritmos descritos en las secciones siguientes (clasificación espectral, análisis de mezclas espectrales, relleno temporal de vacíos, filtros espaciales, filtros de persistencia, filtros de consistencia y filtros correctivos) deben entenderse como componentes del criterio húmedo del sistema, cuyo propósito es asegurar que la señal

de la nieve máxima sea capturada de manera robusta, minimizando el ruido y los vacíos de información sin perder la coherencia espacial y temporal de la serie.

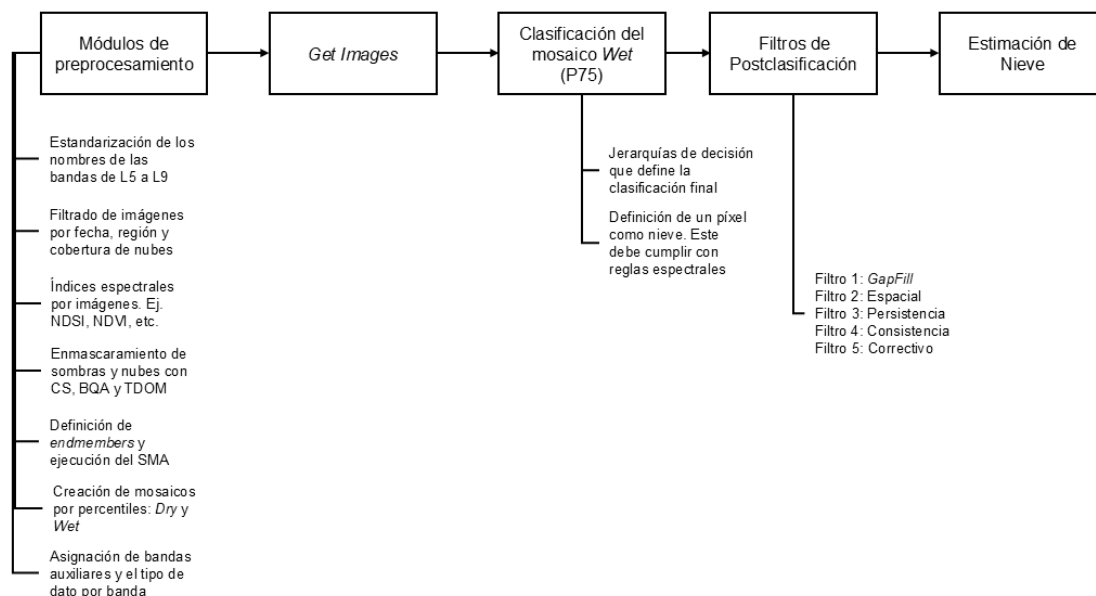


Figura 1: Diagrama de flujo metodológico para la obtención de mapas de cobertura de nieve. Fuente: MapBiomias Perú.

1.1. Alcance y uso de los datos

Dado que la cobertura nival en latitudes tropicales presenta una alta variabilidad estacional y una respuesta rápida a eventos climáticos, el uso de imágenes individuales está severamente limitado por la nubosidad persistente. Para mitigar esta limitación, el algoritmo opera sobre mosaicos compuestos anuales, calculados a partir de las medianas de reflectividad superficial. Esta estrategia permite sintetizar la señal espectral dominante del paisaje, reduciendo el ruido atmosférico residual y la contaminación por píxeles con nubes o sombras no detectadas.

Los datos de estimación de nieve dan una referencia de la extensión horizontal y las cotas altitudinales hasta donde han llegado las precipitaciones sólidas sobre los volcanes que tienen glaciares. Esta cobertura es importante para discriminar los episodios acumulados de nevadas con el glaciar propiamente dicho.

Los datos producidos por MapBiomias Agua, en sus módulos de glaciares y nieve, presentan limitaciones al detectar “hielos negros” o glaciares bajo detritos, debido a la complejidad de descomposición espectral que tiene los píxeles sobre estas áreas.

2. Área de estudio

El área de estudio (Figura 2) se definió basado en el inventario de glaciares Randolph (RGI Consortium, 2017, p. 0), con su correspondencia a toda la zona andina del Ecuador, sobre la cual se delimitaron zonas de glaciares que toman como base a cotas

500 metros por debajo de la altitud de los glaciares detectados en 1985 considerar área de clasificación.

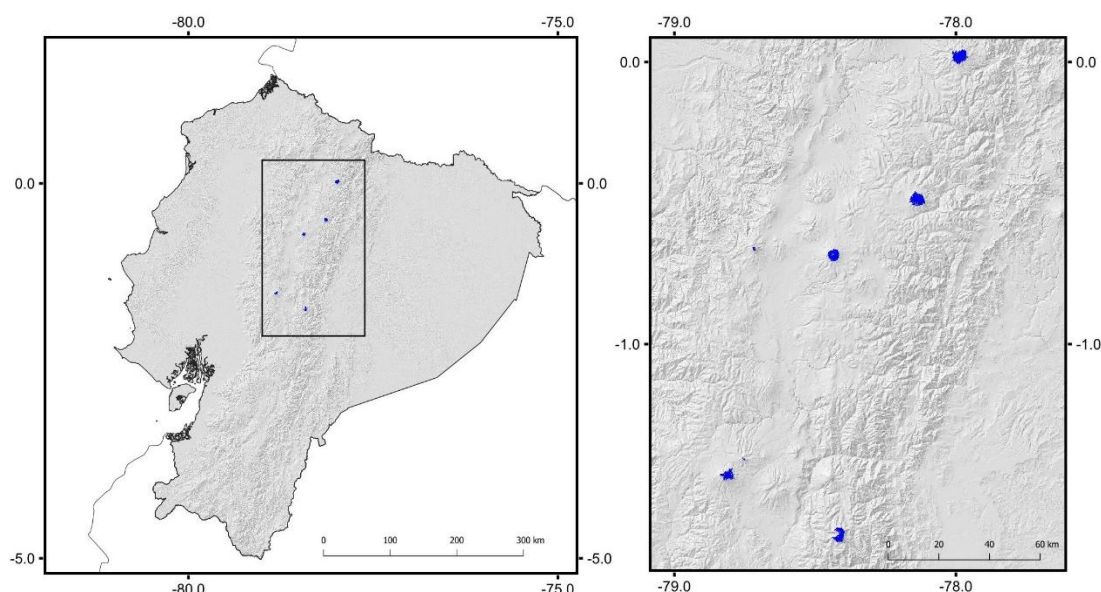


Figura 2: Área de estudio

3. Mosaicos de imágenes

La clasificación de nieve utilizó los mosaicos de imágenes Landsat generados específicamente para el mapeo de los máximos de precipitaciones sólidas. Estos mosaicos fueron contruidos a partir de los píxeles pertenecientes a los de temporada húmeda, o a las imágenes con criterios de alta humedad después de precipitaciones. Para constituir un mosaico, se usa la distribución por percentiles del análisis de píxeles de las diferentes imágenes filtradas para la región de análisis.

El análisis de píxeles responde a una distribución por percentiles, donde los píxeles pertenecientes al percentil 75, son tomados para la composición de los mosaicos de características húmedas ("wet").

El mosaico de característica húmeda captura las condiciones de un estimado máximo de cobertura nival del año y se construye seleccionando las imágenes donde el valor del NDSI es mayor o igual al percentil 75 de la distribución anual. Sobre estas imágenes filtradas se calcula la mediana píxel a píxel, generando las bandas denominadas "wet", el percentil 75 se tomó como búsqueda de un balance entre la maximización de la cobertura nival capturada y la minimización del ruido introducido por nubes producto de la temporada.

El comportamiento del percentil en la selección de imágenes opera píxel a píxel sobre la distribución temporal de valores NDSI. Para que un píxel sea incluido en el mosaico de percentil 75 como cobertura nival, requiere haber sido clasificado como nieve en

aproximadamente el 25% o más de las imágenes válidas del año, correspondiente a la posición estadística del percentil 75 en la distribución ordenada de valores.

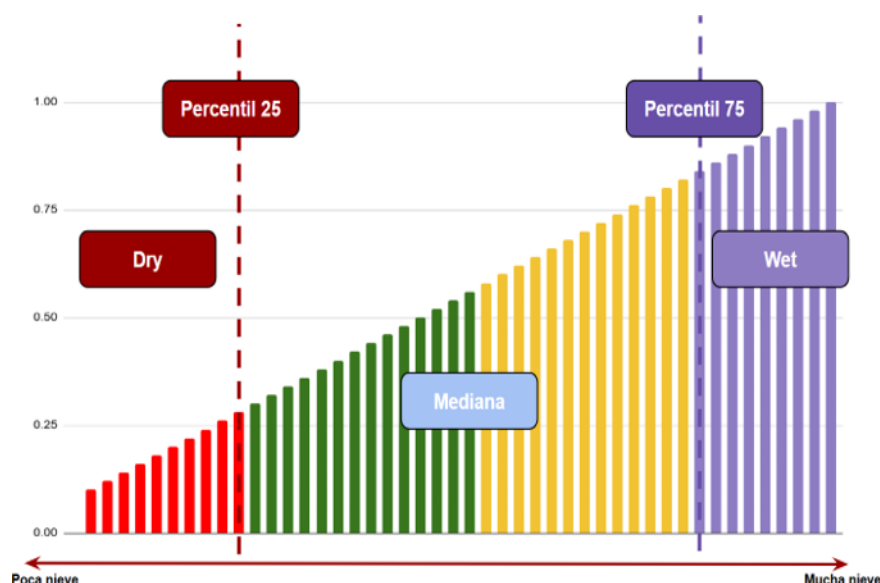


Figura 3: Construcción de los mosaicos de temporada húmeda, basada en la distribución de percentiles. Fuente: MapBiomass Perú.

4. Clasificación

Los algoritmos de esta etapa del flujo de trabajo tienen como objetivo generar mapas binarios anuales de presencia/ausencia de nieve y hielo expuesto para el territorio ecuatoriano utilizando como insumo principal la serie temporal de los satélites Landsat (TM, ETM+ y OLI).

El proceso de clasificación de nieve opera sobre el mosaico de característica húmeda (percentil 75 del NDSI de la serie anual), cuyo objetivo es capturar la máxima cobertura de nieve del año. La clasificación de los mosaicos Landsat se realizó íntegramente en la plataforma Google Earth Engine, basada en umbrales. La clasificación de la cobertura nival a partir del mosaico de característica húmeda no emplea un clasificador supervisado como Random Forest. En su lugar, utiliza exclusivamente reglas de umbrales espectrales aplicadas directamente sobre las variables del mosaico mediante operadores condicionales *where* en lenguaje de programación. Este proceso de clasificación en la metodología responde a la inestabilidad temporal de la nieve estacional, que impide construir un conjunto de píxeles de entrenamiento suficientemente estables para el período húmedo.

Sobre los mosaicos se aplica un conjunto de condiciones secuenciales donde todos los píxeles parten de una asignación inicial “sin cobertura nival” y cada regla de umbrales puede sobrescribir el resultado de la anterior. La primera condición evalúa la reflectancia en la banda infrarroja cercana del mosaico de característica húmeda, descartando como

cobertura nival aquellos píxeles que no superan el umbral mínimo establecido según el sensor.

De forma análoga, la segunda condición evalúa la reflectancia en la banda roja del mosaico de característica húmeda, aplicando umbrales diferenciados para Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 y Landsat 9, descartando igualmente los píxeles que no los alcanzan.

La identificación definitiva de cobertura nival se basa en una condición dual que debe cumplirse simultáneamente: el valor mínimo anual del NDSI, que representa la menor cobertura nival registrada para ese píxel en todo el año, debe ser mayor o igual a 100 en la escala (equivalente a NDSI real mayor o igual a 0.0), y la fracción de nieve derivada del Análisis de Mezcla Espectral (SMA, por sus siglas en inglés) debe ser mayor o igual al 20 por ciento. Los píxeles que satisfacen ambas condiciones son asignados a la de presencia nival.

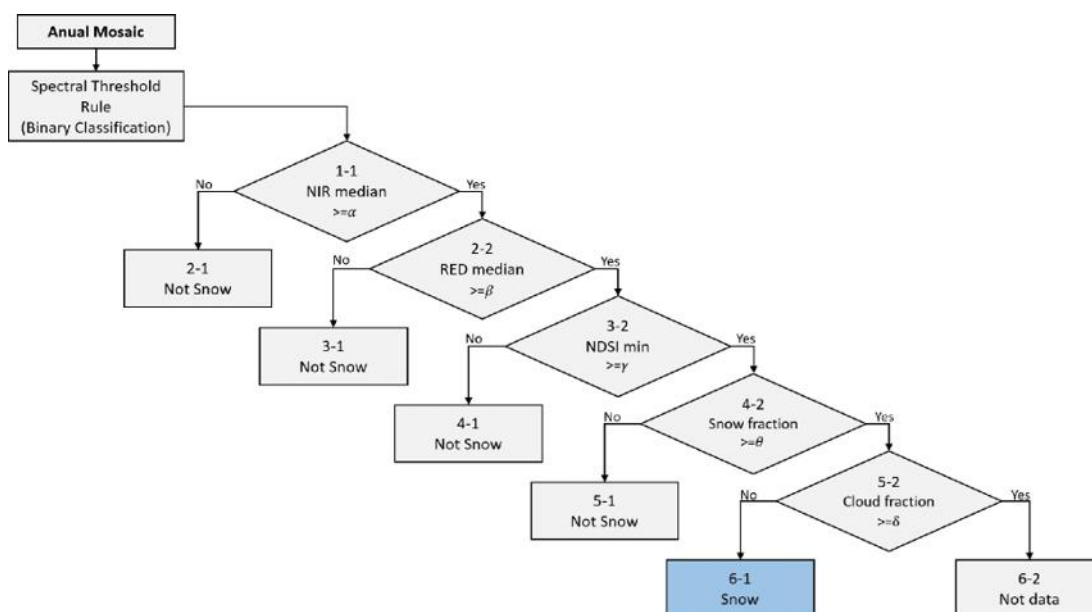


Figura 4: Árbol empírico combinado con Random Forest para clasificación de nieve.

Fuente: MapBiomás Perú.

Finalmente, como paso de control de calidad, los píxeles con contaminación residual de nubes son identificados mediante la fracción de nube derivada del SMA. Aquellos que superan el valor umbral son clasificados como “dato inválido” y descartados de la clasificación final, asegurando que únicamente píxeles con observaciones espectralmente confiables sean incluidos en el producto de cobertura nival.

En resumen, la nieve y el hielo presentan una reflectividad extremadamente alta en el espectro visible (especialmente azul y rojo) y muy baja en el infrarrojo de onda corta (SWIR). Sin embargo, la respuesta espectral exacta varía según la configuración de bandas y la calibración radiométrica de cada misión Landsat. El parámetro referente a la mediana del infrarrojo cercano actúa como un tamiz radiométrico preliminar. Si un píxel presenta una reflectividad en el infrarrojo cercano (NIR) o rojo menor a estos

umbrales, es automáticamente descartado como nieve (o etiquetado como "no-nieve"). Esto se fundamenta en que la nieve, para ser considerada como tal en un mosaico de medianas, debe mantener una alta reflectividad; valores bajos sugieren presencia de agua, vegetación vigorosa o roca oscura.

Adicionalmente se integra un Modelo Digital de Elevación (SRTM) y su derivada, la pendiente (*slope*). La inclusión de la pendiente es crítica en la dinámica de la nieve porque en pendientes muy pronunciadas (>15-20 grados), la reflectividad puede verse alterada por la geometría de iluminación (efecto de orientación de laderas).

Además, que la nieve tiende a no acumularse de forma estable en pendientes extremadamente verticales o en valles profundos sombreados, a menos que se trate de glaciares de escombros o hielo en circos glaciares.

4.1. Análisis de Mezcla Espectral (SMA)

Tras el preprocesamiento, se llama al módulo de Análisis de Mezcla Espectral (*Spectral Mixture Analysis, SMA*). Este módulo genera las fracciones *gv* (vegetación verde), *npv* (vegetación no fotosintética), *soil* (suelo), *cloud* (nube) y *snow* (nieve).

En los Andes Tropicales, un píxel de 30x30 metros de Landsat rara vez es "nieve pura". Suele ser una mezcla de hielo, roca expuesta (escombros), glaciares con detritos y parches de nieve. El análisis de mezclas espectrales permite modelar el píxel como una combinación lineal de firmas espectrales puras (*endmembers*). La fracción *snow* (0-100%) indica la proporción del píxel cubierta por nieve, siendo una métrica mucho más robusta para estudios de retroceso glaciar que una simple clasificación dura.

4.2. Lógica de Clasificación Espectral (Jerarquía de Umbrales)

La clasificación final se construye mediante una cascada de condiciones lógicas (.where).

De entrada, se asume que todo es "No-Nieve", se mantiene en "No-Nieve" si la reflectividad NIR está por debajo del umbral. La nieve en el espectro NIR (*near infra-red*), si bien no es tan brillante como en el visible, sigue siendo altamente reflectante. Un píxel con NIR bajo podría ser agua líquida (donde el NIR se absorbe totalmente) o vegetación densa.

Adicionalmente, se utiliza el Índice Diferencial de Nieve Normalizado (NDSI) en su variante mínima. Se calcula como $(\text{Green} - \text{SWIR1}) / (\text{Green} + \text{SWIR1})$. Un valor de NDSI mayor o igual a 100 (probablemente escalado) indica una firma espectral clásica de nieve: alta reflectancia en verde y alta absorción en el SWIR.

Respecto a la fracción de nieve (fracción *snow* del SMA): Debe ser mayor o igual a 20%. Esto significa que al menos una quinta parte del píxel debe estar compuesta por el *endmember* de nieve/hielo.

En el tema de la pendiente, debe ser mayor o igual a 0. Esta es una condición lógica para descartar píxeles *NoData* en el MDE, asegurando que la evaluación solo ocurra en zonas con un terreno definido.

En resumen, un píxel es clasificado como "Nieve/Hielo" si cumple estrictamente con el índice espectral tradicional y presenta una proporción mínima de nieve en el modelo físico de mezcla. Esta doble validación (índice + fracción) minimiza la confusión con nubes, que también son blancas en el visible pero no suelen tener la misma firma de absorción en el SWIR ni la misma fracción espectral.

En otras palabras, si la fracción de nube calculada por el modelo SMA supera el umbral definido, el píxel es reclasificado a la clase "Nube" y enmascarado. Esto es vital en zonas tropicales donde las nubes son el principal contaminante de las series de nieve.

4.3. Variables de clasificación

El algoritmo de clasificación utiliza diferentes variables de clasificación, organizadas en tres categorías principales que capturan diferentes aspectos de la firma espectral de las superficies nivales.

La primera categoría comprende seis bandas espectrales en sus valores medianos de característica húmeda (percentil 75 del NDSI).

La segunda categoría incluye el uso de índices espectrales, destacando las variaciones temporales del NDSI (*Normalized Difference Snow Index*) calculado tres momentos distintos.

- *Ndsi_median_dry*: NDSI mediano de época o característica seca (percentil 25), que captura la condición espectral del glaciar permanente sin nieve estacional, o en su defecto, mínima presencia nival.
- *Ndsi_median_wet*: NDSI mediano de época o característica húmeda (percentil 75), que refleja la máxima cobertura nival de periodo húmedo.
- *Ndsi_min*: Valor mínimo del NDSI en todo el año. Umbral restrictivo y relevante para la clasificación.

En la clasificación de cobertura nival, no se utiliza la pendiente topográfica como variable discriminante directa, dado que la distribución espacial de la nieve estacional puede diferir del patrón morfológico del glaciar permanente. La nieve puede acumularse en superficies de baja pendiente, lo que haría que un umbral de pendiente excluyera zonas nevadas válidas.

Finalmente, se incluyen las variables derivadas del análisis de mezcla espectral (*Spectral Mixture Analysis* - SMA). El SMA es una técnica de procesamiento que

descompone la reflectancia de cada píxel en fracciones de diferentes materiales puros, proporcionando información cuantitativa sobre la composición subpíxel de cada área. La fracción de nieve resulta particularmente relevante para distinguir superficies nivales de otros tipos de cobertura en ambientes de alta montaña, mientras que las fracciones de nube y sombra contribuyen a identificar y filtrar píxeles con observaciones comprometidas.

Tabla 1: Bandas utilizadas para la clasificación.

Tipo	Nombre	Fórmula	Descripción	Reductor ¹				
				Median	Median dry	Median wet	Mín	Máx
Banda	blue	B1 (L5 y L7); B2 (L8)	Espectro visible azul			X		
	green	B2 (L5 y L7); B3 (L8)	Espectro visible verde			X		
	red	B3 (L5 y L7); B4 (L8)	Espectro visible rojo			X		
	nir	B4 (L5 y L7); B5 (L8)	Infrarrojo cercano			X		
	swir1	B5 (L5 y L7); B6 (L8)	Infrarrojo de onda corta 1			X		
	swir2	B7 (L5); B8 (L7); B7(L8)	Infrarrojo de onda corta 2			X		

Tabla 2: Índices espectrales utilizadas para la clasificación

Tipo	Nombre	Fórmula	Descripción	Reductor ¹				
				Median	Median dry	Median Wet	Mín	Máx
Índices	NDSI	$\frac{(green - SWIR)}{(green + SWIR)}$	Índice Diferencial de Nieve Normalizado			X		

Tabla 3: SMA utilizadas para la clasificación

Tipo	Nombre	Fórmula	Descripción	Reductor ¹				
				Median	Median dry	Median Wet	Mín	Má x
Fraccion es	Cloud fraction	SMA	Fracción de nube			X		
	Snow fraction	SMA	Fracción de nieve			X		

5. Post-Clasificación

Dada la naturaleza del modelo de clasificación y el procesamiento de una serie temporal extensa, se implementó una cadena de filtros post clasificación.

5.1. Llenado de vacíos de información (Gap Fill)

La secuencia de filtros de post procesamiento se inicia con el *Gap Fill*, cuyo objetivo es corregir los vacíos de información presentes en la serie temporal de clasificación de cobertura nival. Este proceso resulta fundamental en el análisis de series temporales de teledetección, ya que aborda uno de los desafíos más recurrentes en la disciplina: la existencia de píxeles sin dato o con clasificación comprometida como consecuencia de la cobertura nubosa, las sombras topográficas o las limitaciones propias de la captura satelital.

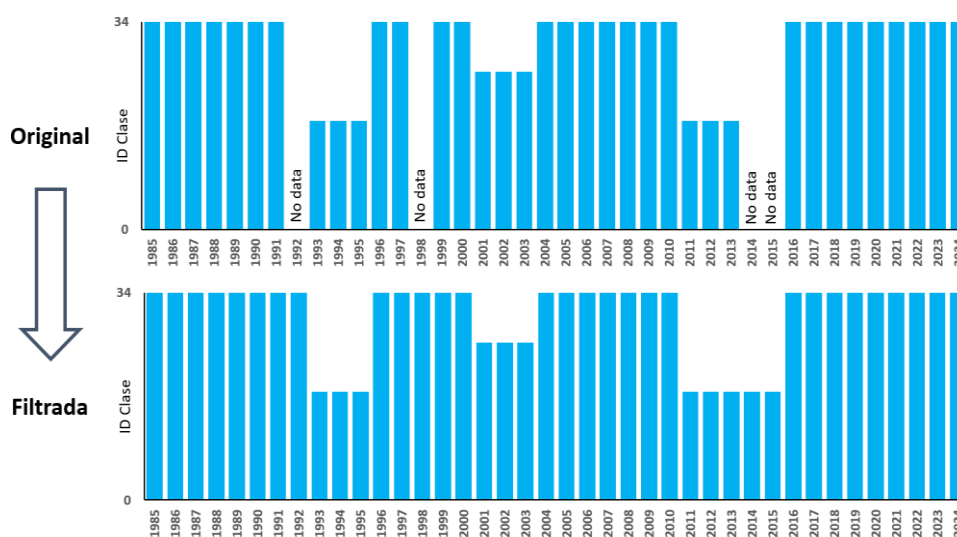


Figura 5: Filtro Gap Fill

El algoritmo implementa un enfoque bidireccional que opera en dos fases complementarias para garantizar la completitud de la serie temporal. Durante la primera fase, el algoritmo recorre la serie desde el año inicial hasta el año final. Cada vez que encuentra un píxel sin dato en un año determinado, le asigna el valor clasificado del año

inmediatamente anterior, propagando la información hacia adelante en el tiempo. La segunda fase ejecuta el recorrido inverso, desde el año final hacia el inicial, y rellena los píxeles que permanecieron sin dato tras la primera fase asignándoles el valor del año posterior más cercano con información válida. Esta estrategia bidireccional garantiza que los vacíos solo persistan en aquellos píxeles que carecen de observaciones válidas en la totalidad de la serie temporal, minimizando las brechas de información mediante imputación temporal del valor clasificado más cercano, sin generar nuevas observaciones espectrales.

A diferencia del relleno unidireccional, el enfoque bidireccional permite capturar mejor los cambios de estado en la cobertura. Si un píxel pasa de "no-nieve" a "nieve" en un año específico, el relleno hacia atrás y hacia adelante desde ese punto de cambio preservará la transición, evitando la propagación errónea de un estado más allá de su período real.

Es importante recordar que la detección de nieve mediante sensores ópticos pasivos (Landsat) está inherentemente limitada por la presencia de nubes, sombras topográficas y fallos en la adquisición de datos. En Los Andes tropicales, donde la nubosidad es persistente durante gran parte del año, pueden existir años sin datos válidos para píxeles específicos o incluso regiones completas.

El método expresado en este algoritmo asume que la cobertura de nieve/hielo en zonas glaciares tiene una alta inercia temporal a escala anual, especialmente en Los Andes donde los glaciares responden lentamente a las variaciones climáticas interanuales. Esta hipótesis aplica exclusivamente al componente glaciar del producto, no a la nieve estacional, que es altamente variable.

El código o algoritmo reorganiza las clasificaciones anuales individuales en una imagen multibanda donde cada banda representa un año específico, esta estructura permite aplicar operaciones temporales de manera eficiente.

Respecto a las limitaciones metodológicas, el *gap fill* introduce cierta incertidumbre temporal en los años rellenados. Los cambios de cobertura detectados en años con datos reales son confiables, mientras que los años rellenados representan una estimación conservadora basada en la persistencia temporal. Esta limitación debe considerarse al interpretar tasas de cambio interanual.

Los productos con *gap fill* son ideales para análisis de tendencias a largo plazo (>5 años) y para la visualización continua de series temporales. Para análisis de cambios interanuales precisos, se recomienda consultar los productos sin *gap fill* donde los vacíos se mantienen explícitamente como "sin datos".

5.2. Filtro espacial

El filtro espacial trabaja exclusivamente con la dimensión espacial de las imágenes, analizando la coherencia y conectividad de los píxeles clasificados en cada año de estudio individual.

Este filtro aborda un problema común en la clasificación de imágenes satelitales, siendo la presencia de píxeles aislados o pequeños grupos de píxeles que son clasificados de manera diferente a su entorno inmediato. Estos píxeles aislados frecuentemente representan errores de clasificación más que características reales del terreno.

El proceso de filtro espacial se implementa en dos etapas principales, esto para cada año de la serie temporal.

Durante la primera etapa el filtro utiliza la función “*connectedPixelCount*” para calcular, cuantos píxeles glaciares están conectados entre sí. La segunda etapa del filtro consiste en agrupar píxeles, el filtro marca todos los grupos que tienen menos de 9 píxeles conectados. Adicionalmente, el filtro complementario en el algoritmo, de moda focal, reemplaza los píxeles aislados por el valor de clase predominante en su vecindad local. Los grupos pequeños de píxeles aislados son candidatos a ser errores.

Para el mapeo de nieve en los Andes, donde la superficie nival puede tener formas complejas debido a la topografía montañosa, el filtro espacial es valioso, ya que ayuda a eliminar clasificaciones erróneas causadas por sombras topográficas y nubes pequeñas no detectadas.

Toda esta estrategia se fundamenta en el principio de autocorrelación espacial en geografía: los objetos geográficos reales (como glaciares y campos de nieve) tienden a ser espacialmente coherentes y compactos, mientras que el ruido de clasificación es espacialmente aleatorio e incoherente.

Ya en la parte operativa, se utiliza una conectividad de 8 vecinos (ventana de 3x3 píxeles) para determinar si los píxeles están conectados espacialmente.

En superficies glaciares, los píxeles de hielo/nieve forman parches continuos. La conectividad de 8 vecinos (que incluye las diagonales) es más apropiada que la de 4 vecinos porque las superficies de hielo no siguen necesariamente orientaciones cardinales y pueden extenderse diagonalmente a través de la cuadrícula de píxeles. Esto es particularmente relevante en glaciares de montaña con geometrías irregulares.

Cuando se habla de conectividad espacial, es necesario definir el umbral mínimo de tamaño de grupo conectado. Los grupos de píxeles con 9 o menos píxeles conectados se consideran ruido potencial y son elegibles para ser eliminados.

A una resolución de 30 metros, 9 píxeles conectados representan un área de aproximadamente 8,100 m² (0.81 hectáreas). Los glaciares y campos de nieve permanentes en los Andes ecuatoriales raramente existen como parches menores a 1 hectárea, especialmente en las zonas de acumulación.

El algoritmo implementa un bucle temporal que aplica el filtrado espacial independientemente para cada año de la serie temporal (1985-2025). Las condiciones de iluminación, cobertura nubosa y estado del glaciar varían entre años. Aplicar el filtro espacial de forma independiente permite:

- Adaptarse a las condiciones específicas de cada año (por ejemplo, años con más nubosidad pueden requerir filtrado más agresivo).
- Preservar cambios temporales reales en la cobertura glaciar y nival. Si se aplicara un filtro espaciotemporal combinado, se podrían suavizar artificialmente las transiciones entre años donde ocurren cambios reales.

En este y otros filtros, el código incluye capas de visualización para comparar la clasificación original con la filtrada espacialmente. La validación visual es una herramienta crítica para calibrar el parámetro *min_connect_pixel*. Un valor demasiado bajo dejaría ruido residual; un valor demasiado alto eliminaría parches legítimos de nieve/hielo.

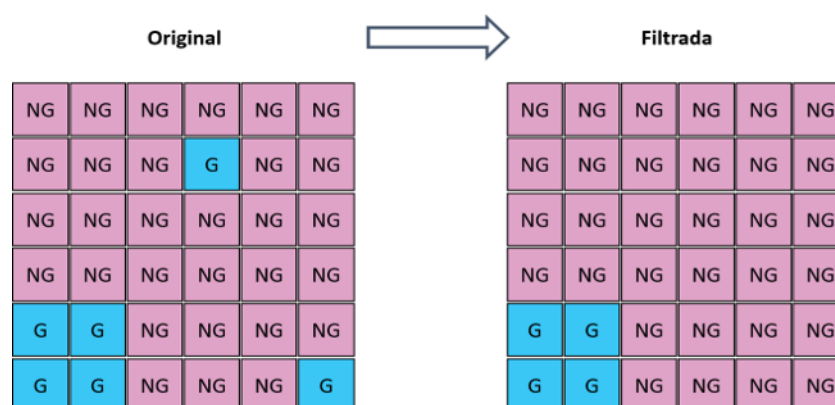


Figura 6: Efecto del filtro espacial

5.3. Filtro de persistencia

Las clasificaciones anuales generadas en las secciones anteriores identifican la presencia de nieve/hielo en cada año individual. Sin embargo, en los Andes tropicales, existe una distinción crítica entre:

- Nieve estacional o efímera: Nevadas temporales que aparecen durante la estación húmeda y desaparecen en la estación seca. Estos no constituyen glaciares permanentes.
- Cobertura glaciar permanente: Masas de hielo que persisten durante múltiples años, independientemente de las variaciones estacionales.

El filtro de persistencia evalúa la frecuencia temporal con la que cada píxel es clasificado como nieve/hielo a lo largo de toda la serie temporal. Esta métrica permite discriminar entre:

- Píxeles persistentes: Aquellos que son consistentemente clasificados como nieve en una proporción significativa de años, indicando cobertura glaciar estable.
- Píxeles esporádicos: Aquellos que aparecen como nieve solo ocasionalmente, sugiriendo nieve estacional, errores de clasificación o procesos transitorios.

Los glaciares en los Andes tropicales responden a las condiciones climáticas con una inercia temporal característica. En un escenario ideal, un glaciar saludable mantiene su cobertura de hielo año tras año, incluso durante eventos climáticos adversos (años El Niño, por ejemplo). Por el contrario, las nevadas estacionales son altamente sensibles a la variabilidad climática interanual y desaparecen en años secos.

El uso de un umbral de 35% responde a que el Ecuador presenta alta nubosidad durante todo el año. Incluso con los filtros de *gap fill* y espaciales aplicados previamente, algunos años pueden tener clasificaciones erróneas debido a contaminación atmosférica residual.

Los glaciares ecuatorianos están en retroceso acelerado. Muchos glaciares pequeños han desaparecido durante el período de estudio (1985-2025). Un umbral del 35% captura incluso glaciares que existieron solo en los primeros años de la serie, mientras que excluye nieve estacional que aparece esporádicamente.

El algoritmo itera sobre todas las bandas anuales y acumula un contador (*snow_count*) que registra cuántos años cada píxel fue clasificado como nieve.

No todos los píxeles tienen datos para todos los años. Después del *gap fill* y filtrado espacial, algunos píxeles pueden quedar enmascarados (sin datos) en años específicos. El denominador debe reflejar los años con datos reales para cada píxel, no el total teórico de años. Esto evita sesgos en píxeles con series temporales incompletas.

Respecto a las limitaciones se puede considerar que el valor del 35% es un análisis empírico. Umbrales más altos (>50%) excluyen glaciares en retroceso que existieron solo parcialmente durante el período; umbrales más bajos (<20%) incluyen nieve estacional persistente.

El filtro asume que el período de estudio (1985-2025) es suficientemente largo para capturar la variabilidad climática. Para glaciares muy dinámicos (retroceso rápido o colapso), el filtro podría no reflejar adecuadamente cambios recientes.

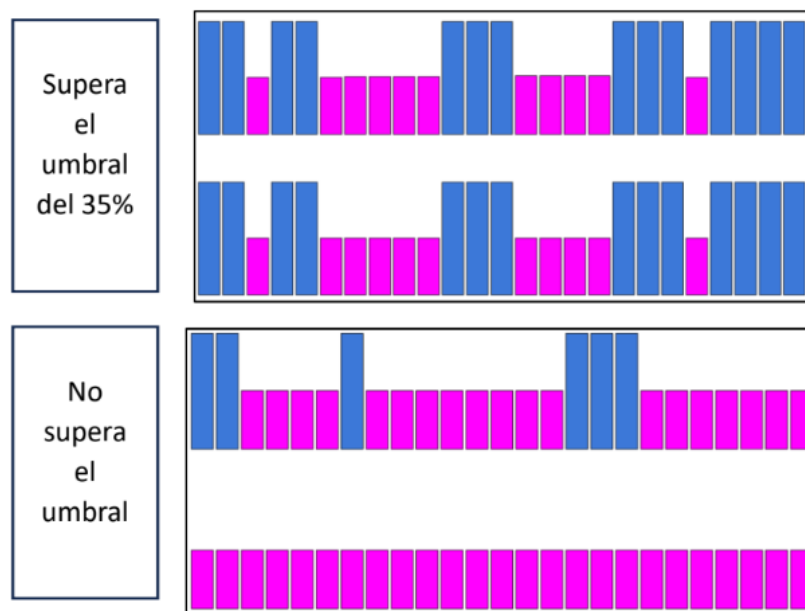


Figura 7: Filtro de persistencia

5.4. Filtro de consistencia

Después de aplicar el filtro de persistencia, algunos píxeles que representan glaciares estables y saludables pueden presentar vacíos temporales en su serie de clasificación. Estos vacíos ocurren cuando:

- Fallos en la clasificación espectral: Años con condiciones atmosféricas particularmente adversas (nubes cirros delgadas, aerosoles volcánicos, sombras topográficas extremas) que el preprocesamiento no logró eliminar completamente.
- Limitaciones del gap fill temporal: El relleno bidireccional implementado en la Sección 5.1. puede no capturar adecuadamente glaciares con geometrías complejas o en zonas de transición.
- Variabilidad en la reflectividad: Cambios en la reflectividad de la nieve debido a eventos de fusión intensa, acumulación de polvo volcánico, o presencia de crioconita que alteran temporalmente la firma espectral.

Como una solución a estas condiciones, el filtro de consistencia identifica píxeles que son clasificados como nieve en una proporción muy alta de años ($\geq 96\%$) y asume que estos píxeles representan glaciares inequívocamente estables. Para estos píxeles, se fuerza la clasificación como nieve en todos los años de la serie temporal, llenando los vacíos ocasionales que puedan existir.

Se puede decir que la diferencia fundamental con el filtro de persistencia radica en que éste elimina nieve esporádica en píxeles no persistentes y cuyo objetivo es distinguir glaciares de nieve estacional (persistencia $\geq 35\%$); mientras que el filtro de consistencia

rellena vacíos en píxeles consistentes con el fin de garantizar continuidad en glaciares estables (consistencia $\geq 96\%$).

Entonces, el filtro de persistencia actúa como un filtro pasa-bajo (elimina ruido), mientras que el filtro de consistencia actúa como un filtro pasa-alto (refuerza señal). Juntos, proporcionan una serie temporal más robusta y continua.

5.5. Filtro correctivo

A pesar de los filtros anteriores (gap fill, espacial, persistencia y consistencia), pueden existir años anómalos donde la clasificación de nieve/hielo falla sistemáticamente en grandes áreas que deberían estar clasificadas como glaciar. Estos años anómalos pueden ser causados por:

- Eventos atmosféricos extremos: Erupciones volcánicas que depositan ceniza sobre los glaciares, alterando drásticamente su reflectividad y oscureciéndolos temporalmente.
- Condiciones climáticas excepcionales: Años con nubosidad persistente que impiden la adquisición de imágenes Landsat sin nubes en zonas glaciares.
- Fallos en el preprocesamiento: Errores en la generación de mosaicos anuales que afectan regiones completas.

El filtro utiliza como referencia una capa auxiliar de píxeles persistentes al 90% de la serie temporal, que representa el núcleo de cobertura glaciar/nival con presencia en al menos 37 de los 41 años analizados (90% de 41 $\approx$ 37). Para cada año y región se evalúa la relación entre los píxeles de la capa de persistencia al 90% y los píxeles clasificados como cobertura nival en ese año dentro de la zona de persistencia. Si los píxeles de la capa de referencia al 90% superan en más del 30% a los píxeles clasificados en el año evaluado, dicho año es declarado como vacío.

Esta condición es válida porque los píxeles de la capa al 90% deberían estar contenidos dentro de la clasificación anual al 35%. Cuando esta relación de contención se invierte, es decir, cuando el núcleo permanente supera en cantidad a la clasificación anual, es indicativo de ausencia de mosaico válido o clasificación deficiente para ese año.

Para cada año declarado vacío, el algoritmo busca los años válidos más próximos anterior y posterior en la serie temporal. La corrección se aplica mediante la intersección (operación AND lógica) de las clasificaciones de ambos años vecinos válidos: únicamente los píxeles identificados como cobertura nival en ambos años son utilizados para rellenar el año vacío. Este criterio conservador garantiza que solo se rellene la mínima cobertura glaciar/nival verificada por continuidad temporal, evitando la sobreestimación.

6. Discusión y limitaciones de los datos

La generación de un producto de nieve/hielo para Ecuador requiere una reflexión profunda sobre la naturaleza misma del fenómeno que se pretende mapear. A diferencia de las regiones polares o las montañas de latitudes medias, donde la capa de nieve estacional puede persistir durante meses, en los Andes ecuatoriales la nieve es un fenómeno meteorológicamente esporádico y termodinámicamente inestable.

Las nevadas en las cumbres ecuatorianas ocurren bajo condiciones atmosféricas muy específicas, típicamente asociadas a la intrusión de masas de aire frío provenientes del sur del continente o a eventos convectivos extremos en la Amazonía. Sin embargo, una vez depositada, la nieve en estas latitudes está sometida a un régimen térmico implacable, especialmente en el día. Dada la posición ecuatorial, la radiación solar incidente es alta durante todo el año, y la isoterma de 0 °C se encuentra generalmente por encima de los 4,800–5,000 msnm., lo que implica que la nieve fresca rara vez permanece más de una hora o días. Este derretimiento rápido no es una anomalía, sino la norma del sistema climático ecuatorial.

El producto descrito en este ATBD, basado en mosaicos anuales de medianas de reflectividad, está diseñado para capturar, tanto eventos efímeros de nevadas como episodios más prolongados. Los filtros de persistencia al 35% y de consistencia al 96% actúan precisamente para eliminar la señal de las nevadas esporádicas muy débiles y conservar únicamente la cobertura de nieve que perdura más en el tiempo. Por lo tanto, los mapas resultantes deben interpretarse como una representación de la cobertura de nieve en proceso de transformación y no como un inventario de eventos de precipitación nival.

Esta distinción es crucial para los usuarios finales (hidrólogos, glaciólogos y tomadores de decisiones). Si se busca estudiar la frecuencia de nevadas o los aportes hídricos inmediatos de la nieve fresca al derretimiento diario, este producto es un buen punto de partida, pero se deben explorar otros insumos satelitales de mejor resolución espacial y temporal. Sin embargo, si el objetivo es cuantificar el retroceso de las masas de hielo a largo plazo, la detección de la nieve estacional es una ventaja metodológica, ya que evita que falsos positivos temporales inflen artificialmente las estimaciones de área glaciaria.

Es importante recordar un aspecto que condiciona la interpretación de este producto y es la frecuencia de revisita y la resolución espacial de la constelación Landsat. Aunque la resolución de 30 metros es excelente para mapear glaciares individuales, la capacidad de Landsat para observar la superficie terrestre está limitada por dos factores que confluyen en los Andes tropicales:

- Los ecosistemas de páramo y las cumbres andinas ecuatorianas están sujetos a una cobertura nubosa convectiva casi permanente, especialmente durante la tarde. La metodología mitiga esto mediante el uso de mosaicos de medianas y un filtro de nubosidad interna, pero no puede eliminar por completo la contaminación por nubes cirros delgadas o neblina de alta montaña.

- Landsat 8/9 tiene una resolución temporal de 16 días (8 días en combinación). Una nevada que cae sobre un glaciar y se derrite en 3 días solo será captada por Landsat si, por casualidad, el satélite cruza la zona durante ese breve período. Si la nevada ocurre en un día nublado o entre dos pasadas del satélite, no quedará registrada en los datos.

Esta limitación refuerza la conclusión del punto anterior. El producto no debe utilizarse para análisis de dinámica estacional de nieve fresca ni para estudios de eventos de precipitación sólida. La probabilidad de que la constelación Landsat capture la nieve efímera de un evento específico es baja, y el procesamiento posterior (medianas + filtros de persistencia) está explícitamente diseñado para suprimir cualquier señal que logre colarse.

Además, esta limitación introduce una incertidumbre residual en los píxeles de transición. En años donde un glaciar está cubierto de nieve fresca justo cuando el satélite pasa, la reflectividad puede aumentar temporalmente, haciendo que un píxel de hielo en retroceso (clasificado como no-nieve en otros años) aparezca como nieve ese año. Los filtros de consistencia y correctivo reducen este efecto, pero no lo eliminan por completo.

A pesar de estas limitaciones, y en gran medida gracias a cómo el equipo técnico ha abordado explícitamente en la cadena de procesamiento, el producto de nieve/hielo generado por MapBiomás Agua constituye una herramienta de alto valor científico para el monitoreo del cambio climático en los Andes.

Se considera que la disponibilidad de los datos es importante porque el retroceso glaciar es uno de los indicadores más sensibles e inequívocos del calentamiento global. Los glaciares ecuatorianos, en particular, son centinelas climáticos: su pérdida de masa es rápida, cuantificable y tiene consecuencias directas para la disponibilidad de agua en los páramos y las ciudades. Una serie temporal consistente de 41 años (1985–2025), generada con una metodología replicable y transparente, permite cuantificar con precisión cuánto hielo se ha perdido y a qué ritmo, discriminando primero la nieve estacional.

Adicionalmente, los datos son importantes porque la continuidad espacial y temporal que se logra mediante los filtros de *gap fill*, persistencia, consistencia y correctivo es difícil de obtener con otros productos globales (como MODIS o VIIRS), que sacrifican resolución espacial por temporal. Este producto llena un vacío de datos de escala fina para una región donde los glaciares son pequeños y requieren los 30 metros de Landsat para ser mapeados con precisión.

Finalmente, es esencial que los usuarios interpreten este producto como una máscara de cobertura de hielo y nieve máxima por año, no como un registro de precipitación. Las tendencias de área nival derivadas de estos mapas son robustas y comparables entre años; sin embargo, las fluctuaciones interanuales menores (por ejemplo, un aumento aparente de nieve en un año húmedo) deben analizarse con cautela. Como se discutió, esas variaciones pueden reflejar la mayor o menor probabilidad de que el satélite capturara nieve fresca, más que cambios reales en la masa de hielo subyacente.

La cadena de procesamiento implementada reconoce explícitamente las particularidades climáticas y logísticas del monitoreo de nieve en Ecuador. Al diseñar los filtros para eliminar la señal efímera y reforzar la persistente, y al documentar las limitaciones inherentes a Landsat, el producto final ofrece una visión conservadora pero confiable de la cobertura nival, adecuada para los estudios de largo plazo que la actual crisis climática demanda.

7. Conclusiones

Al referirse a la estrategia de clasificación espectral y umbrales de reflectividad, la implementación de umbrales de reflectividad específicos por sensor demostró ser un mecanismo eficaz para la identificación preliminar de nieve y hielo en el contexto de los Andes ecuatorianos. La parametrización diferenciada entre Landsat 5/7 y Landsat 8/9 permitió mitigar las discrepancias radiométricas propias de cada plataforma, asegurando una coherencia temporal en la serie 1985–2025. La integración del Análisis de Mezclas Espectrales (SMA) como complemento a los umbrales espectrales añadió una dimensión física a la clasificación, permitiendo discriminar coberturas mixtas que los índices tradicionales tienden a omitir. Los resultados obtenidos sugieren que la combinación de lógica de umbrales con fracciones de mezcla incrementa la sensibilidad del clasificador en zonas de transición glaciar-roca y reduce la incidencia de falsos positivos asociados a nubes o superficies altamente reflectantes.

En lo referente a la diferenciación de coberturas mediante percentiles de persistencia, la aplicación de umbrales de persistencia temporal (35%) y consistencia (96%) sobre la serie multianual permitió establecer una distinción metodológica clara entre la cobertura glaciar permanente y la nieve estacional efímera. El umbral de persistencia del 35% actuó como un filtro discriminador que preservó los glaciares con variabilidad interanual moderada, mientras que el umbral del 96% reforzó la continuidad de los núcleos glaciares más estables, corrigiendo omisiones en años con condiciones atmosféricas adversas. Adicionalmente, la generación de una capa de referencia al percentil 90% (P90) proporcionó una base robusta para la detección de años vacíos, permitiendo cuantificar desviaciones sistemáticas en la clasificación anual. Este enfoque escalonado de percentiles demostró ser particularmente apropiado para glaciares tropicales, donde la alta nubosidad y la rápida respuesta climática exigen criterios flexibles pero fundamentados glaciológicamente.

Respecto a la eficacia de los filtros temporales y espaciales en la cadena de procesamiento, la integración secuencial de filtros espaciales (conectividad y moda focal), temporales (*gap fill* bidireccional) y correctivos (interpolación desde años vecinos) demostró ser esencial para la generación de un producto final científicamente consistente. El filtrado espacial eliminó eficazmente el ruido sal-y-pimienta característico de las clasificaciones basadas en umbrales, sin comprometer la integridad de los parches glaciares mayores a una hectárea. Por su parte, el filtro correctivo basado en la referencia P90 permitió identificar y reparar años con déficits sistemáticos de clasificación, evitando la propagación de vacíos artificiales en la serie temporal. La exportación con pirámides basadas en la moda estadística garantizó la preservación de

la clase dominante en los procesos de visualización y agregación espacial. En conjunto, la cadena de procesamiento fue diseñada para manejar las limitaciones inherentes a la teledetección óptica en regiones de alta montaña tropical, proporcionando una base metodológica replicable para el monitoreo multitemporal de glaciares en otros ámbitos andinos.

8. Referencias

- Bomshoms Calvelo, M., Quispe Gutiérrez, N., & Quispe Vega, K. (2018). Estudio de la frecuencia de nevadas en el Perú. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., & Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312(5781), 1755-1756.
- Brown, R. D., & Robinson, D. A. (2011). Northern Hemisphere Spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty. *The Cryosphere*, 5(1), 219–229.
- Dietz, A. J., Kuenzer, C., Gessner, U., & Dech, S. (2012). Remote sensing of snow – A review of available methods. *International Journal of Remote Sensing*, 33(13), 4094–4134.
- Gascoin, S., Grizonnet, M., Bouchet, M., Salgues, G., & Hagolle, O. (2019). Theia Snow collection: High-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*, 11(2), 493–514.
- Lamantia, K. A., Larocca, L. J., Thompson, L. G., & Mark, B. G. (2024). El Niño enhances snow-line rise and ice loss on the Quelccaya Ice Cap, Peru. *The Cryosphere*, 18(10), 4633-4644.
- Luo, Jianfeng, Dong, Chunyu, Lin, Kairong, Chen, Xiaohong, Zhao, Liqiang, & Menzel, Lucas. (2022). Mapping forest snow cover using optical remote sensing, machine learning, and time-lapse photography. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113017>
- Romero, C. E., Saavedra, F. A., & Celis-Plá, P. S. M. (2026). Remote sensing methods for snowline dynamics detection in the Andes: a critical review. *EGUsphere*, 2026, 1-43.
- SENAMHI. (2018). Estudio de la frecuencia de nevadas en el Perú. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Schaefli, B. (2015). Projecting hydropower production under future climates: a guide for decision-makers and modelers based on a review of published studies. *WIREs Water*, 2(4), 311–340.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., ... & Sicart, J. E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-science reviews*, 176, 195-213.