

POSGRADOS

Maestría en
**RECURSOS HÍDRICOS con mención en gestión e
ingeniería de agua potable y saneamiento**

RPC-SE-03-NO.041-2020

Opción de Titulación:

Artículo Científico

Tema:

Análisis de la variación del espejo de agua de la laguna de Colta y los sistemas lacustres de Atillo y Ozogoché en la Provincia de Chimborazo; bajo los efectos del cambio climático, empleando teledetección.

Autor(a)

Sandra Beatríz Viñan Pilamunga 1

Director:

Charles Jim Cachipundo Ulcuango

QUITO -ECUADOR

2025

Autor(a):



Sandra Beatriz Viñan Pilamunga.

Profesión.

Candidata a Magíster en Recursos Hídricos con Mención en Gestión e Ingeniería de Agua Potable y Saneamiento por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito.

svinan@est.ups.edu.ec.

Dirigido por:



Charles Jim Cachipuendo Ulcuango

Ingeniero Agrónomo

Diplomado Superior en Evaluación de la Educación Superior

Magíster en Desarrollo Local con Mención en Formulación y

Evaluación de Proyectos de Desarrollo Endógeno, DoutorEm

Ciencias Programa Engeharia de Sistemas Agrícolas

ccachipuendo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2022 © Universidad Politécnica Salesiana.

Quito – ECUADOR – SUDAMÉRICA

Nombres y apellidos.

Medios de comunicación tradicionales y alternativos: "no "

Análisis de la variación del espejo de agua de la laguna de Colta y los sistemas lacustres de Atillo y Ozogоче en la Provincia de Chimborazo; bajo los efectos del cambio climático, empleando teledetección

Analysis of changes in the water surface area of Colta Lagoon and the Atillo and Ozogоче lake systems in Chimborazo Province under the effects of climate change, using remote sensing.

RESUMEN

Este estudio examina la fluctuación del espejo de agua en las lagunas de Atillo y Ozogоче, así como en la de Colta, situadas en la provincia ecuatoriana de Chimborazo, utilizando métodos de teledetección para observar los impactos del cambio climático. El objetivo principal fue determinar las variaciones espaciales y temporales de los espejos de agua entre 1991 y 2024, relacionándolas con las tendencias climáticas del periodo. La metodología se basó en un enfoque descriptivo y cuantitativo, que empleaba el análisis multitemporal de imágenes Landsat 5, 8 y 9 en nivel L2SP. Estas imágenes fueron procesadas utilizando ArcGIS Pro 3.1 y R-Studio. Se incorporaron series climáticas de temperatura, precipitación y radiación solar obtenidas del modelo MERRA-2 y se utilizó el índice MNDWI para definir la extensión de agua. Los sistemas lacustres se escogieron mediante muestreo deliberado debido a su importancia para el medioambiente. Los resultados revelan que el espejo de agua ha disminuido en los tres sistemas estudiados. En el caso de la laguna de Colta, se observó una disminución cercana al 15 % de su superficie; en cambio, las reducciones en Atillo y Ozogоче fueron menores, del 6 % y 4 %, respectivamente. Estos cambios están relacionados con un incremento medio de 0,8 °C en la temperatura del año y una reducción de hasta el 12 % en las lluvias. Se recomienda aumentar la vigilancia y el manejo ambiental, ya que se concluye que el cambio climático está afectando la estabilidad hídrica de los ecosistemas lacustres.

ABSTRACT

This study examines the fluctuation of the water surface in the Atillo and Ozogoché lagoons, as well as in the Colta lagoon, located in the Ecuadorian province of Chimborazo, using remote sensing methods to observe the impacts of climate change. The main objective was to determine the spatial and temporal variations in water levels between 1991 and 2024, relating them to climate trends during the period. The methodology was based on a descriptive and quantitative approach, using multitemporal analysis of Landsat 5, 8, and 9 images at L2SP level. These images were processed using ArcGIS Pro 3.1 and R-Studio. Climate series for temperature, precipitation, and solar radiation obtained from the MERRA-2 model were incorporated, and the MNDWI index was used to define the water extent. The lake systems were chosen through deliberate sampling due to their importance to the environment. The results reveal that the water surface area has decreased in the three systems studied. In the case of the Colta lagoon, a decrease of close to 15% in its surface area was observed; in contrast, the reductions in Atillo and Ozogoché were smaller, at 6% and 4%, respectively. These changes are related to an average increase of 0.8°C in the annual temperature and a reduction of up to 12% in rainfall. Increased monitoring and environmental management are recommended, as it is concluded that climate change is affecting the water stability of lake ecosystems.

Palabras claves

Teledetección, hidrología, cambio climático, laguna, variación, Chimborazo

Keywords

Remote sensing, hydrology, climate change, lagoon, variation, Chimborazo

1. Introducción

La calidad del agua constituye un componente importante en la gestión de los recursos hídricos, por su influencia directa en los sectores agrícola, ganadero, turístico y productivo. Esta se mide a través de los Índices de Calidad del Agua (ICA), que permite resumir el estado general de los cuerpos hídricos y facilitar la toma de decisiones (Pérez et al., 2018).

El cambio climático es uno de los desafíos ambientales más grandes a escala mundial porque transforma los patrones hidrometeorológicos, acelera la desaparición de ecosistemas vulnerables y cambia la disponibilidad de agua (*Intergovernmental Panel on Climate Change* [IPCC], 2021). En estas circunstancias, las lagunas de alta montaña funcionan como sensores naturales debido a que sus propiedades morfológicas y fisicoquímicas reaccionan directamente a la variabilidad climática. Según Vuille et al. (2018), la reducción de las precipitaciones y el retroceso glaciar han llevado a una disminución de las lagunas altoandinas en Bolivia y Perú.

La principal causa del cambio climático es la actividad humana, especialmente por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) derivado de la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la agricultura intensiva, atrapan el calor en la atmósfera, provocando un aumento en la temperatura global (Gómez y Salas, 2022).

En este escenario, la teledetección constituye una herramienta en el monitoreo ambiental, permitiendo hacer análisis multitemporales a partir de imágenes satelitales o aéreas tomadas en diferentes periodos. Los análisis multitemporales facilitan la detección de cambios en la cobertura del suelo, la vegetación, y los cuerpos hídricos, ofreciendo información esencial para evaluar el impacto del cambio climático (Calderón y Mora, 2022).

Cabe mencionar que para poder realizar un análisis del cual se pueda obtener datos confiables, se requiere del uso de diferentes métodos de procesamiento de los mismos, que permitan contrastar debidamente la información obtenida mediante las imágenes Landsat (píxeles) y los diferentes parámetros de análisis requeridos (Delgado, 2022).

En los sistemas lacustres de Colta, Ozogoche y Magdalena-Atillo, se han realizado estudios sobre los diagnósticos tróficos por teledetección (Jiménez, 2022), valoraciones económicas y ecosistémicas (Delgado et al., 2019) y eutrofización (Escobar et al., 2021). Sin embargo, no existen estudios multitemporales ni comparativos acerca de cómo el espejo de agua en estos sistemas lacustres se ha visto afectado por la variación provocada por el cambio climático.

Los sistemas de Colta, Atillo y Ozogoché, ubicados en la provincia de Chimborazo, tienen una enorme importancia a nivel cultural, ecológico y socioeconómico. La laguna de Colta, situada a 3.312 msnm, tiene un pH que oscila entre 8,36 y 9,20 y una baja transparencia Secchi; por lo tanto, muestra condiciones de eutrofización moderada (Escobar et al., 2021). Se ha destacado la importancia hídrica y socioeconómica del sistema de Atillo, que está constituido por unos 14 estanques, junto a su vulnerabilidad ante presiones climáticas y antrópicas (Toaquiza, 2021; Delgado et al., 2019).

Aproximadamente 30 lagunas componen el sistema lacustre de Ozogoché, que se encuentra a unos 3.800 metros sobre el nivel del mar. Se ha utilizado la teledetección para evaluar su estado trófico, con énfasis en Magtayán y Cubillín debido a su amplitud y diversidad biológica endémica (Quishpe y Lema, 2022; Mullo y Álvarez, 2021).

Diversos estudios en estos cuerpos de agua se han centrado en la calidad y cantidad del recurso (Costales y Bastidas, 2017), además de los procesos sociales relacionados con ellos (García y Quiroz, 2023). No obstante, no hay estudios que examinen la disminución del área hídrica utilizando datos de teledetección y de cambio climático al mismo tiempo. Este vacío es crucial si se tiene en cuenta que las herramientas satelitales, como Landsat, son instrumentos útiles para medir cambios espacio-temporales y respaldar la gestión del agua (Cabello y Paruelo, 2008).

El monitoreo de los cuerpos de agua superficiales es fundamental para comprender la dinámica hidrológica y climática de una región, así como para evaluar los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos. La variación de la lámina de agua constituye un indicador sensible de los procesos de evapotranspiración, balance hídrico y disponibilidad del recurso, los cuales dependen directamente de las condiciones climáticas locales. En zonas agrícolas y ecosistemas reguladores, estos cambios reflejan tanto la influencia del clima como el impacto de las actividades humanas sobre el uso y manejo del agua.

En el presente estudio se analiza la relación entre la variación de la lámina de agua y las variables climáticas derivadas del modelo reanálisis MERRA-2, obtenidas a través del sistema NASA POWER (*Prediction of Worldwide Energy Resource*) para el periodo 1990–2024, con coordenadas de referencia latitud -1.4693 y longitud -78.817 . Esta base de datos proporciona estimaciones diarias de temperatura mínima, media y máxima, radiación solar incidente y precipitación, con una resolución espacial aproximada de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, lo que permite caracterizar

de manera continua el clima local y su evolución temporal.

La información climática satelital se complementa con los resultados obtenidos mediante teledetección del cambio de la lámina de agua, a partir de coberturas multitemporales procesadas con el software ArcGIS Pro. Esta integración de fuentes permite evaluar si los cambios observados en los cuerpos de agua guardan relación con las variaciones en temperatura, precipitación o radiación solar, y en qué medida los patrones climáticos han influido en la dinámica hídrica durante las últimas tres décadas. Se consideran las lagunas Atillo, Ozogoché y Colta, ubicadas en la región interandina del Ecuador.

En este contexto, este estudio tiene como objetivo determinar las variaciones de los espejos de agua de la laguna de Colta y los sistemas lacustres de Atillo y Ozogoché bajo los efectos del cambio climático a partir del año 2000, mediante el uso de imágenes Landsat y datos climáticos de acuerdo con la tercera comunicación de cambio climático en la zona de estudio, en la temporalidad correspondiente. A través de esta integración metodológica, se busca generar evidencia científica que complemente a la gestión sostenible de los recursos hídricos altoandinos del Ecuador, fortaleciendo el conocimiento sobre la respuesta hidrológica de los ecosistemas frente a la variabilidad climática.

2. Materiales y Métodos

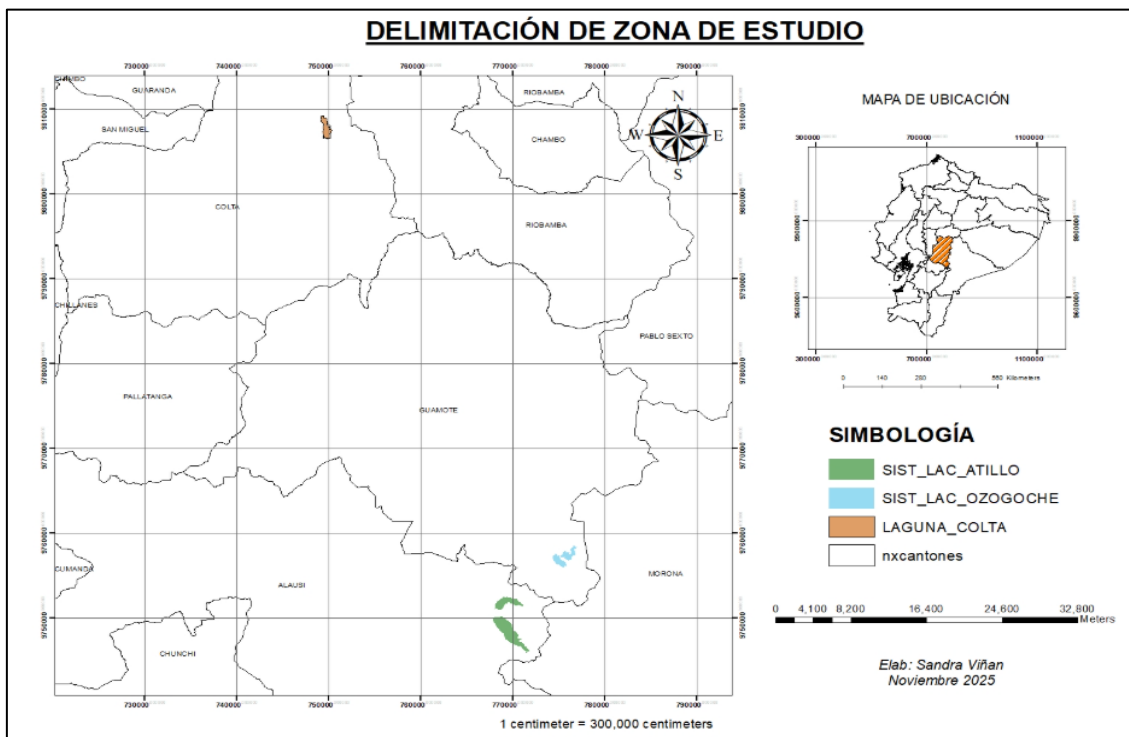
2.1 Localización del área de estudio

La investigación se desarrolló en tres sistemas lacustres localizados en la provincia de Chimborazo, Ecuador: la laguna de Colta, el sistema lacustre de Atillo y el sistema lacustre de Ozogoché (Figura 1). Estas lagunas se ubican en la región interandina, a altitudes comprendidas entre los 3.300 y 3.800 msnm y constituyen ecosistemas estratégicos para la regulación hídrica y la biodiversidad local.

La laguna de Colta se ubica a 19 km al sur de la ciudad de Riobamba, dentro de la delimitación política de la Provincia de Chimborazo, con coordenadas UTM-WGS84 17 S X=749599,94; Y=9807915,45. El sistema lacustre de Atillo se ubica a aproximadamente 90 km al sur de la ciudad, con coordenadas UTM-WGS84 17 S X=774826,48; Y=9757028,53. Finalmente, el sistema lacustre de Ozogoché se ubica a aproximadamente 90 km de la ciudad de Riobamba, dentro de la delimitación política de la Provincia de Chimborazo, con coordenadas UTM-WGS84 17 S X=769436,96; Y=9750699,35.

Figura 1.

Mapa general de ubicación de las 3 áreas de estudio



Estos cuerpos de agua se encuentran bajo la influencia directa de la variabilidad climática andina, caracterizada por precipitaciones estacionales y temperaturas medias anuales entre 8 y 11 °C. Su estudio es relevante para comprender los impactos del cambio climático en ecosistemas lacustres altoandinos.

2.2 Materiales y equipos

El estudio se apoyó en herramientas informáticas y datos de libre acceso, detallados en la Tabla 1.

Tabla 1.

Materiales y equipos de apoyo

Tipo de insumo	Descripción
Software	ArcGIS Pro 3.1, R-Studio for Data Science
Datos satelitales	Imágenes Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI/TIRS y Landsat 9 OLI-2/TIRS-2, nivel de producto L2SP (Reflectancia de Superficie) descargadas desde el portal USGS Earth Explorer
Información climática	Datos diarios de temperatura, precipitación y radiación solar derivados del modelo de reanálisis MERRA-2.
Cartografía base	Capas vectoriales oficiales del Instituto Geográfico Militar (IGM)
Equipo	Computador portátil con 16 GB RAM y 1 TB de almacenamiento

2.3 Métodos

Se elaboró un método cronológico y estructurado para el presente estudio con el fin de examinar, por medio de técnicas de teledetección, la fluctuación del espejo de agua en los sistemas lacustres de Atillo y Ozogoche, así como en la laguna de Colta, ubicados en la provincia de Chimborazo, a causa del cambio climático. Los tres cuerpos de agua citados constituyeron la muestra; estos fueron elegidos por medio de un muestreo deliberado debido a su importancia ambiental y representatividad frente a la variación climática.

2.4. Metodología de la investigación.

Adquisición y preprocesamiento de imágenes satelitales

Para la presente investigación se realizó la adquisición de imágenes satelitales de la serie Landsat, descargadas directamente desde la plataforma USGS Earth Explorer, utilizando el producto Level 2 Surface Reflectance Product (L2SP), el cual incorpora correcciones radiométricas, geométricas y atmosféricas, permitiendo trabajar directamente con reflectancia de superficie.

Se seleccionaron imágenes correspondientes a fechas representativas de distintos periodos temporales: 1991 y 1998 con Landsat 5 TM, 2015 con Landsat 8 OLI/TIRS, y 2024 con Landsat 9 OLI-2/TIRS-2, priorizando aquellas con mínima cobertura de nubes y completa cobertura del área de estudio. Las imágenes de Landsat 5 TM se adquirieron para los Path 010 y Row 061, asegurando coherencia espacial con las escenas posteriores de Landsat 8 y 9 como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2.

Periodos temporales de acuerdo al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)

Satélite	Código de imagen	Fecha
Landsat 5 TM	LT05_L2SP_010061_19911015_20230523_02_T1	15/10/1991
Landsat 5 TM	LT05_L2SP_010061_19980714_20200909_02_T1	14/07/1998
Landsat 8 OLI/TIRS	LC08_L2SP_010061_20150915_20200908_02_T1	15/09/2015
Landsat 9 OLI-2/TIRS-2	LC09_L2SP_010061_20240830_20240831_02_T1	30/08/2024

Las bandas ópticas seleccionadas fueron:

- Landsat 5 TM: B1 (Azul), B2 (Verde), B3 (Rojo), B4 (Infrarrojo cercano), B5 (Infrarrojo medio) y B7 (Infrarrojo medio corto), con resolución de 30 m.
- Landsat 8/9 OLI: B1 (Azul costero), B2 (Azul), B3 (Verde), B4 (Rojo), B5 (Infrarrojo cercano), B6 (SWIR1) y B7 (SWIR2), también con resolución de 30 m.

Se descartó el uso de Landsat 7 ETM+ para el año 2000 debido al fallo del *Scan Line Corrector (SLC-Off)*, el cual genera franjas diagonales sin datos, haciendo que las imágenes no fueran confiables para análisis multitemporal.

Composición de bandas y fotointerpretación

Descargadas las bandas desde el portal de USGS Earth Explorer se realizó una composición de bandas en ArcGIS Pro utilizando la herramienta composite que permitió generar un stack de bandas para cada año de estudio.

Para facilitar la identificación de los cuerpos de agua, se realizó la combinación de bandas (RGB) en ArcGIS Pro, utilizando los siguientes composites:

- Color natural (True Color, 432 o 321 según satélite): permite diferenciar agua de vegetación y suelo.
- Color falso con NIR (456 o 543): resalta vegetación y cuerpos hídricos.

A partir de estas composiciones, se llevó a cabo una fotointerpretación visual, identificando y delimitando los cuerpos de agua principales (lagunas) en cada fecha. Esta etapa permitió validar la presencia de lagunas y facilitar su posterior análisis mediante índices espectrales.

Digitalización de la zona de estudio

Una vez identificadas las lagunas se dibujó un polígono como región de interés o ROI y se procedió con el recorte del *stack* para cada año de estudio para tener solamente la imagen recortada a nivel de ROI para cada laguna.

Cálculo del índice espectral MNDWI

Para identificar la superficie de agua, se utilizó el ***Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)***, definido como:

$$\text{MNDWI} = \frac{(\text{Green} - \text{SWIR1})}{(\text{Green} + \text{SWIR1})}$$

- **Bandas:**
 - **Landsat 5 TM: B2 (Green), B5 (SWIR1)**
 - **Landsat 8/9: B3 (Green), B6 (SWIR1)**
- Se aplica especialmente en zonas donde el agua podría confundirse con áreas urbanas o vegetación densa, mejorando la delimitación de cuerpos de agua en entornos mixtos.
- **Rango de valores:** [-1, 1]

Los valores positivos del índice indica presencia de agua, mientras que valores cercanos a cero o negativos representan vegetación o suelo.

El procesamiento incluyó:

1. Aplicación del índice MNDWI a cada año de estudio.
2. Análisis del histograma de valores para determinar umbrales de clasificación.
3. Generación de ráster binarios (1 = agua; 0 = no agua).
4. Conversión de ráster a polígonos y cálculo de superficie en hectáreas mediante la herramienta *Tabulate Area*.

Análisis multitemporal y cuantificación de cambios

Para comparar los resultados, todas las imágenes se alinearon espacialmente (30 m/píxel) y se generaron mapas de pérdida, ganancia y estabilidad hídrica, definidos como -1: área que dejó de ser agua (pérdida), 0: sin cambio y 1: nueva área cubierta por agua (ganancia). La variación total del espejo de agua entre 1991 y 2024 se cuantificó mediante la diferencia de coberturas binarias. Además, se elaboraron mapas de recurrencia hídrica basados en la suma de valores categóricos (0–4) para evaluar la persistencia temporal del agua. Finalmente, el resultado del índice se almacenó como ráster temático por año, permitiendo análisis comparativos multitemporales de la extensión y variación de las lagunas a lo largo del periodo estudiado. Este procedimiento asegura que los datos sean consistentes, comparables y adecuados para los análisis espaciales y estadísticos de cobertura de agua que se desarrollan en el estudio (Figura 2 y 3).

Figura 2.

LANDSAT 8 Y LANDSAT 9

Tamaño de los píxeles 30 metros								
Bandas								
Nombre	Unidades	Mín.	Máx.	Escala	Desplazamiento	Tamaño de los píxeles	Longitud de onda	Descripción
SR_B1		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	0.435 a 0.451 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 1 (azul ultra, aerosol costero)
SR_B2		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	0.452 a 0.512 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 2 (azul)
SR_B3		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	De 0.533 a 0.590 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 3 (verde)
SR_B4		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	0.636 a 0.673 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 4 (rojo)
SR_B5		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	0.851 a 0.879 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 5 (infrarrojo cercano)
SR_B6		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	De 1.566 a 1.651 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 6 (infrarrojo de onda corta 1)
SR_B7		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	2.107 a 2.294 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 7 (infrarrojo de onda corta 2)

Figura 3.

LANDSAT 5

Tamaño de píxel 30 metros								
Bandas								
Nombre	Unidades	Mín.	Máx.	Escala	Desplazamiento	Tamaño de los píxeles	Longitud de onda	Descripción
SR_B1		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	0.45 a 0.52 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 1 (azul)
SR_B2		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	0.52-0.60 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 2 (verde)
SR_B3		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	0.63 a 0.69 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 3 (rojo)
SR_B4		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	0.77 a 0.90 μm	Reflectancia de la superficie de la banda 4 (infrarrojo cercano)
SR_B5		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	1.55 a 1.75 μm	Banda 5 (infrarrojo de onda corta 1): Reflectancia de la superficie
SR_B7		1	65455	2.75e-05	-0.2	metros	2.08 a 2.35 μm	Banda 7 (infrarrojo de onda corta 2): Reflectancia de la superficie

El diseño experimental, basado en métodos de teledetección y análisis estadístico, asegura que el estudio pueda ser replicado a través de procesos estandarizados y del empleo de un software especializado. Como limitaciones posibles se identifican la falta de datos históricos completos sobre el clima y las fluctuaciones en la resolución espacial y temporal de las imágenes Landsat. Esta metodología ofrece una visión cuantitativa, comparativa y multitemporal de la dinámica lacustre en la provincia de Chimborazo, basada en las variaciones climáticas.

Análisis climático

Se incorporaron series temporales diarias de temperatura media, precipitación y radiación solar del modelo MERRA-2 para el período 1990–2024 (latitud -1.4693 , longitud -78.817). Los datos se procesaron en R-Studio para generar tendencias anuales y correlaciones entre las variables climáticas y las áreas hídricas obtenidas mediante teledetección.

3. Resultados y Discusión

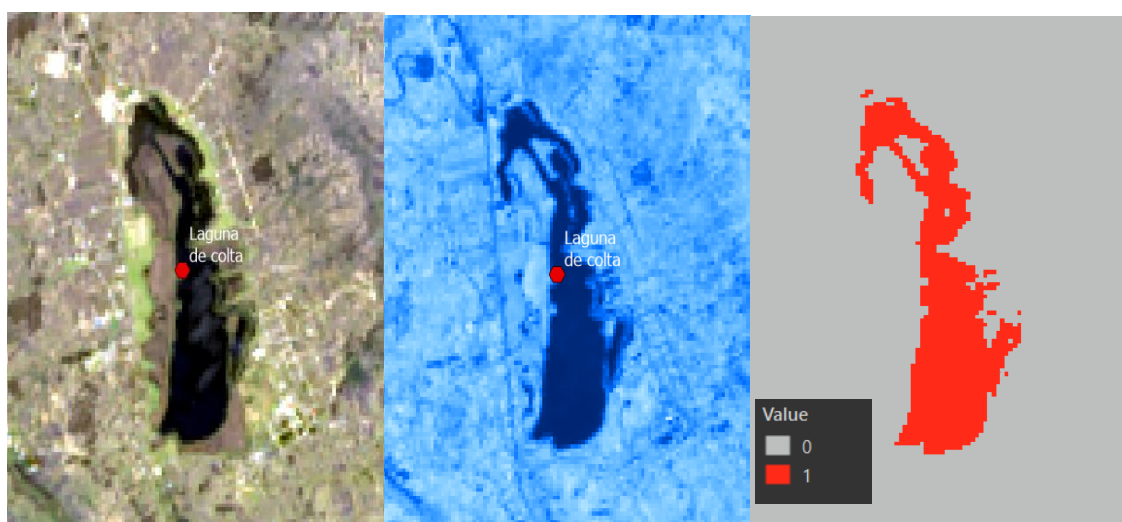
Análisis multitemporal del espejo de agua

El análisis de los resultados se orientó a determinar las variaciones espaciales y temporales de los espejos de agua de la Laguna de Colta y de los sistemas lacustres de Atillo y Ozogoché, empleando técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG). A partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat correspondientes a los años 1991, 1998, 2015 y 2024, se aplicó el índice MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) para la delimitación precisa de las superficies hídricas.

Los resultados alcanzados posibilitan visualizar las alteraciones en la extensión de los cuerpos de agua a través del tiempo, mostrando las fluctuaciones generadas por elementos climáticos como la temperatura y la lluvia, vinculados a las consecuencias del cambio climático en Chimborazo. En este apartado se muestran los mapas de clasificación, las máscaras generadas por la detección del agua y las composiciones espectrales, además del análisis comparativo multitemporal de la superficie del lago. Estos hallazgos son la base para analizar la dinámica del agua y su vínculo con las tendencias climáticas de la región.

Figura 4.

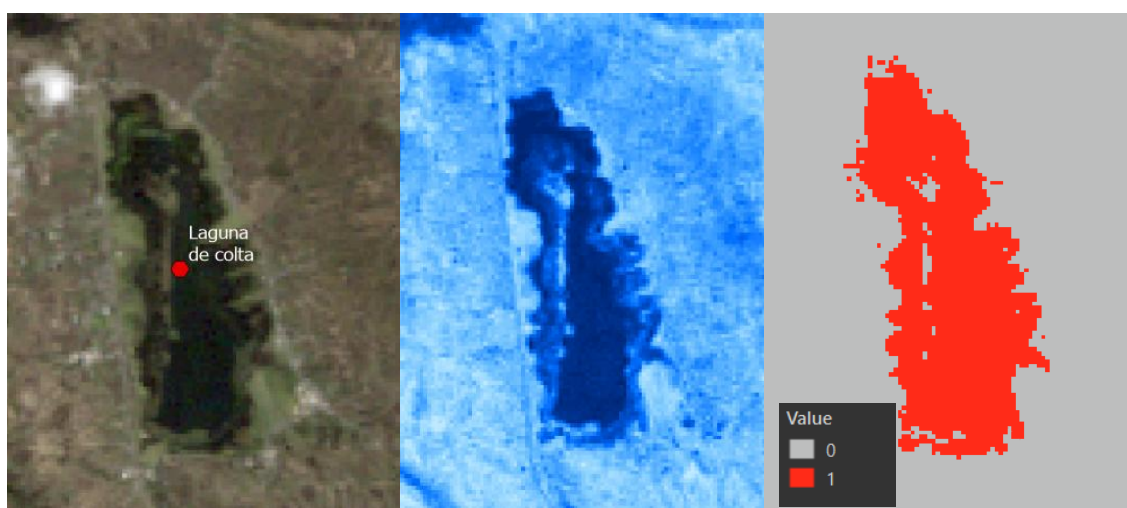
Laguna de Colta año 2024



En la Figura 4 se puede evidenciar permafrost en la lámina de agua para el año 2024. Una vez aplicado el índice MNDWI se obtuvo rangos de valores desde -0.288 hasta 0.0411. Se observa que el rango es bastante estrecho para este cuerpo de agua. Para segregar la cobertura se utilizó el valor >-0.125 en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 otras coberturas, 1 laguna Colta. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

Figura 5.*Laguna de Colta año 2015*

En la Figura 5 se puede evidenciar permafrost en la lámina de agua para el año 2015, similar al alcanzado en el año 2024. Una vez aplicado el índice MNDWI se obtuvo rangos de valores igualmente estrechos para esta cobertura de agua que van entre -0.3006 hasta 0.0351. Para segregar la cobertura se utilizó el valor >-0.143 en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 otras coberturas, 1 laguna Colta. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

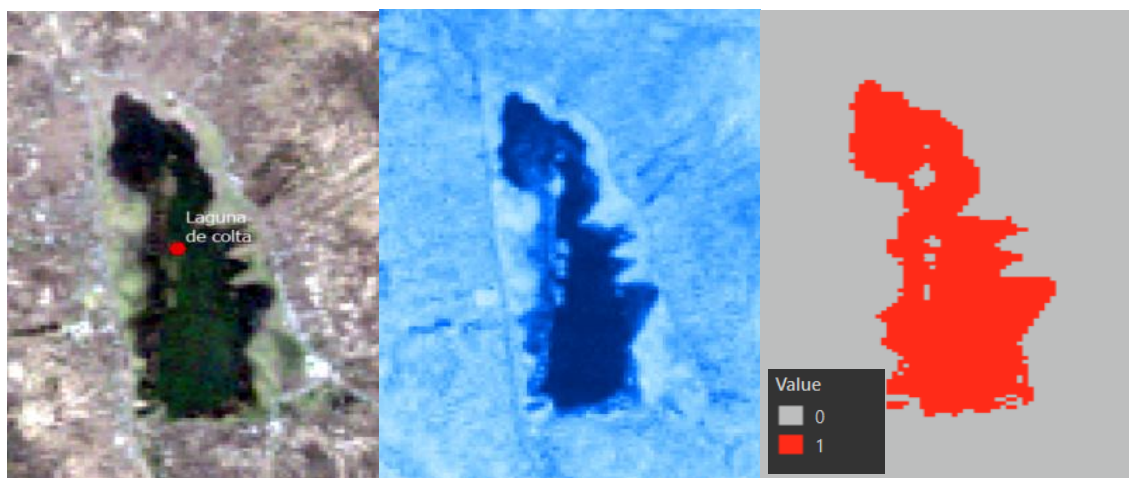
Figura 6.*Laguna de Colta año 1998*

En la Figura 6 se puede evidenciar permafrost en la lámina de agua para el año 1998 pero en menor cantidad. Una vez aplicado el índice MNDWI se obtuvo rangos de valores un poco más

extensos para esta cobertura de agua que van entre -0.3033 hasta 0.1073. Para segregar la cobertura se utilizó el valor >-0.121 en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 otras coberturas, 1 laguna Colta. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

Figura 7.

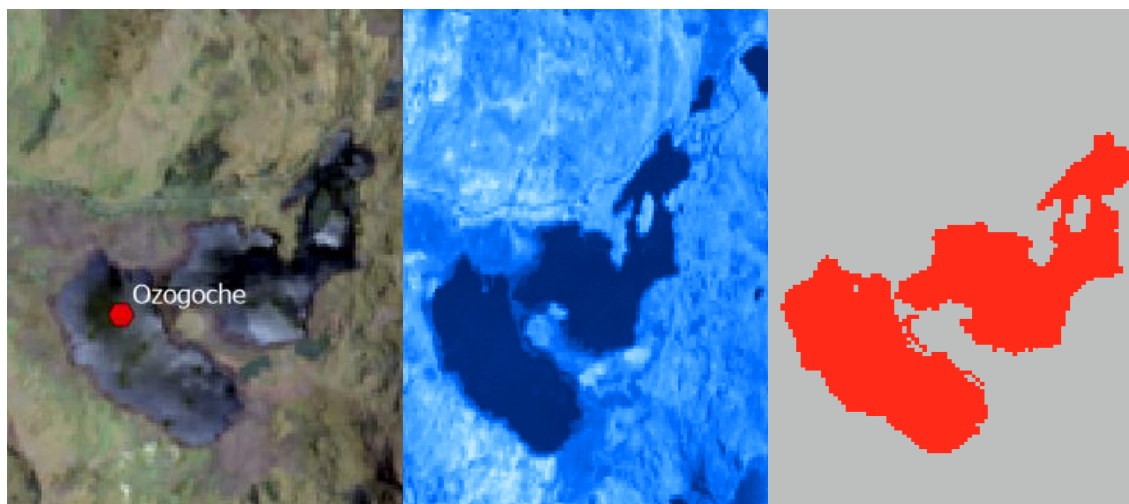
Laguna de Colta año 1991



En la Figura 7 se puede evidenciar permafrost en la lámina de agua. Una vez aplicado el índice MNDWI se obtuvo rangos de valores desde -0.2799 hasta 0.1118. Para segregar la cobertura se utilizó el valor $>-0,109$ en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 otras coberturas, 1 laguna Colta. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

Figura 8.

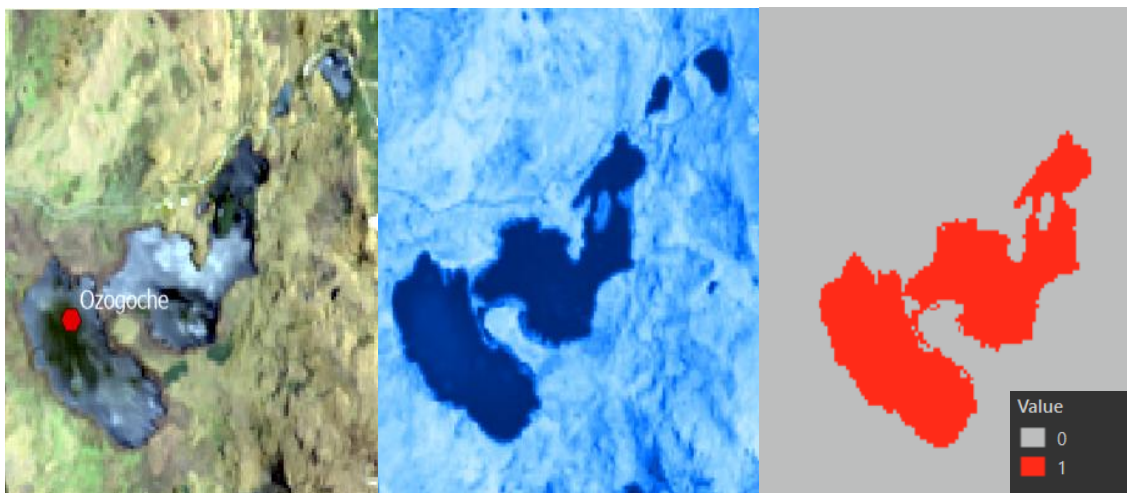
Lacustre Ozogoché año 2024



En la Figura 8 el Lacustre Ozogoche se encuentra bien definida. Una vez aplicado el índice **MNDWI** se obtuvo rangos de valores que van entre -0.3003 hasta 0.03621. Para segregar la cobertura se utilizó el valor >-0.082 en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 otras coberturas, 1 laguna Ozogoche. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro).

Figura 9.

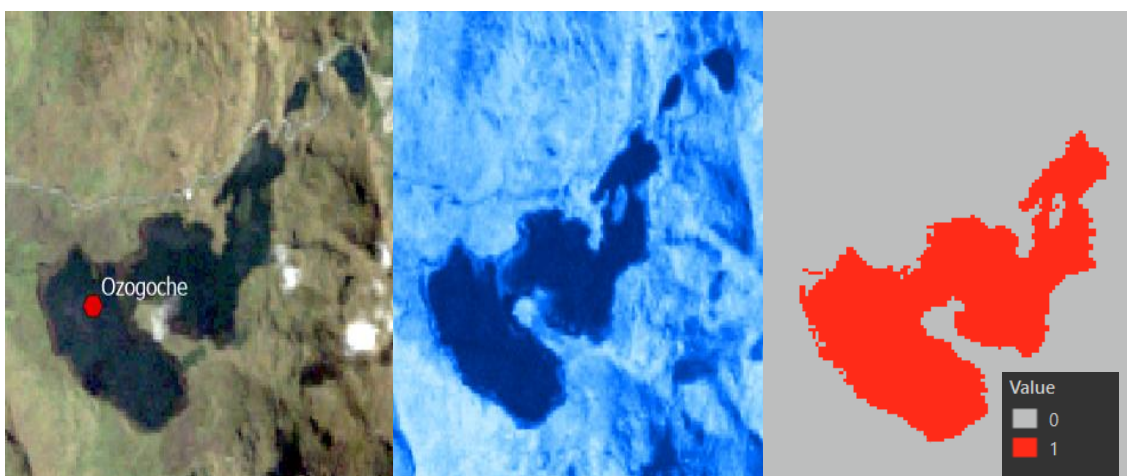
Lacustre Ozogoche año 2015



En la Figura 9, Ozogoche se encuentra bien definida para el año 2015. Una vez aplicado el índice **MNDWI** se obtuvo rangos de valores que van entre -0.3118 hasta 0.03617. Para segregar la cobertura se utilizó el valor >-0.106 en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 otras coberturas, 1 laguna Ozogoche. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

Figura 10.

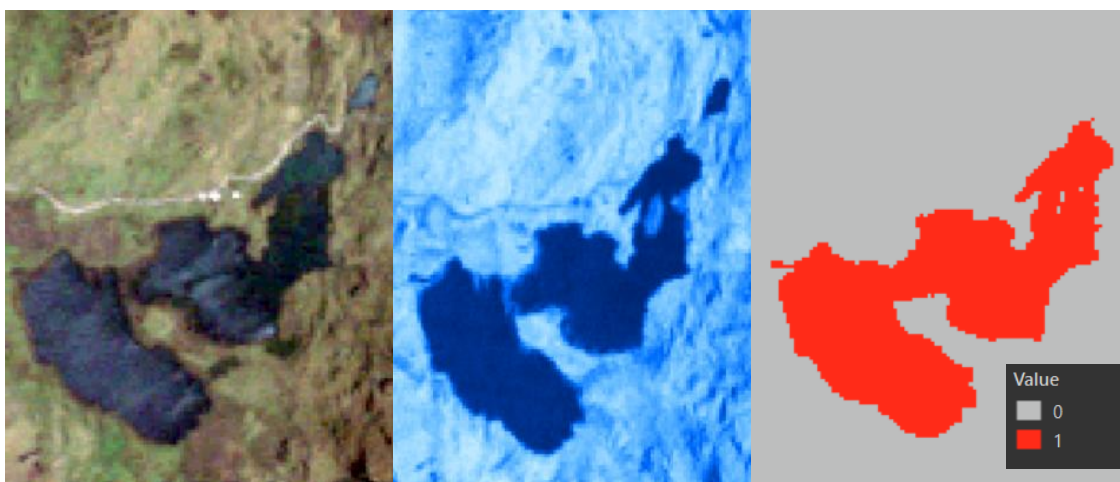
Lacustre Ozogoche año 1998



En la Figura 10 Ozogoché se encuentra bien definida para el año 1998. Una vez aplicado el índice MNDWI se obtuvieron rangos de valores que van entre -0.2620 hasta 0.1061. Para segmentar la cobertura se utilizó el valor >-0.1 en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 para otras coberturas, 1 para la laguna Ozogoché. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

Figura 11.

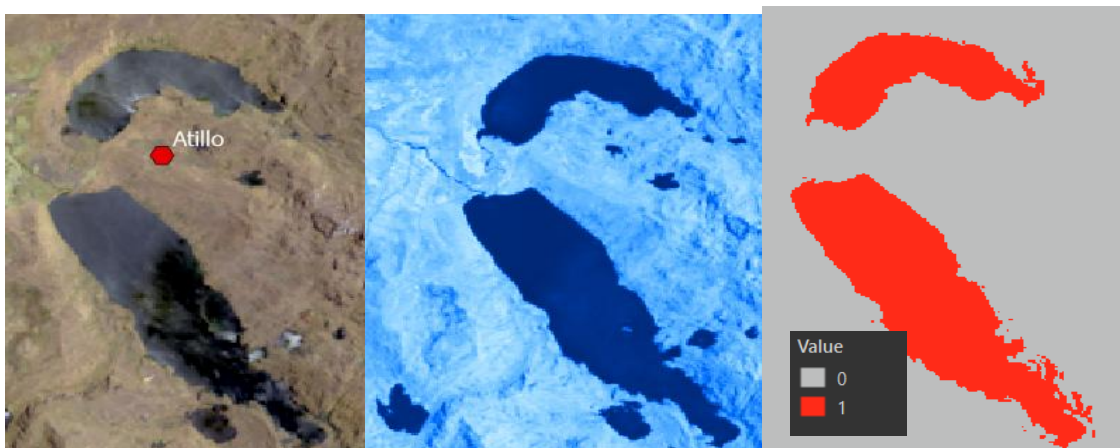
Lacustre Ozogoché año 1991



En la Figura 11 Ozogoché en el año 1991, una vez aplicado el índice MNDWI se obtuvieron rangos de valores que van entre -0.2563 hasta 0.0859. Para segmentar la cobertura se utilizó el valor $>-0,107$ en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 para otras coberturas, 1 para la laguna Ozogoché. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

Figura 12.

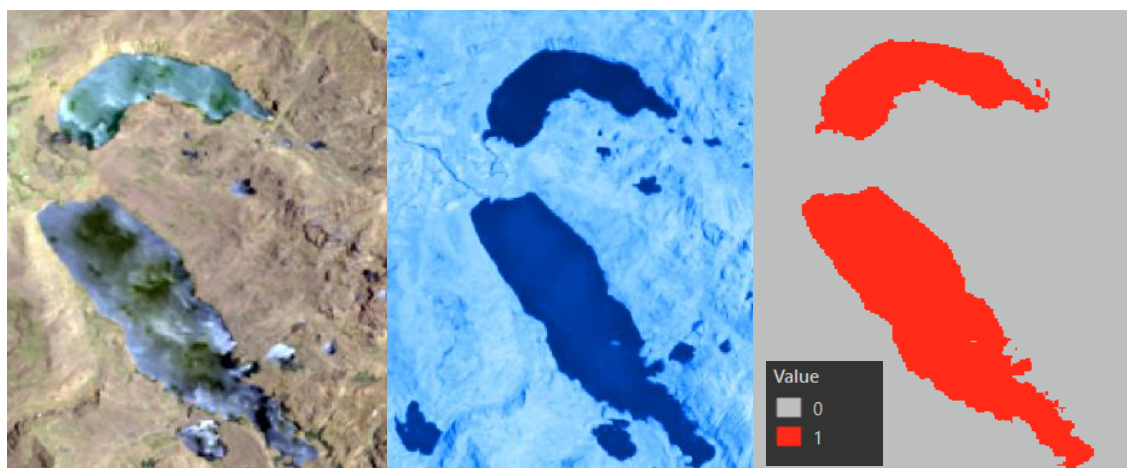
Lacustre Atillo año 2024



En la Figura 12 del Lacustre Atillo del año 2024, una vez aplicado el índice MNDWI se obtuvo rangos de valores que van entre -0.2943 hasta 0.4417. Para segregar la cobertura se utilizó el valor >-0.151 en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 otras coberturas, 1 laguna Atillo. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

Figura 13.

Lacustre Atillo año 2015



En la Figura 13 el Lacustre Atillo se encuentra bien definido. Una vez aplicado el índice MNDWI se obtuvo rangos de valores que van entre -0.3307 hasta 0.0508. Para segregar la cobertura se utilizó el valor >-0.131 en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 otras coberturas, 1 laguna Atillo. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

Figura 14.

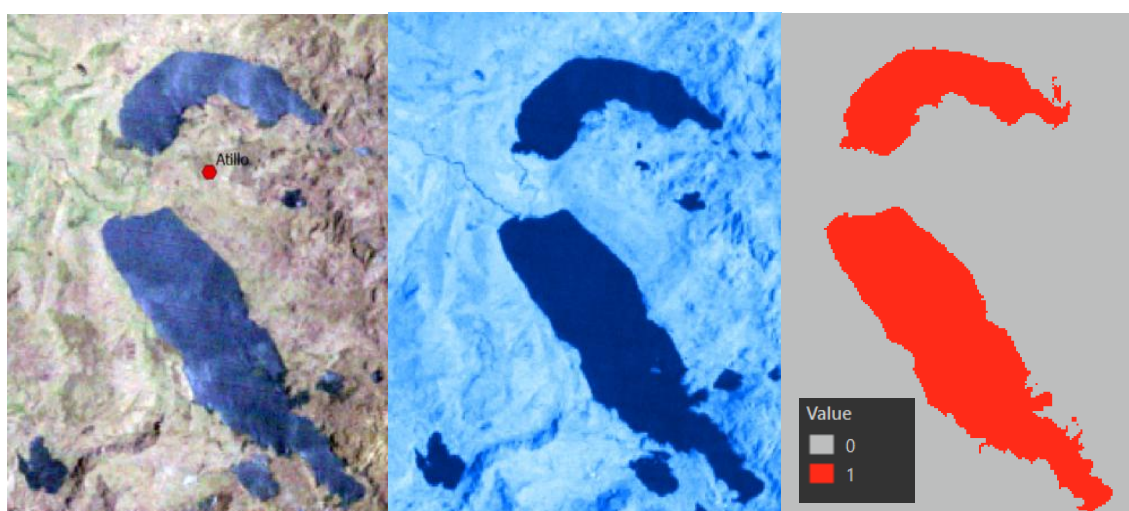
Lacustre Atillo año 1998



En la Figura 14 el lacustre Atillo en el año 1998, se encuentra bien definido y una vez aplicado el índice MNDWI se obtuvo rangos de valores que van entre -0.2723 hasta 0.5106. Para segregar la cobertura se utilizó el valor >-0.16 en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 otras coberturas, 1 laguna Atillo. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

Figura 15.

Lacustre Atillo año 1991



En la Figura 15 una vez aplicado el índice MNDWI se obtuvo rangos de valores que van entre -0.2910 hasta 0.0793. Para segregar la cobertura se utilizó el valor >-0.104 en la calculadora ráster lo que arrojó un ráster binario 0 otras coberturas, 1 laguna Atillo. Esto extrajo la lámina de agua visible (azul oscuro). El umbral se eligió a partir de los valores del histograma del índice.

Análisis multitemporal y análisis del cambio total.

Una vez obtenido los MNDWI por año recortados a la misma extensión y re proyectados al mismo sistema de referencia con tamaño de celda 30 metros y alineadas todas las imágenes, se pudo evaluar los cambios espaciales y temporales en la cobertura de agua. Esta configuración fue clave para evitar desplazamientos de píxeles entre periodos. La clasificación binaria realizada permitió obtener dos coberturas generales:

- 1 = Agua.
- 0 = No agua.

Cuantificación de áreas

El procesamiento se realizó con la calculadora ráster realizando una diferencia entre el periodo 2024 y 1991 para cada una de las lagunas dando como resultado lo siguiente:

- -1: Área que dejó de ser agua (Pérdida).
- 0: Sin cambio observado (Sin cambio).
- 1: Área que se volvió agua (Ganancia).

Para cuantificar la extensión superficial de las coberturas hídricas identificadas mediante el índice NDWI, se procedió al cálculo de áreas de los periodos analizados (1991 y 2024) para medir el cambio neto. Las imágenes Landsat empleadas poseen una resolución espacial de 30 metros, lo que equivale a una superficie de 900 m² por píxel. Una vez aplicados los umbrales de clasificación y obtenidas las capas binarias que representan la presencia o ausencia de agua, se realizó el conteo de píxeles y el y el cálculo de las áreas que representan en m² con la herramienta *Tabulate área*. El resultado se dividió por 10000 para obtener las hectáreas respectivas. Este procedimiento permitió comparar cuantitativamente la dinámica espacial de los cuerpos hídricos, facilitando el análisis multitemporal de pérdidas y ganancias de la lámina de agua (tabla 3).

Tabla 3.

Análisis de la lámina de agua entre año 1991 y 2024 (hectáreas)

Laguna	Agua_1991	Agua_2024	Ganancia	Pérdida
Atillo	804,96	834,84	34,92	5,04
Ozogoche	281,34	254,16	1,98	29,16
Colta	158,13	114,03	11,79	55,89

Como análisis independiente se muestra los cambios de cobertura de agua a no agua y viceversa con sus pérdidas y ganancias para la laguna Atillo se muestra en la matriz de tabulación cruzada (tabla 4):

Tabla 4.

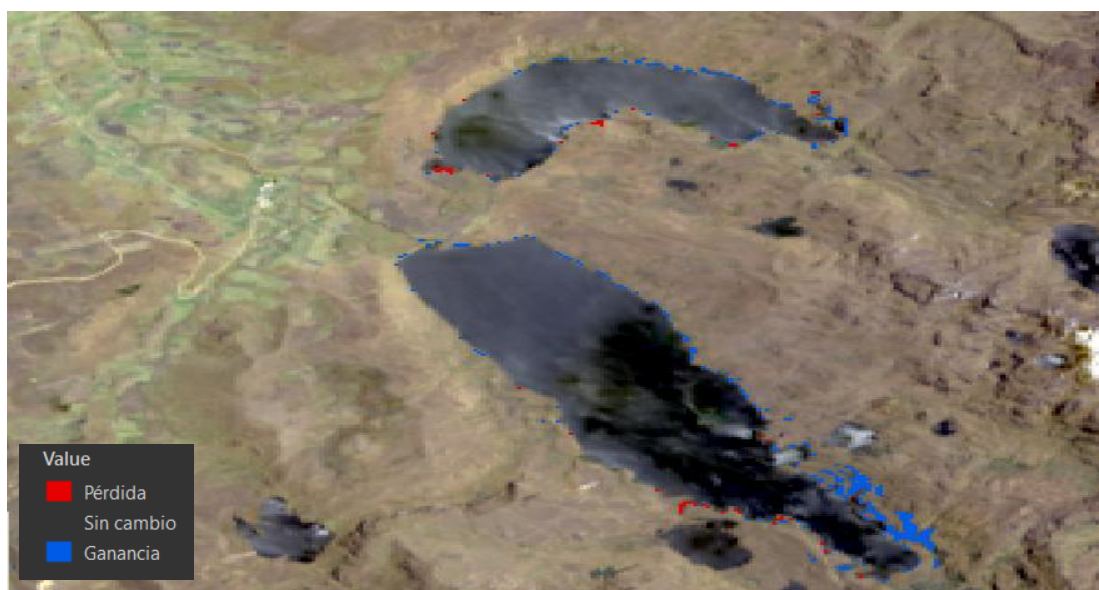
Cambios de cobertura de agua a no agua y viceversa con pérdidas y ganancias Atillo

Valor (1991)	Valor (2024)	Descripción	Conteo (píxeles)	Área (ha)
0	0	Zona que se mantuvo No Agua	64.735	5.826,15
0	1	Agua ganada (de no agua a agua)	388	34,92
1	0	Agua perdida (de agua a no agua)	56	5,04
1	1	Agua estable (sigue siendo agua)	8.888	799,92

La laguna Atillo en el año 1991 se cuantificó con 804,96 ha. Entre 1991 y 2024, el área cubierta por la lámina de agua aumentó 34,92 ha, lo que representa un leve incremento de la superficie de agua que pasó a tener 834,84 ha. La mayor parte del territorio se mantuvo estable sin cambio con aproximadamente 5.826,15 ha de áreas no hídricas y 799,92 ha de agua constante.

Figura 16.

Superficie de agua de Atillo



Ozogoche

Como análisis independiente se muestra los cambios de cobertura de agua a no agua y viceversa con sus pérdidas y ganancias para la laguna Ozogoche se muestra en la matriz de tabulación cruzada:

Tabla 5.

Cambios de cobertura de agua a no agua y viceversa con pérdidas y ganancias Ozogoche

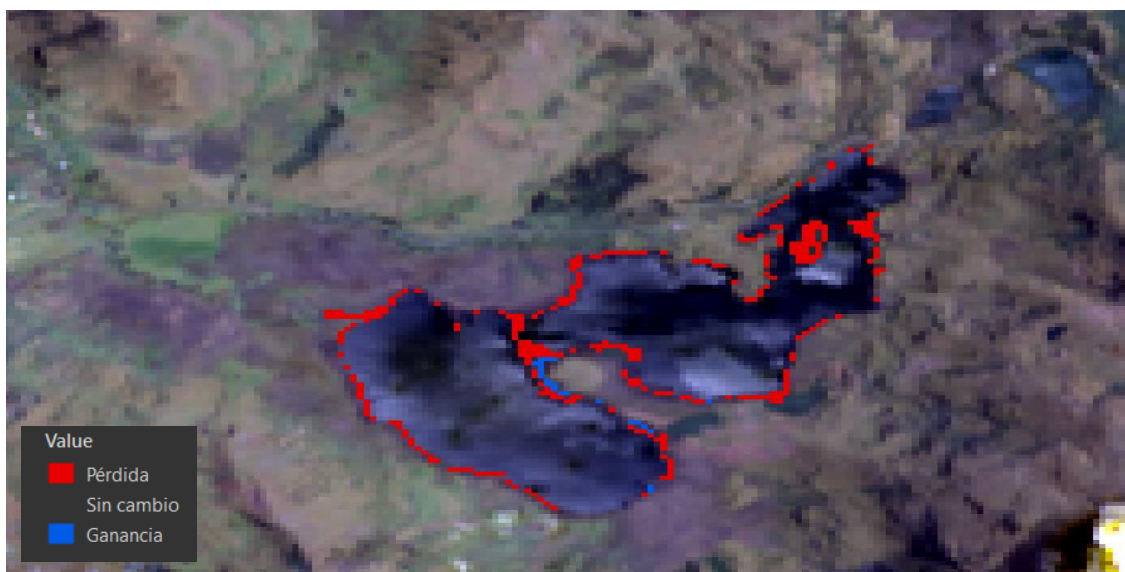
Valor (1991)	Valor (2024)	Descripción	Conteo (píxeles)	Área (ha)
0	0	Zona que se mantuvo No Agua	22.779	2.050,11
0	1	Agua ganada (de no agua a agua)	22	1,98
1	0	Agua perdida (de agua a no agua)	324	29,16
1	1	Agua estable (sigue siendo agua)	2.802	252,18

La laguna Ozogoche en el año 1991 se cuantifico con un área de 281,34 ha. Entre 1991 y 2024, el área cubierta por la lámina de agua tuvo un decremento aproximadamente 29,16 ha, lo que representa un leve descenso de la superficie de agua que pasó a tener 254,16 ha; aunque la cobertura tuvo una ganancia mínima de 1,98 ha, su pérdida fue mayor. La mayor parte del

territorio se mantuvo estable sin cambio con aproximadamente 2.050,11 ha de áreas no hídricas y 252,18 ha de agua constante.

Figura 17.

Superficie de agua de Ozogoché



Como análisis independiente se muestra los cambios de cobertura de agua a no agua y viceversa con sus pérdidas y ganancias para la laguna Colta se muestra en la matriz de tabulación cruzada:

Tabla 6.

Cambios de cobertura de agua a no agua y viceversa con pérdidas y ganancias Colta

Valor (1991)	Valor (2024)	Descripción	Conteo (píxeles)	Área (ha)
0	0	Zona que se mantuvo No Agua	18.719	1.684,71
0	1	Agua ganada (de no agua a agua)	131	11,79
1	0	Agua perdida (de agua a no agua)	621	55,89
1	1	Agua estable (sigue siendo agua)	1.136	102,24

La laguna Colta en el año 1991 se cuantifico con un área de 158,13 ha. Entre 1991 y 2024, el área cubierta por la lámina de agua tuvo un decremento aproximadamente de 55,89 ha, lo que representa un descenso considerable de la superficie de agua que pasó a tener 114,03 ha; aunque la cobertura tuvo una ganancia de 11,79 ha, su pérdida fue mayor. La mayor parte del territorio se mantuvo estable sin cambio con aproximadamente 1.684,71 ha de áreas no hídricas y 102,24 ha de agua constante.

Figura 18.*Superficie de agua de Colta***Cambio multitemporal y análisis de transición entre periodos**

El análisis multitemporal se realizó mediante la calculadora ráster, aplicando una sumatoria de los valores categóricos (0–1) correspondientes a los años 1991, 1998, 2015 y 2024 para cada una de las lagunas estudiadas. Esta operación permitió identificar la persistencia hídrica de cada píxel a lo largo del tiempo, determinando cuántas veces fue clasificado como superficie de agua. De esta manera, se caracterizó la estabilidad o variabilidad espacial del espejo de agua en cada cuerpo lacustre. El resultado del análisis se estructuró en cinco categorías que representan el grado de recurrencia hídrica (tabla 7):

Tabla 7.*Categorías según el grado de recurrencia hídrica*

Código	Descripción	Interpretación
0	Sin cambio observado	El píxel nunca fue clasificado como agua.
1	Solo en un año	Agua temporal o efímera.
2	En dos años	Agua intermitente.
3	En tres años	Agua semipermanente.
4	En los cuatro años	Agua permanente.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de la lámina de agua entre periodos, expresados en hectáreas (ha):

Tabla 8.

Resultados de lámina de agua entre periodos de la laguna de Colta, lagustre Ozogoché y Atillo

Laguna	0	1	2	3	4
Atillo	5174,96	27,20	11,60	10,72	700,88
Ozogoché	1803,84	24,24	18,08	6,32	221,68
Colta	1452,88	45,76	45,76	20,16	84,00

El análisis comparativo entre las tres lagunas evidencia diferencias notables en la persistencia y estabilidad hídrica durante el periodo 1991–2024. La Laguna de Atillo presenta la mayor extensión de superficie permanente (700,88 ha), lo que indica una alta estabilidad del cuerpo de agua y menor sensibilidad a las variaciones climáticas o antrópicas. En contraste, la Laguna de Ozogoché muestra una menor superficie permanente (221,68 ha), pero una proporción relativamente alta de áreas intermitentes y temporales, lo que sugiere fluctuaciones estacionales o variaciones en el nivel del agua asociadas a la recarga pluvial o procesos de desecación parcial. Finalmente, la Laguna de Colta evidencia una menor permanencia hídrica (84 ha) y mayor proporción de zonas clasificadas como intermitentes o semipermanentes, lo cual refleja una mayor dinámica hidrológica posiblemente influenciada por factores antrópicos, sedimentación o cambios en el uso del suelo en su entorno inmediato.

Transición entre periodos de Lacustre Atillo

Como análisis independiente, se evaluó la transición temporal de cobertura de agua en la Laguna de Atillo mediante una tabulación cruzada multitemporal entre los años 1991, 1998, 2015 y 2024. Este procedimiento permitió cuantificar los cambios de cobertura de agua a no agua y viceversa, identificando las zonas de pérdida, ganancia y permanencia de la lámina de agua.

Tabla 9.

Resultados de transición entre periodos Atillo

Valor	Descripción	Conteo (pixeles)	Area (ha)
0	Sin cambio observado	64687	5174,96
1	Solo en un año (temporal).	340	27,20
2	En dos años (intermitente).	145	11,60
3	En tres años (semipermanente).	134	10,72
4	En los cuatro años (Permanente).	8761	700,88

El análisis muestra que la mayor proporción de superficie corresponde a la categoría 0 (sin cambio observado), lo que evidencia amplias zonas sin presencia de agua durante todo el

periodo analizado. Sin embargo, destaca la existencia de 700,88 hectáreas clasificadas como agua permanente, que representan el núcleo estable del cuerpo lacustre de Atillo. Las categorías intermedias (1, 2 y 3) reflejan áreas con fluctuaciones interanuales o variaciones estacionales del nivel de agua, posiblemente asociadas a la dinámica natural de precipitación y escorrentía en su cuenca.

En conjunto, la Laguna de Atillo muestra un comportamiento hidrológicamente estable, con una extensión significativa de superficie permanente y una reducida proporción de zonas temporales o intermitentes, lo que sugiere baja vulnerabilidad frente a la variabilidad climática en comparación con otros sistemas lacustres analizados.

Figura 19.

Superficie de agua de Atillo



Transición entre periodos de Lacustre Ozogoche

En la Laguna de Ozogoche se analizó la transición multitemporal de cobertura de agua considerando los periodos 1991, 1998, 2015 y 2024, con el fin de identificar los patrones de persistencia y variabilidad hídrica. El procesamiento se efectuó mediante una tabulación cruzada ráster, que permitió cuantificar el número de veces que cada píxel fue clasificado como agua, así como su distribución espacial y temporal. La matriz de resultados se detalla a continuación:

Tabla 10.

Resultados de transición entre periodos Ozogoche

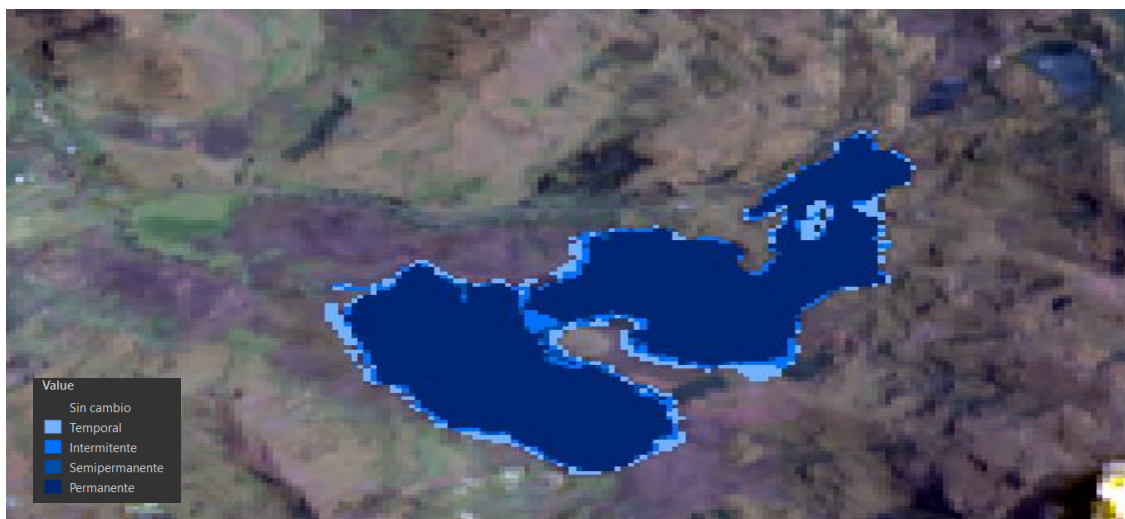
Valor	Descripción	Conteo (pixeles)	Area (ha)
0	Sin cambio observado	22548	1803,84
1	Solo en un año (temporal).	303	24,24
2	En dos años (intermitente).	226	18,08

3	En tres años (semipermanente).	79	6,32
4	En los cuatro años (Permanente).	2771	221,68

Los resultados muestran que la mayor extensión corresponde a la categoría 0 (sin cambio observado), representando áreas que no registraron presencia de agua en ninguno de los periodos analizados. La superficie permanente de 221,68 ha constituye el núcleo estable del sistema lacustre de Ozogoche, mientras que las categorías intermitentes (2) y temporal (1) evidencian zonas de alta variabilidad hídrica, probablemente vinculadas a la dinámica natural de los aportes pluviales y a la variación estacional del nivel del agua. Este patrón sugiere que la Laguna de Ozogoche presenta un comportamiento hidrológico más variable que Atillo, con sectores que experimentan fluctuaciones periódicas en la extensión de la lámina de agua. Dicha dinámica puede estar asociada tanto a factores climáticos como a la morfología del vaso lacustre y la permeabilidad del terreno circundante.

Figura 20.

Superficie de agua de Atillo



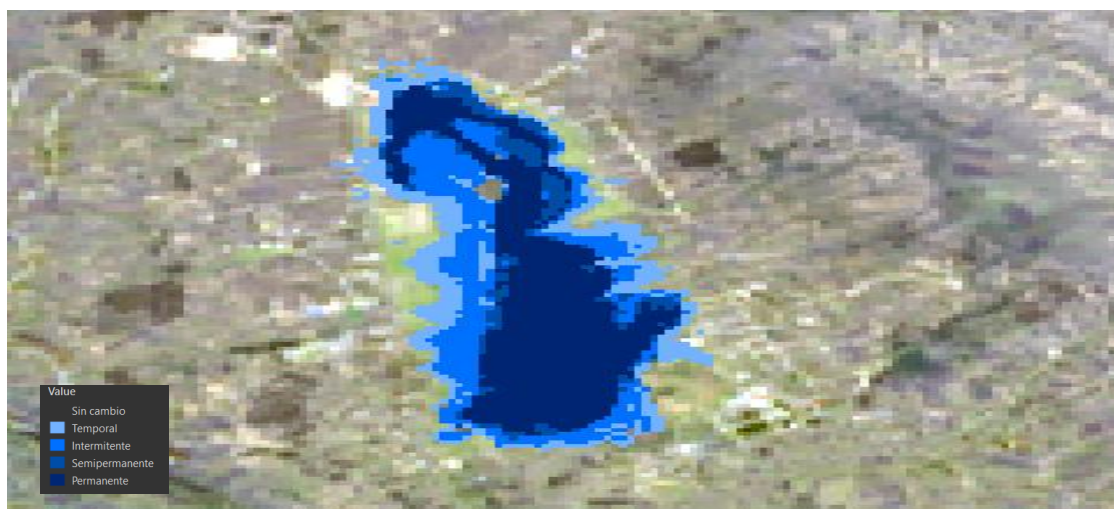
Transición entre periodos de Laguna de Colta

Para la Laguna de Colta se efectuó el análisis de transición multitemporal de cobertura de agua correspondiente a los años 1991, 1998, 2015 y 2024, con el propósito de identificar los patrones de persistencia y cambio en la lámina de agua. Mediante la tabulación cruzada ráster se cuantificó el número de veces que cada píxel fue clasificado como agua, lo que permite evaluar la estabilidad y variabilidad del cuerpo lacustre a lo largo del tiempo. La matriz de resultados se presenta a continuación (tabla 11):

Tabla 11.*Resultados de transición entre periodos Laguna de Colta*

Valor	Descripción	Conteo (pixeles)	Area (ha)
0	Sin cambio observado	18161	1452,88
1	Solo en un año (temporal).	572	45,76
2	En dos años (intermitente).	572	45,76
3	En tres años (semipermanente).	252	20,16
4	En los cuatro años (Permanente).	1050	84,00

Los resultados muestran una predominancia de la categoría 0 (sin cambio observado), indicando amplias zonas donde no se registró presencia de agua en ninguno de los periodos evaluados. La superficie de agua permanente (84 ha) es la más reducida entre las tres lagunas analizadas, evidenciando una baja estabilidad hídrica y una alta dinámica temporal de su lámina de agua. La presencia de valores significativos en las categorías intermitente (2) y temporal (1) sugiere que la Laguna de Colta experimenta variaciones frecuentes en su extensión superficial, probablemente influenciadas por procesos de sedimentación, drenaje natural y modificaciones antrópicas en su entorno inmediato. Estos resultados reflejan un sistema lacustre con mayor vulnerabilidad hidrológica frente a las fluctuaciones climáticas y a las actividades humanas que alteran su régimen hídrico.

Figura 21.*Superficie de agua de Atillo*

El análisis climático de las lagunas de Colta, Atillo y Ozogoche, basado en la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (MAE, 2017), revela tendencias significativas en temperatura y precipitación en la provincia de Chimborazo. Entre 1980 y 2020, la temperatura

media anual en la región ha mostrado un incremento sostenido, pasando de aproximadamente 9,8 °C en 1980 a 11,0 °C en 2020, lo que representa un aumento de 1,2 °C en cuatro décadas.

Este incremento es consistente con las proyecciones del IPCC (2021) para los Andes tropicales, donde se espera que la temperatura siga aumentando a razón de 0,15–0,2 °C por década.

En cuanto a la precipitación anual, los registros muestran una variabilidad interanual considerable, con algunos periodos de sequía y otros con lluvias intensas asociadas a eventos ENSO. No obstante, la tendencia general indica una ligera disminución de hasta un 15 % en la precipitación acumulada desde 1980. Esta reducción relativa puede afectar directamente la recarga hídrica de los espejos de agua en las lagunas y sistemas lacustres estudiados.

El procesamiento se desarrolló empleando las librerías que se detallan a continuación:

```
# Paquetes necesarios
library(tidyverse) #manipulación y transformación de datos tabulos.
library(lubridate) #manejo de fechas.
library(Kendall) # Test Mann-Kendall
library(trend) # Sen's slope (sens.slope)
```

En primer lugar, se realizó la carga de datos en formato csv y se verificó su estructura.

```
# Cargar archivo CSV de CLIMA local
clima_diario <- read_delim("clima_diario.csv",
  delim = ";", escape_double = FALSE, col_types = cols(`PRECTOTCORR (mm/dia)` = col_double()),
  trim_ws = TRUE)

# Cargar archivo CSV de COBERTURAS local
lamina_agua <- read_delim("lamina_agua.csv",
  delim = ";", escape_double = FALSE, trim_ws = TRUE)

#Verificación de estructura
glimpse(clima_diario)
```

Agregaciones temporales - anuales

Para continuar con el análisis multitemporal tenemos que parsear las fechas de la base clima_diario para que contenga el formato estándar de tipo YYYY-01-01 y poder realizar series temporales.

```
# Parsear fecha
clima_diario <- clima_diario |>
# crear una cadena "YYYY-01-01" y sumar los días menos 1
mutate(
  date = ymd(paste0(YEAR, "-01-01")) + days(DAY - 1),
  month = month(date, label = TRUE, abbr = FALSE)
)
```

La generación de series anuales contiene 35 observaciones y 6 variables.

```
# Agregación diaria -> anual
clima_anual <- clima_diario |>
  group_by(Year = YEAR) |>
  summarise(
    tmean = mean(T2M, na.rm = TRUE),
    tmin = mean(T2M_MIN, na.rm = TRUE),
    tmax = mean(T2M_MAX, na.rm = TRUE),
    precip = sum(`PRECTOTCORR (mm/dia)`, na.rm = TRUE),
    rad = mean(`SFC_SW_DWN (MJ/m^2/day)`, na.rm = TRUE),
    .groups = "drop")
```

Unión entre tablas

Cómo último paso se unió la base *clima_anual* con la base *lamina_agua* a partir de la columna **Year**. Para ello, debemos renombrar la columna Anio por Year, luego se generó la fusión. Como resultado tenemos un nuevo objeto que contiene 12 observaciones y 8 variables.

```
# Renombrar columna 'Anio' para que coincida con YEAR
lamina_agua <- lamina_agua |>
  rename(Year = Anio)

# Unir ambas por el año
data_union <- left_join(lamina_agua, clima_anual, by = "Year")
```

Análisis exploratorio de datos (EDA)

- Estadística descriptiva anual:

El estudio cubre un periodo de 35 años desde 1990 hasta 2024. Por lo que se puede analizar tendencias climáticas a largo plazo. Como primera aproximación, se aplicó un resumen estadístico de las variables climáticas para entender su comportamiento generalizado

```
#resumen estadístico de los datos de clima anual
summary(clima_anual)
```

La *variable temperatura* muestra que la dispersión es mayor en la temperatura media y máxima, lo que indica una mayor variabilidad en los años más cálidos. La diferencia entre el año más frío y el más cálido es de 2.39 °C en promedio, siendo un valor considerable con una tendencia más cálida a lo largo del tiempo.

La *variable precipitación* muestra que el valor medio es de 1495 mm/año con una gran dispersión que arroja valores mínimos de 543.6 mm y máximo de 2113.1 mm, lo que indica que hay años muy secos y años muy húmedos que puede deberse al fenómeno ENSO. La *variable radiación* muestra menor variabilidad entre los años con un rango de 13.92 MJ/m² a 17.38 MJ/m², y su valor medio es casi idéntico a su mediana.

-Series de tiempo anual y tendencia lineal:

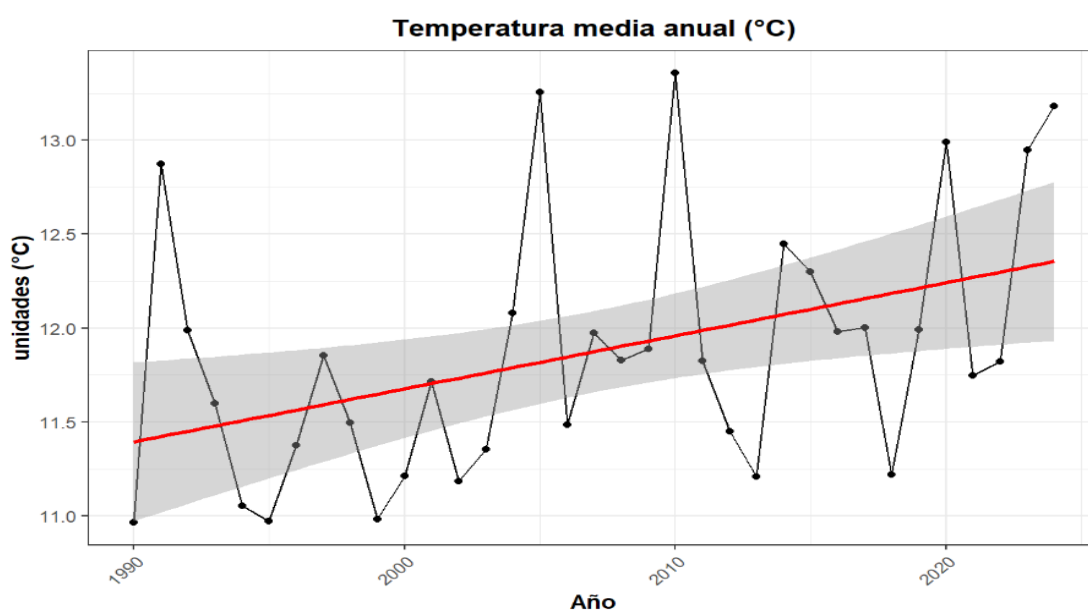
Para entender el comportamiento de cada variable en el tiempo se realizó un análisis multitemporal anual más detallado con líneas de tendencia, el cual se muestra a continuación:

La temperatura media anual (tmean): El comportamiento de la temperatura media anual se caracteriza por una fuerte variabilidad de año a año (fluctuaciones), pero con una tendencia clara y significativa de calentamiento a largo plazo en el periodo de 1990 a 2020s.

```
# Serie temporal anual: tmean
ggplot(clima_anual, aes(x = Year, y = tmean)) +
  geom_line() +
  geom_point() +
  geom_smooth(method = "lm", color = "red", se = TRUE) + # línea de regresión +
  labs(title = "Temperatura media anual (°C)",
       caption = "NASA POWER / MERRA-2",
       x = "Año",
       y = "unidades (°C)") +
  theme_bw() +
  theme(
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1),
    plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 13, face = "bold"),
    plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, size = 10),
    axis.title.x = element_text(face = "bold"),
    axis.title.y = element_text(face = "bold"))
```

Figura 22.

Temperatura media anual

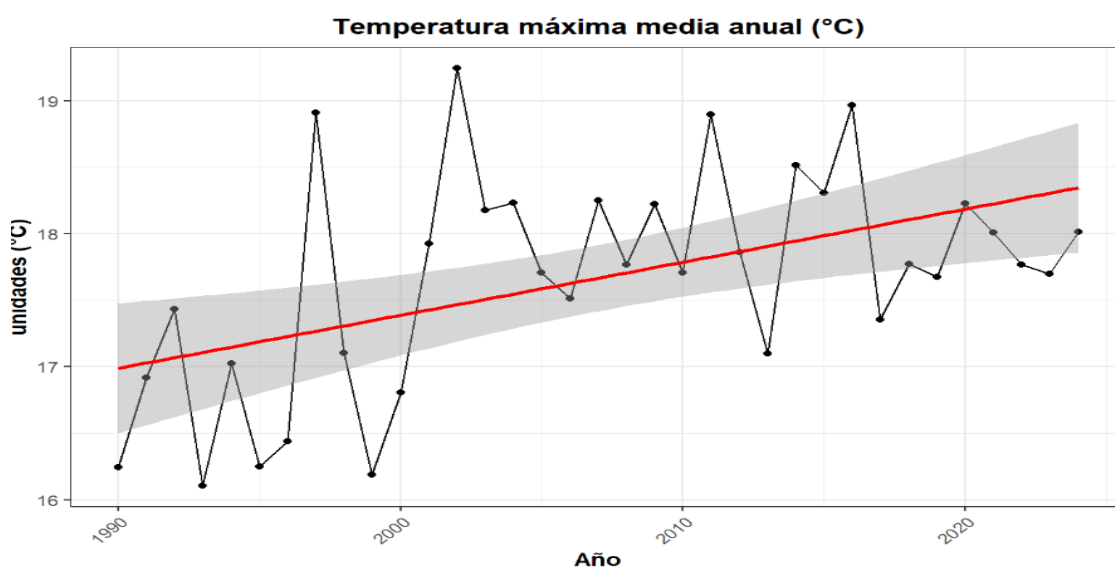


La temperatura media máxima (tmax): Al igual que con la temperatura mínima, la línea de tendencia (roja) muestra un claro y gradual aumento en la temperatura máxima media anual a lo largo del periodo. La temperatura máxima es extremadamente volátil, con grandes fluctuaciones de un año a otro. En los años más recientes (después de 2016), los picos se han mantenido cerca o por encima de la tendencia, aunque también se han registrado años con valores notablemente más bajos.

```
# Serie temporal anual: tmax
ggplot(clima_anual, aes(x = Year, y = tmax)) +
  geom_line() +
  geom_point() +
  geom_smooth(method = "lm", color = "red", se = TRUE) + # línea de regresión +
  labs(title = "Temperatura máxima media anual (°C)",
       caption = "NASA POWER / MERRA-2",
       x = "Año",
       y = "unidades (°C)") +
  theme_bw() +
  theme(
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1),
    plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 13, face = "bold"),
    plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, size = 10),
    axis.title.x = element_text(face = "bold"),
    axis.title.y = element_text(face = "bold"))
```

Figura 23.

Temperatura máxima media anual

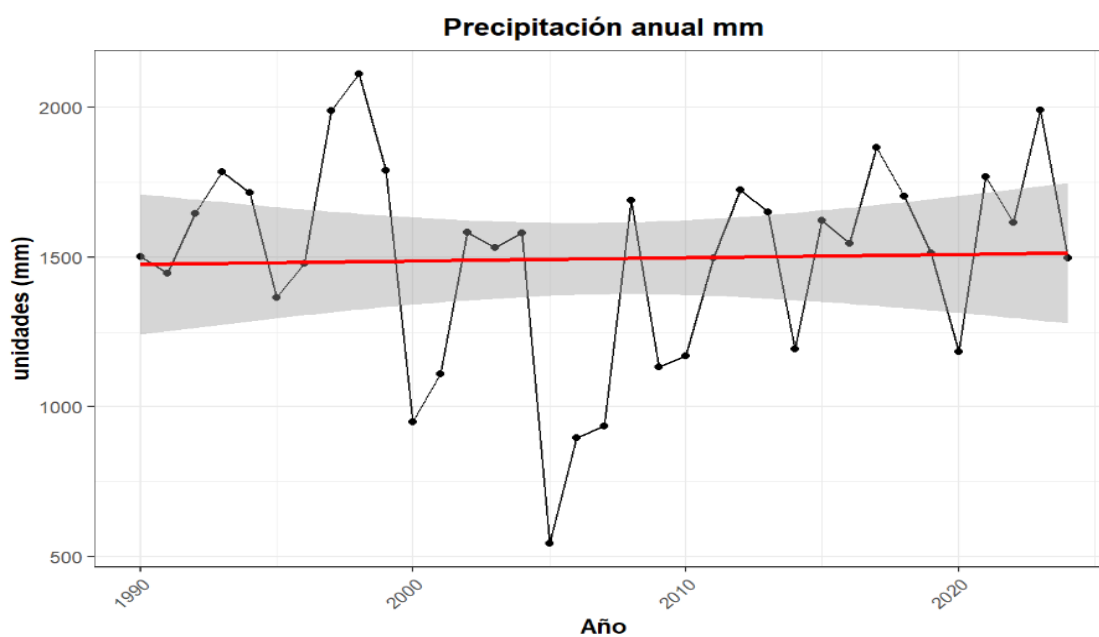


Precipitación anual (precip): A diferencia de los gráficos de temperatura, la línea de tendencia (roja) de la precipitación es prácticamente plana y horizontal. El valor medio de la precipitación se mantiene estable alrededor de 1500 mm/año durante todo el periodo analizado. Esto indica que no hay una tendencia significativa de aumento o disminución de la precipitación total anual a lo largo de las décadas. Lo que se traduce a que la cantidad total de lluvia en promedio no ha cambiado, pero la frecuencia y la intensidad de los años climáticos extremos (muy secos o muy húmedos) son una característica dominante del registro por efecto del Fenómeno de El Niño y la Niña.

```
# Serie temporal anual: precipitación
ggplot(clima_anual, aes(x = Year, y = precip)) +
  geom_line() +
  geom_point() +
  geom_smooth(method = "lm", color = "red", se = TRUE) + # línea de regresión +
  labs(title = "Precipitación anual mm",
       caption = "NASA POWER / MERRA-2",
       x = "Año",
       y = "unidades (mm)") +
  theme_bw() +
  theme(
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1),
    plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 13, face = "bold"),
    plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, size = 10),
    axis.title.x = element_text(face = "bold"),
    axis.title.y = element_text(face = "bold"))
```

Figura 24.

Precipitación anual

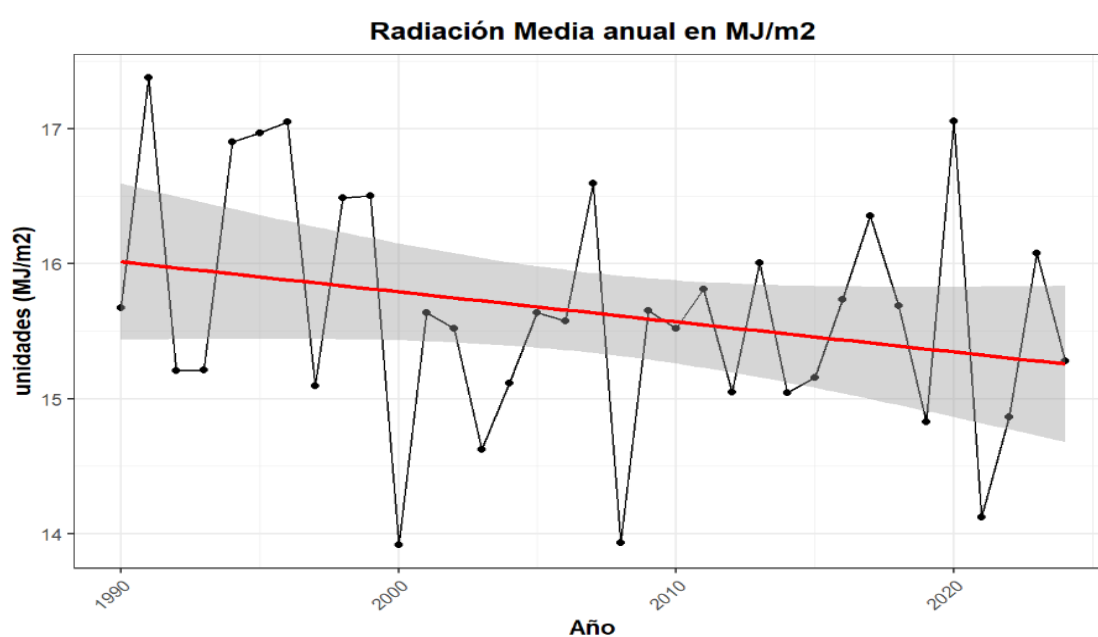


Radiación (rad): La radiación tiene una tendencia descendente a lo largo del periodo de estudio. A principios de los 90, la tendencia de la radiación se situaba en torno a los 16.0 MJ/m² y hacia el periodo final tuvo un ligero descenso a 15.3 MJ/m². Esto indica que, en general, la radiación solar media anual ha disminuido ligeramente durante estas décadas, pero el factor dominante en este registro es la fuerte inestabilidad año tras año.

```
ggplot(clima_anual, aes(x = Year, y = rad)) +  
  geom_line() +  
  geom_point() +  
  geom_smooth(method = "lm", color = "red", se = TRUE) + # línea de regresión +  
  labs(title = "Radiación Media anual en MJ/m2",  
        caption = "NASA POWER / MERRA-2",  
        x = "Año",  
        y = "unidades (MJ/m2)") +  
  theme_bw() +  
  theme(  
    axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1),  
    plot.title = element_text(hjust = 0.5, size = 13, face = "bold"),  
    plot.subtitle = element_text(hjust = 0.5, size = 10),  
    axis.title.x = element_text(face = "bold"),  
    axis.title.y = element_text(face = "bold"))
```

Figura 25.

Radiación media anual



Como resumen tenemos que el clima en el periodo de estudio se caracteriza por el calentamiento y los extremos. Las temperaturas están subiendo de manera constante (Calentamiento Global), mientras que la precipitación es neutral en el total, pero con una mayor oscilación entre la temporada húmeda y seca. En esencia, la región está experimentando un clima más cálido en general, con un régimen hidrológico cada vez más inestable y extremo.

-Tendencia climática con Mann-Kendall y Sen (Sen's slope):

El **test de Mann-Kendall** es una prueba no paramétrica utilizada para determinar si existe una tendencia monótona (constante hacia arriba o hacia abajo) estadísticamente significativa en una serie de datos a lo largo del tiempo. Para evaluar el test se considera:

- Hipótesis Nula (H_0): No hay tendencia monótona significativa. Los datos son independientes y están distribuidos idénticamente.
- Hipótesis Alternativa (H_a): Existe una tendencia monótona significativa (creciente o decreciente).

El test produce un valor p-value, si el p-value es menor que el nivel de significancia (típicamente $\alpha=0.05$): Se rechaza H_0 . Se concluye que existe una tendencia monótona estadísticamente significativa.

El **test de Sen's slope** es una técnica no paramétrica utilizada para cuantificar la magnitud de una tendencia lineal que ha sido identificada por el test de Mann–Kendall.

Para evaluar el test se considera el signo del estadístico Z indica la dirección:

- $Z>0$: Tendencia creciente (hacia arriba).
- $Z<0$: Tendencia decreciente (hacia abajo).

Donde se aplican estas métricas para determinar tendencia y magnitud de la temperatura media anual.

```
# Mann-Kendall en serie anual
mk_tmean <- MannKendall(clima_anual$tmean)

# Sen's slope
ss_tmean <- sens.slope(clima_anual$tmean)

mk_tmean
```

El *test de Mann-Kendall* nos muestra el valor de τ positivo que indica una tendencia creciente (calentamiento). El p -value es menor que el umbral de significancia de 0.05 por lo cual, se rechaza la hipótesis nula (no hay tendencia). La tendencia de calentamiento observada es estadísticamente significativa.

El *test de Sen's slope* muestra el valor de Z positivo que denota una tendencia creciente y el valor de S (Sen's slope) de 0.02925571 que indica la tasa de cambio de la temperatura media anual con un intervalo de confianza al 95% de (0.007780822 - 0.049500799). Existe una alta confianza en que la verdadera tasa de calentamiento se encuentra dentro de ese rango. Se puede concluir que la Temperatura Media Anual está aumentando a una tasa de aproximadamente 0.029°C por año.

Tendencia y magnitud de la precipitación anual

```
# Mann-Kendall en serie anual
mk_precip <- MannKendall(clima_anual$precip)

# Sen's slope
ss_precip <- sens.slope(clima_anual$precip)

mk_precip
```

El *test de Mann-Kendall* nos muestra el valor de *tau* cercano a 0 que indica una tendencia creciente muy débil. El *p-value* es mucho mayor que el umbral de significancia de 0.05 por lo cual, NO se rechaza la hipótesis nula. La tendencia observada NO es estadísticamente significativa.

El *test de Sen's slope* muestra el valor de Z es muy pequeño y positivo que denota tendencia creciente muy débil que no es estadísticamente significativa. El valor de S (Sen's slope) de 2.19 que indica la tasa de cambio de la precipitación anual con un intervalo de confianza al 95% de (-8.0672 - 11.8320). Existe una alta confianza en que el verdadero valor con la tasa de cambio de la precipitación caiga en ese rango.

Se puede concluir que No hay una tendencia significativa en la precipitación anual total durante el periodo 1990-2024. La ligera tendencia creciente de 2.19 mm por año no es lo suficientemente fuerte o consistente para ser considerada un cambio real a largo plazo.

-Correlación entre el cambio de coberturas lacustre y clima local

La matriz de correlación muestra la relación lineal entre las variables climáticas anuales (tmean, tmin, tmax, precip, rad) y el área de las láminas de agua en hectáreas (lamina_ha).

```
# Seleccionas solo las variables numéricas de clima y hectáreas
vars_clima <- data_union |>
  dplyr::select(tmean, tmin, tmax, precip, rad, lamina_ha)

# Calcular matriz de correlación
cor_matrix <- cor(vars_clima, use = "complete.obs")

# Ver resultado
cor_matrix
```

La matriz de correlación revela que ninguna variable climática individual tiene una correlación lineal fuerte con el área de las láminas de agua.

- La Precipitación y las Temperaturas son las variables más relevantes, pero solo muestran una correlación débil ($|r| \approx 0.20$ a 0.23).
- La precipitación se relaciona positivamente (más lluvia \rightarrow más agua).
- Las temperaturas se relacionan negativamente (más calor \rightarrow menos agua).
- La Radiación tiene una relación insignificante.

Esto sugiere que el área de las lagunas está probablemente influenciada por una combinación de factores (precipitación, temperaturas que afectan la evaporación, características del suelo/cuenca, uso del agua y cambios estacionales) y que su variación no está fuertemente explicada por el clima anual de forma lineal.

Dado que las correlaciones lineales fueron débiles se debería considerar:

Modelos no Lineales que capturen relaciones más complejas entre las variables (ej. máquinas de vectores de soporte o redes neuronales).

Relación entre variables climáticas y superficie de agua

El análisis climático de las lagunas de Colta, Atillo y Ozogoche, basado en la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (MAE, 2017), revela tendencias significativas en temperatura y precipitación en la provincia de Chimborazo. Entre 1980 y 2020, la temperatura media anual en la región ha mostrado un incremento sostenido, pasando de aproximadamente 9,8 °C en 1980 a 11,0 °C en 2020, lo que representa un aumento de 1,2 °C en cuatro décadas. Este incremento es consistente con las proyecciones del IPCC (2021) para los Andes tropicales, donde se espera que la temperatura siga aumentando a razón de 0,15–0,2 °C por década.

En cuanto a la precipitación anual, los registros muestran una variabilidad interanual considerable, con algunos periodos de sequía y otros con lluvias intensas asociadas a eventos ENSO. No obstante, la tendencia general indica una ligera disminución de hasta un 15 % en la precipitación acumulada desde 1980. Esta reducción relativa puede afectar directamente la recarga hídrica de los espejos de agua en las lagunas y sistemas lacustres estudiados.

4. Conclusiones

El análisis multitemporal mediante el índice MNDWI permitió cuantificar las variaciones en la superficie de los espejos de agua de las lagunas de Colta, Atillo y Ozogoche durante el período 1991–2024. Los resultados evidencian patrones contrastantes: una reducción significativa en Colta (–35,4 %), un leve incremento en Atillo (+4,3 %) y una pérdida moderada en Ozogoche (–10,3 %). Estas variaciones reflejan la influencia combinada del cambio climático y de las actividades antrópicas locales sobre la dinámica hídrica de los sistemas lacustres altoandinos.

Al combinar el análisis multitemporal de las imágenes Landsat con los datos climáticos extraídos de los registros de reanálisis MERRA-2, se pudo demostrar una conexión directa entre la variabilidad del clima y las oscilaciones en la extensión de los cuerpos acuáticos estudiados. El

empleo del índice MNDWI permitió trazar con exactitud los límites de las áreas lacustres, lo que evidencia su utilidad como instrumento para seguir el estado de los ecosistemas acuáticos en regiones altoandinas.

Estos hallazgos coinciden con investigaciones Martín et al. (2020) anteriores que indican la vulnerabilidad de los ecosistemas lacustres andinos ante las variaciones en las condiciones climáticas. Esto enfatiza la importancia de reforzar los programas de seguimiento ambiental a través de bases de datos globales sobre el clima y sensores remotos.

Se han detectado, entre las limitaciones más importantes de la investigación, la resolución temporal de las imágenes satelitales y la existencia de registros climáticos homogéneos para cada estación durante el periodo analizado. No obstante, la metodología usada revela que el análisis climático y la teledetección se combinan para presentar una forma sólida de describir cómo los ecosistemas acuáticos evolucionan ante situaciones de cambio climático.

Por último, se aconseja extender la investigación hacia un examen hidrológico integral que incluya factores como el balance hídrico, los caudales de aporte y las propiedades geomorfológicas de las cuencas. Esto permitiría crear modelos predictivos acerca de cómo reaccionarán lagos y lagunas ante contextos futuros de variabilidad climática.

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento hacia la Universidad Politécnica Salesiana, por ofrecerme la oportunidad de estudiar la Maestría en Recursos Hídricos con especialización en Gestión e Ingeniería de Agua Potable y Saneamiento (RPC-SE-03-NO.041-2020), así como por el respaldo institucional que permitió llevar a cabo esta investigación.

Agradezco al Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) y al Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador, por proveerme la información cartográfica y técnica que se necesitaba para el análisis a través de la teledetección, esencial para realizar este estudio.

Durante el proceso de elaboración del artículo científico, agradezco profundamente al ingeniero Charles Jim Cachipundo Ulcuango, mi director de tesis, por su asesoría, asistencia y apoyo incondicional.

Por último, deseo exponer mi agradecimiento a todas las instituciones, colegas y personas que han colaborado con la realización de los objetivos de esta investigación y que tienen el compromiso de manejar los recursos hídricos en Ecuador de manera responsable y sostenible.

Referencias

- Calderón Hernández, J.J. y Mora Pérez, W., 2022. Modelado por teledetección entre 2013 y 2021 del retroceso glaciar como consecuencia del cambio climático en la Cordillera Vilcabamba. [en línea] Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/100467/Calderon_HJJ-Mora_PW-SD.pdf?sequence=4&isAllowed=y [Consultado el 23 Sep. 2025].
- Delgado Yáñez, M.S., Martínez-Fresneda Mestre, M. y Villaruel, A., 2019. Valoración económica del servicio limnológico de la laguna Magdalena-Atillo, Riobamba-Ecuador. Enfoque UTE, 10(2), pp.1–16. [en línea] Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5722/572262062001/html/> [Consultado el 23 Sep. 2025].
- Escobar-Arrieta, S., Albuja, A. y Andueza-Leal, F.D., 2021. Calidad fisicoquímica del agua de la laguna Colta. Chimborazo. Ecuador. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 11(1), pp.76–81. doi:10.29166/revfig.v11i1.3135.
- García Castillo, L.N. y Quiroz Carrión, E.N., 2023. Consecuencias de la expansión agrícola en la Parroquia Santiago de Quito, Cantón Colta. [en línea]. <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/12222/1/UNACH-EC-FCEHT-PHCS-002-2024.pdf>.
- Gómez Fernández, D. y Salas López, R., 2022. Análisis de la dinámica multitemporal del espejo de agua de dos lagos amazónicos durante 2024-2020, utilizando imágenes de SAR en GEE y técnicas de regresión. [en línea] Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. <https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/2633/G%c3%b3mez%200Fern%c3%a1ndez%20Darwin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. [en línea] Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- Jiménez Torres, D.A., 2022. Factores fisiológicos de rendimiento en los corredores de fondo. [Trabajo de titulación modalidad Artículo Profesional de alto nivel previo a la obtención del título de Maestría en Entrenamiento Deportivo]. UCE.

- Mullo Cepeda, J.V. y Álvarez Lema, F.A., 2021. Guía de aves de la laguna de Colta, Provincia de Chimborazo. [en línea] Universidad Técnica de Cotopaxi. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7807>.
- Pérez, J.I., Nardini, A.G. y Galindo, A.A., 2018. Comparative analysis of water quality indices applied to the Ranchería river, La Guajira-Colombia. *Información Tecnológica*, 29(3), pp.47–58. doi:10.4067/S0718-07642018000300047.
- Quishpe, C. y Lema, J., 2022. Evaluación del estado trófico de las lagunas de Ozogoché mediante teledetección y análisis limnológicos. Tesis de grado. Quito: Universidad Central del Ecuador. [en línea]. <https://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/28174>.
- Toaquiza Lluilema, J.B., 2021. Estabilidad de los agregados del suelo del sistema lacustre Atillo, parroquia Cebadas, provincia de Chimborazo. [en línea] Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/14774/1/236T0534.pdf>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Timm, O.E., Condom, T., Salzmann, N. y Sicart, J.-E., 2018. Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, pp.195–213. doi:10.1016/j.earscirev.2017.09.019.