

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
AMBIENTAL



TESIS

**Parámetros de Calidad de Agua con Imágenes Satelitales Landsat 8 de la
laguna Huayllay - distrito de Luricocha – Huanta, 2025**

PARA OBTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero en Gestión Ambiental

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Ciencias Naturales

Presentado por:

Tenorio Palomino, Julio

Asesor:

Dr. Santos Clemente, Herrera Diaz

HUANTA – PERÚ 2025

NOMBRE DEL TRABAJO

TESIS 2025.pdf

AUTOR

SANTOS CLEMENTE HERRERA DIAZ

RECUENTO DE PALABRAS

19583 Words

RECUENTO DE CARACTERES

115428 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

103 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

7.5MB

FECHA DE ENTREGA

Dec 15, 2025 11:46 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Dec 15, 2025 11:48 PM GMT-5**● 6% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 5% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Fuentes excluidas manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)
- Bloques de texto excluidos manualmente

**“PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA CON IMÁGENES
SATELITALES LANDSAT 8 DE LA LAGUNA HUAYLLAY – DISTRITO
DE LURICOCHA – HUANTA, 2025”**

Presentado por:

Bach. Julio, Tenorio Palomino

Asesor:

Dr. Santos Clemente, Herrera Diaz



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Creada por Ley N° 29658

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL

"AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO EN GESTIÓN AMBIENTAL**

En ciudad de Luricocha, en el auditorio del pabellón de la E.P de IGA – campus universitario de Intay de la Universidad Nacional Autónoma de Huanta, ubicado en la autopista Carlos Ch. Hiraoka, desvió a Ccollana, a los 19 días del mes de diciembre de 2025, siendo las 16:00 horas se dio inicio al acto académico de sustentación de tesis con la presencia de los miembros del jurado calificador:

Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz
Dr. Jorge Luis Lozano Rodriguez
Dr. Santos Clemente Herrera Diaz

Presidente
Miembro titular 2
Miembro titular 3

Acto seguido se procedió a dar lectura la Resolución de Vicepresidencia Académica N° 120-2025-CO-UNAH, en la que señala fecha, hora y designación de jurado evaluador para la sustentación de tesis del **Bach. Julio Tenorio Palomino**, con la tesis titulada: "**Parámetros de calidad de agua con imágenes satelitales landsat 8 de la laguna Huayllay - Distrito de Luricocha - Huanta, 2025**", asesorado por el Dr. Santos Clemente Herrera Díaz, para optar el Título profesional de: Ingeniero en Gestión Ambiental.

Observaciones:

.....
.....
.....

Terminada la sustentación se procedió a la formulación de preguntas por los miembros del jurado evaluador, los mismos que fueron defendidos y absueltos por el tesista. Acto seguido se procedió a calificar con el resultado siguiente:

Aprobado Regular ()
Aprobado Bueno (X)
Aprobado Muy Buenos ()
Aprobado Excelente ()

Con la calificación de Quince (15)

Siendo las 17:31 se da por finalizada el acto académico de sustentación de tesis pasando a firmar los miembros del jurado evaluador.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz
DOCENTE COORDINADORA PRINCIPAL

Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz
Presidente



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dr. Jorge Luis Lozano Rodriguez
DOCENTE COORDINADOR ASOCIADO

Dr. Jorge Luis Lozano Rodriguez
Miembro titular 2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dr. Santos Clemente Herrera Diaz
DOCENTE COORDINADOR PRINCIPAL

Dr. Santos Clemente Herrera Diaz
Miembro titular 3

DEDICTORIA

Este trabajo de investigación está dedicado, con todo mi amor y gratitud, a mis padres, quienes nunca dejaron de brindarme su apoyo incondicional; su esfuerzo, sacrificio y presencia constante han sido mi mayor motivación desde el inicio de mi vida universitaria hasta la culminación de esta meta tan anhelada.

A mis hermanos, sobrinos, familiares y a todas las personas que me acompañaron con su cariño, consejos y aliento inquebrantable, gracias por creer en mí y por ser parte esencial de este sueño hecho realidad.

AGRADECIMIENTO

A Dios, fuente de vida y fortaleza, por permitirme llegar hasta este momento, por iluminar mi camino y acompañarme en cada paso de este recorrido; sin su guía, nada de esto habría sido posible.

Mi más profundo agradecimiento al Doctor Santos Clemente Herrera Díaz, por su valiosa orientación, tiempo y dedicación brindada durante el desarrollo de esta tesis; su asesoría académica fue fundamental para la culminación de este trabajo.

A mis padres, hermanos, sobrinos, familiares y amigos, por su apoyo constante, su confianza inquebrantable y por estar siempre pendientes de mi persona, brindándome aliento en los momentos más difíciles.

Con un cariño especial, expreso mi gratitud a dos seres maravillosos que hoy me acompañan desde el cielo, mi querida hermana Betsi y mi cuñado Amílcar, quienes desde el inicio creyeron en mi capacidad y me impulsaron a seguir adelante. Su recuerdo vive en cada logro alcanzado.

Finalmente, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de Huanta, por haberme acogido en sus aulas y contribuir a mi formación profesional. A mis docentes, por compartir sus conocimientos y experiencias con entrega y compromiso.

A todos los que, de una u otra forma, creyeron en mí y me brindaron su apoyo en este camino, gracias infinitas.

JULIO TENORIO PALOMINO

RESUMEN

La investigación evaluó la calidad ambiental de la laguna Huayllay mediante teledetección, como alternativa complementaria al monitoreo convencional. El objetivo fue estimar temperatura superficial terrestre (LST-°C), sólidos totales suspendidos (TSS) y clorofila-a (Chl-a), empleando imágenes Landsat 8 con corrección radiométrica y atmosférica, para generar datos espacialmente explícitos que faciliten la vigilancia limnológica en ecosistemas de difícil acceso. Se aplicó un enfoque cuantitativo, descriptivo y no experimental, con diseño longitudinal y análisis raster algebra en ArcGIS, ENVI 5.3 y RStudio, desarrollando tres procedimientos: conversión de valores digitales (DN) a radiancia y reflectancia TOA; modelamiento térmico LST integrando NDVI y emisividad; y modelos de regresión lineal múltiple con bandas visibles-NIR/SWIR (B3, B4, B5; B10-B11) para Sólidos Totales Suspendidos y Clorofila-a. Los hallazgos indicaron variabilidad térmica superficial a lo largo del periodo abril - agosto 2025 y valores moderados de Sólidos Totales Suspendidos, con turbidez estable durante el periodo abril - agosto, mientras que Clorofila-a mostró categorías eutróficas a hipereutróficas predominantes en zonas periféricas, evidenciando gradientes espaciales de productividad algal y nutrientes periféricos. La teledetección permitió construir estimaciones robustas para parámetros bioópticos y de turbidez ($R^2 > 0,75$ en estudios referenciales), aunque con limitaciones inherentes para variables no activas sin validación de campo. Se concluye que Landsat es un insumo científico consistente, reproducible y económico para vigilancia ambiental preliminar, útil para priorización de áreas con estrés limnológico y apoyo a la gestión ambiental descentralizada. Se recomienda estandarizar etapas de preprocesamiento, consolidar calibración local con firmas espectrales y mantener monitoreo bimensual/trimestral, bajo principios de reproducibilidad y acceso libre.

Palabras claves: Laguna, Calidad de agua, Imágenes Landsat 8, Teledetección.

ABSTRACT

The research evaluated the environmental quality of the Huayllay lagoon using remote sensing as a complementary alternative to conventional monitoring. The objective was to estimate land surface temperature (LST-°C), total suspended solids (TSS), and chlorophyll-a (Chl-a) using Landsat 8 images with radiometric and atmospheric correction to generate spatially explicit data that facilitate limnological monitoring in hard-to-reach ecosystems. A quantitative, descriptive, and non-experimental approach was applied, with a longitudinal design and raster algebra analysis in ArcGIS, ENVI 5.3, and RStudio, developing three procedures: conversion of digital values (DN) to TOA radiance and reflectance; LST thermal modeling integrating NDVI and emissivity; and multiple linear regression models with visible-NIR/SWIR bands (B3, B4, B5; B10-B11) for Total Suspended Solids and Chlorophyll-a. The findings indicated surface thermal variability throughout the period April-August 2025 and moderate values of Total Suspended Solids, with stable turbidity during the period April-August, while Chlorophyll-a showed predominant eutrophic to hypereutrophic categories in peripheral areas, evidencing spatial gradients of algal productivity and peripheral nutrients. Remote sensing allowed for the construction of robust estimates for bio-optical and turbidity parameters ($R^2 > 0.75$ in reference studies), although with inherent limitations for non-active variables without field validation. It is concluded that Landsat is a consistent, reproducible, and economical scientific input for preliminary environmental monitoring, useful for prioritizing areas with limnological stress and supporting decentralized environmental management. It is recommended to standardize preprocessing stages, consolidate local calibration with spectral signatures, and maintain bimonthly/quarterly monitoring, under principles of reproducibility and open access.

Keywords: Lagoon, Water quality, Landsat 8 images, Remote sensing.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Descripción y formulación del problema	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Justificación e importancia.....	5
1.4. Variables	6
II. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes	7
1.2. Bases teóricas	14
1.3. Definición de términos.....	23
III. METODOLOGÍA	24
3.1. Tipo y nivel de investigación	24
3.2. Ámbito temporal y espacial	24
3.3. Población y muestra	24
3.4. Instrumentos.....	25
3.5. Procedimientos.....	25
3.6. Análisis de datos	37
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. Estimación de los parámetros de calidad del agua a partir de imágenes landsat 8.....	38
4.2. Determinar los valores de temperatura superficial en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.....	38
4.3. Determinar los valores de solidos totales suspendidos en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.	47
4.4. Determinar los valores de clorofila-a en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.....	55
4.3. DISCUSIÓN	63
V. CONCLUSIONES	65
VI. RECOMENDACIONES.....	66
II. REFERENCIAS	68
VIII. ANEXOS.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Distribución de las bandas en OLI y TIRS.</i>	22
Tabla 2 <i>Características técnicas de la imagen satelital Landsat 8 (nivel 1, escena LITP, 2025).</i>	29
Tabla 3 <i>Fechas de adquisición de imágenes satelitales Landsat 8 (2025)</i>	31
Tabla 4 <i>Rangos de temperatura del agua en lagunas naturales según investigaciones y normativa peruana.</i>	32
Tabla 5 <i>Fechas de adquisición de imágenes satelitales Landsat 8 (2025).</i>	34
Tabla 6 <i>Rangos de concentración de sólidos totales suspendidos (TSS) en agua de lagunas</i>	34
Tabla 7 <i>Fechas de adquisición de imágenes satelitales Landsat 8 (2025).</i>	36
Tabla 8 <i>Rangos de concentración de clorofila-a en lagunas según estado trófico.</i>	36
Tabla 9 <i>Resultados los Monitoreos mediante las Imágenes Landsat 8.</i>	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Espectro Electromagnético</i>	18
Figura 2 <i>Reflectancia en vegetación e interpretación sensorial en Teledetección</i>	19
Figura 3 <i>Curvas de absorción del agua y reflectividad de la vegetación</i>	20
Figura 4 <i>Misión Cronológica Landsat</i>	21
Figura 5 <i>Mapa de ubicación de la laguna Huayllay</i>	26
Figura 6 <i>Descarga de imagen satelital desde el servidor USGS Earth Explorer (2025)</i>	27
Figura 7 <i>Localizamos el área de estudio ingresando el archivo KMZ</i>	27
Figura 8 <i>Definimos los criterios o parámetros de Búsqueda (baja nubosidad y fechas apropiadas)</i>	28
Figura 9 <i>Definimos los criterios o parámetros para obtener resultados esperados y satisfactorios</i>	28
Figura 10 <i>Resultados en el servidor USGS (Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos)</i>	29
Figura 11 <i>Diagrama de flujo para el cálculo de Temperatura Superficial Terrestre (LST-°C) a partir de imágenes Landsat 8 (2025)</i>	33
Figura 12 <i>Diagrama de flujo para el cálculo de Sólidos Totales Suspendidos (TSS) a partir de imágenes Landsat 8 (2025)</i>	35
Figura 13 <i>Diagrama de flujo para el cálculo de Clorofila-a a partir de imágenes Landsat 8 (2025)</i>	37
Figura 14 <i>Monitoreo satelital de temperatura de la laguna de Huayllay – abril 2025</i>	39
Figura 15 <i>Temperatura Superficial (LST-°C) en la Laguna Huayllay - abril 2025</i>	39
Figura 16 <i>Monitoreo satelital de temperatura de la laguna de Huayllay, mes de mayo</i>	40
Figura 17 <i>Temperatura Superficial (LST-°C) en la Laguna Huayllay mes de mayo</i>	41
Figura 18 <i>Monitoreo satelital de temperatura de la laguna de Huayllay, mes de junio</i>	42
Figura 19 <i>Temperatura Superficial (LST-°C) en la Laguna Huayllay - junio 2025</i>	42

Figura 20 <i>Monitoreo satelital de temperatura de la laguna de Huayllay, mes de julio</i>	43
Figura 21 <i>Temperatura Superficial (LST-°C) en la Laguna Huayllay - julio 2025</i>	44
Figura 22 <i>Monitoreo satelital de temperatura de la laguna de Huayllay, mes de agosto.</i>	45
Figura 23 <i>Temperatura Superficial (LST-°C) en la Laguna Huayllay - agosto 2025</i>	45
Figura 24 <i>Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de abril.</i>	47
Figura 25 <i>Sólidos totales suspendidos (TSS) en la Laguna Huayllay - abril 2025.</i>	48
Figura 26 <i>Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de mayo.</i>	49
Figura 27 <i>Sólidos totales suspendidos (TSS) en la Laguna Huayllay - mayo 2025.</i>	49
Figura 28 <i>Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de junio.</i>	50
Figura 29 <i>Sólidos totales suspendidos (TSS) en la Laguna Huayllay - junio 2025.</i>	51
Figura 30 <i>Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de julio.</i>	52
Figura 31 <i>Sólidos totales suspendidos (TSS) en la Laguna Huayllay - julio 2025.</i>	52
Figura 32 <i>Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de agosto.</i>	53
Figura 33 <i>Sólidos totales suspendidos (TSS) en la Laguna Huayllay - agosto 2025.</i>	54
Figura 34 <i>Monitoreo satelital de clorofila-a de la laguna de Huayllay, mes de abril.</i>	55
Figura 35 <i>Clorofila-a en la Laguna Huayllay - abril 2025.</i>	56
Figura 36 <i>Monitoreo satelital de clorofila-a de la laguna de Huayllay, mes de mayo.</i>	57
Figura 37 <i>Clorofila-a en la Laguna Huayllay - mayo 2025.</i>	57

Figura 38 Monitoreo satelital de clorofila-a de la laguna de Huayllay, mes de junio.....	58
Figura 39 Clorofila-a en la Laguna Huayllay - junio 2025.....	59
Figura 40 Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de julio.....	60
Figura 41 Clorofila-a en la Laguna Huayllay - julio 2025.....	60
Figura 42 Monitoreo satelital de clorofila-a de la laguna de Huayllay, mes de agosto.....	61
Figura 43 Clorofila-a en la Laguna Huayllay - agosto 2025.....	62

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua en ecosistemas altoandinos constituye un eje crítico para la conservación ambiental, la salud pública y la gestión sostenible de recursos hídricos, especialmente en escenarios donde el monitoreo in situ es limitado por barreras geográficas, temporales y económicas (Vörösmarty et al., 2015; United Nations, 2018). En este marco, la teledetección multiespectral y térmica ha emergido como una alternativa científica con potencial para estimar parámetros fisicoquímicos y bioópticos de cuerpos de agua continentales mediante sensores satelitales, permitiendo análisis espaciales y temporales replicables y escalables (Lu et al., 2004; Pizani et al., 2020).

El programa Landsat, a través de sus sensores OLI/TIRS, ha facilitado la generación de datos calibrados de reflectancia y radiancia en el techo de la atmósfera (TOA) para la estimación de variables ópticamente activas y no activas, incluyendo sólidos suspendidos totales (SST), temperatura superficial (LST o LST-Water) y clorofila-a (Chl-a), todos ellos indicadores limnológicos fundamentales en la evaluación de procesos de turbidez, sedimentación, productividad primaria y eutrofización en aguas dulces (Martínez, 2017; Martínez, I., 2017; Pereira-Sandoval et al., 2016). Estudios previos han demostrado que combinaciones de bandas visibles (B3, B4, B5) —y en particular la banda térmica 10— permiten derivar modelos de regresión lineal múltiple robustos ($R^2 > 0,75$) para clorofila-a y sólidos suspendidos, aunque con limitaciones para parámetros no activos como temperatura y pH cuando no se ajusta el ángulo solar o la emisividad, resaltando la necesidad de calibración radiométrica y corrección atmosférica antes de su uso analítico (Caballero et al., 2022; Orbegoso & Blas, 2023).

En el Perú, si bien existen estándares normativos como los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA) aprobados por el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2017), persiste una brecha metodológica en la integración de monitoreo ambiental sistemático con tecnologías geoespaciales de acceso libre y procesamiento reproducible. Particularmente, la laguna Huayllay, ubicada a 4230 m.s.n.m. en el distrito de Luricocha – Huanta, representa un ecosistema de agua fría, con dinámica propia de microcuencas altoandinas y exposición a impactos antropogénicos asociados a actividades humanas y cambio climático; sin embargo, la literatura nacional evidencia insuficiencia de estudios que operacionalicen el uso

de imágenes Landsat 8 para estimar parámetros limnológicos en este cuerpo hídrico específico durante el año 2025 (Chuquimia, 2021; Diaz & Llave, 2019).

Por lo tanto, el presente estudio se plantea como una investigación aplicada, cuantitativa, descriptiva y no experimental, cuyo propósito es estimar parámetros limnológicos clave mediante flujos de preprocesamiento radiométrico y corrección atmosférica utilizando herramientas de álgebra raster y modelos de regresión lineal múltiple a partir de bandas OLI/TIRS. Se busca generar mapas temáticos que describan la distribución espacial de temperatura superficial, SST y clorofila-a, fortaleciendo a su vez competencias locales en el manejo de tecnologías de teledetección para la vigilancia ambiental de ecosistemas acuáticos altoandinos (Tenorio, 2025).

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema

A nivel global, se ha observado un incremento en el interés por la calidad del agua debido a su relevancia en términos de salud pública, conservación de la biodiversidad y promoción del desarrollo sostenible (United Nations, 2018). Contar con información precisa y reciente sobre la calidad del agua es esencial para tomar decisiones fundamentadas y llevar a cabo políticas eficaces de gestión del agua en todo el mundo (Vörösmarty et al., 2015). En esta perspectiva, el uso de la teledetección espectral mediante satélites representa una valiosa herramienta para realizar un monitoreo eficaz y preciso de cuerpos de agua a gran escala (Lu et al., 2004).

En América Latina y el Caribe, la situación del agua es crítica, con un acceso desigual que afecta principalmente a las comunidades rurales y marginadas. La región, que alberga casi un tercio de los recursos hídricos mundiales, enfrenta desafíos significativos debido a la contaminación, la sobreexplotación y los efectos del cambio climático (FAO, 2024). La teledetección espectral se presenta como una solución prometedora para monitorear y gestionar estos recursos de manera más eficiente.

En el caso de Perú, la situación referente al agua presenta una complejidad aún mayor. Ya que, a pesar de los progresos en cuanto a políticas y regulaciones, el país no está avanzando hacia el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con el agua para el año 2030. Tan solo la mitad de la población cuenta con acceso a un servicio de agua potable gestionado de manera segura, mientras que únicamente el 43% dispone de un servicio de saneamiento gestionado de forma segura (OECD, 2021). La teledetección espectral, por lo tanto, se convierte en una herramienta indispensable para el monitoreo y la gestión de la calidad del agua en cuerpos como las lagunas.

Aunque la relevancia de la laguna Huayllay y la urgencia de resolver los problemas de calidad del agua son evidentes, hasta ahora ha habido una carencia de investigaciones exhaustivas que empleen tecnologías de teledetección espectral, como Landsat 8, para vigilar y analizar la calidad del agua en esta zona específica.

De este modo, es crucial llevar a cabo un estudio que cubra esta falta de información y explore las capacidades de la teledetección espectral utilizando el satélite Landsat 8 para monitorear las propiedades fisicoquímicas del agua. Este estudio se enfocará en evaluar la adecuación y eficiencia de esta tecnología para detectar y examinar aspectos clave de la calidad del agua en la laguna Huayllay, además de identificar potenciales fuentes de contaminación y patrones de cambio.

Este estudio no solo ampliará nuestro conocimiento sobre la calidad del agua en la laguna Huayllay, sino que también ofrecerá datos esenciales para respaldar políticas y medidas de gestión ambiental enfocadas en la preservación y recuperación de este crucial ecosistema acuático.

1.1.1. Interrogante general

- ¿Como estimar parámetros de la calidad de agua de la laguna Huayllay utilizando imágenes satelitales?

1.1.2. Interrogante específico

- ¿Qué valores de temperatura superficial se encontrarán en la Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8?
- ¿Qué valores de solidos totales suspendidos se encontrarán en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8?
- ¿Qué valores de clorofila-a se encontrarán en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8?

1.2. Objetivos

• *Objetivo General*

- Estimar parámetros de la calidad de agua de la laguna Huayllay utilizando imágenes satelitales.

• *Objetivos Específicos*

- Determinar los valores de temperatura superficial en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.
- Determinar los valores de solidos totales suspendidos en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.

- Determinar los valores de clorofila-a en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.

1.3. Justificación e importancia

El uso de la teledetección espectral, usando el satélite Landsat 8, para monitorear las características fisicoquímicas del agua en la laguna Huayllay, es una labor muy relevante en la ingeniería ambiental y el manejo de los recursos hídricos. Este estudio afronta retos prácticos y de metodología, pero también tiene un impacto social significativo, dado que aporta al conocimiento actual sobre la calidad del agua y su gestión sostenible.

Desde una **perspectiva Práctica** monitorear las propiedades químicas y físicas del agua es crucial para salvaguardar la salud de las personas y preservar la biodiversidad de seres que habitan en ella. La teledetección espectral nos permite examinar y obtener información sobre factores clave como la turbidez, temperatura y el nivel de fitoplancton, que son indicadores que revelan el estado del agua (Podest et al., 2018). El empleo de esta herramienta tecnológica para monitorear la laguna Huayllay hizo más fácil identificar contaminantes en sus inicios, valorar el nivel de eutrofización y manejar de manera más eficaz los recursos hídricos.

Desde una **perspectiva Metodológica** el aprovechamiento de la percepción remota espectral, haciendo uso del satélite Landsat 8, para el monitoreo fisicoquímico del agua en la laguna Huayllay, simboliza un esfuerzo de gran valía dentro del campo de la ingeniería ambiental y la administración de recursos acuíferos. Esta investigación no solo confronta retos prácticos y de metodología, sino que también conlleva un impacto social considerable al aportar al saber ya existente sobre la calidad del agua y su manejo sustentable (Portal & Zambrano, 2021).

En cuanto a la **relevancia Social** el agua de la laguna Huayllay es un recurso vital para las comunidades adyacentes, siendo usada para consumo humano, uso agrícola y para proporcionar refugio a especies endémicas. La vigilancia eficaz permite eliminar los problemas de salud pública relacionados con la calidad de los recursos y promover prácticas de uso sostenible entre las comunidades locales. Por

lo tanto, contribuirá significativamente al bienestar social y económico (Perea-Ardila et al., 2021).

Contribución al Conocimiento esta iniciativa busca profundizar nuestro saber científico sobre los procedimientos fisicoquímicos que tienen lugar en las aguas dulces, ofreciendo un esquema que puede usarse para la vigilancia ambiental en distintos lugares. Los datos que se obtienen podrán usarse para perfeccionar los modelos predictivos de la calidad hídrica y para dar información a las normas de administración ambiental locales y nacionales.

1.4. Variables

1.4.1. Variable 1: Imágenes satelitales Landsat 8

Las imágenes satelitales Landsat 8 son escenas raster de observación de la Tierra obtenidas por el satélite Landsat 8 mediante dos instrumentos: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). OLI capta información en bandas del visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) y también una banda pancromática; mientras que TIRS capta información en bandas térmicas para apoyar la estimación de temperatura de la superficie. Estas imágenes se distribuyen típicamente con 15 m de resolución espacial (pancromática), 30 m (multiespectral) y 100 m (térmica), y cubren una franja aproximada de 185 km por escena. (U.S. Geological Survey [USGS], 2013; USGS, s. f.-a).

1.4.2. Variable 2: Parámetros de la calidad del agua

Los parámetros de la calidad del agua son el conjunto de variables o indicadores medibles (en campo y/o laboratorio) que describen el estado de un cuerpo de agua a partir de sus características físicas, químicas y biológicas/microbiológicas; se usan para evaluar si el agua cumple los requisitos de un uso específico (p. ej., consumo humano, riego, recreación o protección de la vida acuática) y para monitorear cambios en el tiempo. (Federal Judicial Center, s. f.; Chapman, 1996).

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. *Antecedentes internacionales*

Con base en lo que investigo Caballero et al. (2022), en su artículo científico titulado "Utilización de los satélites Sentinel-2 y Landsat-8 para la vigilancia de la calidad del agua: Una herramienta de alerta temprana en la laguna costera de Mar Menor", utilizando datos de los satélites Landsat-8 y Sentinel-2, tuvo como objetivo analizar cómo cambió la calidad del agua en el Mar Menor durante la crisis ecológica de 2021. La metodología incluyó campañas de campo en diez puntos de control en marzo, julio, agosto, y noviembre de 2021 para medir las variables de calidad del agua. Los resultados demostraron una alta precisión en la estimación de variables biogeoquímicas por satélite; los errores medios para la clorofila y la turbidez fueron de 0,41 mg/m³; y la FNU para la turbidez fue de 2,04 FNU. El uso combinado de ambos satélites demuestra un rendimiento consistente en el preprocesamiento de datos, lo que indica que las estrategias cartográficas podrían mejorar. Se descubrieron áreas importantes cerca de la desembocadura del río Albuñón donde las concentraciones de clorofila-a superan los 3 mg/m³, lo que sugiere el inicio del proceso de eutrofización. Estos resultados destacan la idoneidad de la metodología para monitorear la calidad del agua en el Mar Menor de manera sistemática y rentable, lo que podría proporcionar herramientas útiles para mejorar las estrategias de seguimiento y establecer sistemas de alerta temprana para prevenir desastres ecológicos en la laguna costera.

También nos da a conocer Pizani et al. (2020), en su artículo titulado "Estimación de la Calidad del Agua de un Embalse a partir de los Sensores Sentinel-2 MSI y Landsat-8 OLI", en donde señala como objetivo comparar el desempeño de estos sensores para producir modelos de regresión múltiple para los parámetros de calidad del agua en un embalse hidroeléctrico en Brasil. La técnica incluye mediciones in situ y análisis de laboratorio de los parámetros físico-químicos del agua. Además, ambos sensores usaron bandas de reflectancia espectral como predictores en modelos de regresión múltiple. Además de seis parámetros ópticamente no activos, se examinaron cuatro parámetros ópticamente activos: clorofila-a, profundidad del disco de Secchi, turbidez y temperatura. Para los parámetros ópticamente activos, los modelos resultantes mostraron coeficientes de

determinación de sólidos (r^2), con valores superiores a 0,75. Para los parámetros ópticamente no activos, r^2 fue tan bajo como 0,03 para la temperatura y valores superiores a 0,8 para el pH y el oxígeno disuelto. Estos resultados indican que tanto los OLI Sentinel-2 MSI como los Landsat-8 pueden ser útiles para estimar la calidad del agua en embalses y podrían complementar las campañas de campo de manera rentable. Estos sensores podrían mejorar la gestión y el monitoreo de los recursos hídricos, lo que permitiría una respuesta más efectiva a las crisis ambientales.

Así mismo Perdomo (2015), en su proyecto de investigación titulado "Predicción de parámetros físico químicos de calidad del agua mediante el uso de sensores remotos: caso estudio Embalse del Neusa", establece como meta establecer una clasificación entre los datos de parámetros físicoquímicos recolectados en el Embalse del Neusa y los valores de reflectancia derivados de las bandas del sensor Thematic Mapper del satélite Landsat 7. Se Utilizarán modelos lineales tanto simples como Múltiples para establecer una compensación entre estos datos. Los hallazgos indicaron que el modelo calibrado para la transparencia exhibió el coeficiente de determinación más elevado (0.916), seguido del modelo calibrado para el pH (0.868), oxígeno disuelto (0.808), temperatura (0.765) y alcalinidad (0.892). Durante el periodo comprendido entre 2003 y 2015, estos modelos posibilitaron la predicción de parámetros calculados en los valores de reflectancia y facilitaron la comprensión de su comportamiento a lo largo de la totalidad del embalse. La comparativa interanual evidenció una elevación en la temperatura superficial del agua del embalse y una disminución en su transparencia. Llegó a la conclusión de que los modelos calibrados establecen correlaciones significativas entre los parámetros y los valores de reflectancia, corroborando así la idoneidad del uso de sensores remotos como un método factible para supervisar los parámetros físicoquímicos en el embalse de Neusa.

De la misma forma Martínez, I. (2017), en su proyecto de investigación titulado "Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota", menciona como objetivo investigar la posibilidad de utilizar satélites para estimar la calidad del agua en lagos y embalses. La concentración de clorofila es el principal indicador de la posible eutrofización, que tiene un impacto en la calidad del agua embalsada. Las bandas relacionadas con la reflectancia del agua, características de la presencia de clorofila, se analizan utilizando imágenes

multiespectrales de satélites como Sentinel-2 y Landsat-8. Se consideran estimadores de clorofila y se utilizan una variedad de herramientas de procesamiento de imágenes. El método creado se emplea en embalses particulares, como Cuerda del Pozo en Soria y castro de las Cogotas en Ávila, y se comparan los resultados con de concentración de clorofila in -situ. Los resultados demuestran que estos métodos pueden utilizarse para monitorear continuamente los embalses y lagos que están afectados por problemas de eutrofización. Se destaca la importancia de la observación remota como un método efectivo y económico para monitorear la calidad del agua en cuerpos acuáticos.

y como plantea Pérez, M. (2011), en su proyecto de investigación titulado “Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la reserva de la biosfera de la Mancha Húmeda”, en donde describe como objetivo principal demostrar cómo las tecnologías de la información geográfica son útiles para administrar humedales particulares dentro de esta reserva. Para lograr este objetivo, se realizó un estudio exhaustivo que incluyó la identificación y delimitación de humedales, el análisis de la contaminación hídrica y la evaluación de posibles soluciones de restauración. La técnica utilizada permitió obtener resultados significativos en la caracterización de los humedales estudiados mediante la combinación de técnicas de teledetección, sistemas de información geográfica y análisis de datos hidrológicos convencionales. Los resultados obtenidos a través de la aplicación de estas tecnologías demostraron que la eutrofización y la contaminación estaban presentes en las aguas de los humedales examinados. Estos resultados destacaron la capacidad de las imágenes de satélite para detectar estos fenómenos durante el período estival. Además, se logró cartografiar los aportes antrópicos recibidos por los humedales, analizar la calidad del agua in situ y evaluar la recuperación de la calidad del agua después de la implementación de depuradoras. Estos resultados destacan la relevancia de la teledetección y los SIG en la monitorización, gestión y toma de decisiones sobre la conservación y restauración de los humedales.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Desde el punto de vista de Orbegoso y Blas (2023), en su tesis titulada "Aplicación de la teledetección espectral usando Landsat 8 para el monitoreo fisicoquímico del agua de la laguna de Conache – 2023", en donde indica como

objetivo principal evaluar la eficacia del monitoreo de la laguna de Conache para los parámetros de calidad del agua utilizando imágenes Landsat 8. Se utilizaron algoritmos especializados para estimar los parámetros fisicoquímicos de la laguna durante tres meses, específicamente en abril, mayo y junio. Posteriormente, se examinaron la validez y precisión de estos hallazgos al compararlos con los hallazgos del laboratorio. Se obtuvieron resultados significativos al evaluar la evaluación entre los datos de laboratorio y los obtenidos por teledetección espectral utilizando el software SPSS y el modelo de regresión Spearman. Por ejemplo, se encontró una valoración significativa entre la temperatura del agua y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.716, evaluado a través de la banda 7 de Landsat 8. Además, con las bandas 2 y 3, se encontró una proporción significativa para la clorofila ($R^2 = 0.574$), mientras que el pH mostró una relación moderada ($R^2 = 0.299$). Sin embargo, la estimación entre los sólidos totales ($R^2 = 0.024$) y la turbidez ($R^2 = 0.271$) fue débil. Estos resultados muestran que la teledetección espectral es una herramienta útil para monitorear los parámetros fisicoquímicos del agua, pero también indican que se necesitan investigaciones adicionales para mejorar la precisión de las estimaciones de ciertos parámetros.

También Portal y Zambrano (2021), sostienen en proyecto de investigación titulado "Teledetección Espectral Usando el Satélite Landsat 8 para el Monitoreo Físicoquímico del Agua de la Laguna San Nicolás – Cajamarca 2021", donde señala como objetivo principal es emplear la teledetección satelital de manera regular para examinar las características fisicoquímicas del agua en la Laguna San Nicolás. Se pretende identificar estos parámetros espectralmente mediante un enfoque tecnológico, cuasi experimental, longitudinal y correlacional utilizando imágenes Landsat 8. El método implica la utilización de métodos espectrales tanto en laboratorio como en campo, con monitoreos periódicos de los cuerpos de agua. Los resultados obtenidos indicaron la capacidad de calcular parámetros como el pH, el oxígeno disuelto, la turbidez y la temperatura del agua a partir de imágenes satelitales. Además, se observó que a medida que el tamaño de píxel de las imágenes disminuía, también lo hacía el margen de error de los datos, lo que sugiere una mayor precisión en el monitoreo automatizado de cuerpos de agua mediante técnicas satelitales. En resumen, estos resultados respaldan la noción de que la teledetección satelital puede mejorar la precisión y eficacia del monitoreo de la

calidad del agua, lo que podría conducir a una gestión más efectiva de los recursos hídricos.

De acuerdo con Chuquimia (2021), que da a conocer en su tesis titulada "Monitoreo de Calidad de Agua Mediante Percepción Remota del Lago Titicaca", en la que se concentró en observar el pH, la temperatura superficial del lago y los niveles de oxígeno disuelto. Se desarrolló un modelo lineal para analizar estos parámetros en 43 puntos de muestreo utilizando datos de muestreo de campo proporcionados por la Autoridad Administrativa del Agua del Titicaca en julio de 2018. Los resultados mostraron que más del 90% del área de estudio tenía niveles de oxígeno disuelto superiores a 6 mg/l, que se consideraban aceptables según el ECA para agua, con un 25% de su variabilidad explicada por la B4. El pH mostró valores normales en más del 95% del área, y el infrarrojo más cercano (B5) explicó un 22% de la variabilidad. Alrededor del 90% de la superficie del lago tenía temperaturas normales, con temperaturas promedio anuales de 10 °C y temperaturas más bajas de 6-8 °C en la Reserva Nacional del Titicaca. Estos resultados indican que la mayoría de los parámetros analizados se encuentran dentro de los límites aceptables, lo que sugiere una buena calidad del agua en el Lago Titicaca, especialmente en términos de oxígeno disuelto y pH. Sin embargo, se identificarán áreas de interés como la bahía interior de Puno y la Reserva Nacional del Titicaca, que podrían requerir más atención en futuras intervenciones de monitoreo y gestión ambiental.

Teniendo en cuenta a Cusquisiban (2019), en su tesis titulado "Ubicación de Zonas de Recarga Hídrica usando Imágenes Landsat 8 mediante el Método de Árbol de Decisiones en la Cuenca del Río Chamán, Cajamarca y La Libertad-Perú", en donde menciona como objetivo principal es identificar las áreas de recarga de agua en una población de estudio de 1,569 km² que se encuentra en la cuenca Chamán. El estudio, de diseño no experimental, transversal y causal, analizó imágenes Landsat 8 utilizando técnicas espectrales y el método de árbol de decisiones. Los hallazgos indican que de los 1,021 pozos de agua subterráneo registrados por INGEMMET en 2015, 805 representan áreas favorables para la recarga de agua, lo que proporciona una certeza del 78.8% en la identificación de estas áreas. Esto demuestra que el estudio tiene una alta precisión en la ubicación de las zonas de recarga de agua subterránea. Por último, se resalta la relevancia de

emplear métodos satelitales como la teledetección de imágenes Landsat 8 para localizar y ubicar áreas de recarga hídrica, lo que ayudará a mejorar el uso y preservación de este recurso esencial. El potencial de la teledetección como herramienta adicional en diversas áreas del conocimiento también se destaca.

Como expresa también Díaz y Llave (2019), en su proyecto de investigación titulado "Estimación de los Parámetros de Calidad de Agua y su Relación con la Reflectividad del Superficie del Satélite Landsat 8 en el Lago Chinchaycocha - Junín", se enfocaron primordialmente en la elaboración de un modelo estadístico para los parámetros de calidad del agua del lago Chinchaycocha, empleando imágenes del satélite Landsat 8. Por ejemplo, la temperatura del agua (SST) exhibió un R^2 de 0,9718 con la banda b5, en contraste con la conductividad eléctrica (CE), que evidenció un R^2 de 0,8522 con las bandas b2, b3, b4 y b6. detectaron correlaciones entre el pH, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la temperatura en diversas bandas espectrales, con valores de R^2 que oscilan entre 0,7697, 0,8577 y 0,6307, respectivamente. En síntesis, se dedujo que los modelos estadísticos elaborados a partir de las imágenes Landsat 8 representan un instrumento valioso para monitorear los parámetros de calidad del agua en el lago Chinchaycocha. Esto facilita la determinación de correlaciones entre los estándares de agua y los niveles de reflectancia superficial.

Así mismo; Altuna (2018), en su tesis titulado "Calidad del Agua en la Laguna de Conache, Distrito de Laredo - Trujillo, Entre Abril y Agosto del 2018", señala que su propósito principal fue examinar una variedad de variables físicas y químicas para evaluar la calidad del agua en la laguna de Conache en Laredo. Se empleó el protocolo de monitoreo del agua establecido por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y se llevaron a cabo análisis de muestras recolectadas en cinco estaciones de muestreo como parte de la metodología. Se utilizaron herramientas como el multiparametro (HANNA) para medir la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales, el oxígeno disuelto y la demanda química de oxígeno. Los resultados revelaron que la temperatura del agua alcanzó su punto máximo en mayo, oscilando entre 22,20 y 23,20 °C, y el pH mostró una ligera alcalinidad, con valores entre 7,42 y 7,98. El rango de partes por millón (ppm) de oxígeno disuelto fue de 7,23 a 7,42, mientras que la demanda bioquímica de oxígeno varió entre 2,84 y 3,65 ppm. Además, se identificaron 21

especies de microalgas, 7 familias de macrófitos y 7 familias de macroinvertebrados en la laguna. Estos resultados son esenciales para comprender la calidad ecológica de la laguna de Conache, especialmente dada su relevancia como destino turístico y recreativo, así como su susceptibilidad a las actividades humanas. Finalmente, esta investigación proporciona información valiosa para la gestión y conservación de este ecosistema acuático.

Como menciona Ayala y Herrera (2019), en su tesis titulado "Monitoreo de la calidad del agua del lago Chinchaycocha, mediante técnicas de teledetección espacial", presentan algoritmos empíricos fundamentados en datos del sensor OLI del satélite Landsat 8/LCDM para la estimación de variables de calidad del agua tales como la clorofila, las partículas suspendidas totales y la transparencia. Se implementaron en el lago Chinchaycocha en respuesta a la proliferación de algas que compromete su calidad. Los cálculos empíricos estiman la clorofila utilizandola relación de reflectividad entre las bandas 3 y 5 del OLI; la transparencia mediante el uso del disco de Secchi y las bandas 3 y 4; y las partículas suspendidas totales utilizando la banda 5. Esto Resultó en mapas del lago que incorporaban los valores correspondientes a estos parámetros. La La investigación corrobora la eficacia de estas técnicas, que resultan beneficiosas para el seguimiento de cuerpos hídricos a gran escala a través de datos satelitales, simplificando la evaluación y administración de la calidad del agua.

Dicho con palabras de Rivera, D. (2020), en su proyecto de investigación titulado "Estimación de parámetros de calidad de agua en la Laguna Santa Elena usando imágenes satelitales ", exponen que el objetivo del proyecto era establecer los parámetros de calidad del agua en la Laguna Santa Elena a través de la utilización de imágenes satelitales para el seguimiento continuo. Se emplearon modelos previos y empíricos, complementados con datos procedentes de sensores Landsat 8 OLI y Sentinel 2 MSI rectificadas atmosféricamente y datos obtenidos en el lugar. Se elaboraron modelos para la estimación de clorofila-a, turbidez y transparencia, con los modelos más destacados exhibiendo correlaciones notables y una precisión aceptable. Se produjeron series temporales con el objetivo de ilustrar la dinámica del ecosistema, evidenciando una escasa variabilidad en los parámetros evaluados en su totalidad. Sin embargo, se identificó un sector con problemas de calidad del agua, exhibiendo valores elevados para todos los

parámetros. La clasificación de la laguna como eutrófica enfatiza la necesidad de un plan de gestión para evitar el deterioro de este ecosistema, un elemento esencial para la preservación ambiental.

Finalmente, Quezada, M (2020), en su proyecto de investigación titulado "Uso de imágenes satelitales para determinar los parámetros de calidad del agua en los ríos amazónicos Neshuya y Aguaytía - Perú", busca corroborar la factibilidad de la utilización de imágenes satelitales para cuantificar los indicadores de calidad del agua en los ríos Neshuya y Aguaytía. Se llevaron a cabo evaluaciones de diversos parámetros, entre los que se incluyen la Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD), la Demanda Química de Oxígeno (COD), el Carbono Orgánico Total (TOC), el Índice de Permanganato (COD_{mn}) y el Nitriógeno Amoniacal. El análisis empleó métodos de aceleración y regresión múltiple. Los Se encontró evidenciaron que los parámetros BOD, COD y TOC exhibieron un coeficiente de compensación de uno, lo cual señala una compensación perfecta con la reflectancia gráfica. Este hallazgo evidencia la aptitud de las imágenes satelitales para establecer los parámetros de calidad del agua. No sin embargo, esta metodología presenta restricciones, dado que no puede sustituir de manera íntegra los métodos convencionales, particularmente en la identificación de contaminantes orgánicos como metales pesados, nitrato, fosfato, entre otros que exigen análisis directos en laboratorio. Pese a estas restricciones, las imágenes satelitales son valoradas y pertinentes, particularmente en regiones distantes donde el acceso directo resulta complejo y los costos asociados al muestreo y análisis de laboratorio son considerablemente elevados.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Calidad de agua

Debido al creciente interés en la conservación del medio ambiente y la protección de la salud pública, la calidad del agua se ha convertido en un tema de gran relevancia en la actualidad. El concepto de "calidad del agua" se refiere al estado del agua en términos de su composición química, física y biológica. Se evalúa utilizando una variedad de parámetros que incluyen temperatura, pH, turbidez, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales, nutrientes, metales pesados y contaminantes orgánicos. (University of Illinois, 2019).

1.2.2. *Parámetros Físicos Químicos*

- **Temperatura**

Es una medida que evalúa tanto el calor como el frío. En esencia, representa una estimación de la energía cinética interna promedio de las moléculas que forman el objeto de estudio en el ámbito de los recursos hídricos. Para imágenes satelitales, se utiliza la banda 7. (02,11 a 02.29) (Swain y Sahoo,2017).

- **Sólidos suspendidos totales**

Se considera un contaminante comúnmente reconocido. Anteriormente denominado como residuo no filtrable, este término hace referencia a una medida específica: el peso seco de las partículas retenidas por un filtro, generalmente de un tamaño de poro determinado. Un SST elevado ($> 1000 \text{ mg L}^{-1}$) puede tener un impacto significativo en la calidad del agua al reducir la penetración de la luz y puede acortar la vida útil del cuerpo de agua debido a la sedimentación de materia en suspensión (Kulkarni, 2011).

Los cambios en este factor afectan a la vida en el agua, desde organismos como el fitoplancton hasta los peces, especialmente cuando las partículas son diminutas y cargan consigo numerosas sustancias dañinas o tóxicas. Por consiguiente, estas partículas en suspensión suelen ser el principal vehículo para la introducción de estos contaminantes en lagos y áreas costeras de los océanos, donde se depositan (Kulkarni, 2011).

- **Clorofila-a**

Las clorofilas constituyen una familia de pigmentos presentes en organismos que poseen cloroplastos en sus células, tales como plantas y diversos grupos de algas. Típicamente, estas moléculas presentan dos picos de absorción en el espectro visible, uno en el rango de la luz azul y otro en la región roja del espectro; sin embargo, reflejan la parte intermedia del espectro, que es la más abundante y se corresponde con el color verde (500-600 nm) (Pereira-Sandoval et al., 2016; Preciado Vargas & Silva Rodríguez, 2015).

Los Estándares de Calidad Ambiental para el Agua, aprobados mediante el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, definen criterios para distintos usos del agua. En particular, en cuanto a la calidad del agua en ríos y lagunas, se estableció la categoría 4 con el objetivo de preservar el entorno acuático. Este reglamento

modifica y suprime ciertas categorías, parámetros, subcategorías y valores de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), los cuales están detallados en el Anexo 02. (MINAM, 2017).

Para evaluar la calidad del agua, resulta más conveniente realizar el monitoreo en el lugar donde se encuentra el recurso, ya que permite obtener mediciones precisas en un lugar y tiempo específicos. No obstante, este enfoque presenta algunas limitaciones, como la necesidad de que el investigador realice el muestreo y las mediciones; además, puede resultar difícil realizar estudios abarcadores debido a las variaciones espaciales y temporales, y la precisión de los datos recopilados en el lugar puede ser objeto de cuestionamiento (Segundo Bretreger et al., 2022). Por consiguiente, dependiendo del propósito de uso o conservación del recurso, es necesario llevar a cabo el monitoreo de una variedad de parámetros físicos y químicos para evaluar la calidad del agua.

1.2.3. Teledetección

La teledetección constituye una metodología que posibilita la observación y cuantificación de objetos de manera remota, sin requerir contacto físico, lo que la convierte en un instrumento altamente valioso para diversas facetas de la administración hídrica. Esta Metodología se emplea tanto en el contexto de cuencas hidrográficas como en la evaluación de cuerpos de agua de menor tamaño, aportando datos pertinentes sobre los riesgos ambientales. En vista de que las imágenes satelitales constituyen representaciones visuales de los datos recolectados por un sensor desde una órbita artificial, resulta imprescindible que estos datos sean procesados de manera apropiada para proporcionar información valiosa acerca de las características del área bajo observación, (German, R. 2021).

1.2.4. Bandas Espectrales

Crea múltiples filtros de bandas espectrales que abarcan la porción visible del espectro electromagnético y evalúa la cantidad de luz transmitida a través de estas ondas. El perfil de transmisión, que indica la intensidad de la luz emitida en una longitud de onda específica, define la banda espectral. Cualquier cambio en la superficie conduce a un aumento en su rugosidad, lo que se traduce en una marcada alteración en las propiedades de reflexión, (Peguero, 2016).

1.2.5. Espectro electromagnético

Se refiere al espectro completo de frecuencias de radiación electromagnética disponible, que abarca desde la transmisión de datos mediante ondas hasta otros usos potenciales. Este espectro se divide en múltiples bandas o regiones, cada una con características específicas y distintivas (Horning, 2019, p.10). Incluye ondas electromagnéticas con longitudes de onda que varían desde escalas extremadamente grandes, como miles de kilómetros, hasta escalas extremadamente pequeñas, comparables al tamaño de un núcleo atómico, y con frecuencias que van desde un hercio hasta 1025 Hz. Por lo tanto, estas ondas se clasifican en grupos separados dentro del espectro electromagnético, donde cada rango incluye diferentes tipos de ondas electromagnéticas, como microondas, infrarrojos, rayos X, luz visible y ultravioleta, cada una con características distintivas (Addanki et al., 2018, p.5).

1.2.6. Regiones espectrales utilizadas para la observación remota de la tierra

– Espectro visible (0.4 - 0.7 μm)

Rango de frecuencias del ojo humano. Máxima radiación solar. Subdividido en tres bandas: Rojo (0.6 - 0.7 μm), Verde (0.5 - 0.6 μm) y Azul (0.4 - 0.5 μm), (Bravo, 2017).

– Infrarrojo cercano (0.7 - 1.1 μm)

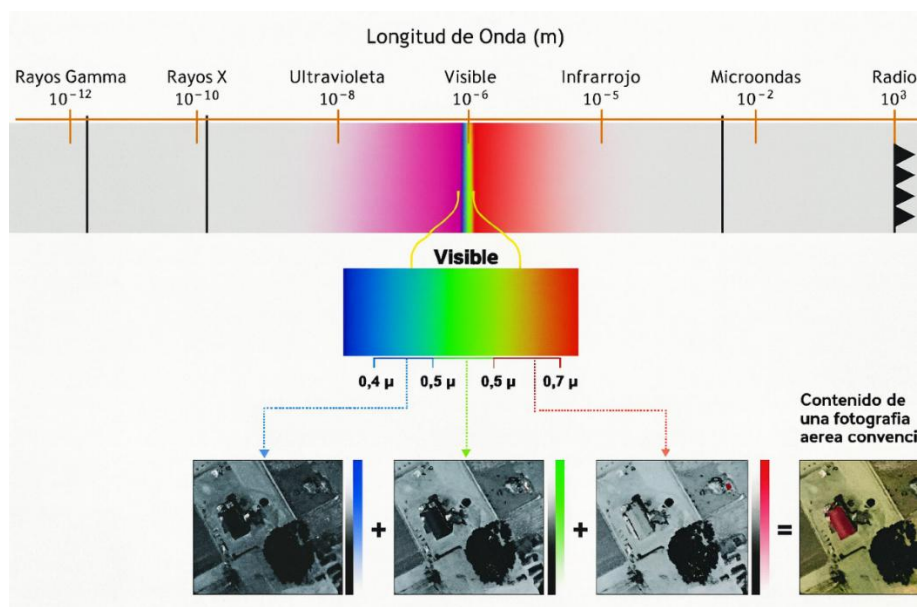
Tiene una longitud de onda más larga. Se utiliza en una variedad de aplicaciones, como comunicaciones ópticas, fotografía infrarroja, sensores de proximidad y aplicaciones médicas, (Bravo, 2017, p.9).

– Infrarrojo medio (1.1 – 8 μm)

En el espectro infrarrojo medio, la radiación solar y las emisiones térmicas y su interacción con la atmósfera son importantes. Estas interacciones se pueden utilizar en aplicaciones que utilizan técnicas como la espectroscopía de infrarrojo medio para medir las concentraciones de aerosoles, ozono, vapor de agua y otros elementos de la atmósfera, (Bravo, 2017, p.9).

– Infrarrojo térmico (8 - 14 μm)

es una onda larga que se emite por la superficie terrestre y cuya intensidad cambia con la temperatura. La sensibilidad de TIRS a las longitudes de onda infrarrojas permite distinguir las temperaturas de la atmósfera y la superficie terrestre, (USGS, 2016, p.12).

Figura 1*Espectro Electromagnético.*

Nota. La figura muestra el espectro electromagnético. Tomado Teledetección espacial Landsat, sentinel2, aster 11t y Modis (p. 9), Bravo 2017, Geomática Ambiental S.R.L.

1.2.7. Interacciones entre la energía electromagnética y los cuerpos naturales

La mayor parte de la superficie terrestre está compuesta por una variedad de elementos como suelos, rocas, cuerpos de agua y vegetación. Al seleccionar las bandas del espectro electromagnético para su estudio mediante sensores remotos, es esencial comprender las propiedades espectrales de estos elementos. La interacción entre la radiación electromagnética y los materiales determina la respuesta de cada longitud de onda. A continuación, se describen las diversas categorías de cobertura terrestre, que pueden agruparse en tres principales: suelos desnudos, cuerpos de agua y vegetación, (Peguero, 2016).

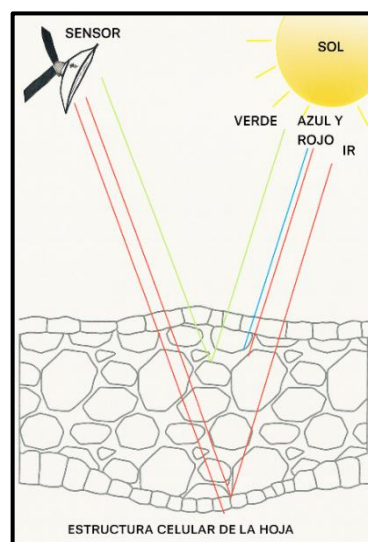
a. Vegetación

Los atributos de las hojas, la configuración del dosel (cantidad de capas de hojas) y la disposición de las hojas son aspectos significativos en la respuesta espectral de la vegetación. El Índice de Área Foliar (LAI), que indica la cantidad total de superficie foliar en relación con la superficie del suelo, constituye una medida de la densidad vegetal, la cual comprende un conjunto de hojas agrupadas y dispuestas de diversas maneras, (Peguero, 2016).

Una hoja está compuesta por numerosas capas de material orgánico fibroso que albergan diversos tipos de pigmentos, tales como clorofila, xantofilas y carotenoides. La cantidad de agua que contiene varía según la especie, las condiciones ambientales del lugar donde crece y las etapas fenológicas específicas de la hoja. Además de estos factores, otros elementos que influyen incluyen la respuesta espectral del suelo, la presencia de vegetación envejecida, la posición angular del sol y del sensor, la configuración de la cobertura vegetal y los cambios fenológicos, (Peguero, 2016).

Figura 2

Reflectancia en vegetación e interpretación sensorial en Teledetección.



Nota. En la figura se muestra LAI, que es la superficie total de hojas por superficie de terreno. Tomado de Sensores Remotos y Aplicaciones en Teledetección Geodesia y Gestión de Recursos Naturales (p. 109), Peguero 2016, SAMBA

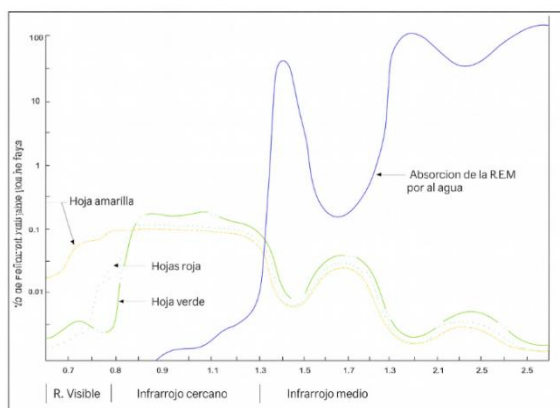
b. Cuerpos de agua

La reflectividad de cuerpos hídricos, vegetales y terrestres fluctúa en función de la longitud de onda, debido a su interacción con la radiación solar. En los cuerpos de agua pura, la radiación tiende a ser transmitida o absorbida en una proporción significativa. En comparación, la reflexión es significativamente inferior en comparación con la vegetación y el suelo. La reflexión en cuerpos acuáticos tiende a ser especular, debido a la uniformidad de su superficie, lo que conduce a una magnitud inferior en comparación con otras longitudes de onda debido a las irregularidades superficiales. No sin embargo, cuando se produce una perturbación en la superficie, se intensifican las

irregularidades superficiales, lo que resulta en una fluctuación notable en las propiedades de reflexión, (Peguero, 2016).

Figura 3

Curvas de absorción del agua y reflectividad de la vegetación.



Nota. En la figura se muestra la reflectividad de los cuerpos de agua. Tamada de Sensores Remotos y Aplicaciones en Teledetección Geodesia y Gestión de Recursos Naturales (p. 115), Peguero 2016, SAMBA.

c. Suelo desnudo

La reflectancia del suelo se encuentra condicionada por diversos factores, entre los que se incluyen el contenido de humedad superficial, la composición mineral, la concentración de materia orgánica, la textura y la rugosidad. Debido a que la mayoría de los sensores se enfocan en la capa superficial del suelo, sus propiedades espectrales son notablemente diferentes a las de la vegetación. La información directa sobre el suelo se puede obtener principalmente en áreas sin cobertura vegetal, como regiones áridas, semiáridas o subárticas, o en áreas donde el suelo está expuesto debido a la erosión o preparación para la siembra. En todos estos casos, la cobertura vegetal juega un papel crucial en la reflexión de la energía electromagnética. Los principales factores que influyen en la reflectancia del suelo son su contenido de humedad, textura, estructura y composición, (Peguero, 2016).

1.2.8. Satélite

Las imágenes satelitales se forman con píxeles que varían en tamaño según la resolución del sensor. Cada píxel representa una celda y contiene información sobre la radiación electromagnética capturada de varias coberturas, según las longitudes de onda captadas, (Bravo, 2017).

La energía electromagnética se codifica en los píxeles con valores digitales que representan tonalidades, llamados Niveles Digitales (ND). La cantidad de niveles digitales varía según la resolución del sensor, por ejemplo, en un sensor de 8 bits, 0 es negro y 255 es blanco en escala de grises. (Bravo, 2017).

El falso color convencional, donde se asigna rojo a la banda verde, verde a la banda roja y azul a la banda infrarroja cercana, es ampliamente reconocido. Este esquema se aplica en diversas áreas, como medio ambiente, recursos hídricos, agricultura, recursos forestales, geología y uso del suelo, proporcionando información valiosa extraída de las imágenes satelitales, (Bravo, 2017).

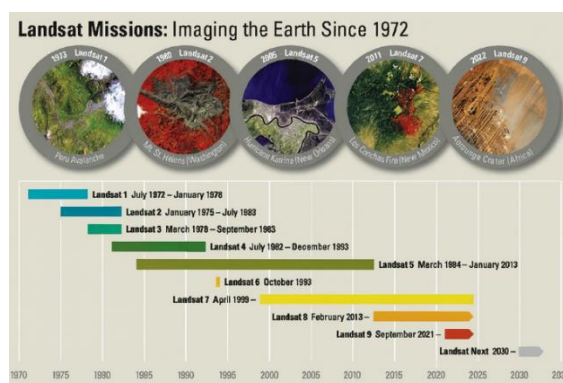
a. Satélite Landsat

La colaboración entre la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos en el programa Landsat implica una serie de misiones de observación de la Tierra mediante satélites. Esta serie comenzó en 1972 con el lanzamiento del ERTS-1, conocido posteriormente como Landsat 1. Desde entonces, estos satélites han proporcionado datos continuos de detección remota desde el espacio (Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS, 2013).

La Misión de Continuidad de Datos de Landsat (LDCM) se lanzó el 11 de febrero de 2013, marcando el inicio de un nuevo satélite en la serie Landsat, ahora conocido como Landsat 8. Los datos recopilados por este satélite se están integrando continuamente en el archivo para usuarios globales, (USGS, 2013).

Figura 4

Misión Cronológica Landsat



Nota. La figura muestra la cronología de las misiones Landsat, que muestra la brecha entre Landsat 5 y Landsat 8. Tomado de Image courtesy of the USGS 2018 (<https://www.usgs.gov/media/images/landsat-missions-timeline>).

- **Imagen operacional de la Tierra (OLI) y el sensor térmico infrarrojo (TIRS) Satélite Landsat 8**

El satélite Landsat 8, lanzado el 11 de febrero de 2013, permanece activo hasta hoy, equipado con dos sensores: el OLI y el TIRS. Mientras el TIRS mide la temperatura terrestre, el OLI cubre el espectro VNIR, NIR y SWIR. Orbita cada 16 días, con 11 bandas espectrales, ofreciendo una resolución de 30 metros para la mayoría de las bandas y una resolución de 15 metros para la banda 8. Las bandas 1 a 7 y 9 tienen una resolución de 30 metros, mientras que las bandas 10 y 11, que miden la temperatura, ofrecen una resolución de más de 100 metros. La banda 1 es utilizada para estudios de aerosoles costeros y la banda 9 para detectar nubes cirrus, (USGS, 2016).

Tabla 1

Distribución de las bandas en OLI y TIRS.

	BANDA	LONGITUD DE ONDA (MICRÓMETRO)	RESOLUCIÓN EN (METROS)
LANDSAT 8 OPERATIONAL LAND IMAGER (OLI) AND THERMAL INFRARED SENSOR (TIRS)	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	—	30
	Banda 6 - SWIR	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Nota. Los dos sensores transportados por el satélite completan 11 bandas espectrales como se muestra en la tabla. Fuente: USGS (2013).

1.3. Definición de términos

– Laguna

La investigación de Carreño et al. (2021) define la laguna como una masa de agua rodeada de tierra sin conexión directa al mar. Su tamaño varía desde pequeños estanques hasta grandes lagos y puede ser alimentada por lluvias, ríos o aguas subterráneas, resaltando su importancia en relación con la tierra y el mar circundantes.

– Imágenes Landsat 8

Las imágenes Landsat 8 son capturas de alta resolución del satélite Landsat 8, que se utiliza para observar la Tierra. Para una variedad de aplicaciones, como la monitorización ambiental, agrícola y urbana, estos datos multispectrales son útiles. Se utilizan ampliamente en la investigación geoespacial y el análisis de cambios terrestres, (NASA, 2020).

– Teledetección

La teledetección, técnica de medición remota sin contacto físico, es esencial en la gestión del agua. Desde cuencas hasta cuerpos de agua, ofrece datos sobre riesgos ambientales. Las imágenes satelitales, producto de sensores en órbita, son cruciales para evaluar características del área, siempre que se procesen adecuadamente, (German, R. 2021).

– Banda espectral

Las bandas espectrales son regiones del espectro electromagnético que se pueden distinguir en las imágenes satelitales y que brindan información sobre las propiedades de los objetos en la superficie terrestre, (Jensen, 2016).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

Esta investigación fue realizada de tipo aplicativo, ya que busca aplicar conocimientos teóricos y tecnológicos para resolver futuros problemas. Se utilizó un enfoque cuantitativo para medir y analizar fenómenos, con el objetivo de describir, explicar, predecir y verificar causas de manera objetiva, apoyándose en métricas durante la recolección, procesamiento y análisis de datos para llegar a conclusiones fundamentadas, (Sánchez, 2019).

La investigación utilizó el nivel descriptivo, buscando identificar características clave del fenómeno estudiado. Se enfocó en comprender las relaciones entre variables específicas, con estudios longitudinales que recolectan datos en distintos momentos para comprender la evolución, causas y efectos del fenómeno, (Sampieri, 2006, p.211).

3.2. Ámbito temporal y espacial

Desde una Perspectiva temporal, la presente investigación se ha llevado a cabo en el año 2025, mientras que, desde una perspectiva espacial, se ha llevado a cabo en la laguna Huayllay, centro poblado de Huayllay, distrito de Luricocha, perteneciente a la provincia de Huanta y la región de Ayacucho.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

Según Carrasco (2019), la población "está compuesta por todos los elementos (unidades de análisis) que pertenecen al ámbito espacial donde se lleva a cabo la investigación". (p. 236)

En la investigación la población está conformada por la cuadrícula de la imagen satelital de la zona de estudio el cual se descargó del Servicio Geológico USGS (Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos).

3.3.2. Muestra

La muestra "es el subconjunto representativo de la población, que es el tema de observación científica para obtener resultados válidos para el universo estudiado" (López y Fachelli, 2015).

En esta investigación la muestra está comprendido por el cuerpo de agua de la laguna Huayllay monitoreada en el año 2025.

3.4. Instrumentos

Es evidente que toda investigación requiere la recolección de información precisa y confiable acerca del fenómeno en estudio. En ese sentido, para el desarrollo del presente trabajo, se emplearon diversos instrumentos de investigación que permitieron obtener y analizar los datos necesarios. Entre ellos destacan las imágenes satelitales Landsat 8, que proporcionaron información espectral multibanda utilizada para estimar parámetros físico-químicos del agua, tales como la turbidez, clorofila-a y sólidos suspendidos totales.

Finalmente, se utilizaron herramientas de procesamiento digital como ArcGIS, Rstudio, Excel entre otros, que facilitaron el tratamiento, análisis y representación espacial de la información, garantizando la confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos.

3.5. Procedimientos

Para monitorear la laguna Huayllay, primero se localizó la zona de estudio y luego se descargó imágenes espectrales Landsat 8 usando la plataforma USGS (Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos). Después, procesamos estas imágenes mediante técnicas de teledetección para calcular variables de calidad del agua. Utilizamos datos recolectados por sensores remotos para generar modelos matemáticos que nos ayudaron a predecir estos parámetros. Estos modelos se emplearon para estimar la calidad del agua en la laguna Huayllay, como son: temperatura superficial, sólidos totales suspendidos y clorofila-a.

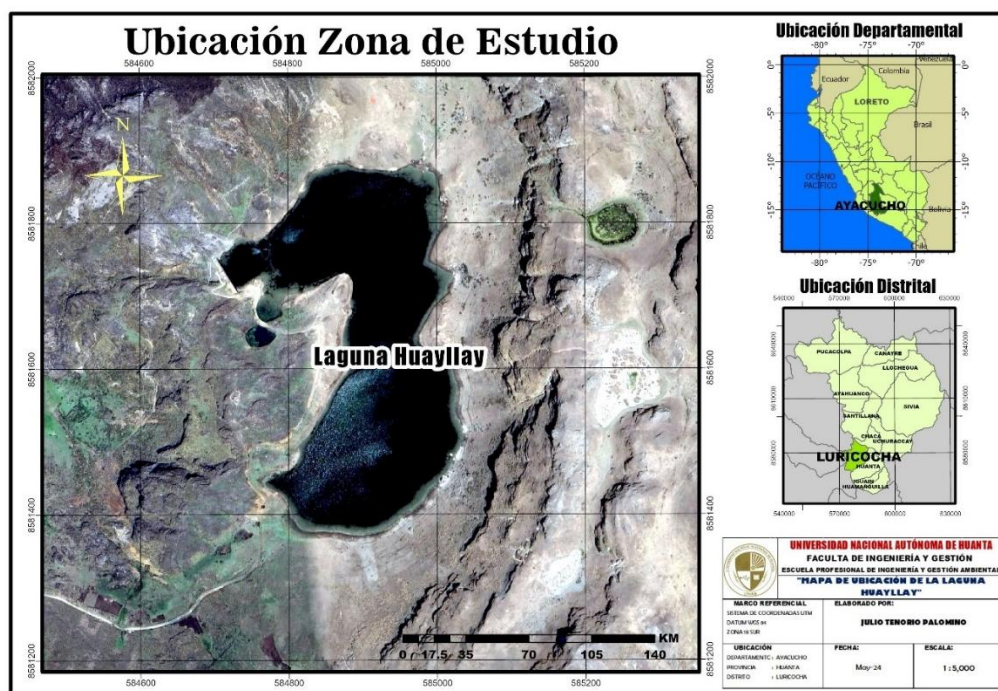
3.5.1. Ubicación del área de estudio

La investigación se llevó a cabo en la laguna Huayllay, situada en el Centro poblado de Huayllay, distrito de Luricocha, al norte del distrito de Huanta, en la región de Ayacucho, a una altitud de 4230 metros sobre el nivel del mar. Sus límites son: con el distrito de Santillana al norte, Huanta y Huancavelica al sur, la provincia de Huanta al este y el departamento de Huancavelica al oeste.

La zona norte del distrito de Luricocha cuenta con 03 micro cuencas hídricas, Ocana, Paccayhuayco y laguna Huayllay, cada una de estas micro cuencas responden a sus propias dinámicas en sus diversos periodos.

Figura 5

Mapa de ubicación de la laguna Huayllay.



Nota. En la imagen se muestra la ubicación de la laguna Huayllay con coordenadas UTM N: 8581652.00, E: 584933.00 y altitud de 4230 m.s.n.m.

3.5.2. procesamiento de imágenes landsat 8

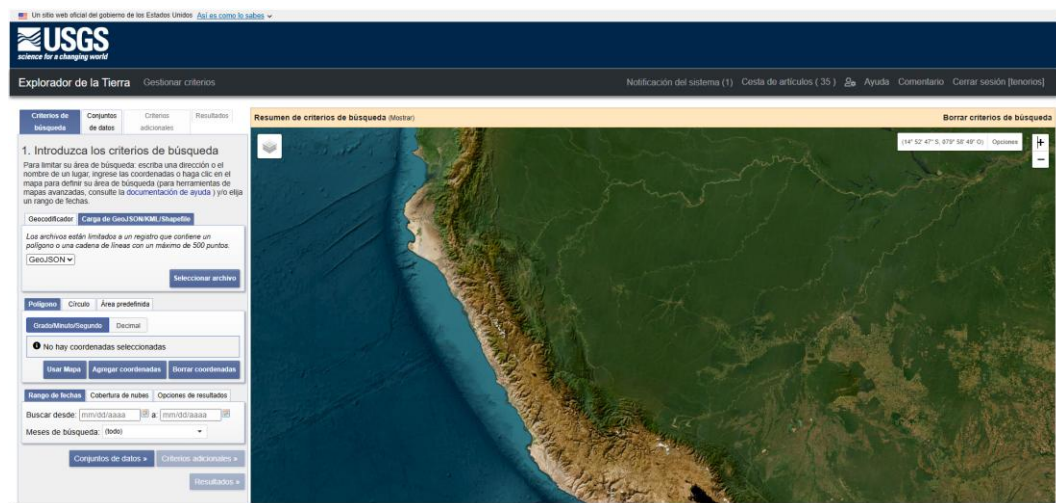
Inicialmente, se seleccionan imágenes Landsat 8 de alta reflectancia y exentas de nubosidad para llevar a cabo el análisis de los parámetros. Posteriormente, las imágenes fueron procesadas utilizando el software ENVI y ArcGIS para la corrección atmosférica, empleando la combinación de bandas y la fórmula específica para cada parámetro seleccionado. Posteriormente, se realizó una mejora lineal utilizando el SPSS de los diversos datos obtenidos, tanto de los ECA como de las imágenes Landsat 8, con el objetivo de evidenciar la efectividad entre ambas variables.

3.5.2.1. Descarga de la Imagen Landsat 8

El archivo KMZ, utilizado en este caso para la descarga de la zona de estudio, fue procesado utilizando el software ArcGIS. Por lo tanto, se accedió a uno de los servidores de descarga gratuita de imágenes disponibles, Landsat 8, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, específicamente a <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Figura 6

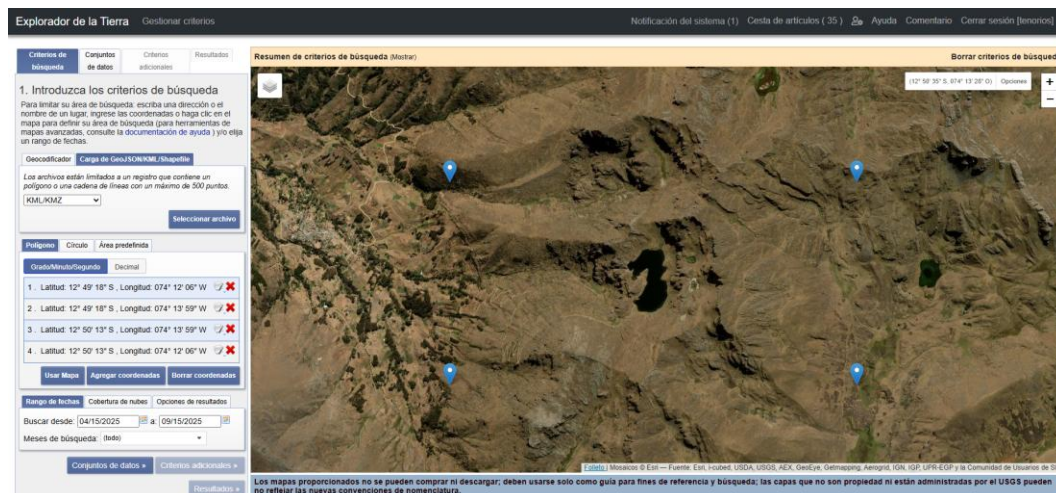
Descarga de imagen satelital desde el servidor USGS Earth Explorer (2025)



Nota. Captura de la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), utilizada para la descarga de imágenes satelitales Landsat (sensor OLI/TIRS).

Figura 7

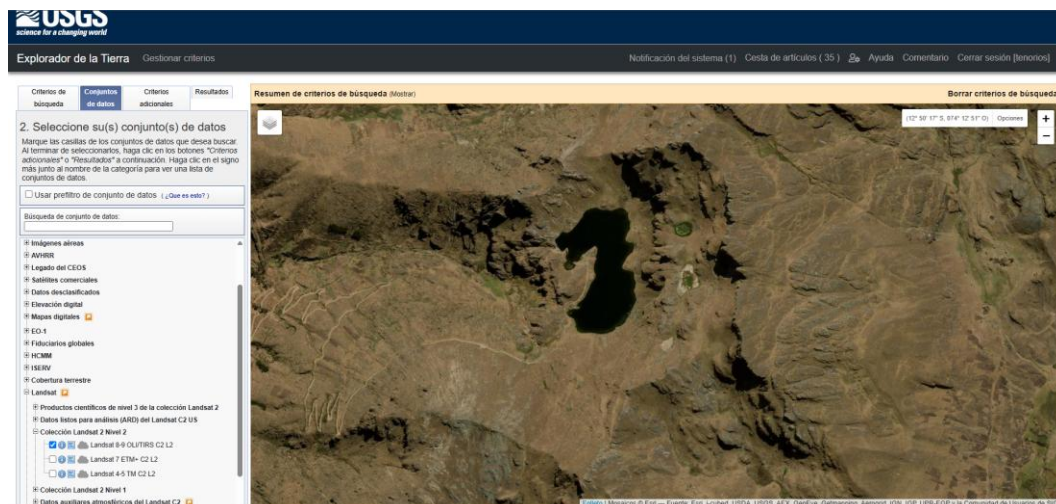
Localizamos el área de estudio ingresando el archivo KMZ.



Nota. Captura de la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), utilizada para la descarga de imágenes satelitales Landsat (sensor OLI/TIRS).

Figura 8

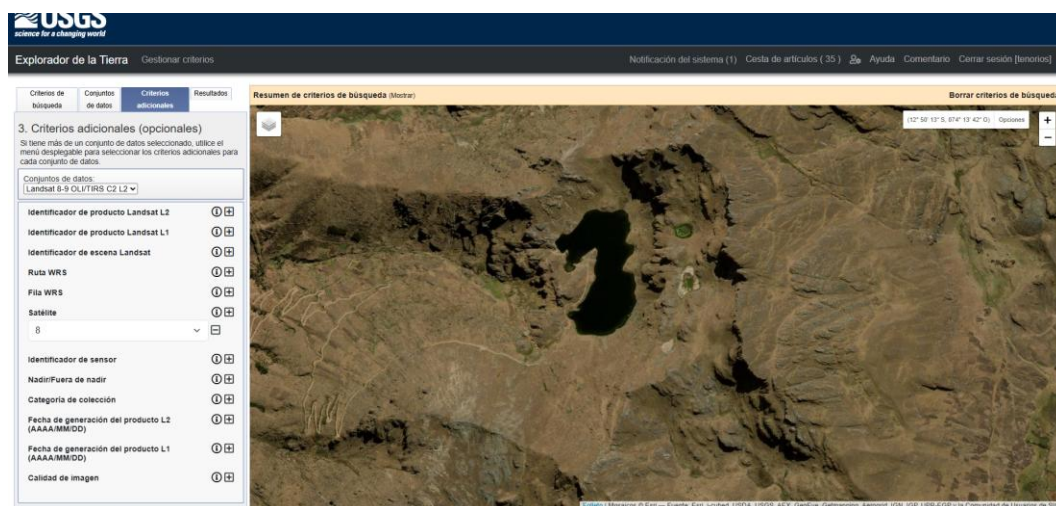
Definimos los criterios o parámetros de Búsqueda (baja nubosidad y fechas apropiadas).



Nota. Captura de la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), utilizada para la descarga de imágenes satelitales Landsat (sensor OLI/TIRS).

Figura 9

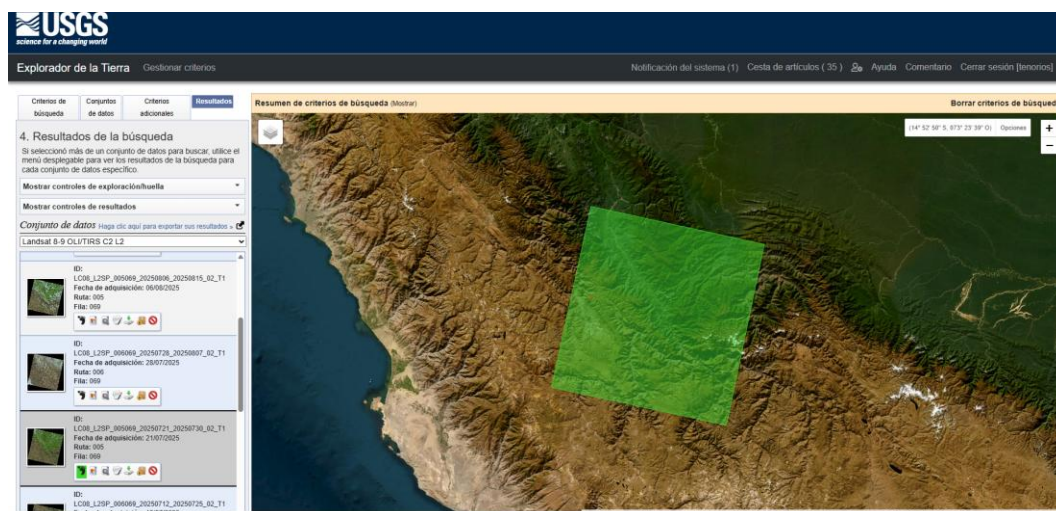
Definimos los criterios o parámetros para obtener resultados esperados y satisfactorios.



Nota. Captura de la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), utilizada para la descarga de imágenes satelitales Landsat (sensor OLI/TIRS).

Figura 10

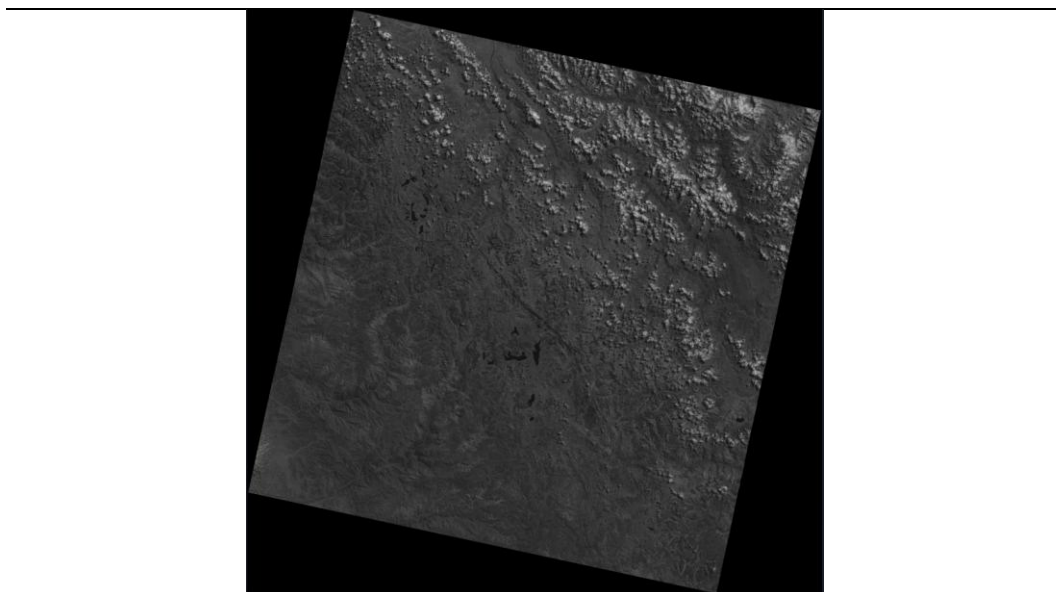
Resultados en el servidor USGS (Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos).



Nota. Captura de la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), utilizada para la descarga de imágenes satelitales Landsat (sensor OLI/TIRS).

Tabla 2

Características técnicas de la imagen satelital Landsat 8 (nivel 1, escena L1TP, 2025)



Atributo de conjunto de datos	Valor de atributo
Identificador del producto Landsat	LC08_L1TP_005069_20250721_20250730_02_T1
Identificador de la escena Landsat	LC80050692025202LGN00
Fecha de adquisición	21/07/2025
Fecha de generación L-1	30/07/2025

Elevación del sol LORA	45.17092611
Azimut solar LORA	42.39822758
Longitud del centro de la escena	-73.56058
Esquina superior izquierda Latitud	-11.96489
Longitud de la esquina superior izquierda	-74.62158
Esquina superior derecha Latitud	-11.95415
Longitud de la esquina superior derecha	-72.51444
Esquina inferior izquierda Latitud	-14.07541
Esquina inferior izquierda Longitud	-74.61836
Esquina inferior derecha Latitud	-14.06270
Esquina inferior derecha Longitud	-72.49333

Nota. Los atributos provienen del producto Landsat 8 (L1TP, nivel 1) e incluyen parámetros geométricos del centro de escena y condiciones de iluminación solar (elevación y azimut).

3.5.2.2. Corrección radiométrica y atmosférica de la imagen LANDSAT 8.

a. Conversión a radiancia en el techo de la atmosfera (TOA)

Los productos estándar Landsat 8 LDCM, suministrados por el USGS consisten en una serie cuantificada, calibrada y escalada de niveles digitales ND, los cuales representan los datos de una imagen multispectral adquirida por ambos sensores: OLI Operational Land Imagen y el TIRS Thermal Infrared Sensor. (USGS, 2013).

Los datos de las bandas del sensor TIRS y OLI están derivados en 16 bits en formato no cifrado y pueden ser reescalados a los valores de reflectancia y o radiancia en el techo de la atmosfera TOA, usando para ello los coeficientes radiométricos provistos en el archivo de metadato, tal y como se describe a continuación (USGS, 2013):

$$L\lambda = MLQ \text{ cal} + AL$$

- $L\lambda$ = Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de (Watts /m² * srad * μm)
- ML = Banda – Es el factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda)
- AL = Banda – Es el factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda)
- $Q \text{ cal}$ = Producto estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

b. Conversión a reflectancia TOA

La información proveniente del sensor OLI puede ser transformada en valores de reflectancia (TOA) en el techo atmosférico, utilizando para ello los coeficientes de reflectancia reescalados proporcionados en el archivo de metadatos MTL.

La siguiente ecuación es usada para convertir los ND niveles digitales a valores de reflectancia para los obtenidos por el sensor OLI (USGS, 2013):

$$L\lambda' = M\rho Q \text{ cal} + A\rho$$

Donde:

- $P\lambda'$ = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar. Note que $P\lambda'$ no contiene una corrección por el ángulo solar.
- $M\rho$ = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).
- $A\rho$ = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).
- $Q \text{ cal}$ = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

5.2.2.3. Temperatura Superficial (LST - °C)

Tabla 3

Fechas de adquisición de imágenes satelitales Landsat 8 (2025)

IMAGENES	FECHA
Landsat 8	23 /Abril /2025
Landsat 8	17/Mayo/2025
Landsat 8	26 /Junio/ 2025
Landsat 8	21/Julio/2025
Landsat 8	29/Agosto/2025

Nota. Las imágenes satelitales corresponden a los productos del sensor OLI/TIRS de Landsat 8, organizadas por fecha de adquisición.

Tabla 4

Rangos de temperatura del agua en lagunas naturales según investigaciones y normativa peruana

CONDICIÓN DEL ECOSISTEMA O TIPO DE LAGUNA	RANGO DE TEMPERATURA (°C)	OBSERVACIONES O INTERPRETACIÓN
Lagunas altoandinas (> 3800 m.s.n.m.)	4 – 14 °C	Agua fría, baja productividad biológica; temperatura estable y oxigenada.
Lagunas interandinas (2500 – 3800 m.s.n.m.)	10 – 18 °C	Condiciones mesotérmicas; ligera estratificación térmica
Lagunas tropicales y amazónicas (< 2000 m.s.n.m.)	22 – 30 °C	Mayor metabolismo y fotosíntesis; posible disminución de oxígeno disuelto.
Variación térmica permisible según ECA (ΔT)	± 3 °C	Diferencia máxima respecto a la temperatura natural del cuerpo de agua.
Temperatura óptima para vida acuática general	10 – 25 °C	Rango adecuado para la mayoría de especies acuáticas y procesos biológicos.

Nota. En el ECA peruano (MINAM, 2017), la temperatura se evalúa como un indicador físico. Se expresa en grados Celsius (°C), dado que se trata de una propiedad termodinámica del agua.

a. Cálculo de la temperatura superficial

Todo el procedimiento fue calculado en base al software Arc Map 10.8 con la herramienta Algebra de mapas.

b. Cálculo de TOA (Top Of Atmospheric) radiancia espectral

$$TOA = 0.0003342 * "Band 10" + 0.1$$

c. Conversión de TOA a Brightness Temperature (Temperatura de brillo)

$$BT = (1321.0789 / \ln ((774.8853 / "%TOA%") + 1)) - 273.15$$

d. Calcular el NDVI

$$NDVI = \text{Float}(\text{Banda 5} - \text{Banda 4}) / \text{Float}(\text{Banda 5} + \text{Banda 4})$$

e. Calcular la proporción de vegetación Pv

$$Pv = \text{Square} ((NDVI - NDVI_{\text{mín}}) / (NDVI_{\text{máx}} - NDVI_{\text{mín}}))$$

f. Calcular la Emisividad ϵ

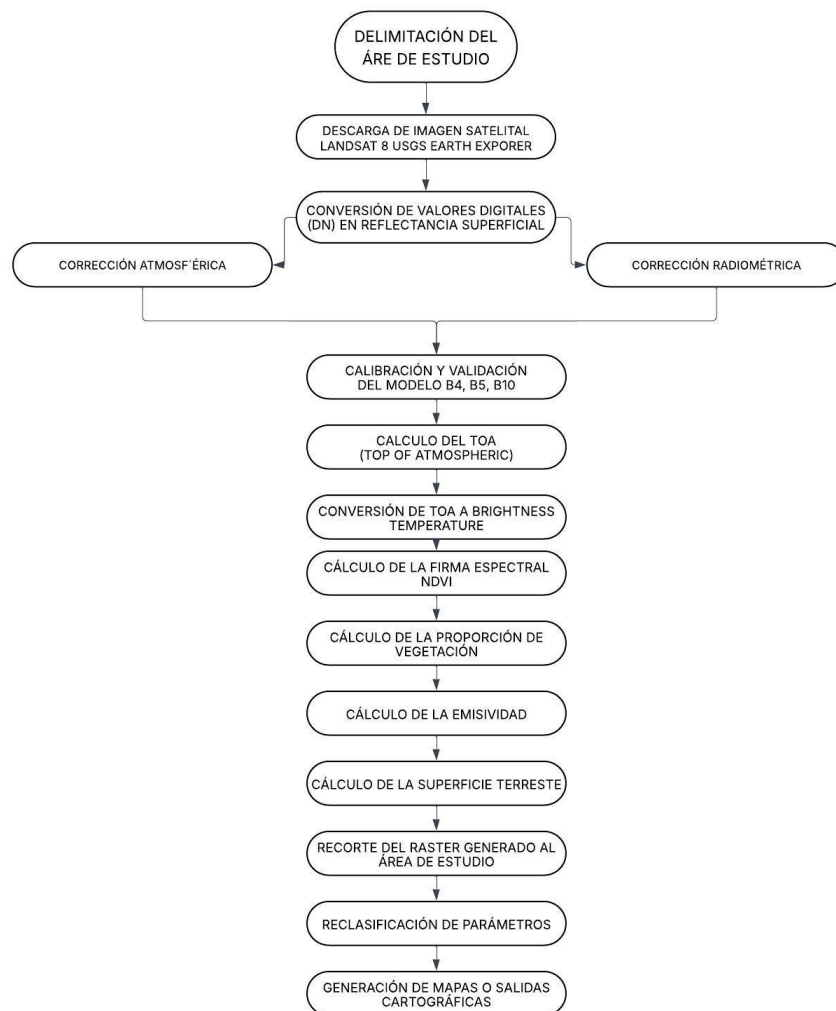
$$\epsilon = 0.004 * Pv + 0.986$$

g. Calcular la temperatura de superficie de la tierra

$$LST = (BT / (1 + (0.00115 * BT / 1.4388) * Ln(\epsilon)))$$

Figura 11

Diagrama de flujo para el cálculo de Temperatura Superficial Terrestre (LST-°C) a partir de imágenes Landsat 8 (2025)



Nota. En la imagen se muestra el diagrama de flujo del proceso para estimar Temperatura Superficial (LST - °C) con imágenes Landsat 8.

3.5.2.4. Sólidos Totales Suspendedos (TSS)

Tabla 5

Fechas de adquisición de imágenes satelitales Landsat 8 (2025).

IMAGENES	FECHA
Landsat 8	23 /Abril /2025
Landsat 8	17/Mayo/2025
Landsat 8	26 /Junio/ 2025
Landsat 8	21/Julio/2025
Landsat 8	29/Agosto/2025

Nota. Las imágenes satelitales corresponden a los productos del sensor OLI/TIRS de Landsat 8, organizadas por fecha de adquisición.

Tabla 6

Rangos de concentración de sólidos totales suspendidos (TSS) en agua de lagunas

CATEGORÍA	CONCENTRACIÓN DE TSS (mg/L)	DESCRIPCIÓN
Agua clara	0 – 10	Muy poca turbidez, buena penetración de luz.
Ligeramente turbia	10 – 25	Algo de materia suspendida, visibilidad aceptable.
Moderadamente turbia	25 – 100	Visibilidad reducida, turbidez visible.
Altamente turbia	100 – 500	Alta concentración de sedimentos u orgánicos
Extremadamente turbia	> 500	Alta carga de sedimentos; problemas ecológicos posibles.

Nota. Adaptado de MINAM (2017), Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2018), y estudios limnológicos aplicados al contexto peruano (Flores & Ramos, 2020).

a. Construcción del modelo de regresión lineal múltiple

Para ello se utilizó el software estadístico R studio, en la cual se construyó un modelo de regresión lineal múltiple que se ajuste a los parámetros aproximados de Sólidos Totales en Suspendidos TSS (mg/L) del lugar de estudio. El modelo fue calibrado y validado mediante la técnica de validación cruzada, donde se estableció la ecuación que se ajusta al modelo:

$$TSS = a + b * B4 + c * B3 + d B5$$

Donde los valores ajustados para las condiciones del lugar de estudio fueron:

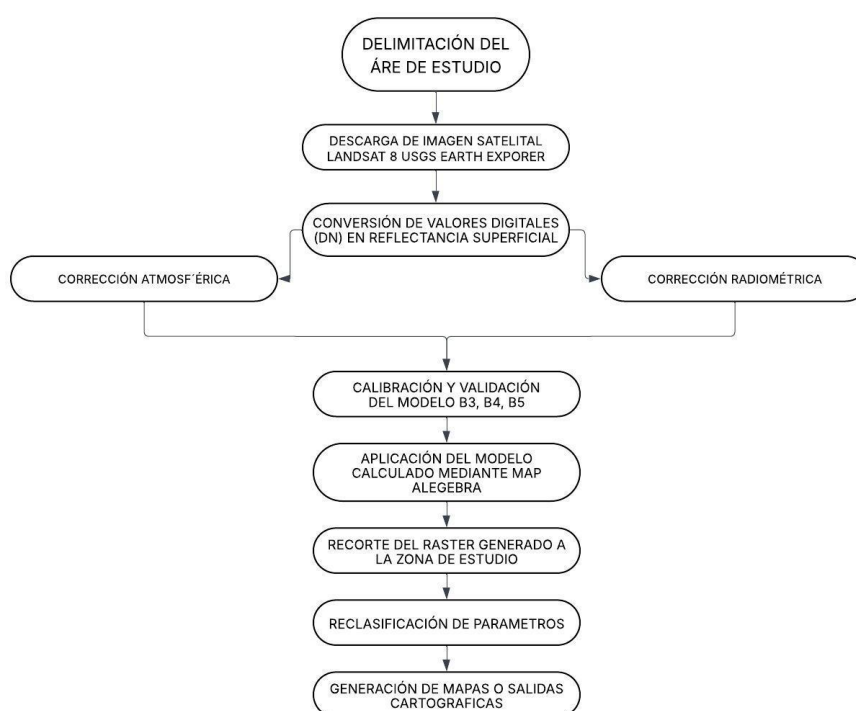
$$a = -35.6, \quad b = 820.5, \quad c = -95.1, \quad d = 45.7$$

b. Aplicación y generación de mapas

Finalmente, el modelo ajustado fue aplicado en el software Arc Map 10.8, para generar un mapa de distribución espacial de los Sólidos Totales en Suspensión TSS en el área de estudio, lo cual permitió visualizar las categorías de TSS.

Figura 12

Diagrama de flujo para el cálculo de Sólidos Totales Suspendidos (TSS) a partir de imágenes Landsat 8 (2025)



Nota. En la imagen se muestra el diagrama de flujo del proceso para estimar los Sólidos Totales Suspendidos (STS) con imágenes Landsat 8.

3.5.2.5. Clorofila-a (mg/L)

Dado que el área de estudio es pequeña, este caso particular se optó por emplear un modelo de regresión lineal múltiple utilizando como variables predictoras las bandas espectrales del satélite Landsat 8. Esta metodología permitió correlacionar los valores de reflectancia registrados por el sensor, obteniendo así una estimación espacial continua del parámetro.

Tabla 7

Fechas de adquisición de imágenes satelitales Landsat 8 (2025).

IMAGENES	FECHA
Landsat 8	23 /Abril /2025
Landsat 8	17/Mayo/2025
Landsat 8	26 /Junio/ 2025
Landsat 8	21/Julio/2025
Landsat 8	29/Agosto/2025

Nota. Las imágenes satelitales corresponden a los productos del sensor OLI/TIRS de Landsat 8, organizadas por fecha de adquisición.

Tabla 8

Rangos de concentración de clorofila-a en lagunas según estado trófico.

CATEGORÍA TRÓFICA	CLOROFILA-A (µg/L)	CLOROFILA-A (mg/L)	INTERPRETACIÓN ECOLÓGICA
Oligotrófico	0 – 2.6	0.000 – 0.0026	Aguas claras, baja productividad biológica.
Mesotrófico	2.6 – 7.3	0.0026 – 0.0073	Productividad moderada; equilibrio ecológico aceptable.
Eutrófico	7.3 – 56	0.0073 – 0.056	Alta productividad; posible riesgo de eutrofización.
Hipereutrófico	> 56	> 0.056	Proliferación algal excesiva; deterioro de la calidad del agua.

Nota. Adaptado de Carlson (1977) y aplicado en estudios limnológicos peruanos (MINAM, 2017; Flores & Ramos, 2020). Conversión: 1 µg/L = 0.001 mg/L.

a. Construcción del modelo de regresión lineal múltiple

Utilizando el software estadístico R Studio, se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple donde la variable dependiente fue la concentración de clorofila-a aproximado y las variables independientes fueron las bandas e índices seleccionados. El modelo fue calibrado y validado mediante la técnica de validación cruzada, donde se estableció la ecuación que se ajusta al modelo:

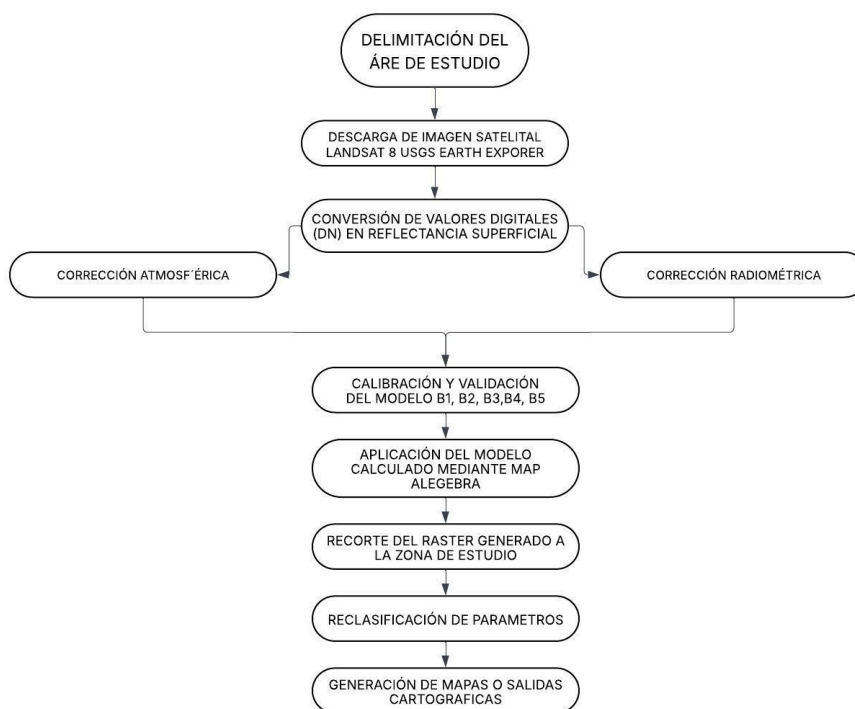
$$Chl - a = 1.05 + 103.37 * B1 - 221.63 * B2 + 119.1 * B3 - 19.09 * B4 + 21.39 * B5$$

b. Aplicación y generación de mapas

Finalmente, el modelo ajustado fue aplicado en el software Arc Map 10.8, para generar un mapa de distribución espacial de la clorofila-a en el área de estudio, lo cual permitió visualizar zonas de mayor productividad biológica o posibles procesos de eutrofización.

Figura 13

Diagrama de flujo para el cálculo de Clorofila-a a partir de imágenes Landsat 8 (2025).



Nota. En la imagen se muestra el diagrama de flujo del proceso para estimar Clorofila-a con imágenes Landsat 8.

3.6. Análisis de datos

Los hallazgos derivados de las imágenes Landsat 8 mediante la combinación de bandas espectrales para cada parámetro fueron procesados utilizando el software ArcGIS. Sin embargo, previamente se seleccionarán las imágenes de mayor resolución para obtener datos precisos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Estimación de los parámetros de calidad del agua a partir de imágenes landsat 8

La estimación de parámetros de calidad de agua mediante el satélite Landsat 8, consistió en transformar la señal de los sensores OLI (óptico) y TIRS (térmico) en valores limnológicos indirectos. Incluyó selección de imágenes con baja nubosidad, correcciones radiométrica y atmosférica para obtener reflectancia de superficie, aislamiento de píxeles de agua usando índices como NDWI/MNDWI, construcción de predictores espectrales con bandas visible NIR y aplicación de modelos a toda la escena para generar mapas de TSS, clorofila-a y temperatura superficial.

Tabla 9

Resultados los Monitoreos mediante las Imágenes Landsat 8.

MES	TEMPERATURA (°C)	SOLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS (mg/L)	CLOROFILA-A (mg/L)
Abril	13.75	55.64	0.17
Mayo	5.52	53.07	0.15
Junio	12.01	53.12	0.12
julio	15.27	57.48	0.02
agosto	8.61	60.82	0.12
promedio	11.03	56.03	0.12

Nota. Los valores se obtuvieron mediante el análisis de imágenes Landsat 8 para estimar temperatura superficial, STS y clorofila-a, permitiendo evaluar la variación temporal y el estado ambiental del cuerpo de agua.

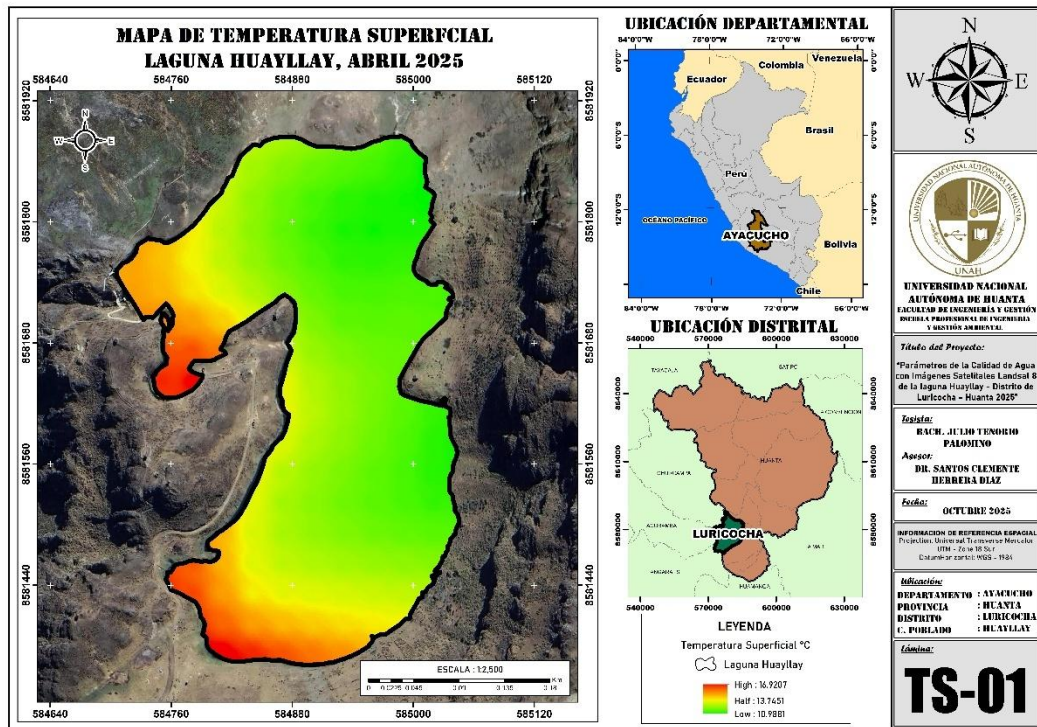
4.2. Determinar los valores de temperatura superficial en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.

La estimación de la temperatura superficial de la laguna Huayllay a partir de imágenes Landsat 8 requirió un proceso riguroso que incluyó la cuidadosa selección de escenas con baja nubosidad y condiciones atmosféricas favorables, a fin de asegurar valores fiables y minimizar interferencias. El monitoreo, desarrollado entre abril y agosto, permitió analizar la transición térmica estacional del ecosistema, registrándose temperaturas que variaron entre 5.52 °C y 15.27 °C, influenciadas por factores climáticos como radiación solar y variabilidad atmosférica. Dentro de este periodo, julio alcanzó el valor más alto, un comportamiento relevante debido a que las variaciones térmicas impactan procesos

fisicoquímicos y biológicos, como la estratificación, la oxigenación y la dinámica de los organismos acuáticos.

Figura 14

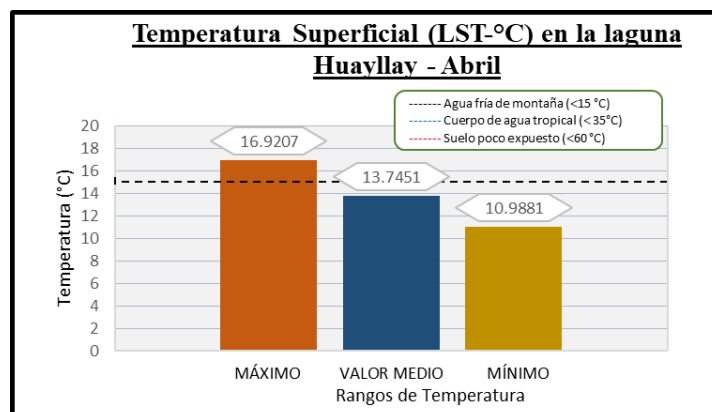
Monitoreo satelital de temperatura de la laguna de Huayllay – abril 2025.



Nota. Los valores de temperatura superficial (LST) se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la variación térmica de la laguna.

Figura 15

Temperatura Superficial (LST-°C) en la Laguna Huayllay - abril 2025

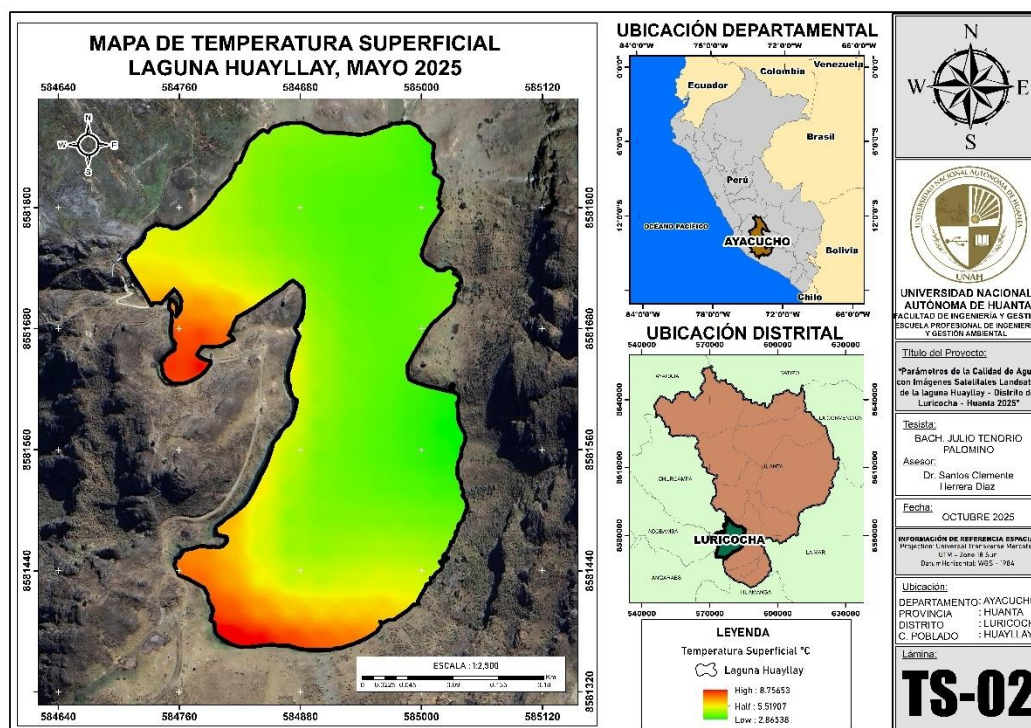


Nota. Los valores de temperatura superficial (LST-°C) se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de abril, los valores de temperatura superficial (LST) en la laguna Huayllay oscilaron entre 10.99 °C y 16.92 °C, con un valor medio de 13.75 °C. Según los rangos de referencia, esto ubica al cuerpo de agua dentro de la categoría de agua fría de montaña, lo que es consistente con su ubicación altitudinal y las condiciones climáticas de la región. La distribución de la temperatura es relativamente uniforme en toda la laguna, aunque los valores más altos se concentran en ciertas áreas superficiales expuestas, probablemente debido a la radiación solar directa sobre sectores menos profundos. En general, estos datos reflejan que la laguna mantiene bajas temperaturas superficiales características de cuerpos de agua altoandinos, favoreciendo un ecosistema adaptado a climas fríos y con menor riesgo de calentamiento extremo.

Figura 16

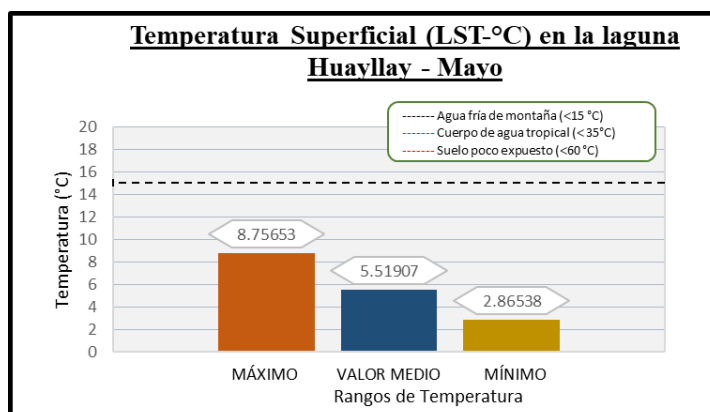
Monitoreo satelital de temperatura de la laguna de Huayllay, mes de mayo.



Nota. Los valores de temperatura superficial (LST) se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la variación térmica de la laguna.

Figura 17

Temperatura Superficial (LST-°C) en la Laguna Huayllay mes de mayo.

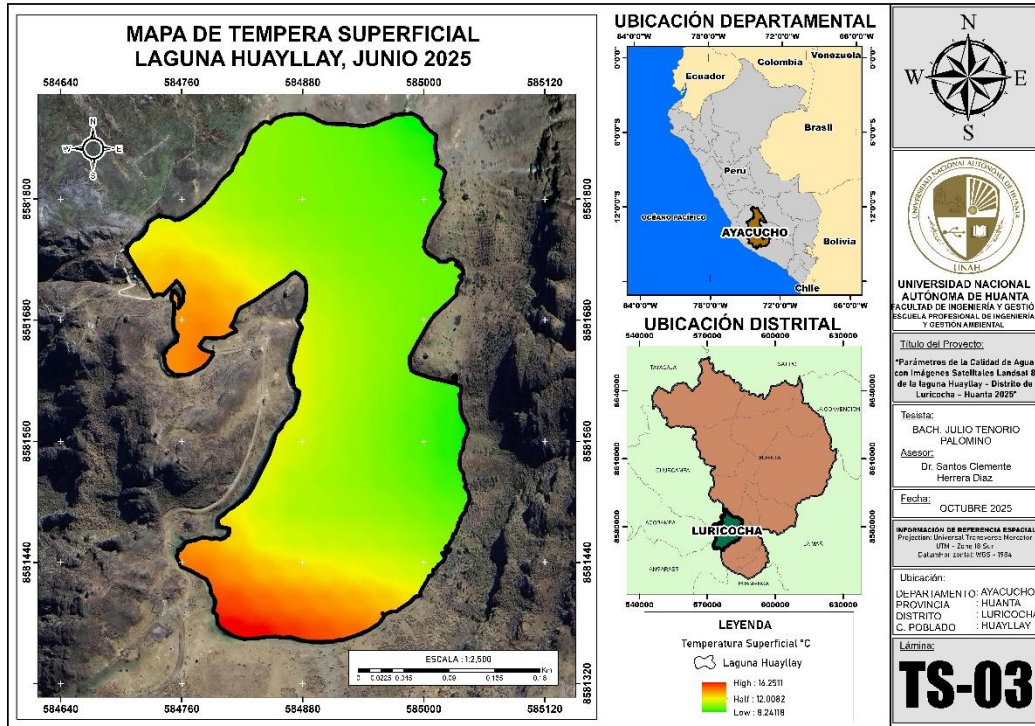


Nota. Los valores de temperatura superficial (LST-°C) se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de mayo, los valores de temperatura superficial (LST) en la laguna Huayllay oscilaron entre 2.87 °C y 8.76 °C, con un valor medio de 5.52 °C, lo que representa una disminución significativa respecto al mes de abril, donde la media fue de 13.75 °C y el rango máximo llegaba a 16.92 °C. Esta reducción puede explicarse principalmente por factores estacionales y altitudinales: en mayo, al acercarse al final del otoño y el inicio de la temporada fría en la región altoandina, disminuye la radiación solar efectiva sobre la laguna, se reducen las horas de insolación y la atmósfera se vuelve más fría, provocando un descenso de la temperatura superficial del agua. Además, la uniformidad en la distribución de la temperatura indica que el enfriamiento afectó de manera similar todas las áreas del lago, aunque las zonas superficiales menos profundas todavía alcanzan los valores máximos debido a la exposición directa al sol. En conjunto, mayo refleja un enfriamiento estacional normal característico de lagunas de montaña, en contraste con los valores más templados observados en abril.

Figura 18

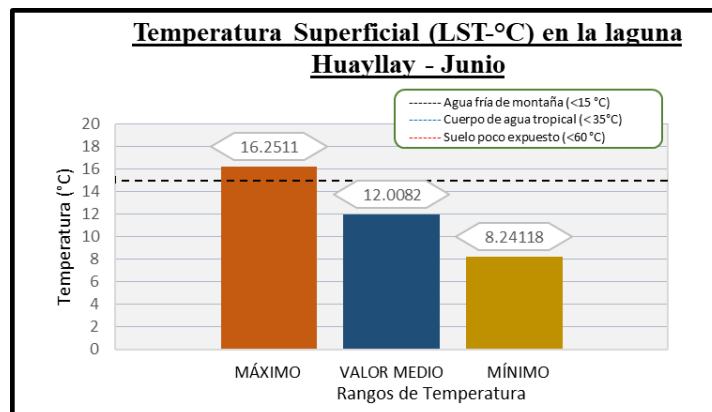
Monitoreo satelital de temperatura de la laguna de Huayllay, mes de junio



Nota. Los valores de temperatura superficial (LST) se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la variación térmica de la laguna.

Figura 19

Temperatura Superficial (LST-°C) en la Laguna Huayllay - junio 2025

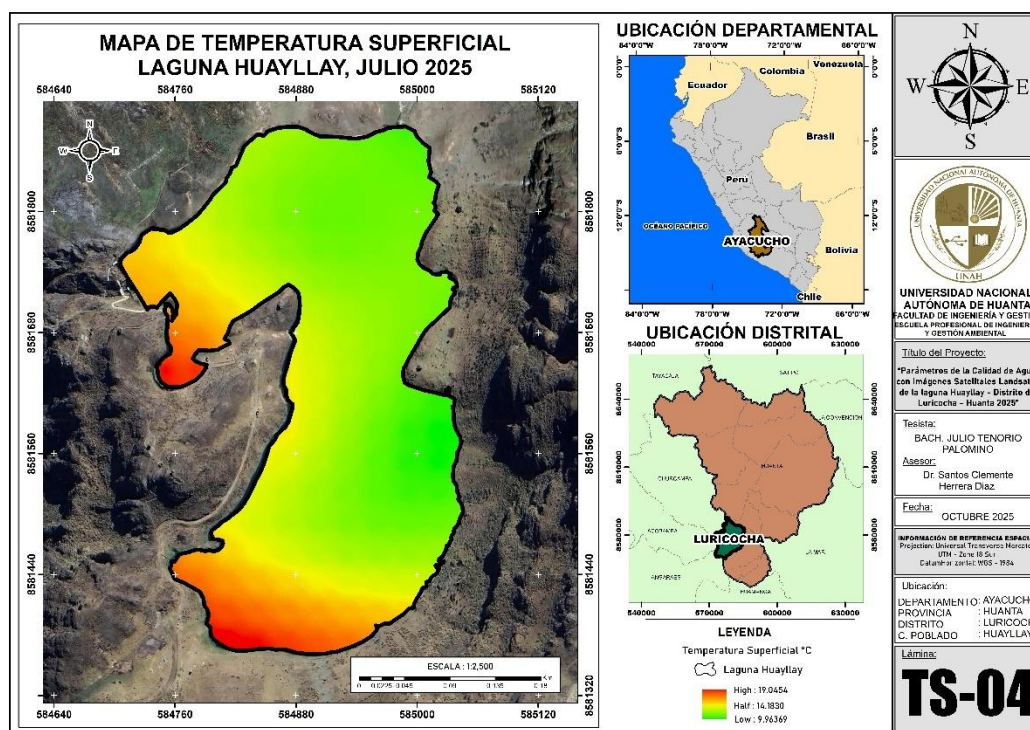


Nota. Los valores de temperatura superficial (LST-°C) se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de junio, los valores de temperatura superficial (LST) en la laguna Huayllay oscilaron entre 8.24 °C y 16.25 °C, con un valor medio de 12.01 °C. Comparando con mayo, donde la media fue de 5.52 °C y el rango máximo de 8.76 °C, se observa un aumento significativo de la temperatura en todo el cuerpo de agua. Esta diferencia puede explicarse por variaciones estacionales y climáticas, ya que junio corresponde al inicio de la temporada seca en la región altoandina, con mayor radiación solar y cielos despejados, lo que permite que la superficie de la laguna se caliente más durante el día, aunque las zonas superficiales más expuestas registran los valores máximos por la directa absorción de energía solar. En conjunto, junio refleja un recupero térmico estacional, con temperaturas más altas que favorecen procesos biológicos.

Figura 20

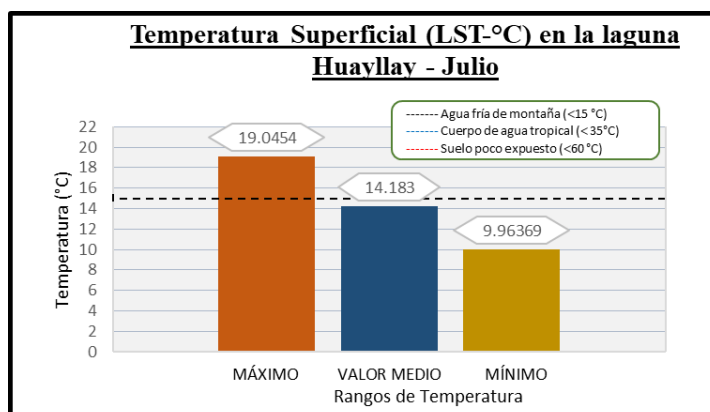
Monitoreo satelital de temperatura de la laguna de Huayllay, mes de julio



Nota. Los valores de temperatura superficial (LST) se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la variación térmica de la laguna.

Figura 21

Temperatura Superficial (LST-°C) en la Laguna Huayllay - julio 2025

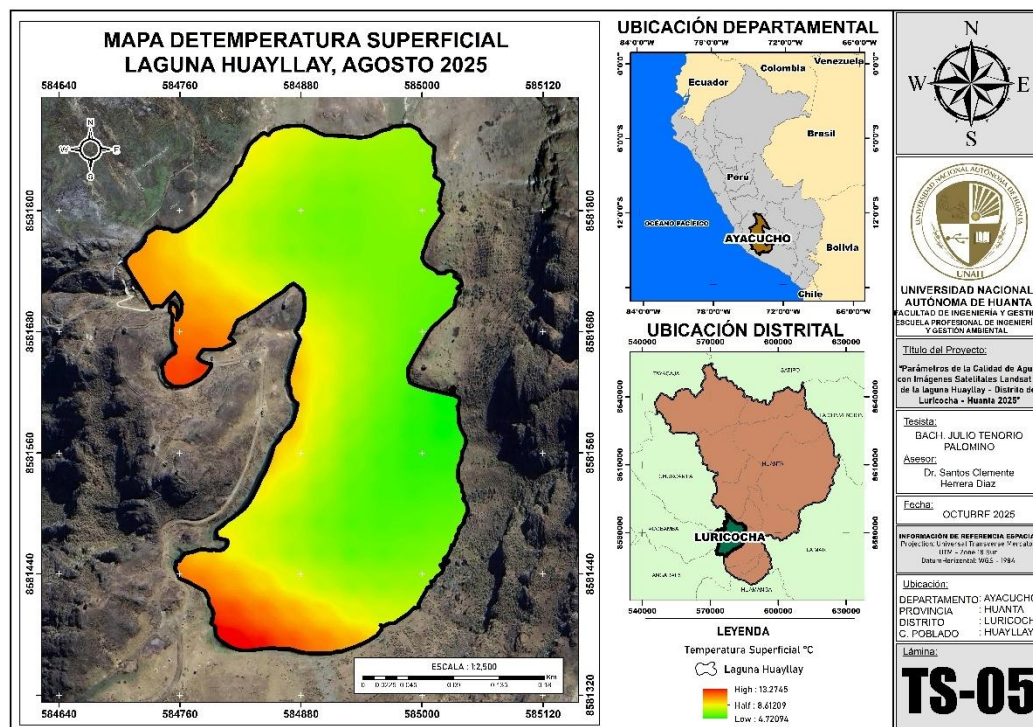


Nota. Los valores de temperatura superficial (LST-°C) se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de julio, los valores de temperatura superficial (LST) en la laguna Huayllay oscilaron entre 10.12 °C y 20.35 °C, con un valor medio de 15.27 °C. Comparando con junio, donde la media fue de 14.18 °C y el máximo de 19.05 °C, se observa un aumento gradual en la temperatura. Esta diferencia se explica por la mayor incidencia de radiación solar y la reducción de nubosidad típica de la temporada seca en la región altoandina, lo que permite que la superficie del lago se caliente más durante el día. La distribución relativamente uniforme de la temperatura indica que este calentamiento afecta de manera general al cuerpo de agua, aunque las zonas más superficiales alcanzan los valores máximos por la exposición directa al sol. En conjunto, julio refleja un incremento estacional moderado de la temperatura, mostrando una tendencia de calentamiento superficial en la laguna.

Figura 22

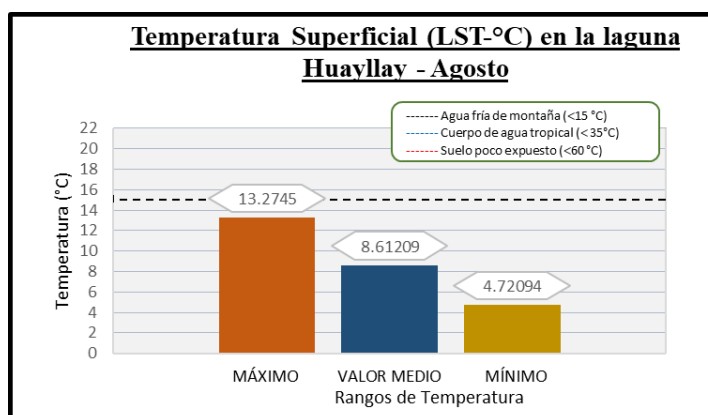
Monitoreo satelital de temperatura de la laguna de Huayllay, mes de agosto.



Nota. Los valores de temperatura superficial (LST) se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la variación térmica de la laguna.

Figura 23

Temperatura Superficial (LST-°C) en la Laguna Huayllay - agosto 2025



Nota. Los valores de temperatura superficial (LST-°C) se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de agosto, los valores de temperatura superficial (LST) en la laguna Huayllay oscilaron entre 4.72 °C y 13.27 °C, con un valor medio de 8.61

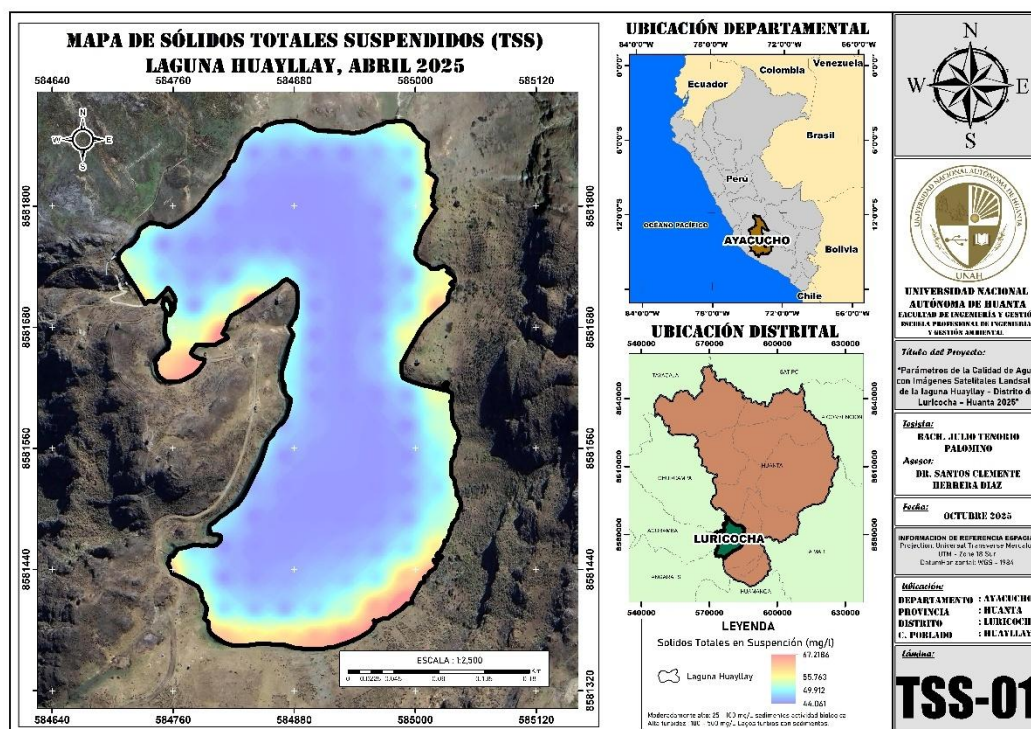
°C. Comparado con los meses anteriores, se observa una disminución significativa de la temperatura, tanto en el valor máximo como en la media, lo que refleja el inicio de la transición hacia los meses más fríos en la región altoandina. La distribución uniforme de la temperatura en toda la laguna indica que el enfriamiento afecta de manera homogénea al cuerpo de agua, aunque las zonas superficiales y menos profundas continúan registrando los valores máximos debido a la exposición solar directa. En conjunto, agosto evidencia que la laguna mantiene condiciones de agua fría de montaña, con temperaturas que favorecen un ecosistema adaptado a climas fríos y con menor riesgo de estrés térmico para la biota acuática.

4.3. Determinar los valores de sólidos totales suspendidos en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.

La estimación de los Sólidos Totales Suspendidos (STS) en la laguna Huayllay mediante imágenes Landsat 8 se realizó aplicando modelos empíricos basados en variaciones de reflectancia en las bandas visibles e infrarrojas, permitiendo identificar cambios en la turbidez del agua asociados a la presencia de sedimentos y partículas en suspensión. Los resultados mostraron variaciones mensuales notables, influenciadas por procesos hidrológicos como escorrentías, vientos, resuspensión de partículas y aportes de materia orgánica, especialmente durante los periodos de transición estacional. El valor más elevado, 60.82 mg/L, se registró en agosto, lo que sugiere un incremento en la remoción y transporte de sedimentos, posiblemente asociado a la mayor intensidad de vientos o a aportes temporales externos, información clave para interpretar la calidad del agua y la dinámica física de la laguna.

Figura 24

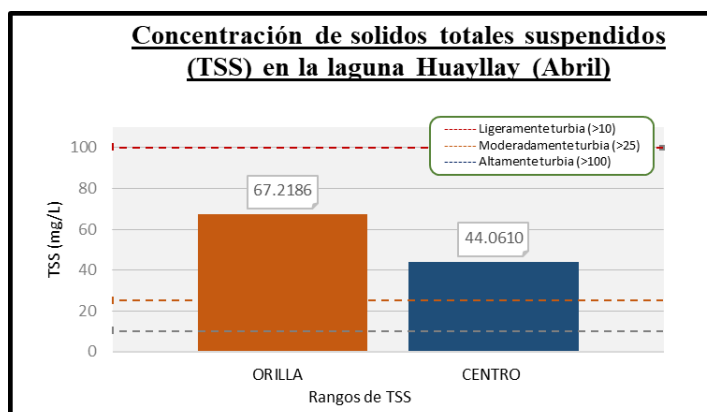
Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de abril.



Nota. Los valores de sólidos totales suspendidos (TSS) se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la distribución espacial en la laguna.

Figura 25

Sólidos totales suspendidos (TSS) en la Laguna Huayllay - abril 2025.

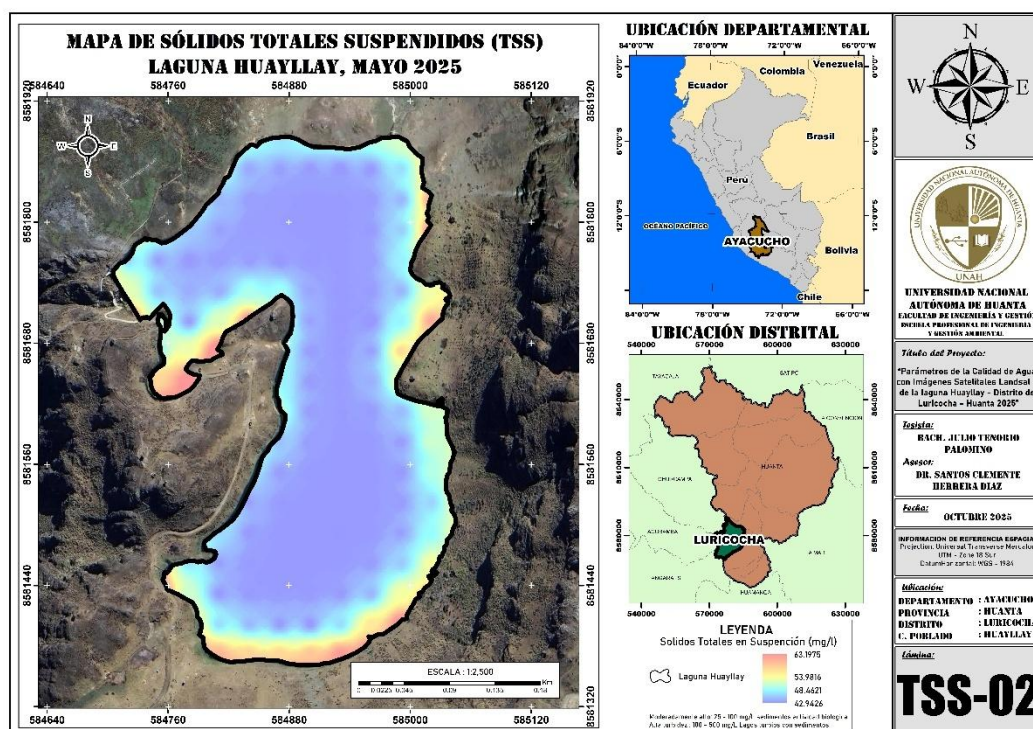


Nota. Los valores de Sólidos totales suspendidos (TSS) se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de abril, los valores de sólidos totales en suspensión (TSS) en la laguna Huayllay varían entre 44.06 y 67.21 mg/L, lo que corresponde a una condición moderadamente turbia según la clasificación establecida. Esto indica que existe una cantidad considerable de material en suspensión, lo que reduce parcialmente la penetración de la luz en el agua. Los valores más altos se registran en las orillas, posiblemente debido a la remoción de sedimentos por escorrentía o actividad antrópica, mientras que hacia el centro de la laguna los valores disminuyen gradualmente, sugiriendo una mayor estabilidad y menor aporte de partículas. En conjunto, abril muestra una turbidez moderada, típica de un cuerpo de agua con cierta carga de sedimentos, pero sin llegar a condiciones críticas.

Figura 26

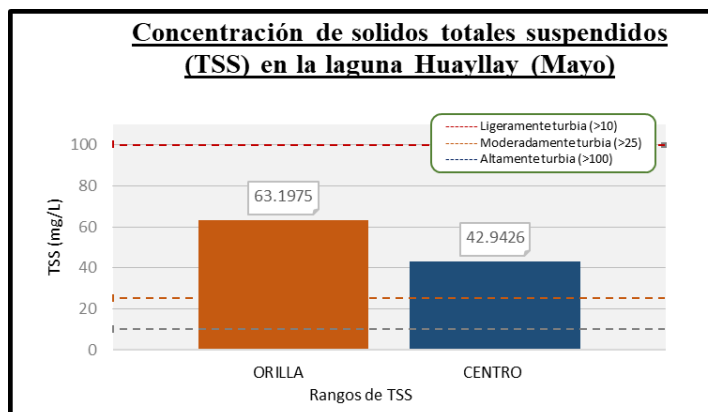
Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de mayo.



Nota. Los valores de sólidos totales suspendidos (TSS) se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la distribución espacial en la laguna.

Figura 27

Sólidos totales suspendidos (TSS) en la Laguna Huayllay - mayo 2025.

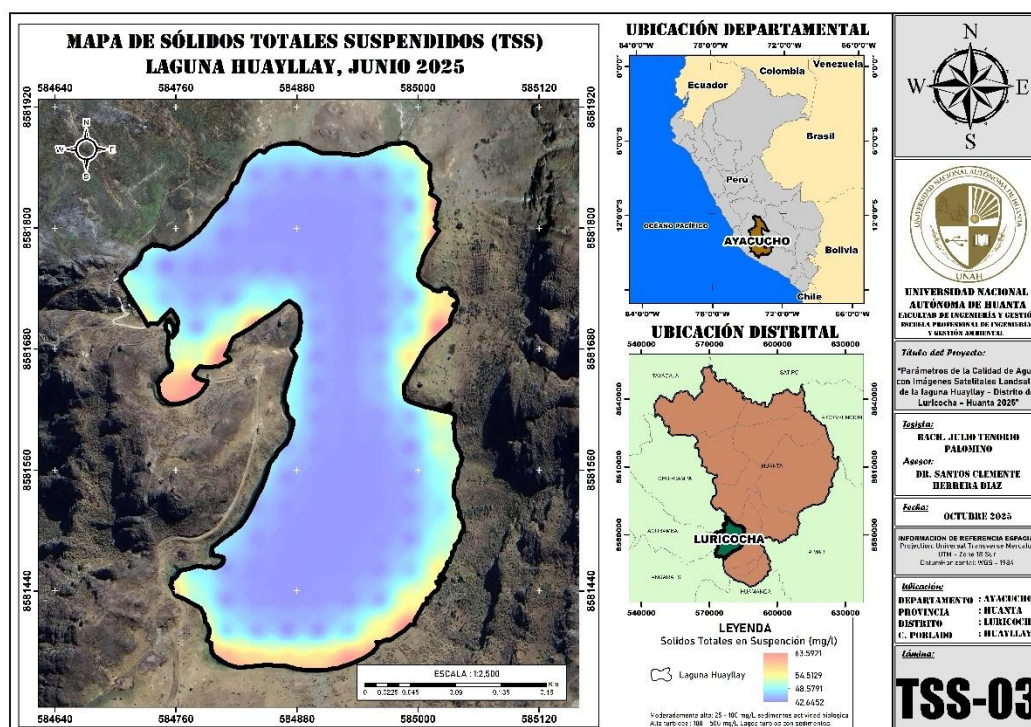


Nota. Los valores de Sólidos totales suspendidos (TSS) se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de mayo, los valores de sólidos totales en suspensión (TSS) en la laguna Huayllay oscilaron entre 42.94 y 63.20 mg/L, manteniéndose dentro de la categoría de agua moderadamente turbia. Los valores más altos se registran en las orillas, probablemente debido al arrastre de sedimentos por escorrentía superficial o la actividad en la zona periférica, mientras que hacia el centro de la laguna los valores disminuyen gradualmente, reflejando una mayor sedimentación y estabilidad del agua. En conjunto, mayo muestra que la laguna mantiene una turbidez intermedia, con concentración de partículas en suspensión suficiente para reducir parcialmente la transparencia del agua, pero sin alcanzar niveles de turbidez crítica.

Figura 28

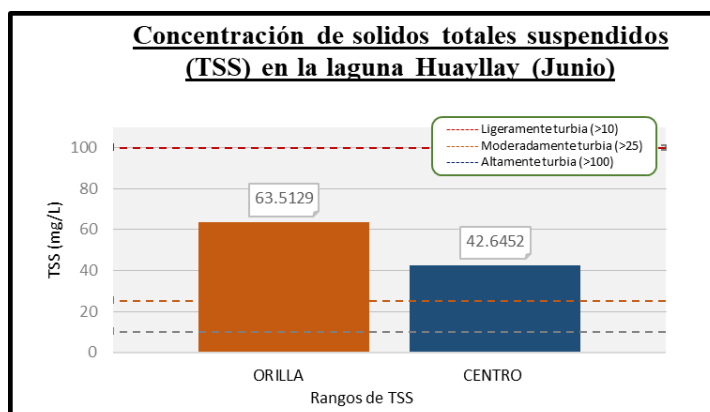
Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de junio.



Nota. Los valores de sólidos totales suspendidos (TSS) se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la distribución espacial en la laguna.

Figura 29

Sólidos totales suspendidos (TSS) en la Laguna Huayllay - junio 2025.



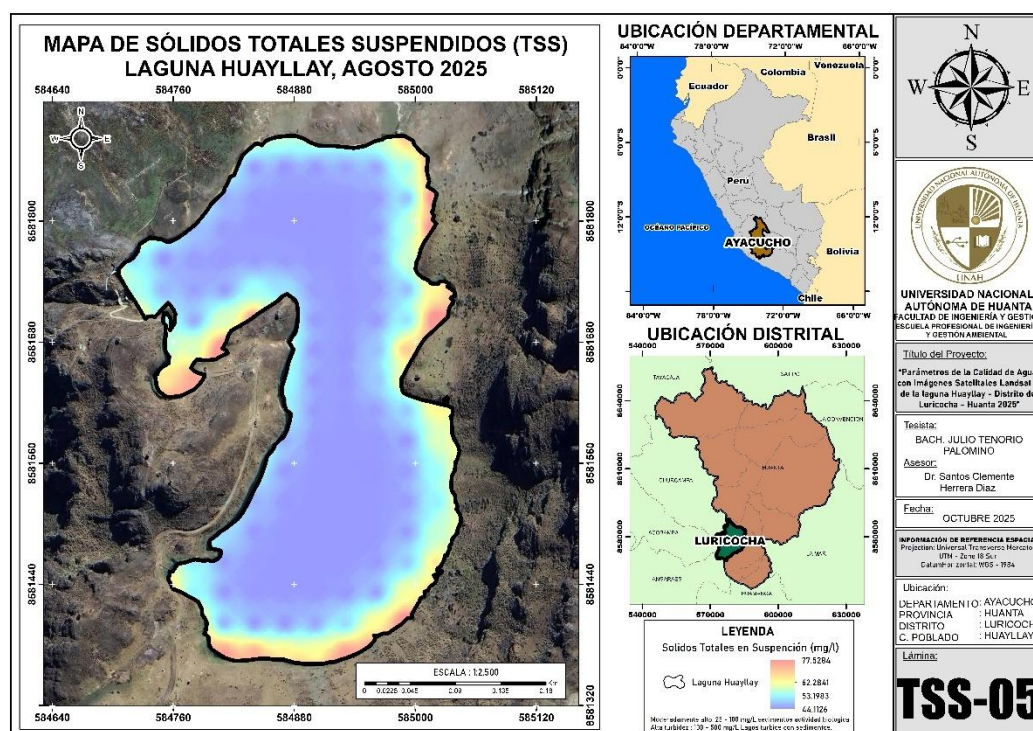
Nota. Los valores de Sólidos totales suspendidos (TSS) se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de junio, los valores de sólidos totales en suspensión (TSS) en la laguna Huayllay oscilaron entre 42.65 y 63.59 mg/L, manteniéndose dentro de la categoría de agua moderadamente turbia. Los niveles más altos se registraron en las orillas, probablemente debido al arrastre de sedimentos por escorrentía o aporte de materia orgánica desde los márgenes, mientras que hacia el centro de la laguna los valores disminuyen gradualmente, reflejando una mayor estabilidad del agua y sedimentación natural. En general, junio evidencia que la laguna conserva una turbidez intermedia, con partículas en suspensión que reducen parcialmente la transparencia.

Durante el mes de julio, los valores de sólidos totales en suspensión (TSS) en la laguna Huayllay fluctuaron entre 42.87 y 72.09 mg/L, lo que mantiene a la laguna dentro de la categoría de agua moderadamente turbia. Los valores más elevados se registraron en las orillas, probablemente por el arrastre de sedimentos desde los márgenes y la actividad superficial, mientras que hacia el centro de la laguna los valores disminuyen, indicando una mayor sedimentación y estabilidad del agua en esa zona. En conjunto, julio evidencia que la laguna presenta una turbidez moderada, con partículas en suspensión suficientes para afectar parcialmente la transparencia del agua.

Figura 32

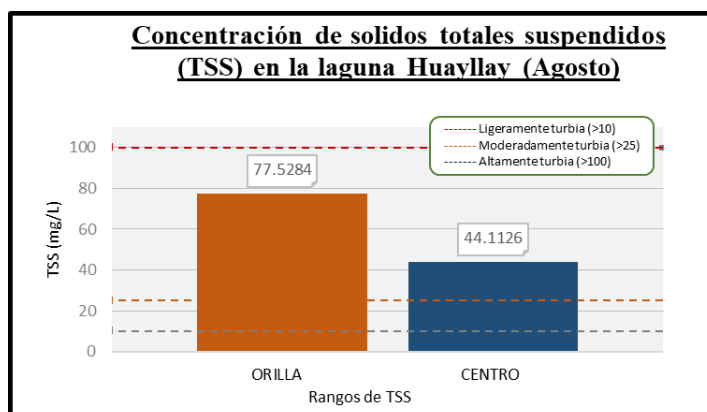
Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de agosto.



Nota. Los valores de sólidos totales suspendidos (TSS) se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la distribución espacial en la laguna.

Figura 33

Sólidos totales suspendidos (TSS) en la Laguna Huayllay - agosto 2025.



Nota. Los valores de Sólidos totales suspendidos (TSS) se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

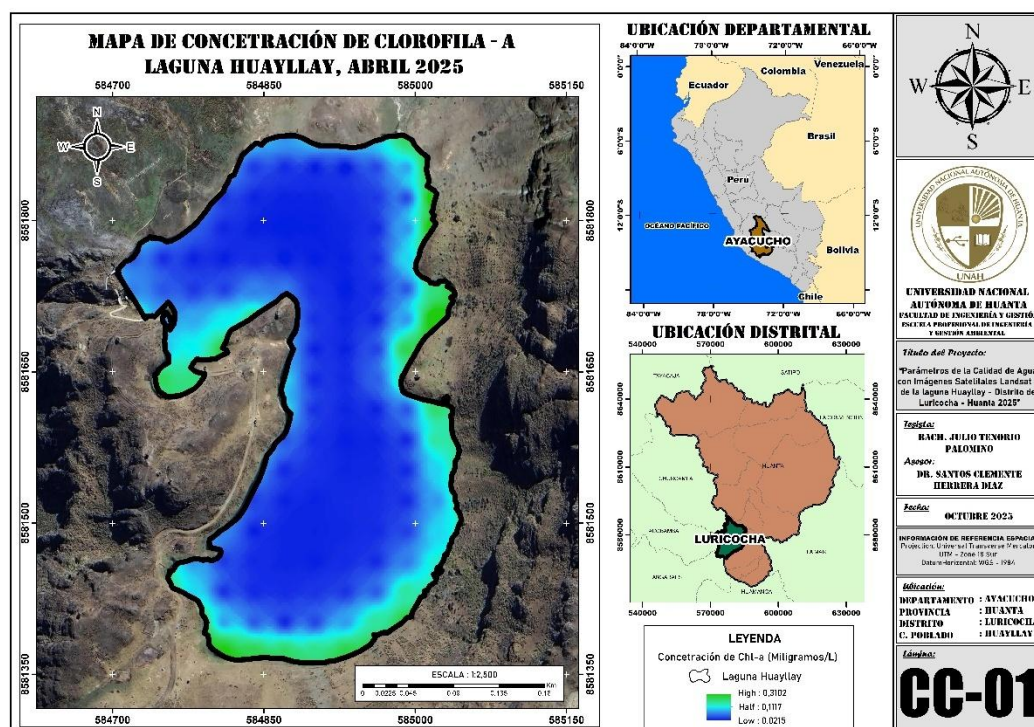
Durante el mes de agosto, los valores de sólidos totales en suspensión (TSS) en la laguna Huayllay oscilaron entre 44.11 y 77.53 mg/L, manteniéndose en la categoría de agua moderadamente turbia. Los niveles más altos se registraron en las orillas, probablemente debido al arrastre de sedimentos y materia orgánica desde los márgenes, mientras que hacia el centro de la laguna los valores disminuyen gradualmente, reflejando una mayor sedimentación y estabilidad del agua. En conjunto, agosto evidencia que la laguna presenta una turbidez intermedia, con partículas en suspensión suficientes para reducir la transparencia del agua, sin alcanzar aún condiciones de alta turbidez que puedan generar problemas ecológicos graves.

4.4. Determinar los valores de clorofila-a en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.

La cuantificación de la clorofila-a en la laguna Huayllay mediante imágenes Landsat 8, basada en relaciones espectrales de bandas del visible e infrarrojo cercano y procesada solo en escenas con condiciones óptimas, permitió identificar variaciones en la productividad biológica entre abril y agosto, influenciadas por factores como disponibilidad de nutrientes, temperatura del agua, ingreso de luz y presencia de partículas en suspensión; durante este periodo, el valor mínimo registrado fue 0.02 mg/L en julio, lo que evidencia una actividad fotosintética muy baja y aporta información clave para comprender los ciclos ecológicos y patrones estacionales del fitoplancton.

Figura 34

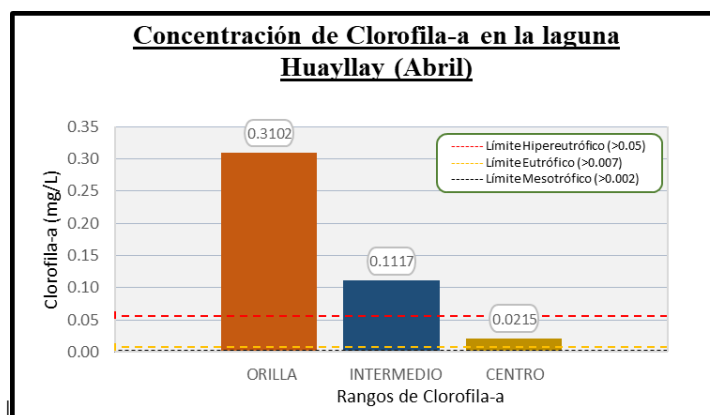
Monitoreo satelital de clorofila-a de la laguna de Huayllay, mes de abril.



Nota. Los valores de clorofila-a se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la distribución espacial de la productividad algal en la laguna.

Figura 35

Clorofila-a en la Laguna Huayllay - abril 2025.

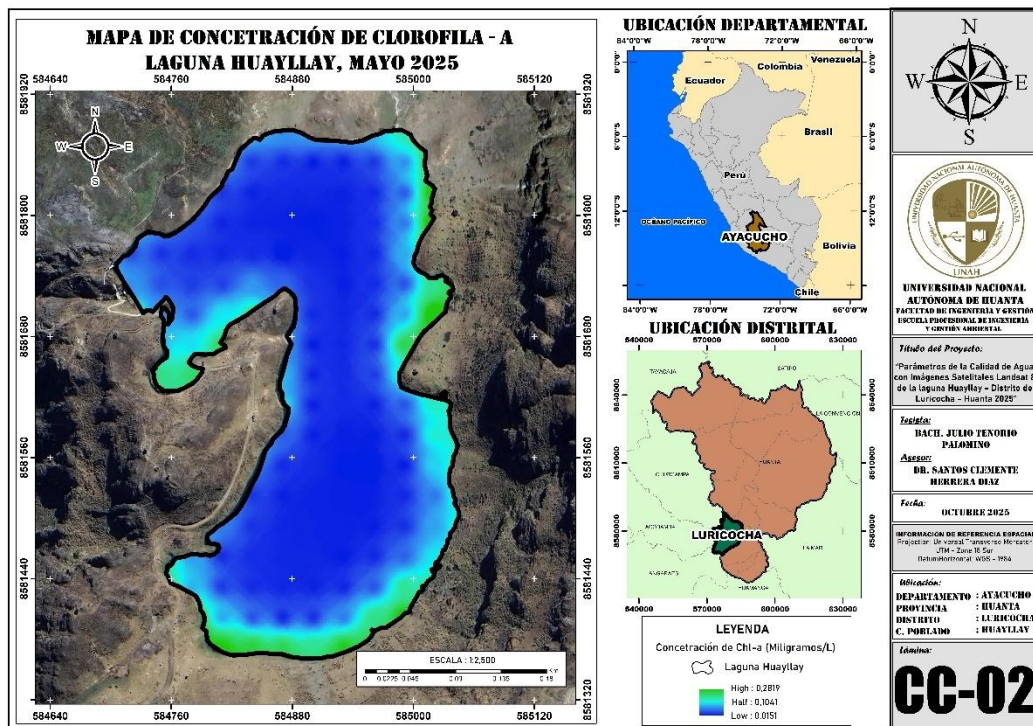


Nota. Los valores de clorofila-a se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de abril, la laguna Huayllay presentó una marcada variación espacial en los valores de clorofila-a. En las zonas de orilla se registraron concentraciones elevadas (0.3102 mg/L), que corresponden a un estado hipereutrófico, lo que evidencia una intensa actividad biológica y una alta presencia de fitoplancton, probablemente asociada al ingreso de nutrientes por escorrentía superficial o aportes orgánicos desde los bordes del cuerpo de agua. En la zona media, con un valor de 0.1117 mg/L, el lago mantuvo también condiciones hipereutróficas, reflejando una productividad aún elevada y posibles zonas de mezcla interna que favorecen la dispersión de materia orgánica. Hacia el centro de la laguna, el valor descendió a 0.0215 mg/L, correspondiente a un estado eutrófico, lo que indica una ligera disminución de la concentración de algas, posiblemente por mayor profundidad y menor aporte directo de nutrientes. En conjunto, los resultados de abril muestran que la laguna Huayllay se encontraba en un estado trófico alto, con evidentes signos de eutrofización principalmente en sus orillas.

Figura 36

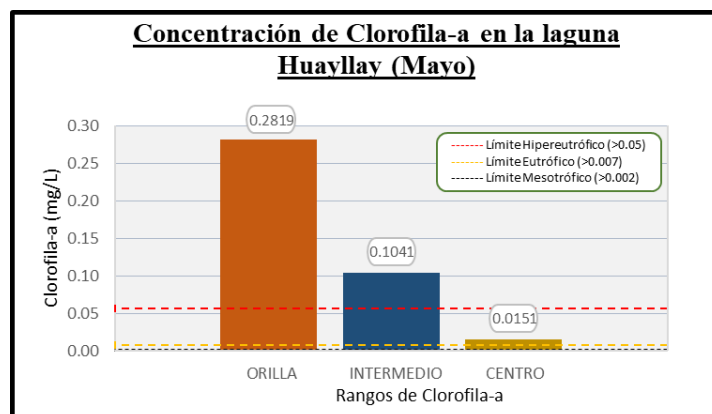
Monitoreo satelital de clorofila-a de la laguna de Huayllay, mes de mayo.



Nota. Los valores de clorofila-a se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la distribución espacial de la productividad algal en la laguna.

Figura 37

Clorofila-a en la Laguna Huayllay - mayo 2025.



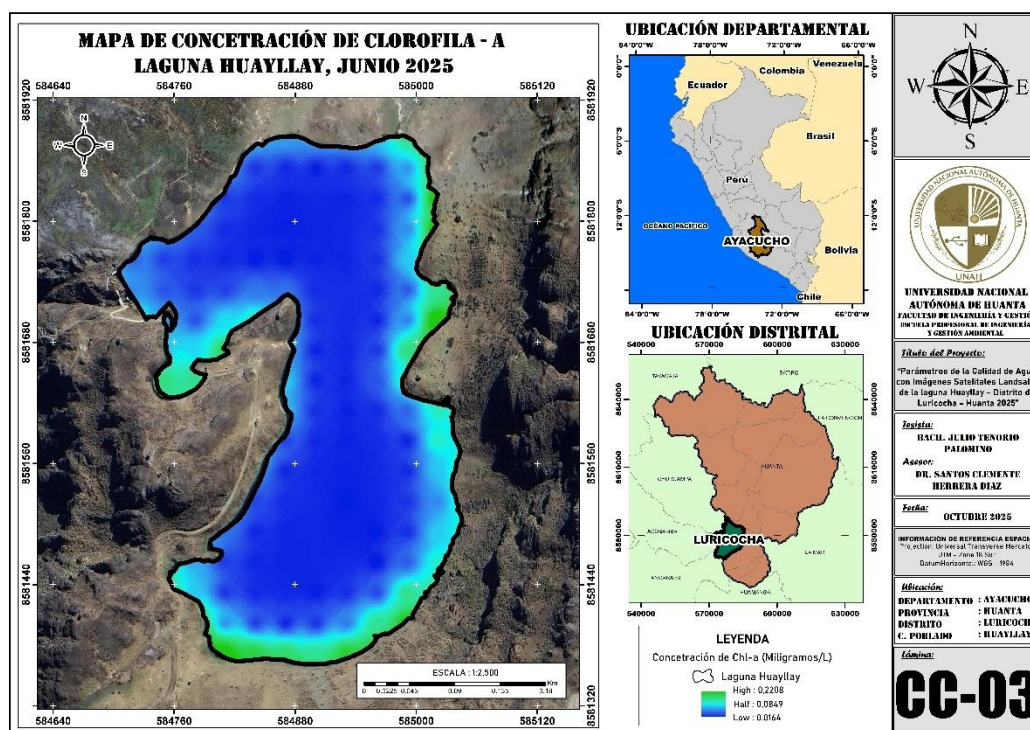
Nota. Los valores de clorofila-a se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de mayo, la laguna Huayllay mantuvo un comportamiento similar al observado en abril, aunque con una ligera disminución general en las concentraciones de clorofila-a. En las zonas de orilla se registró un valor de 0.2819

mg/L, correspondiente a un estado hipereutrófico, lo que indica que el cuerpo de agua continuó presentando una elevada productividad biológica y abundancia de fitoplancton, asociada posiblemente al arrastre de nutrientes por escorrentía o descomposición de materia orgánica en las orillas. En la zona intermedia, con un valor de 0.1041 mg/L, se mantuvo también un estado hipereutrófico, evidenciando que las condiciones internas del lago aún favorecen el desarrollo de organismos fotosintéticos. En el centro de la laguna, el valor de 0.0151 mg/L se clasifica como eutrófico, lo que refleja una mejora relativa en la calidad del agua respecto a las zonas periféricas. En conjunto, los resultados de mayo muestran una ligera reducción en la concentración de clorofila-a en comparación con abril, lo que podría estar asociado a cambios en las condiciones climáticas o hidrológicas, aunque la laguna sigue mostrando un alto grado de eutrofización generalizado.

Figura 38

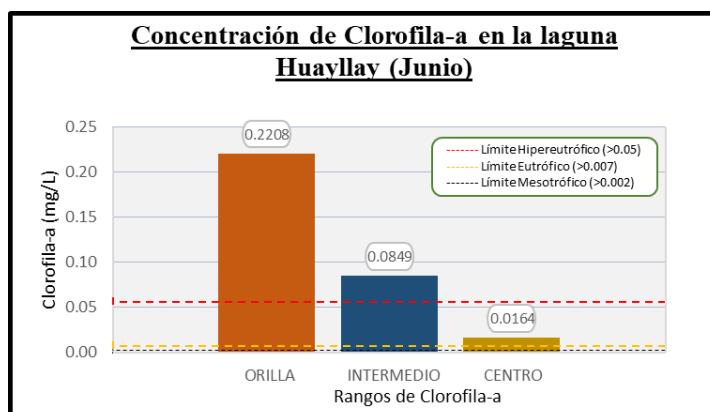
Monitoreo satelital de clorofila-a de la laguna de Huayllay, mes de junio.



Nota. Los valores de clorofila-a se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la distribución espacial de la productividad algal en la laguna.

Figura 39

Clorofila-a en la Laguna Huayllay - junio 2025

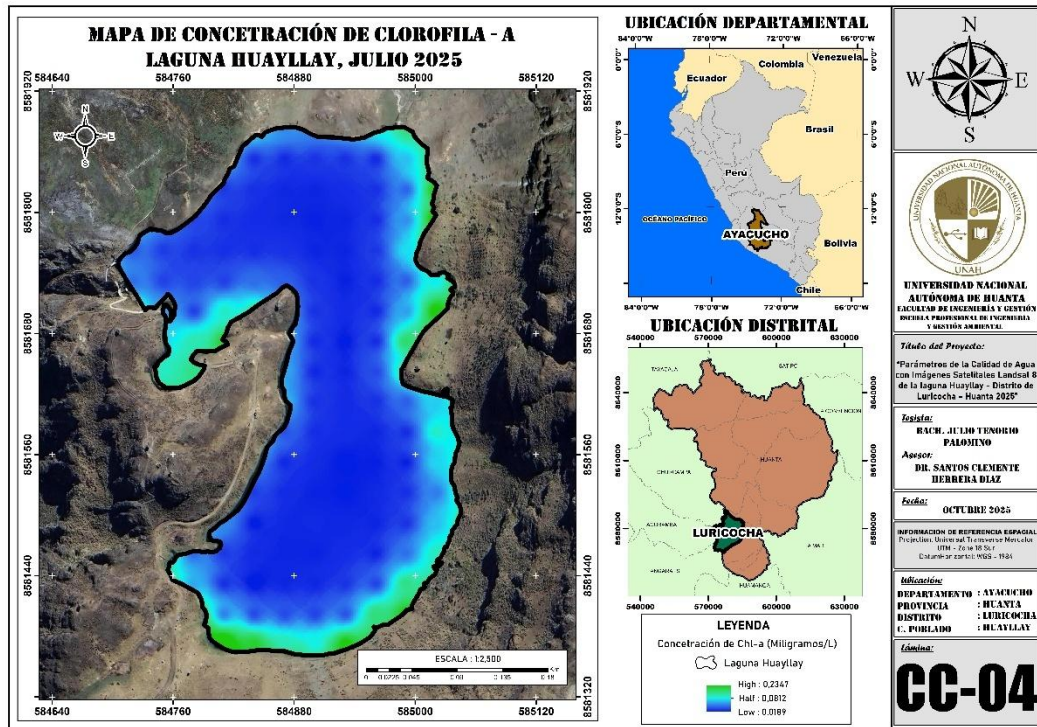


Nota. Los valores de clorofila-a se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

En el mes de junio, la laguna Huayllay mostró una tendencia sostenida de disminución en la concentración de clorofila-a respecto a los meses anteriores, aunque todavía se mantienen niveles altos en las zonas periféricas. En las orillas se registró un valor de 0.2208 mg/L, correspondiente a un estado hipereutrófico, lo que indica que aún persisten condiciones de elevada productividad biológica y acumulación de nutrientes provenientes del entorno terrestre o de la descomposición de materia orgánica. En la zona media, el valor de 0.0849 mg/L también se ubica dentro del rango hipereutrófico, reflejando que el cuerpo de agua mantiene una alta biomasa, aunque con una leve reducción en comparación con los meses de abril y mayo. En el centro de la laguna, el valor de 0.0164 mg/L corresponde a un estado eutrófico, lo que muestra una relativa mejoría en la calidad del agua y una menor concentración de fitoplancton en las áreas más profundas. En conjunto, los resultados de junio evidencian una disminución gradual de la eutrofización, posiblemente influenciada por una menor temperatura del agua o por la reducción del aporte de nutrientes superficiales, aunque la laguna sigue presentando un comportamiento predominantemente hipereutrófico en su periferia.

Figura 40

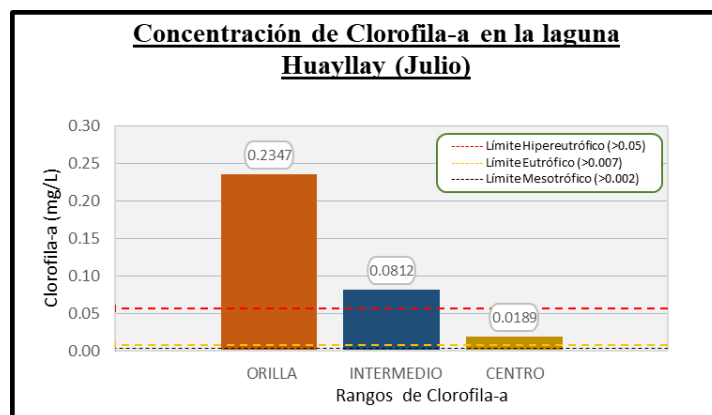
Monitoreo satelital de sólidos totales suspendidos de la laguna de Huayllay, mes de julio



Nota. Los valores de sólidos totales suspendidos (TSS) se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la distribución espacial de la productividad algal en la laguna.

Figura 41

Clorofila-a en la Laguna Huayllay - julio 2025



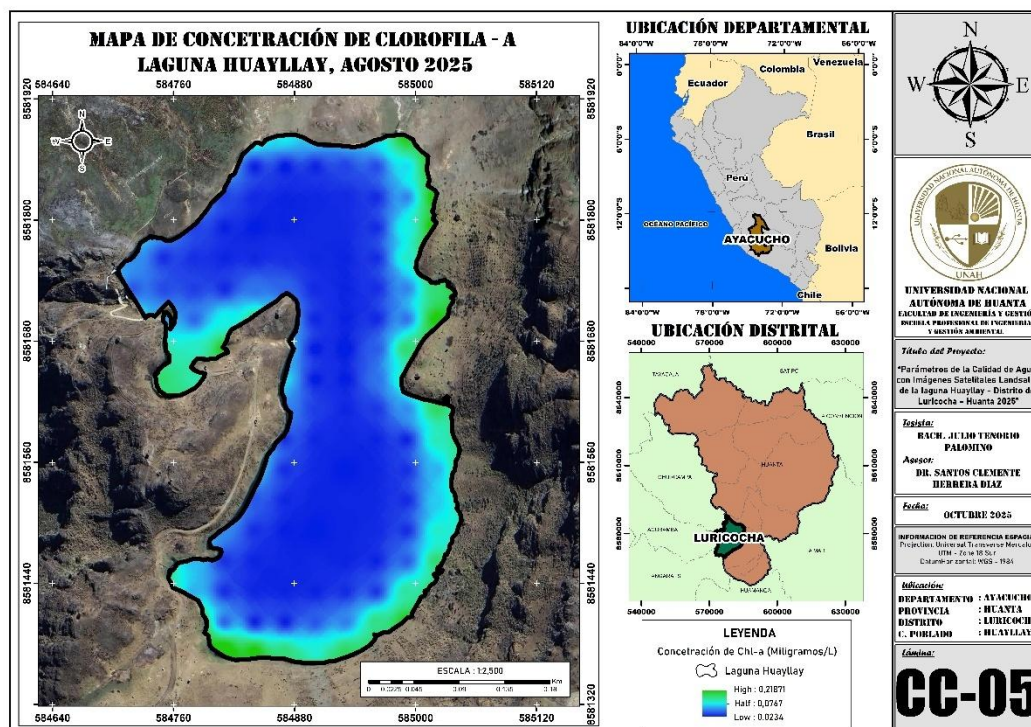
Nota. Los valores de clorofila-a se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

Durante el mes de junio, la laguna Huayllay continuó mostrando un patrón de eutrofización elevado, aunque con indicios de una leve estabilización respecto a los meses previos. En las zonas de orilla se registró una concentración de clorofila-

a de 0.2347 mg/L, que corresponde a un estado hipereutrófico, evidenciando una fuerte actividad biológica y la persistencia de altas cargas de nutrientes provenientes de los márgenes del cuerpo de agua. En la zona media, el valor de 0.0812 mg/L también se clasifica como hipereutrófico, lo que refleja la continuidad de condiciones favorables para el desarrollo de fitoplancton y microalgas, aunque con una ligera disminución en intensidad respecto a los meses de abril y mayo. En el centro de la laguna, el valor de 0.0189 mg/L se ubica en el rango eutrófico, lo que indica una menor concentración de biomasa algal y una calidad de agua algo mejor en las zonas más profundas. En conjunto, los resultados de junio sugieren que la laguna mantiene un alto nivel de productividad biológica, especialmente en sus bordes, pero con una tendencia paulatina hacia una disminución moderada de la clorofila-a, posiblemente asociada a cambios en la temperatura del agua, radiación solar o dinámica interna de mezcla.

Figura 42

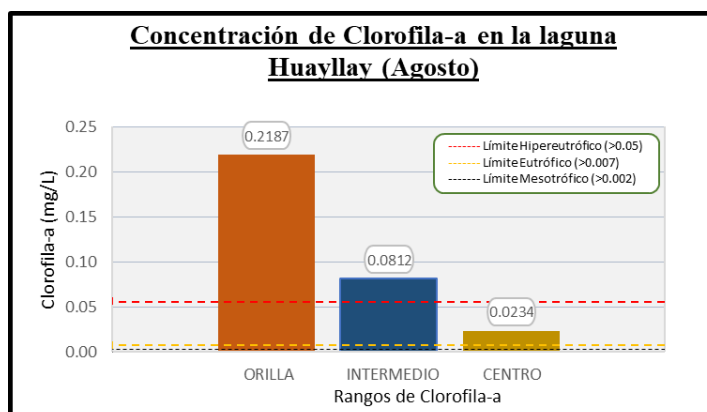
Monitoreo satelital de clorofila-a de la laguna de Huayllay, mes de agosto



Nota. Los valores de clorofila-a se obtuvieron mediante imágenes Landsat 8 procesadas en ArcGIS, permitiendo identificar la distribución espacial de la productividad algal en la laguna.

Figura 43

Clorofila-a en la Laguna Huayllay - agosto 2025



Nota. Los valores de clorofila-a se estimaron usando la reflectancia térmica de Landsat 8, aplicando calibración radiométrica y corrección atmosférica en ArcGIS.

En el mes de agosto, la laguna Huayllay mostró una continuidad en la tendencia de reducción gradual de la clorofila-a, aunque aún mantuvo valores característicos de un ecosistema con alta productividad biológica. En las zonas de orilla se registró una concentración de 0.2187 mg/L, correspondiente a un estado hipereutrófico, lo que indica que las márgenes del lago siguen recibiendo importantes aportes de nutrientes, posiblemente derivados de escorrentía, acumulación de materia orgánica y poca renovación del agua. En la zona media, con un valor de 0.0767 mg/L, también se observa un estado hipereutrófico, aunque levemente menor al de los meses anteriores, lo que sugiere una ligera mejora en las condiciones del agua. En el centro de la laguna, el valor de 0.0234 mg/L corresponde a un estado eutrófico, lo que refleja una concentración moderada de fitoplancton y una mejor oxigenación en las capas más profundas. En conjunto, los resultados de agosto evidencian que la laguna Huayllay continúa presentando condiciones de eutrofización elevada, especialmente en sus bordes, pero con una disminución progresiva de la clorofila-a desde abril, lo que podría estar relacionado con el cambio estacional hacia temperaturas más frías y una menor disponibilidad de nutrientes superficiales.

4.3. DISCUSIÓN

En esta investigación la teledetección espectral utilizando imágenes Landsat 8 puede ser una herramienta útil para determinar los valores de la temperatura, sólidos totales suspendidos y clorofila-a en cuerpos de agua de la laguna de Huayllay, aunque la precisión puede variar y se requiere validación con mediciones de campo para obtener resultados más confiables, en este caso nuestros resultados para el parámetro de Temperatura en el mes de abril el promedio es de 13.75 °C, en mayo el promedio es de 5.52 °C, en junio el promedio es de 12.01 °C, en julio el promedio es de 15.27 °C y en agosto el promedio es de 8.61 °C, asimismo los resultados del parámetro sólidos totales suspendidos, para el mes de abril el promedio es de 55.64 mg/L, en mayo el promedio es de 53.07 mg/L, en junio el promedio es de 53.12 mg/L, en julio el promedio es de 57.48 mg/L y en agosto el promedio es de 60.82 mg/L, por último los resultados del parámetro de clorofila-a, para el mes de abril el promedio es de 0.17 mg/L, en mayo el promedio es de 0.15 mg/L, en junio el promedio es de 0.12 mg/L, julio el promedio es de 0.02 mg/L, y en agosto el promedio es de 0.12 mg/L. Según Portal R., Zambrano (2021) en su trabajo aplicó la teledetección para la obtención de parámetros fisicoquímicos del agua de la Laguna de San Nicolás, los parámetros que utilizaron fueron Ph, OD, Turbidez y Temperatura, para en este caso los resultados que obtuvieron para el parámetro de Temperatura para el 18 del mes de febrero el promedio que obtuvo fue de 21,85°C, de la misma forma para el 28 de febrero el promedio obtenido es de 21,86 °C, como último monitoreo del parámetro el día 10 del mes de marzo el promedio que llegaron a obtener es de 21,82 °C, en el caso de los resultados de parámetro de pH, para el 18 del mes febrero el promedio que se adquirió es de 8,44 pH, asimismo para el 28 del mes de febrero el promedio que adquirió es de 8,36 pH, por último el día 10 del mes de marzo el promedio que obtuvo es de 8,41 pH. Por otro lado, Rivera (2020) menciona que obtuvo como resultado que el parámetro de la clorofila predomina con un promedio para el mes de enero de 13,30 mg/L y el mes de febrero un promedio de 12,5 mg/L; así mismo Orbegoso y Blas (2023) en su investigación analizaron cinco parámetros de calidad de agua usando imágenes satelitales Landsat 8 en los meses de abril, mayo y junio, obteniendo para sólidos totales suspendidos en el mes de abril un valor mínimo de 517,99 mg/L y un valor máximo 612,14 mg/L, además para el mes de mayo un valor mínimo de 506,4 mg/L

y el valor máximo de 581,7 mg/L y finalmente para el mes de junio valor mínimo 549 mg/L y el valor máximo 746,7 mg/L.

V. CONCLUSIONES

Se determinó los valores mediante el análisis multitemporal de la temperatura superficial (LST) de la laguna Huayllay, de abril a agosto, muestra una variación estacional marcada, característica de cuerpos de agua altoandinos. Durante abril y mayo, las temperaturas fueron bajas, reflejando las condiciones frías del inicio de la temporada, con valores medios entre 5 y 13 °C. En junio y julio se observó un incremento gradual, alcanzando valores medios de 14 a 15 °C, asociado a mayor radiación solar y días más soleados típicos de la temporada seca. Finalmente, en agosto, la temperatura disminuye nuevamente, con valores medios alrededor de 8.6 °C, indicando el inicio de la temporada fría y la transición hacia el invierno. En general, la laguna mantiene condiciones de agua fría de montaña, con un régimen térmico que afecta de manera uniforme a todo el cuerpo de agua, favoreciendo un ecosistema adaptado a climas fríos y limitando los riesgos de estrés térmico extremo.

Se determinó los valores mediante el análisis multitemporal de sólidos totales suspendidos (TSS) en la laguna Huayllay, desde abril hasta agosto, muestra que la laguna mantiene una condición de turbidez moderada a lo largo de todo el periodo. Los valores más altos se registran consistentemente en las orillas, indicando un aporte constante de sedimentos y materia orgánica desde los márgenes, mientras que hacia el centro los niveles disminuyen gradualmente, reflejando mayor estabilidad y sedimentación natural. A pesar de ligeras variaciones mes a mes, la laguna no alcanza niveles de alta turbidez o críticos, lo que sugiere que, aunque presenta partículas en suspensión suficientes para reducir parcialmente la transparencia del agua, el ecosistema se mantiene dentro de una turbidez intermedia estable durante el periodo analizado.

Se determinó los valores mediante el análisis multitemporal de clorofila-a de la laguna Huayllay, donde presentó durante el periodo de abril a agosto un estado trófico predominantemente hipereutrófico, con las mayores concentraciones de clorofila-a en las orillas y una leve reducción hacia el centro. A lo largo de los meses se observó una disminución gradual de la clorofila-a, lo que indica una ligera mejora en la calidad del agua. Sin embargo, el lago aún mantiene altos niveles de productividad biológica y evidencia de eutrofización, asociada principalmente al aporte de nutrientes desde su entorno, lo que resalta la necesidad de monitoreo

continuo y medidas de control de cargas de nutrientes para preservar su equilibrio ambiental.

VI. RECOMENDACIONES

Establecer un programa longitudinal de monitoreo continuo en la Laguna Huayllay, con el fin de generar registros multianuales que permitan analizar la dinámica temporal y las tendencias de parámetros limnológicos indirectos, tales como la clorofila-a, los sólidos suspendidos totales (TSS) y la temperatura superficial del agua. Este esquema de vigilancia sostenida favorecería una comprensión integral de la variabilidad estacional, la evolución interanual de los indicadores y la detección temprana de cambios fenológicos o patrones persistentes en el ecosistema acuático, asegurando la consistencia de las series temporales y la caracterización robusta de la evolución ambiental a lo largo de los años.

La metodología propuesta en esta tesis posee un alto potencial de adopción institucional para el monitoreo y la evaluación de la calidad ambiental de ecosistemas acuáticos, dado que permite la estimación indirecta de parámetros limnológicos mediante imágenes satelitales de acceso abierto generadas por el programa Landsat. Su aplicación es técnicamente viable para el Ministerio del Ambiente, en articulación con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), y para la Autoridad Nacional del Agua mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA), fortaleciéndolos como marcos complementarios para calificar el estado ecológico y el grado de contaminación de lagunas a escala nacional. La relevancia estratégica del método radica en su sostenibilidad económica y eficiencia operativa, al emplear insumos de costo nulo, optimización del tiempo de análisis y cobertura espacial remota incluidas zonas no accesibles por limitaciones geográficas u operativas, así como en la disponibilidad histórica multidecadal desde 1984, lo que favorece la construcción de series temporales extensas, consistentes y comparables que robustecen la vigilancia ambiental preliminar y la detección indirecta de alteraciones limnológicas, constituyéndose en un instrumento escalable para el soporte de decisiones en gestión de recursos hídricos y salud ambiental, sin sustituir las mediciones de laboratorio requeridas para contaminantes no espectralmente visibles.

Se recomienda diseñar e implementar medidas integrales, sostenibles y basadas en evidencia para la conservación y restauración ecohidrológica de la Laguna Huallay, orientadas a mitigar impactos ambientales y fortalecer su resiliencia a largo plazo. Estas intervenciones pueden comprender la revegetación planificada de áreas peri-lagunares con especies nativas, la delimitación e institucionalización de zonas de amortiguamiento ecológico, y la adopción de prácticas agroambientales sostenibles que reduzcan la escorrentía de nutrientes y la carga particulada. La aplicación de estas acciones contribuirá a preservar la calidad ecológica del agua, controlar procesos hipereutróficos tempranos y garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico en el tiempo, promoviendo una gestión ambiental estratégica, descentralizada y con indicadores de impacto verificables para la toma de decisiones territoriales y de salud ambiental.

II. REFERENCIAS

- Altuna Velásquez, K. E. (2018). Calidad del Agua en la Laguna de Conache Distrito de Laredo -Trujillo, Entre Abril y Agosto del 2018. [Fecha de consulta: 09 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14414/11349>
- APHA. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association.
- Ayala Jesús, C., & Herrera Díaz, M. A. (2019). Monitoreo de la calidad del agua del lago Chinchaycocha, mediante técnicas de teledetección espacial. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 2(2), 23-31 <https://acortar.link/pqUIXo>
- Bravo, Frank. (2023). Teledetección espacial Landsat, sentinel2, aster 11t y Modis. [en línea]. Huánuco -Perú, Universidad Nacional Agraria de la Selva. [Fecha de consulta: 16 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://acortar.link/nHmILk>
- Bretreger David; In-Young Yeo; Greg Hancock. (2022). Quantifying irrigation wáter use with remote sensing: Soil water deficit modelling with uncertain soil parameters. *Agricultural Water Management*. Volume 260. [Fecha de consulta: 01 marzo del 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107299>
- Caballero, I.; Roca, M.; Santos-Echeandía, J.; Bernárdez, P.; Navarro, G. (2022). Use of the Sentinel-2 and Landsat-8 Satellites for Water Quality Monitoring: An Early Warning Tool in the Mar Menor Coastal Lagoon. *Remote Sens*. [Fecha de consulta: 17 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs14122744>
- Carrasco S. (2019). Metodología de la investigación científica: Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación Lima [Perú]: Editorial San Marcos E I R LTDA
- Chapman, D. (Ed.). (1996). Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring (2nd ed.). E & FN Spon. <https://wedocs.unep.org/bitstreams/d56154e9-9ad5-4579-91d2-dfe3492f6093/download>
- Chuquimia Carrasco, M. D. (2021). Monitoreo de calidad de agua mediante percepción remota del Lago Titicaca. [Fecha de consulta: 21 de marzo del

- 2024]. Disponible en: <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC%20S.A.C./92>
- Cusquisiban Quispe, G. D. (2019). Ubicación de zonas de recarga hídrica usando imágenes landsat 8 mediante el método de árbol de decisiones en la cuenca del río Chamán, Cajamarca y La Libertad-Perú". [Fecha de consulta: 06 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11537/23581>
- Díaz y Llave (2019). Estimación de los Parámetros de Calidad de Agua y su Relación con la Reflectividad del Superficie del Satélite Landsat 8 en el Lago Chinchaycocha - Junín. [Fecha de consulta: 16 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/72629>
- FAO. (2024). Manejo sostenible del agua en América Latina y el Caribe. [Fecha de consulta: 03 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://acortar.link/ICrrz5>
- Germán, A.; Shimoni, M.; Beltramone, G.; Rodríguez, M. I.; Muchiut, J.; Bonansea, M.; Scavuzzo, C. M.; Ferral, A. (2021). Space-time monitoring of water quality in an eutrophic reservoir using SENTINEL-2 data - A case study of San Roque, Argentina, Remote Sensing Applications: Society and Environment, Volume 24. [Fecha de consulta: 16 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100614>
- Hernández Sampieri, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2006). Metodología de la investigación. Cuarta edición. [Fecha de consulta: 03 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://acortar.link/yfrQ2>
- Jensen, J. R. (2016). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective (4th ed.). Pearson.
- Jimenez, A. 2000. Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. Gestión Ambiental 2000, vol. 2(23) pag. 12-19.
- Kulkarni, A. (2011). Water quality retrieval from landsat TM imagery. Procedia Computer Science, 6, 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2011.08.088>
- López, P. y Fachelli, S., (2015). Metodología de la investigación social cuantitativa. [en línea]. Barcelona. [Fecha de consulta: 28 de febrero del 2024]. Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/caplli/2017/185163/metinvsocua_cap2-4a2017.pdf
- Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques . International Journal of Remote Sensing, 25(12), 2365–2401. [Fecha de

- consulta: 02 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
- Martínez, I. (2017). Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota (Tesis de pregrado). Universidad de Cantabria, España. [Fecha de consulta: 05 de marzo del 2024]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10902/12587>
- Ned Horning. (2019). Remote Sensing. [en línea]. Encyclopedia of Ecology (Second Edition). Elsevier. [Fecha de consulta: 21 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780444641304/encyclopedia-of-ecology>
- OECD (2021), Gobernanza del Agua en Perú, OECD Publishing, Paris, [Fecha de consulta: 12 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/f826f55f-es>
- Orbegoso y Blas (2023). Aplicación de la teledetección espectral usando landsat 8 para el monitoreo fisicoquímico del agua de la laguna de Conache – 2023 [Fecha de consulta: 13 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/129175>
- Peguero, C. (2016). Sensores Remotos y Aplicaciones en Teledetección Geodesia y Gestión de Recursos Naturales. SAMBA (Inprohuelva). (Vol. 21, Issue ONU-GE@). [Fecha de consulta: 08 de marzo del 2024]. Disponible en: https://www.academia.edu/36569250/SENSORES_REMOTOS_Y_APLICACIONES_EN_TELEDETECCION_GEODESIA_Y_GESTION_DE_RECursos_NATURALES_Y_PATRIMONIO_NATURAL
- Perdomo, A. (2015). Predicción de parámetros físico químicos de calidad del agua mediante el uso de sensores remotos: caso estudio Embalse del Neusa. [Fecha de consulta: 22 de marzo del 2024]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/1751>
- Perea Ardila, M. A., Leal Villamil, J., & Oviedo Barrero, F. (2021). Caracterización espectral y monitoreo de bosques de manglar con teledetección en el litoral Pacífico colombiano: Bajo Baudó, Chocó. Universidad Politécnica Salesiana. [Fecha de consulta: 01 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.02>

- Pereira-Sandoval, M. A., Ruiz-Verdú, A., Carlos Jiménez, J., Tenjo, C., Delegido, J., Gibaja, G., ... Moreno, J. (2016). Ajuste de los algoritmos OC2 y OC3 de MODIS para la obtención de la concentración de clorofila-a en lagos oligotróficos con Landsat-8: validación en el lago Titicaca Adjusting OC2 and OC3 MODIS. Retrieved from <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/azimut>
- Pérez, M. (2011). Aplicaciones de la teledetección y SIG en la caracterización de humedales en la Reserva de la Biosfera de la Mancha Húmeda (Tesis de maestría). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España. [Fecha de consulta: 13 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14352/46408>
- Pizani, Fernanda; Maillard, Philippe; Ferreira, A; Amorim, Camila. (2020). Estimation of water quality in a reservoir from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI sensors. V-3-2020. 401-408. [Fecha de consulta: 04 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2020-401-2020>
- Podest, E.; McNairn, H.; Jiao, X.; Fielding, E. (2018). La Teledetección por Radar y sus Aplicaciones para la Tierra, el Agua y Desastres. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET). [Fecha de consulta: 05 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://acortar.link/XdKVGc>
- Portal, R. I., & Zambrano, E. Teledetección espectral usando el satélite Landsat 8 para el monitoreo fisicoquímico del agua de la laguna San Nicolás – Cajamarca2021. [Fecha de consulta: 17 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://acortar.link/LMpsKR>
- Quezada, M (2020). Uso de imágenes satelitales para determinar los parámetros de calidad del agua en los ríos amazónicos Neshuya y Aguaytía – Perú (Tesis de maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. [Fecha de consulta: 01 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4550>
- Rivera, Daniela (2020). Estimación de parámetros de calidad de agua en la Laguna Santa Elena usando imágenes satelitales. [Fecha de consulta: 13 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://acortar.link/PJlmoN>
- Romero, J. (2009). Calidad del agua. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

- Sánchez, Fabio. (2019). Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: Consensos y disensos. [Fecha de consulta: 01 marzo del 2024]. Disponible en: <https://orcid.org/0000-0002-0144-9892>
- Sperling, M. (2007). Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal. IWA Publishing.
- Swain, R. and Sahoo, B. (2017) Improving River Water Quality Monitoring Using Satellite Data Products and a Genetic Algorithm Processing Approach. Sustainability of Water Quality and Ecology, 9-10, 88-114. [Fecha de consulta: 03 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2017.09.001>
- United Nations. (2018). Sustainable Development Goal 6 Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation. United Nations. [Fecha de consulta: 10 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://acortar.link/LjExN5>
- University of Illinois. (2019). Water Quality Parameters. [Fecha de consulta: 11 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://acortar.link/xq099I>
- U.S. Geological Survey. (2013). Landsat 8 (Fact Sheet 2013–3060). <https://pubs.usgs.gov/fs/2013/3060/pdf/fs2013-3060.pdf>
- USGS (2024), Landsat 8, el primer satélite Landsat del siglo XXI, proporciona información vital con dos nuevos instrumentos. [Fecha de consulta: 13 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>
- USGS. (2016). Landsat 8 data users handbook. [en línea]. [Fecha de consulta: 12 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://acortar.link/CmnzJs>
- USGS. (2019). Landsat 8 Data Users Handbook. U.S. Geological Survey.
- Vörösmarty, C., McIntyre, P., Gessner, M. et al. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. Nature 467, 555–561. [Fecha de consulta: 20 de marzo del 2024]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/nature09440>

VIII. ANEXOS

8.1. Operacionalización de variables

TÍTULO	VARIABLE 1	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD / ESCALA
Parámetros de calidad de agua con imágenes satelitales Landsat 8 de la laguna Huayllay - Distrito de Luricocha - Huanta, 2025.	Imágenes satelitales Landsat 8.	Imágenes Landsat 8 son escenas raster de observación terrestre captadas por sensores OLI y TIRS. OLI registra bandas visibles, NIR y SWIR y una pancromática; TIRS aporta bandas térmicas para estimar temperatura superficial. Resolución típica: 15, 30 y 100 m; franja de 185 km (USGS, 2013; USGS, s. f.-a).	Las imágenes satelitales Landsat 8 se refieren a las 11 bandas que este satélite adquiere, cada una en una región específica del espectro electromagnético, como el visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, entre otros (USGS, 2021).	Bandas espectrales	<p>ρ Azul (visible)</p> <p>ρ Verde (visible)</p> <p>ρ Rojo (visible)</p> <p>Infrarrojo Cercano</p> <p>ρ SWIR 1</p> <p>ρ SWIR 2</p>	Adimensional
	VARIABLE 2	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD / ESCALA
	Parámetros de la calidad del agua.	Los parámetros de calidad del agua son indicadores medibles que describen el estado de un cuerpo de agua por rasgos físicos, químicos y biológicos. Sirven para evaluar su aptitud de uso y monitorear cambios (Federal Judicial Center, s. f.; Chapman, 1996).	Los parámetros de calidad del agua que se pueden evaluar en la laguna Huayllay son: Temperatura, Solidos totales suspendidos, turbidez, color, entre otros (APHA, 2017).	Parámetros fisicoquímicos.	<p>Temperatura</p> <p>Solidos totales suspendidos</p> <p>Clorofila-a</p>	<p>°C</p> <p>mg/L</p> <p>mg/L</p>


8.2. Matriz de consistencia


“PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 DE LA LAGUNA HUAYLLAY – DISTRITO DE LURICOCHA – HUANTA, 2025”						
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE 1	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD / ESCALA
¿Como estimar parámetros de la calidad de agua de la laguna Huayllay utilizando imágenes satelitales?	Estimar parámetros de la calidad de agua de la laguna Huayllay utilizando imágenes satelitales.	Se podrá estimar parámetros de la calidad de agua de la laguna Huayllay utilizando imágenes satelitales	Imágenes satelitales Landsat 8.	Bandas espectrales	<p>ρ Azul (visible)</p> <p>ρ Verde (visible)</p> <p>ρ Rojo (visible)</p> <p>Infrarrojo Cercano</p> <p>ρ SWIR 1</p> <p>ρ Azul (visible)</p>	Adimensional
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	VARIABLE 2	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD / ESCALA
¿Qué valores de temperatura superficial se encontrarán en la Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8?	Determinar los valores de temperatura superficial en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.	Se logrará determinar los valores de temperatura superficial en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.			Temperatura superficial	°C
¿Qué valores de solidos totales suspendidos se encontrarán en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8?	Determinar los valores de solidos totales suspendidos en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.	Se logrará determinar los valores de solidos totales suspendidos en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.	Parámetros de la calidad del agua	Parámetros fisicoquímicos	Solidos totales suspendidos	mg/L
¿Qué valores de clorofila-a se encontrarán en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8?	Determinar los valores de clorofila-a en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.	Se logrará determinar los valores de clorofila-a en la laguna Huayllay a partir de las imágenes de satélite Landsat 8.			Clorofila-a	mg/L

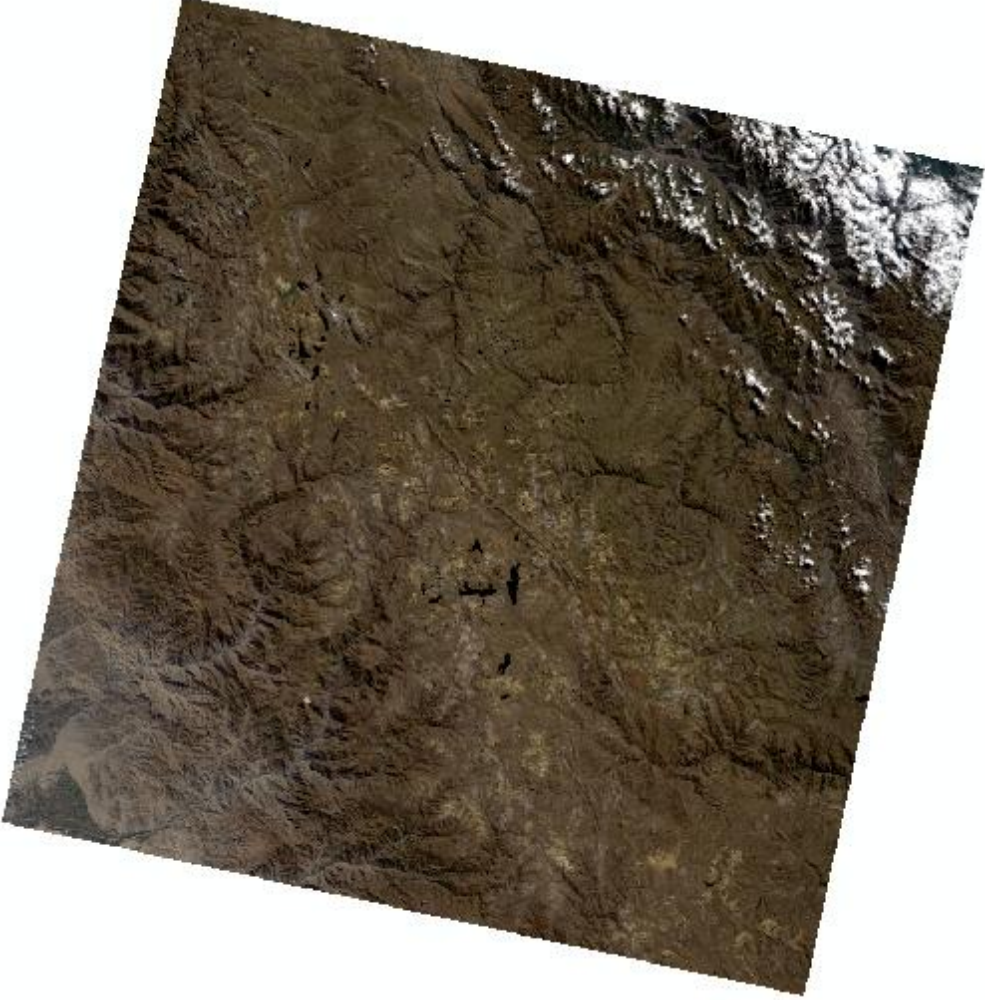
8.3. Ficha de descarga de imágenes satelitales

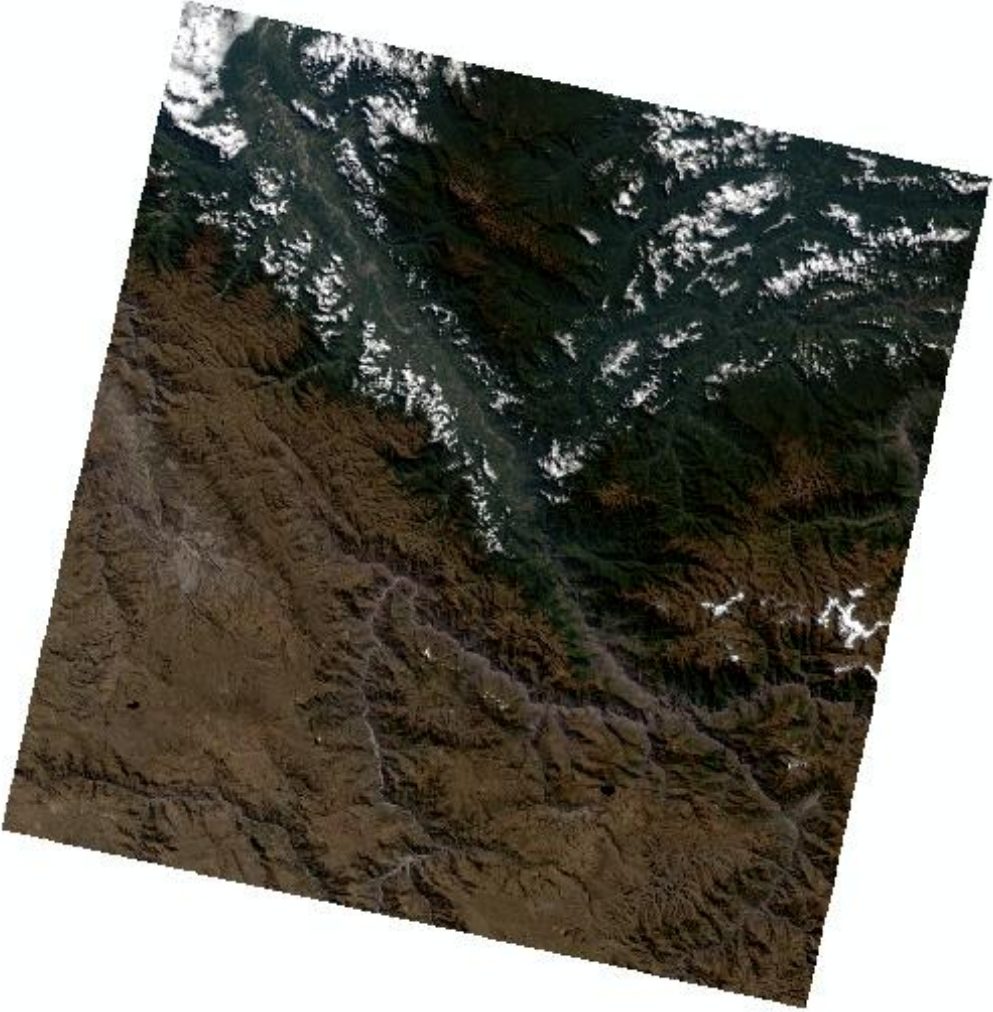
Proyecto:	"Parámetros de la Calidad de Agua con Imágenes Satelitales Landsat 8 de la laguna Huayllay - distrito de Luricocha – Huanta, 2025"				
Tesista: Julio Tenorio Palomino					
1. ÁREA DE INTERES					
1.1. Coordenadas del punto central:					
Latitud	Longitud				
<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>				
1.2. ID de la imagen en caso que sea de archivo					
<input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>					
1.3. Fecha de programación o archivo					
<input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>					
1.4. Justificación (Uso de la imagen)	1.5. Zona				
<input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>				
2. PRIORIDAD					
2.1. Imágenes de archivo	<input type="checkbox"/>				
2.2. Imágenes de programación	<input type="checkbox"/>				
3. TIPO DE IMAGEN REQUERIDA					
3.1. Satélite Landsat					
Landsat 1	<input type="checkbox"/>	Landsat 2	<input type="checkbox"/>	Landsat 3	<input type="checkbox"/>
Landsat 4	<input type="checkbox"/>	Landsat 5	<input type="checkbox"/>	Landsat 6	<input type="checkbox"/>
Landsat 7	<input type="checkbox"/>	Landsat 8	<input type="checkbox"/>	Landsat 9	<input type="checkbox"/>
4. NUBOSIDAD MÁXIMA					
<input style="width: 50px; height: 20px;" type="text"/>		%, de nubosidad (5%, 10%, 20% o 30%)			
5. OBSERVACIONES:					
.....					
.....					
.....					

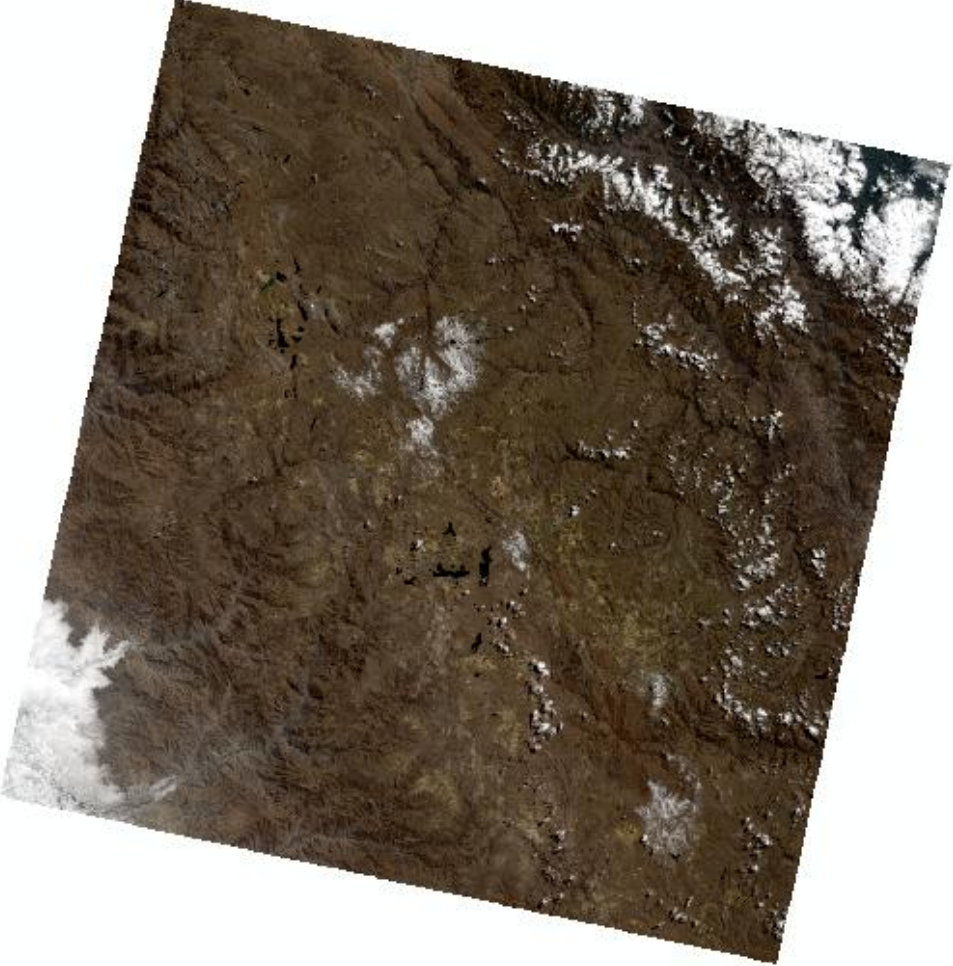
8.4. Metadato de las imágenes landsat 8, disponibles en la web de USGS

ID	LC08 L1TP 006069 20250423 20250429 02 T1	
		
PATH	6	
ROW	69	
FECHA DE ARQUISICIÓN	2025-04-23	
SCENE CENTER TIME	15:04:33.3073280Z	
COORDENADAS GEOGRAFICAS DE LA IMAGEN		
LATITUD	LONGITUD	
-11.96287	-76.13152	
-11.96349	-74.03470	
-14.06217	-76.14108	
-14.06290	-74.02654	
SISTEMA DE REFERENCIA	WGS84	
SISTEMA DE PROYECCIÓN	UTM	
COBERTURA NUBOSA	9.91	

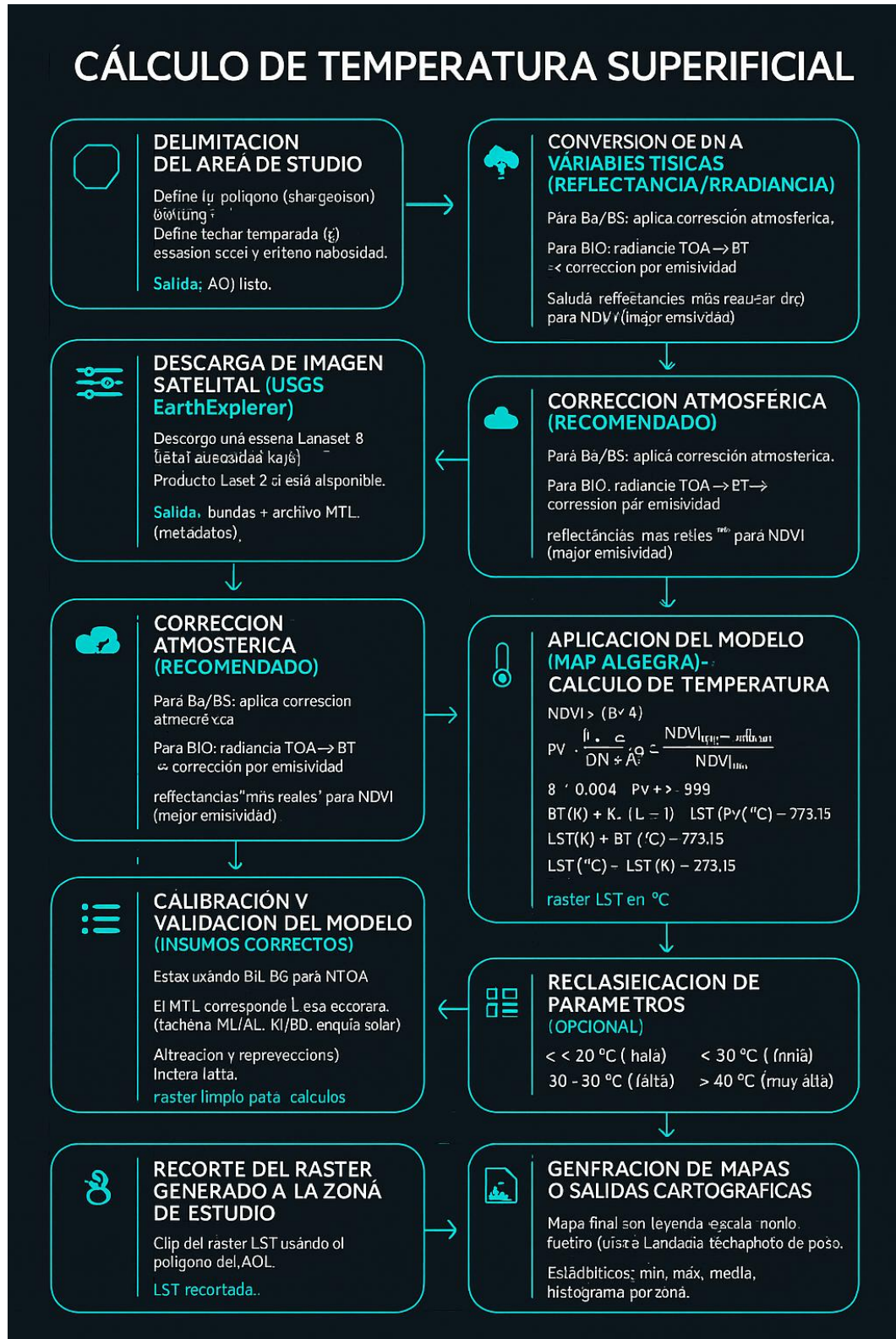
ID	LC08 L1TP 006069 20250517 20250517 02 T1	
		
PATH	6	
ROW	69	
FECHA DE ARQUISICIÓN	2025-05-17	
SCENE CENTER TIME	15:04:42.2498330Z	
COORDENADAS GEOGRAFICAS DE LA IMAGEN		
LATITUD	LONGITUD	
-11.96546	-76.16183	
-11.96630	-74.06225	
-14.06202	-76.17164	
-14.06301	-74.05433	
SISTEMA DE REFERENCIA	WGS84	
SISTEMA DE PROYECCIÓN	UTM	
COBERTURA NUBOSA	3.32	

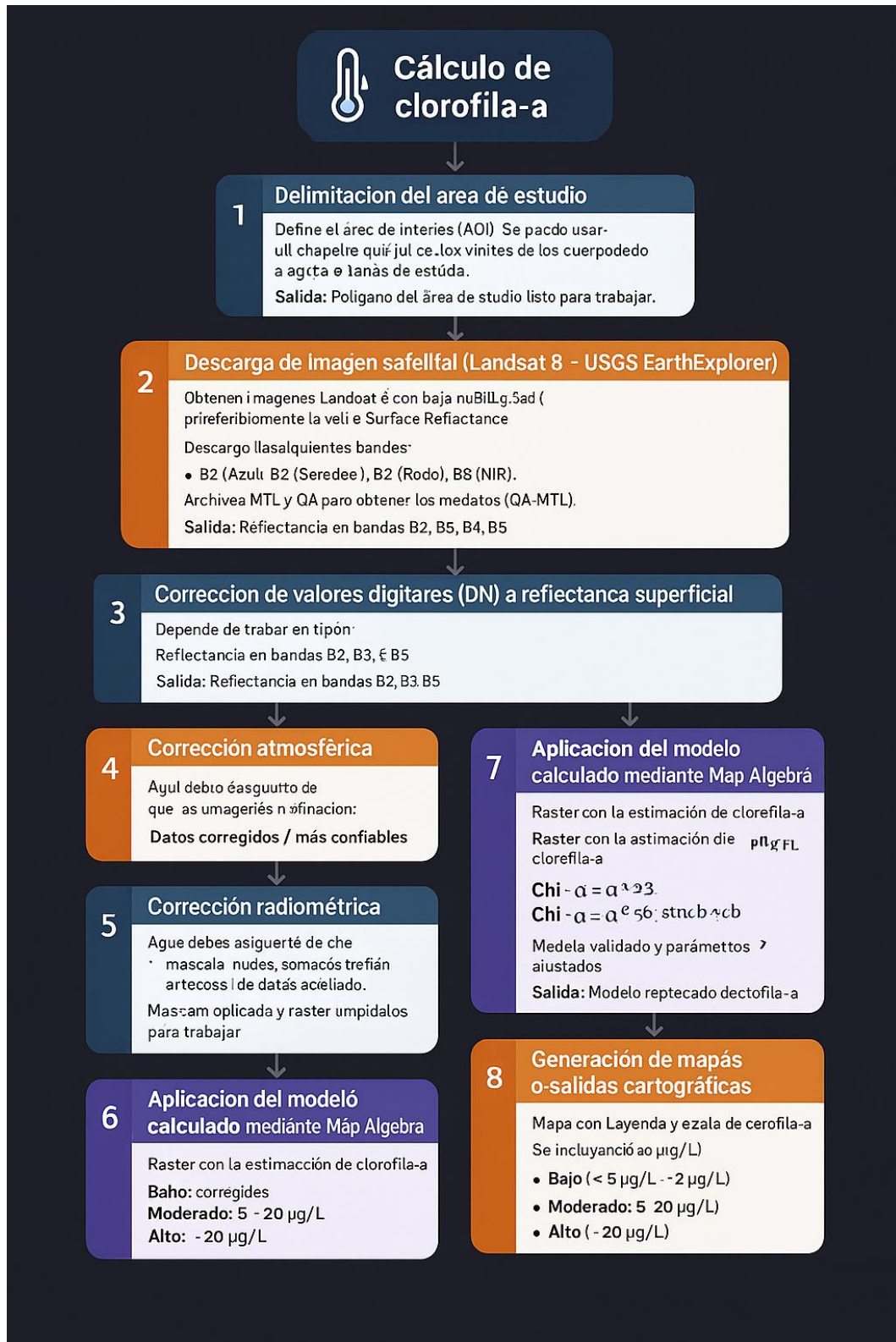
ID	LC08_L1TP_006069_20250626_20250710_02_T1	
		
PATH	6	
ROW	69	
FECHA DE ARQUISICIÓN	2025-06-26	
SCENE CENTER TIME	15:04:54.5996960Z	
COORDENADAS GEOGRAFICAS DE LA IMAGEN		
LATITUD	LONGITUD	
-11.96272	-76.16733	
-11.96360	-74.06776	
-14.06200	-76.17720	
-14.06303	-74.05989	
SISTEMA DE REFERENCIA	WGS84	
SISTEMA DE PROYECCIÓN	UTM	
COBERTURA NUBOSA	3.21	

ID	LC08_L1TP_005069_20250721_20250730_02_T1	
		
PATH	5	
ROW	69	
FECHA DE ARQUISICIÓN	2025-07-21	
SCENE CENTER TIME	14:58:51.6414549Z	
COORDENADAS GEOGRAFICAS DE LA IMAGEN		
LATITUD	LONGITUD	
-11.96489	-74.62158	
-11.95415	-72.51444	
-14.07541	-74.61836	
-14.06270	-72.49333	
SISTEMA DE REFERENCIA	WGS84	
SISTEMA DE PROYECCIÓN	UTM	
COBERTURA NUBOSA	4.02	

ID	LC08 L1TP 006069 20250829 20250903 02 T1	
		
PATH	6	
ROW	69	
FECHA DE ARQUISICIÓN	2025-08-29	
SCENE CENTER TIME	15:05:14.4659539Z	
COORDENADAS GEOGRAFICAS DE LA IMAGEN		
LATITUD	LONGITUD	
-11.96281	-76.14529	
-11.96354	-74.04848	
-14.06210	-76.15497	
-14.06296	-74.04044	
SISTEMA DE REFERENCIA	WGS84	
SISTEMA DE PROYECCIÓN	UTM	
COBERTURA NUBOSA	8.33	

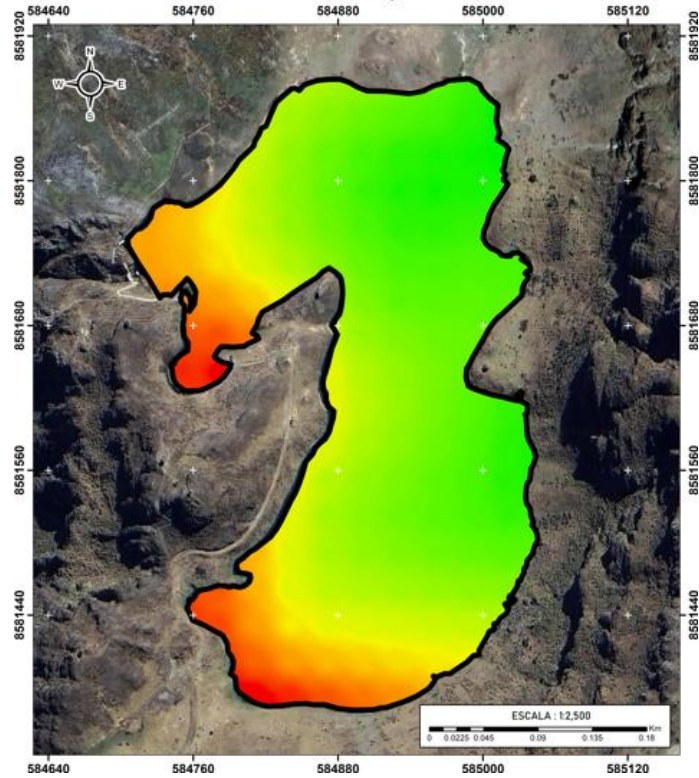
8.5. Flujo para el cálculo de parámetros de calidad de agua como son temperatura LST, sólidos totales suspendidos y clorofila-a, en la laguna Huayllay entre los meses abril - agosto 2025.



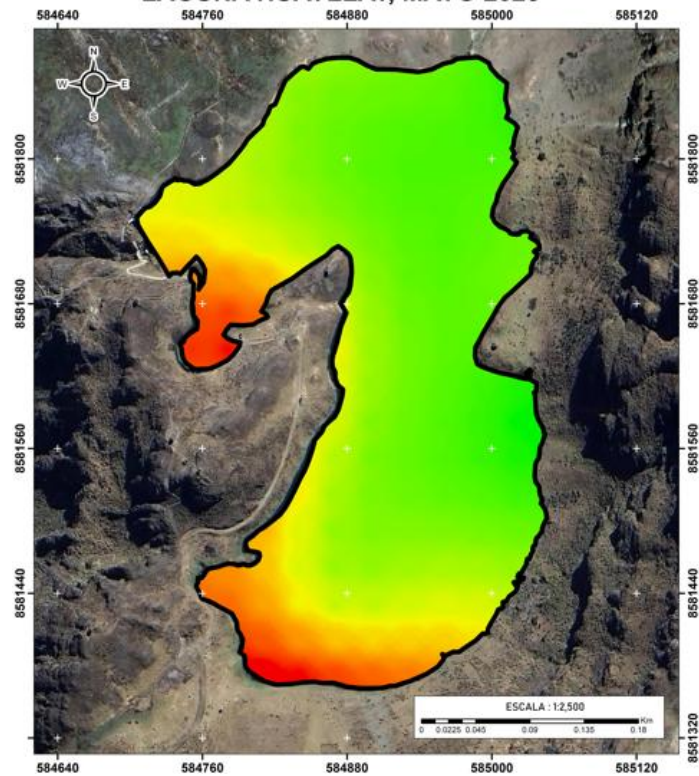


8.5. Mapas de Promedio de las Predicciones Espaciales de los parámetros de calidad de agua del mes abril - agosto 2025.

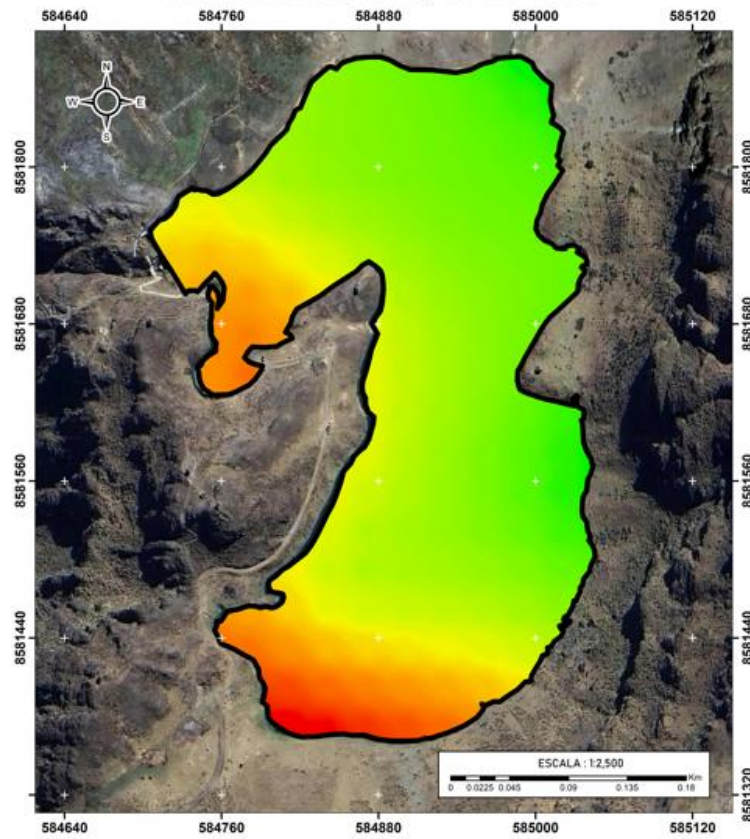
**MAPA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL
LAGUNA HUAYLLAY, ABRIL 2025**



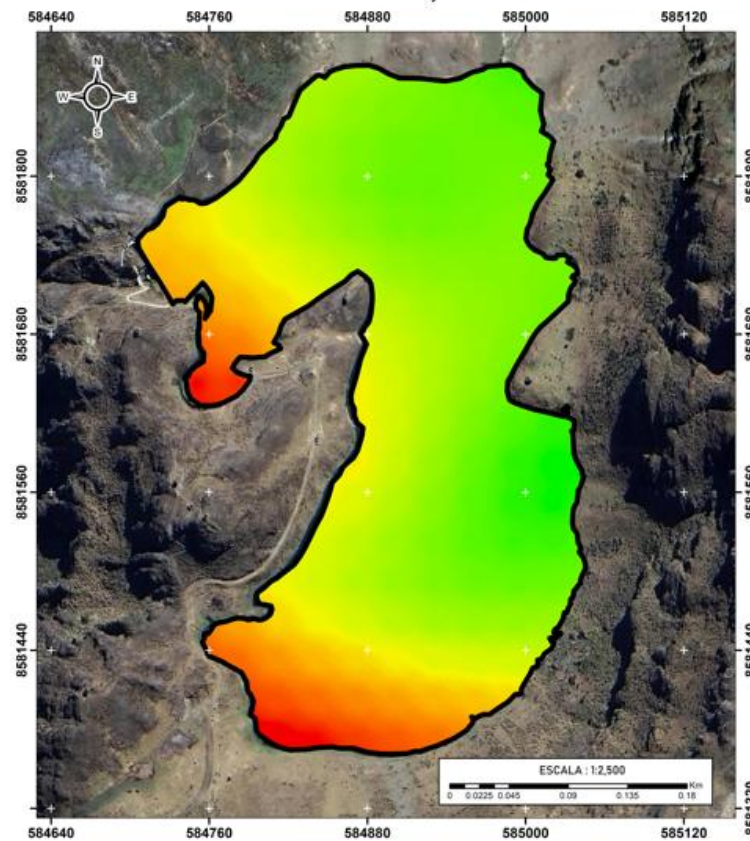
**MAPA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL
LAGUNA HUAYLLAY, MAYO 2025**



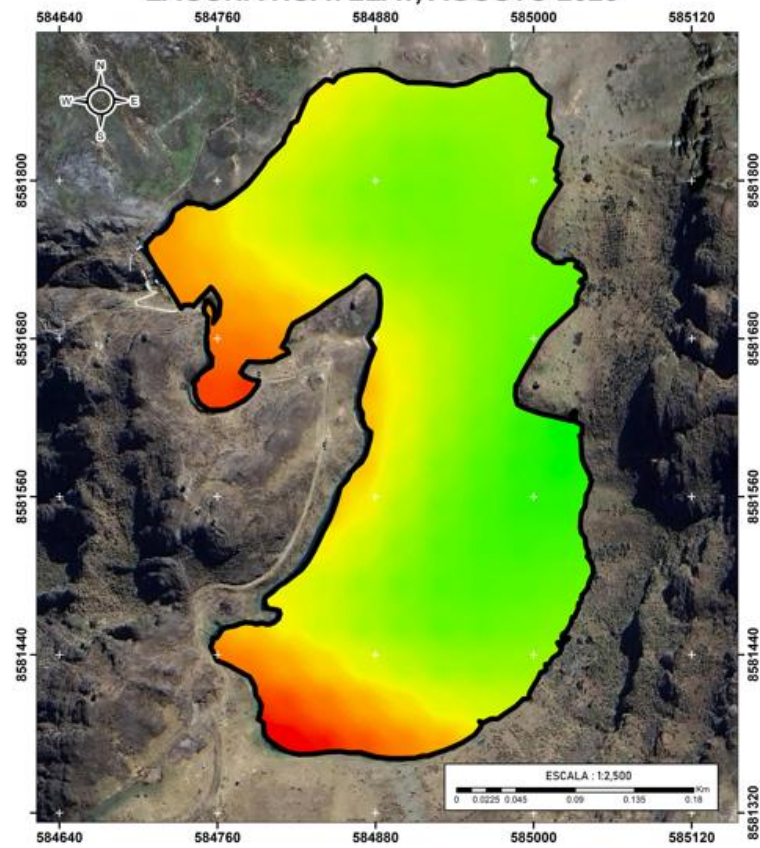
MAPA DE TEMPERA SUPERFICIAL LAGUNA HUAYLLAY, JUNIO 2025



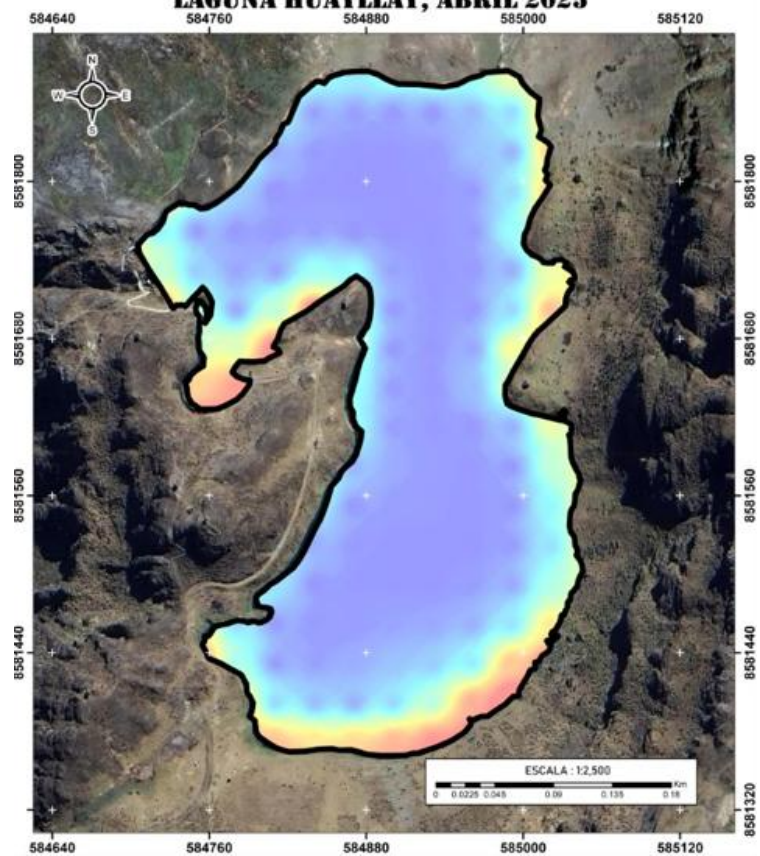
MAPA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL LAGUNA HUAYLLAY, JULIO 2025



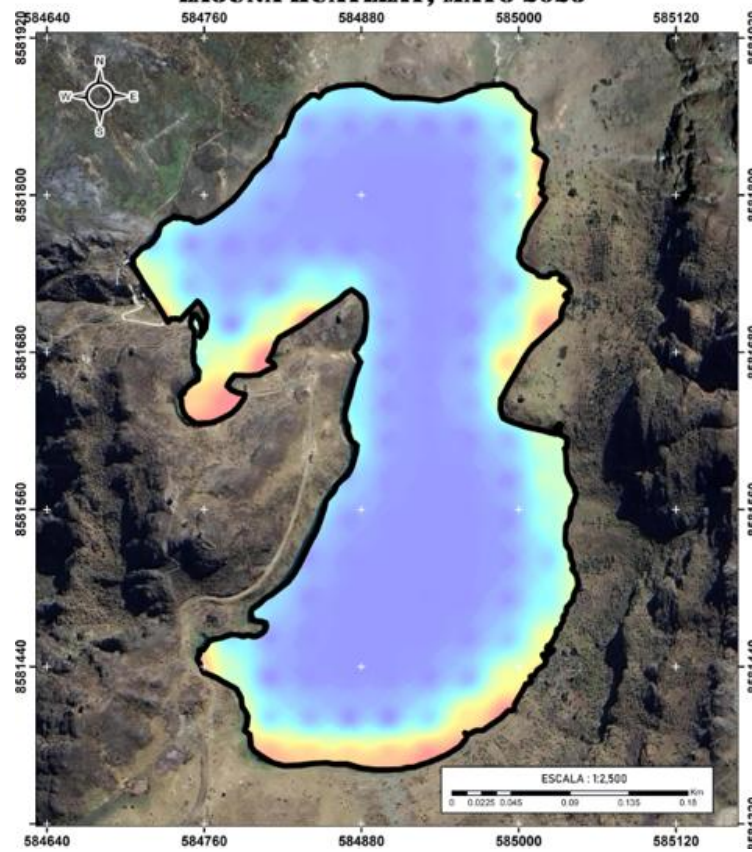
**MAPA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL
LAGUNA HUAYLLAY, AGOSTO 2025**



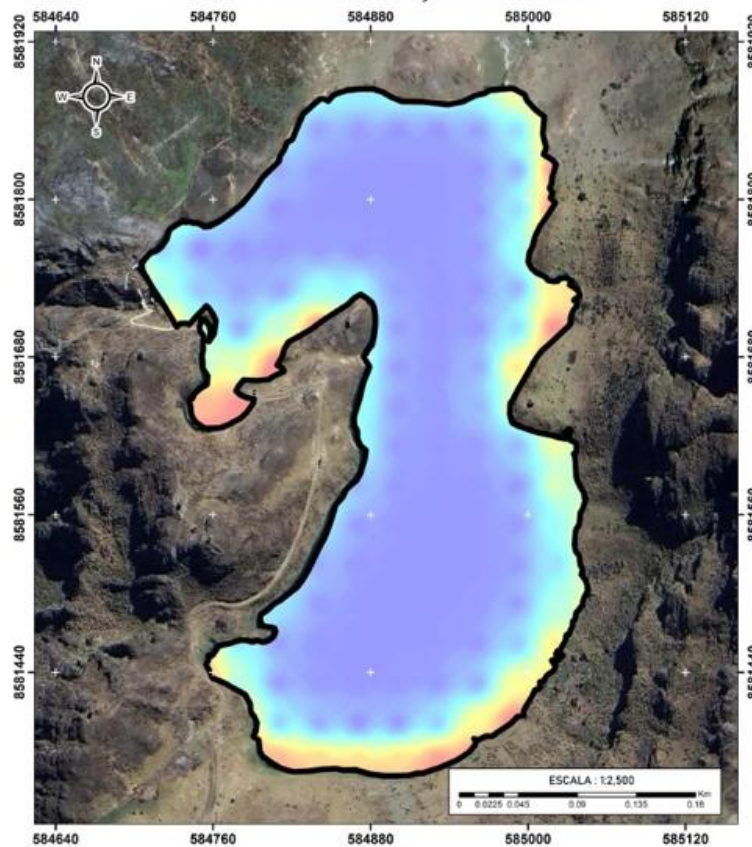
**MAPA DE SÓLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS (TSS)
LAGUNA HUAYLLAY, ABRIL 2025**



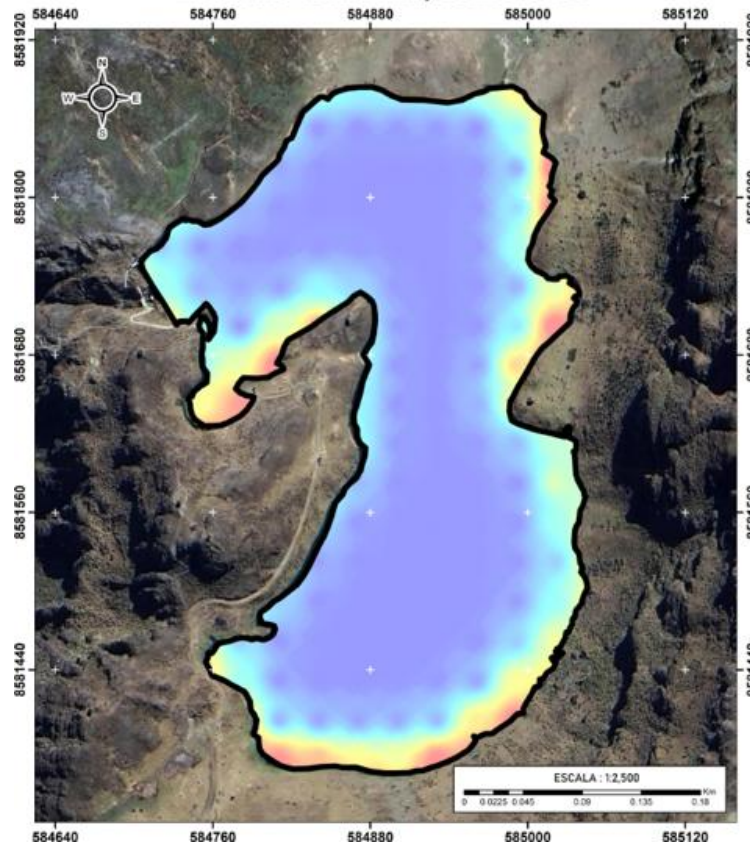
**MAPA DE SÓLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS (TSS)
LAGUNA HUAYLLAY, MAYO 2025**



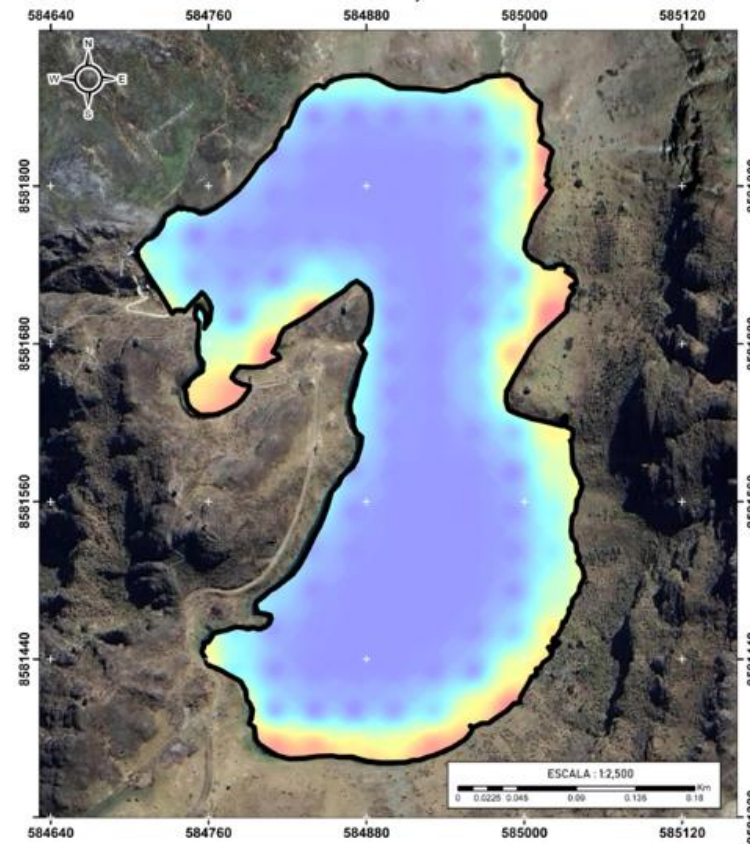
**MAPA DE SÓLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS (TSS)
LAGUNA HUAYLLAY, JUNIO 2025**



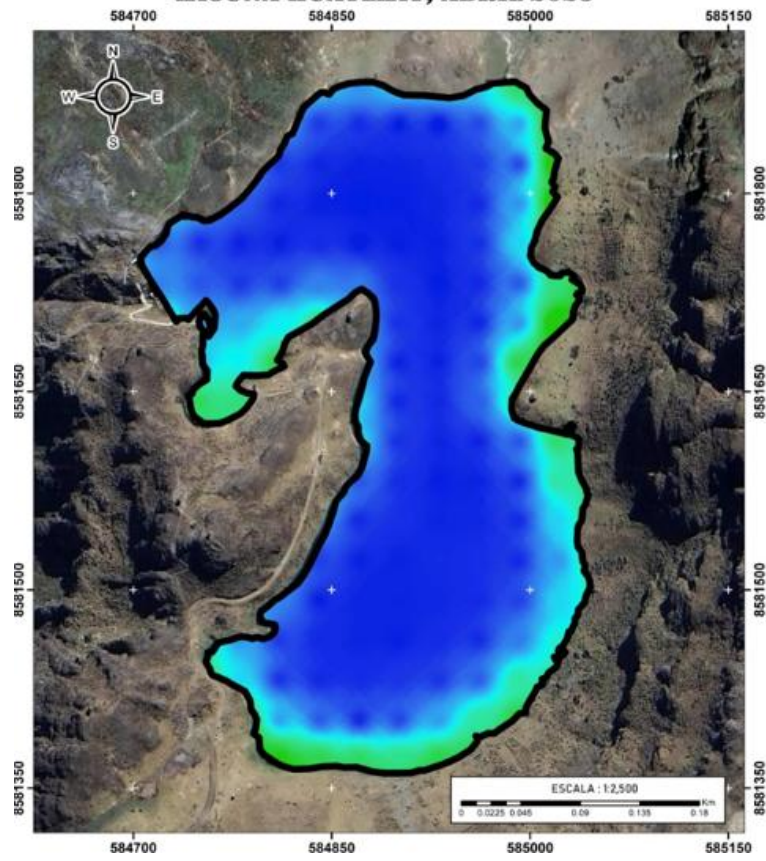
**MAPA DE SÓLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS (TSS)
LAGUNA HUAYLLAY, JULIO 2025**



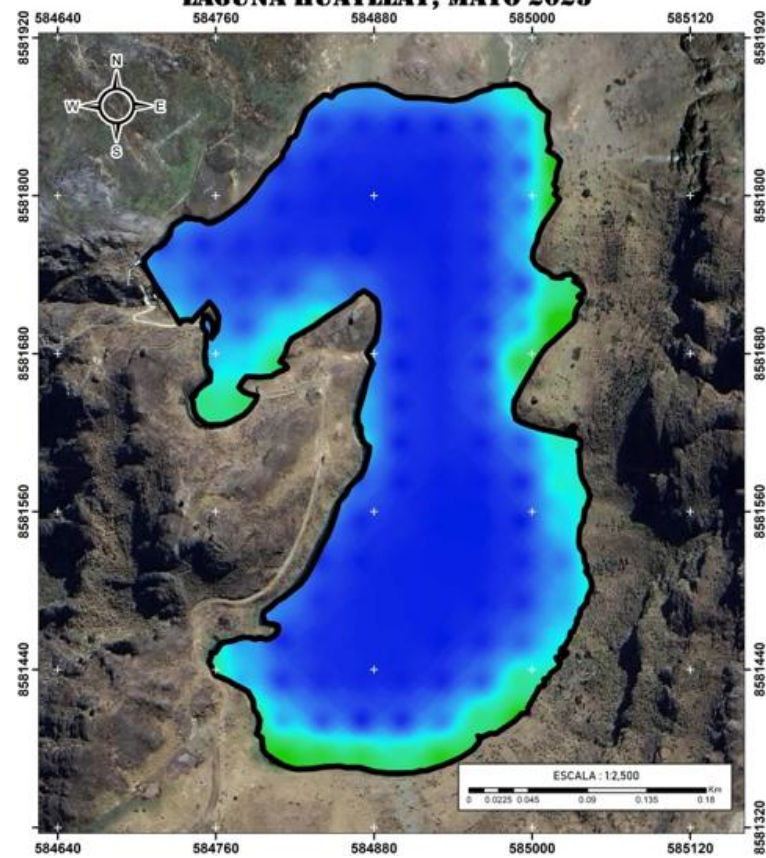
**MAPA DE SÓLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS (TSS)
LAGUNA HUAYLLAY, AGOSTO 2025**



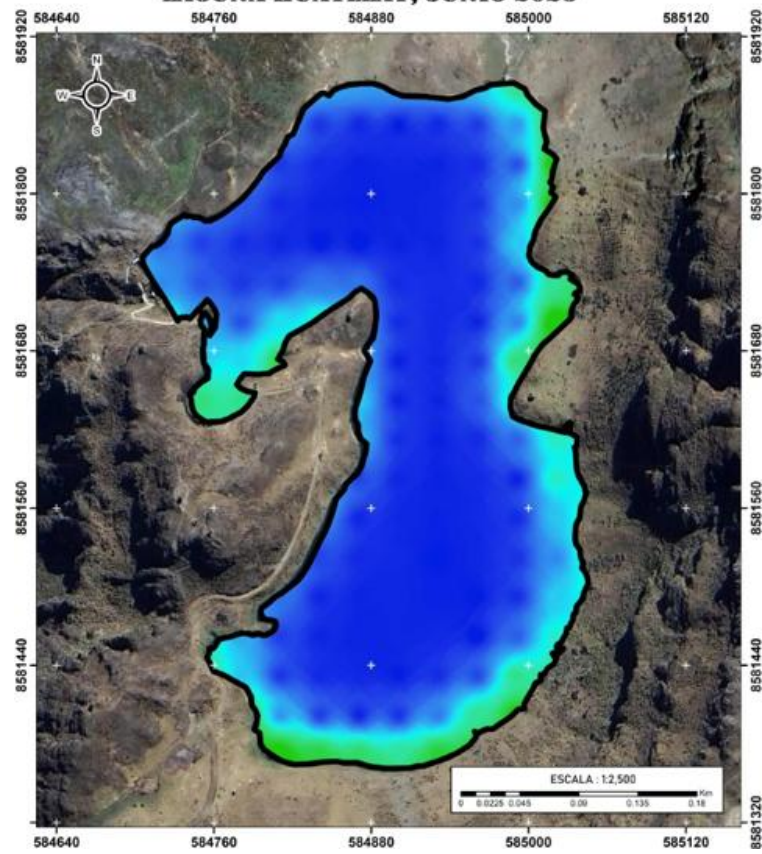
**MAPA DE CONCETRACIÓN DE CLOROFILA - A
LAGUNA HUAYLLAY, ABRIL 2025**



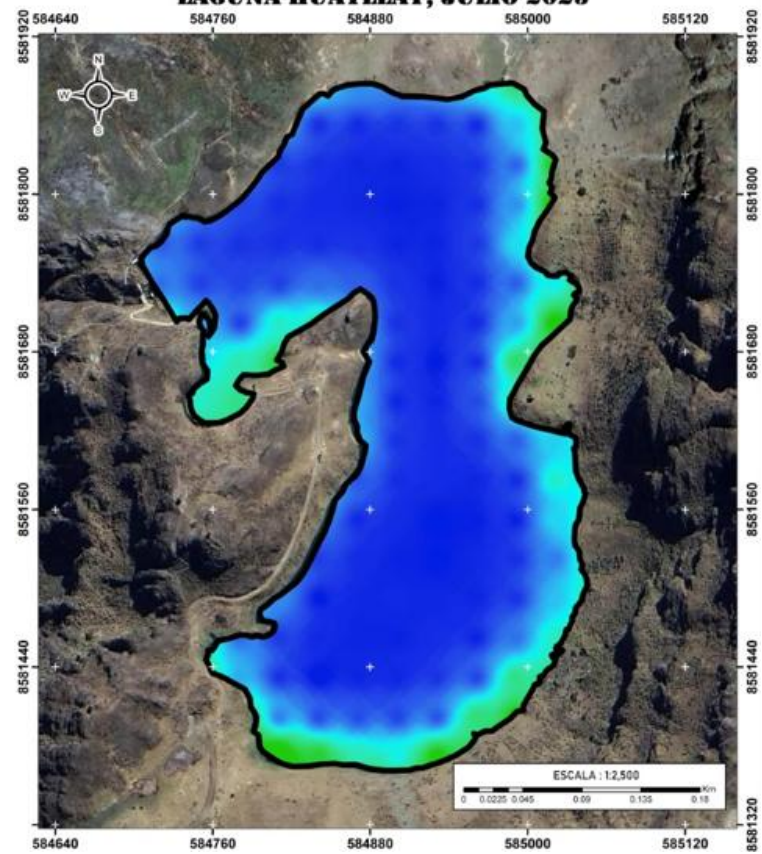
**MAPA DE CONCETRACIÓN DE CLOROFILA - A
LAGUNA HUAYLLAY, MAYO 2025**



**MAPA DE CONCETRACIÓN DE CLOROFILA - A
LAGUNA HUAYLLAY, JUNIO 2025**



**MAPA DE CONCETRACIÓN DE CLOROFILA - A
LAGUNA HUAYLLAY, JULIO 2025**



**MAPA DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA - A
LAGUNA HUAYLLAY, AGOSTO 2025**

