

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A

MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO,

PERIODO 2015 - 2024

PRESENTADA POR:

JHON RONALD SALAZAR OHA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PUNO - PERÚ

2025



Repositorio Institucional ALCIRA by Universidad Privada San Carlos is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



14.31%

SIMILARITY OVERALL

SCANNED ON: 31 JUL 2025, 3:42 PM

Similarity report

Your text is highlighted according to the matched content in the results above.

● IDENTICAL
0.56%

● CHANGED TEXT
13.75%

Report #27777667

JHON RONALD SALAZAR OHA // ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO, PERIODO 2015 - 2024 RESUMEN La bahía interior de Puno enfrenta desafíos significativos en cuanto a la calidad del agua y la concentración de la clorofila-a. El objetivo de la presente investigación fue analizar el espacio-temporal de la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno, periodo 2015 - 2024. El método de la investigación es no experimental con un enfoque cuantitativo y observacional, con el uso imágenes satelitales GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3), LandSat-8 y programas de Qgis y RStudio, para determinar la concentración de la clorofila-a se desarrolló mediante el modelo estadístico de tipo logarítmico con regresión lineal múltiple e interacciones. El resultado reveló que el modelo para la identificación de la clorofila-a muestra un coeficiente de determinación $r^2 = 0.878$ y un p -valor = 0.0237 inferior ($<$) a $\alpha = 0.05$, con un nivel de significancia del 95%, lo que sugiere que el modelo es un instrumento eficaz para el seguimiento satelital de la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno. Por otro lado, se observa un incremento de 0.615 mg/m^3 en 2015 a 0.862 mg/m^3 en 2024 en la concentración de clorofila-a, esta progresión ascendente revela una marcada correlación con el tiempo $r^2 = 0.7409$ y un p -valor = 0.00139 inferior ($<$) a $\alpha = 0.05$, c

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TESIS

**ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A
MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO,
PERIODO 2015 - 2024**

PRESENTADA POR:

JHON RONALD SALAZAR OHA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

:



Dr. ESTEBAN ISIDRO LEON APAZA

PRIMER MIEMBRO

:



M.Sc. FREDY APARICIO CASTILLO SUAQUITA

SEGUNDO MIEMBRO

:



Dra. MARLENE CUSI-MONTESINOS

ASESOR DE TESIS

:



Mg. JULIO WILFREDO CANO OJEDA

Área: Ingeniería, Tecnología.

Sub área: Ingeniería Ambiental.

Línea de Investigación: Sensores remotos.

Puno, 05 de agosto del 2025

DEDICATORIA

A Dios, que ha sido mi faro en la incertidumbre y mi santuario en los momentos de adversidad. Su guía ha estado presente en cada paso, dándome fortaleza cuando sentí flaquear y llenando de luz mi camino cuando más lo necesitaba.

A mis progenitores, a los que debo más de lo que puedo manifestar verbalmente. Agradezco su amor sin reservas, su modelo de tenacidad y por estar presente en cada fase de este proceso.

A mis amigos, quienes supieron acompañarme con afecto, empatía y alegría cuando más lo necesitaba. Agradezco de corazón cada conversación, cada risa, cada palabra de ánimo que hicieron más livianos los momentos difíciles.

Jhon Ronald Salazar Oha

AGRADECIMIENTOS

- *Expreso mi más profundo agradecimiento a la Universidad Privada San Carlos – Puno por haberme brindado la oportunidad de formarme en un entorno académico que promueve el conocimiento, la ética y el compromiso con la sociedad.*
- *A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, le reconozco con aprecio por proporcionar una formación académica sólida y alineada con las problemáticas ambientales que enfrenta nuestra región y país.*
- *De manera especial, gracias a mi consultor Mg. Julio Wilfredo Cano Ojeda por su compromiso, por compartir su vivencia y por proporcionarme guía durante todo este procedimiento. Su apoyo constante, sus observaciones acertadas y su paciencia fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.*
- *También quiero agradecer sinceramente a los miembros del jurado, quienes con su experiencia y rigurosidad académica aportaron valiosas observaciones que enriquecieron el contenido de esta investigación.*

Jhon Ronald Salazar Oha

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ANEXOS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1.1. PROBLEMA GENERAL	14
1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	14
1.2. ANTECEDENTES	15
1.2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	15
1.2.2. ANTECEDENTES NACIONALES	17
1.2.3. ANTECEDENTES LOCALES	19
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	20
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO	22
2.1.1. ECOSISTEMAS ACUÁTICOS	22
2.1.2. CARACTERÍSTICAS Y DINÁMICA DE LOS LAGOS ALTOANDINOS	23
2.1.3. EUTROFIZACIÓN	24
2.1.4. CLOROFILA-A	24
2.1.5. EFECTOS DEL CAMBIO EN LOS ECOSISTEMAS EN AGUAS DULCES	25
2.1.6. OBSERVACIÓN REMOTA	26
2.2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	27
2.3. MARCO TEÓRICO NORMATIVO	27
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	28
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	28
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	29

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO	30
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	31
3.2.1. POBLACIÓN	31
3.2.2. MUESTRA	31
3.3. MÉTODOS Y MATERIALES	32
3.3.1. MÉTODOS	32
3.3.2. MATERIALES	32
3.4. METODOLOGÍA	33
3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	38
3.6. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO	39

CAPÍTULO IV

EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. DESARROLLAR UN MODELO ESTADÍSTICO PARA EL COMPORTAMIENTO DE LA CLOROFILA-A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO DURANTE EL PERIODO 2015 - 2024.	40
4.2. EXPOSICION Y ANALISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CLOROFILA-A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO DURANTE EL PERIODO 2015 - 2024.	43
4.3. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS.	48
CONCLUSIONES	51
RECOMENDACIONES	53
BIBLIOGRAFÍA	54
ANEXOS	57

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01: Características de la imagen satelital GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3)	34
Tabla 02: Características de la imagen satelital LandSat-8, del sensor OLI.	35
Tabla 03: Operacionalidad de variables.	38
Tabla 04: Modelo de regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones para la detección de la clorofila-a en la bahía interior de Puno.	41
Tabla 05: Estadística descriptiva de la concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 y 2024.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Ecosistemas acuáticos.	22
Figura 02: Características y dinámica de los lagos altoandinos.	23
Figura 03: Clorofila-a en cuerpos de agua.	25
Figura 04: Elemento de un programa de detección a distancia.	26
Figura 05: Mapa de ubicación del área de estudio.	30
Figura 06: Producto GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a.	36
Figura 07: Extracción de valores de la imagen satelital LandSat-8.	36
Figura 08: Valores observados y predichos para la bahía interior de Puno.	42
Figura 09: Concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 y 2024.	44
Figura 10: Mapa de concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 y 2016.	45
Figura 11: Mapa de concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2023 y 2024.	46
Figura 12: Concentración de clorofila-a sobre los periodos de la bahía interior de Puno.	48

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01: Matriz de consistencia	58
Anexo 02: Descarga del producto GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3)	59
Anexo 03: Descarga de la imagen satelital LandSat-8.	60
Anexo 04: Imagen satelital LandSat-8	61
Anexo 05: Extracción de valores de píxeles de las imágenes satelitales	64
Anexo 06: Modelo estadístico de tipo logarítmico con regresión lineal múltiple e interacciones	65
Anexo 07: Resultado de detección de clorofila-a en la bahía interior de Puno	66
Anexo 08: Mapas de detección de clorofila-a en la bahía interior de Puno	67
Anexo 09: Concentración de clorofila-a (mg/m^3) en la bahía interior de Puno	70
Anexo 10: Panel fotográfico	71

RESUMEN

La bahía interior de Puno enfrenta desafíos significativos en cuanto a la calidad del agua y la concentración de la clorofila-a. El objetivo de la presente investigación fue analizar el espacio-temporal de la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno, periodo 2015 - 2024. El método de la investigación es no experimental con un enfoque cuantitativo y observacional, con el uso imágenes satelitales GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3), LandSat-8 y programas de Qgis y RStudio, para determinar la concentración de la clorofila-a se desarrolló mediante el modelo estadístico de tipo logarítmico con regresión lineal múltiple e interacciones. El resultado reveló que el modelo para la identificación de la clorofila-a muestra un coeficiente de determinación $r^2 = 0.878$ y un p -valor = 0.0237 inferior (<) a $\alpha = 0.05$, con un nivel de significancia del 95%, lo que sugiere que el modelo es un instrumento eficaz para el seguimiento satelital de la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno. Por otro lado, se observa un incremento de 0.615 mg/m³ en 2015 a 0.862 mg/m³ en 2024 en la concentración de clorofila-a, esta progresión ascendente revela una marcada correlación con el tiempo $r^2 = 0.7409$ y un p -valor = 0.00139 inferior (<) a $\alpha = 0.05$, con un nivel de significancia del 95%. Esto sugiere que el transcurso del tiempo tiene un impacto significativo del 74% en el incremento de la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno. Concluyendo que la concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno presenta una tendencia ascendente con el paso de los años.

Palabras claves: Bahía, Clorofila-a, LandSat-8, Satélite, Teledetección.

ABSTRACT

The inner bay of Puno faces significant challenges regarding water quality and chlorophyll-a concentration. The objective of this research was to analyze the spatio-temporal concentration of chlorophyll-a using satellite images in the inner bay of Puno, period 2015 - 2024. The research method is non-experimental with a quantitative and observational approach, with the use of satellite images GCOM-C / SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3), LandSat-8 and programs Qgis and RStudio, to determine the concentration of chlorophyll-a was developed using the logarithmic statistical model with multiple linear regression and interactions. The result revealed that the model for the identification of chlorophyll-a shows a coefficient of determination $r^2 = 0.878$ and a p-value = 0.0237 lower (<) than $\alpha = 0.05$, with a significance level of 95%, suggesting that the model is an effective instrument for satellite monitoring of chlorophyll-a concentration in the inner bay of Puno. On the other hand, an increase from 0.615 mg / m³ in 2015 to 0.862 mg / m³ in 2024 is observed in the concentration of chlorophyll-a, this upward progression reveals a marked correlation with time $r^2 = 0.7409$ and a p-value = 0.00139 lower (<) than $\alpha = 0.05$, with a significance level of 95%. This suggests that the passage of time has a significant impact of 74% on the increase in chlorophyll-a concentration in the inner bay of Puno. Concluding that the concentration of chlorophyll-a in the inner bay of Puno shows an upward trend over the years.

Keywords: Bay, Chlorophyll-a, LandSat-8, Satellite, Remote sensing.

INTRODUCCIÓN

La bahía interior de Puno se enfrenta con desafíos relevantes en términos de calidad del agua y biodiversidad. Las prácticas de agricultura y ganadería en las proximidades de la bahía están incrementando la escorrentía de nutrientes, causando un aumento en la concentración de clorofila-a. Este fenómeno puede generar problemas como la eutrofización, que impacta de manera adversa la salud del ecosistema acuático y la fauna de la zona. La ciudad de Puno depende de la bahía interior de Puno para actividades recreacionales y el turismo, lo que hace aún más necesario el monitoreo de su salud ecológica. Sin embargo, hay una carencia de concienciación y conocimiento sobre la importancia de conservar este recurso hídrico.

En el lago de Ciénaga de Ayapel (Córdoba) y el Lago de Tota (Boyacá), Colombia, este estudio tuvo como objetivo analizar la variación espacial y temporal en la concentración de clorofila y la condición trófica de dos ecosistemas acuáticos con características ambientales distintas, utilizando imágenes del satélite Landsat-8 (SR). En la ciénaga de Ayapel, se encontró una buena correlación entre las variables ($r^2=0,563$) mediante un modelo de regresión múltiple que combina las bandas b3, b2, y b5/b4. Sin embargo, en el Lago de Tota, el modelo de regresión simple basado en el promedio de las bandas b3 y b4 mostró una correlación baja ($r^2=0,151$), esto se debe a la profundidad del ecosistema y a la existencia de sólidos dispersos y suspendidos (Merchán, 2018).

En la presente investigación se formuló como hipótesis; en el espacio-temporal existe una variación significativa al aumentar la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno, periodo 2015 - 2024. Por otra lado las variables de la investigación fueron; Causa o variable independiente (VI): Imágenes satelitales, efecto o variable dependiente (VD): Espacio-temporal de la concentración de clorofila-a.

También la investigación se divide en cuatro capítulos; el capítulo I, se muestra el planteamiento del problema, antecedentes y objetivos de la investigación, en el capítulo

II, se muestra el marco teórico y conceptual así también como el marco normativo, en el capítulo III, el capítulo IV trata sobre la metodología de la investigación, incluyendo la localización del área de estudio y la metodología por objetivo de la investigación. Además, se exhiben los hallazgos de la investigación, así como las conclusiones y las sugerencias.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, la calidad del agua es un indicador crucial para establecer la situación de los ecosistemas acuáticos y la salud del entorno natural. La clorofila-a es un marcador crucial que muestra la productividad primaria en los organismos acuáticos, actuando como una señal de la eutrofización y del estado de salud del ecosistema. El incremento de actividades humanas, tales como la agricultura intensiva y la urbanización, ha incrementado los nutrientes en muchos cuerpos de agua, lo que promueve la expansión de algas y el deterioro de la calidad del agua a escala mundial. El uso de imágenes satelitales para monitorear estos cambios facilita una mejor comprensión de la variabilidad espacial y temporal, y apoya el desarrollo de estrategias efectivas para la gestión y conservación de estos recursos (Torrez, 2024).

A nivel nacional, la salud de los ecosistemas acuáticos en Perú es vital, la bahía interior de Puno, ubicada en el lago Titicaca, Puno, simboliza un ecosistema que soporta múltiples presiones ambientales y humanas. Estos cuerpos de agua son vitales para la biodiversidad local y las comunidades que dependen de ellos para su supervivencia y actividades económicas. La ausencia de un monitoreo efectivo y sistemático de la concentración de clorofila-a en esta laguna limita la comprensión de su estado ecológico y la identificación de las causas detrás de los cambios en la calidad del agua. Por lo tanto,

es necesario implementar metodologías que permitan un análisis y seguimiento continuo de estos parámetros (Verdugo et al., 2024).

En el ámbito local, la bahía interior de Puno enfrenta desafíos significativos en cuanto a la calidad del agua y la biodiversidad. Las actividades agrícolas y ganaderas en las cercanías de la bahía están aumentando la escorrentía de nutrientes, lo que está provocando un incremento en la concentración de clorofila-a. Este fenómeno puede causar problemas como la eutrofización, que afecta negativamente la salud del ecosistema acuático y la fauna local. A pesar de su relevancia, faltan estudios detallados que analicen la variabilidad espacio-temporal de la clorofila-a en la bahía interior de Puno, complicando la identificación de las razones detrás de estos cambios y la aplicación de estrategias efectivas para su mitigación.

La ciudad de Puno depende de la bahía interior de Puno para actividades recreacionales y el turismo, lo que hace aún más necesario el monitoreo de su salud ecológica. Sin embargo, hay una carencia de concienciación y conocimiento sobre la importancia de conservar este recurso hídrico. Realizar un análisis mediante imágenes satelitales no solo proporciona datos útiles sobre la concentración de clorofila-a, sino que también podría servir como una herramienta educativa para las comunidades locales, promoviendo una mayor participación en la gestión sostenible de la bahía interior de Puno y fomentando prácticas que aseguren la conservación de este ecosistema acuático.

1.1.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cómo es el análisis espacio-temporal de la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno, periodo 2015 - 2024?

1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cómo es el modelo estadístico del comportamiento de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 - 2024 ?
- ¿Cuál es la concentración de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía

interior de Puno durante el periodo 2015 - 2024?

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Corcho & Valle (2023), en el embalse Abreus, provincia de Cienfuegos, Cuba. El objetivo de este estudio fue emplear técnicas de Percepción Remota para estimar la concentración de clorofila-a. Utilizando datos de campo recopilados entre 2016 y 2021 por el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) y imágenes del satélite Landsat 8 obtenidas de Earth Explorer, se aplicaron métodos de regresión para seleccionar y validar tres modelos de regresión simple que permiten estimar la concentración de clorofila-a en el embalse. El modelo más exacto, que emplea el cociente B4/B5, obtuvo un R^2 de 98,93% y un RMSE de 2,12 $\mu\text{g/L}$. Este modelo fue aplicado a una imagen satelital del 12 de junio de 2019, generando un mapa temático que muestra la distribución espacial de la clorofila-a en esa fecha.

Merchán (2018), en el lago de Ciénaga de Ayapel (Córdoba) y el Lago de Tota (Boyacá), Colombia, este estudio tuvo como objetivo analizar la variación espacial y temporal en la concentración de clorofila y la condición trófica de dos ecosistemas acuáticos con características ambientales distintas, utilizando imágenes del satélite Landsat-8 (SR). En la ciénaga de Ayapel, se encontró una buena correlación entre las variables ($r^2=0,563$) mediante un modelo de regresión múltiple que combina las bandas b3, b2, y b5/b4. Sin embargo, en el Lago de Tota, el modelo de regresión simple basado en el promedio de las bandas b3 y b4 mostró una correlación baja ($r^2=0,151$), lo que se atribuye a la profundidad del ecosistema y a la presencia de sólidos disueltos y suspendidos.

Navarro (2023), en el embalse El Val (Aragón), España, el estudio tiene como objetivo analizar el uso de técnicas avanzadas de teledetección y algoritmos de aprendizaje automático para monitorear parámetros relacionados con la calidad del agua en el embalse, considerado una zona vulnerable y en riesgo ambiental. Se validaron imágenes

térmicas del sensor TIRS de Landsat para medir la temperatura superficial del agua, así como imágenes ópticas del sensor MSI de Sentinel para estimar la turbidez y la concentración de clorofila-a entre enero de 2018 y diciembre de 2022. La temperatura se estimó mediante un modelo de regresión lineal ($R^2=0.98$) con un error de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, calibrado con datos de campo. Para la estimación de clorofila-a y turbidez, se probaron los algoritmos Decision Tree, Random Forest y SVM, optimizando los hiper parámetros y utilizando validación cruzada con 5 particiones estratificadas. Decision Tree y Random Forest lograron explicar el 88% de la varianza en la estimación de clorofila-a, con errores entre 10-15 mg/l, mientras que los modelos de turbidez no representan adecuadamente la variable.

Bravo (2021), El propósito de esta investigación es examinar la condición trófica del lago Villarrica mediante imágenes satelitales, valorando la utilidad de los satélites Sentinel 2 y 3 y otros algoritmos de identificación de clorofila-a. Para Sentinel 2, se examinaron combinaciones de bandas azul-verde, verde-rojo, rojo-NIR, y los satélites oceanográficos OC2 y OC4. Para Sentinel 3, se realizaron evaluaciones de los algoritmos OC5 y C2RCC. Los hallazgos señalaron que el lago muestra una magnitud espectral media baja, con un tope en la zona azul, lo que promueve la aplicación de algoritmos de color azul-verde para identificar trofia. Se alcanzaron los resultados más sobresalientes empleando los algoritmos OC2 y OC4 en datos de Sentinel 2, superando al OC5 de Sentinel 3 en términos de datos. Así pues, se aconseja utilizar Sentinel 2 para calcular la clorofila-a, mientras que Sentinel 3 necesita más estudio. En 2018, 2019 y 2020, el lago Villarrica permaneció en un estado de oligotrófico, evidenciando un incremento en el nivel de trofia en las áreas litorales de Villarrica, La Poza y Pucón. El verano de 2020 mostró una gran variabilidad en el estado trópico, registrándose dos floraciones algales.

Torrez (2024), la investigación tuvo lugar en cuatro campañas de muestreo desde agosto hasta noviembre de 2021, en las que se recogieron muestras para examinar los

parámetros de calidad del agua: clorofila-a y turbidez, calculadas en laboratorio, y el potencial de hidrógeno y la conductividad eléctrica, evaluados en terreno. La metodología se enfocó en anticipar los parámetros físico-químicos y determinar qué sensor daba mejores pronósticos a través de una regresión multivariable, teniendo en cuenta los valores de reflectancia de cada parámetro. Se examinaron los datos a través de los programas gratuitos QGIS y R. Se extrajeron imágenes del sensor Landsat 8, las cuales mostraron nubosidad, lo que impactó en el análisis e interpretación de los datos, sin revelar valores significativos en los coeficientes de correlación de Spearman ni en el modelo de predicción multivariable. El sensor Sentinel-2, en los primeros tres meses, no detectó correlaciones relevantes para ninguno de los parámetros. No obstante, en noviembre, se registró un vínculo moderado del pH con las bandas espectrales B04 (0.45) y B05 (0.47) en el espectro visible y en el infrarrojo próximo, respectivamente. Adicionalmente, se detectaron correlaciones de intensidad moderada y alta para la conductividad eléctrica con múltiples bandas, destacando B04 (0.73), B05 (0.78), B06 (0.81), B07 (0.81), B08 (0.80) y B08A (0.81) en el infrarrojo próximo y de onda corta en el infrarrojo cercano. No se obtuvo correlación significativa para clorofila-a y turbidez. Al generar el modelo, los parámetros de pH y conductividad eléctrica mostraron capacidades predictivas del 21.6% y 69.5%, respectivamente. Se concluye que el sensor Landsat 8 no mostró valores significativos, mientras que Sentinel-2 presentó valores significativos para la predicción de pH y conductividad eléctrica, siendo este último el mejor sensor para tales estimaciones.

1.2.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Estrada & Macahuachi (2023), en la laguna Yarinacocha, Ucayali, el objetivo de este estudio fue analizar el comportamiento espacial de la concentración de clorofila-a, sólidos suspendidos totales y transparencia en la laguna para comprender la distribución de estos parámetros. Se emplearon firmas espectrales, así como regresiones y

correlaciones entre los valores de calidad del agua y la reflectividad superficial obtenida de imágenes satelitales de Sentinel 2a. Para corregir las imágenes, se utilizó el método de Chávez, que implica la sustracción de objetos oscuros. En los resultados, no se logró desarrollar una ecuación empírica para la clorofila-a debido a que su concentración no alcanzó el límite de detección del método de análisis de laboratorio. Para los sólidos suspendidos totales, se estableció una ecuación empírica polinómica de segundo grado basada en la relación de bandas B5/B2, con un R^2 de 0.99. En cuanto a la transparencia, se obtuvo un modelo tribanda con la relación $B4 - \frac{1}{2} (B11 + R^2)$, alcanzando un R^2 de 0.98. Al comparar los resultados con la normativa peruana ECA-agua, se encontró que el 10.4% de la laguna excede los 25 mg/l en concentración de sólidos suspendidos totales, mientras que la clorofila-a se mantiene por debajo de los límites establecidos.

Neyra (2023), en la laguna Cashibococha, ubicada en el departamento de Ucayali, la investigación tuvo como objetivo principal determinar tres parámetros de calidad del agua en la laguna Cashibococha utilizando imágenes satelitales. Los parámetros evaluados fueron Sólidos Suspendidos Totales (SST), Transparencia (SD) y Clorofila-a (Chl-a). Para los SST, se desarrollaron ecuaciones lineales empleando la banda multiespectral B2 del satélite Landsat 9 – OLI 2, obteniendo un R^2 de 0.087, con valores que variaron entre 11.60 mg/L y 26.50 mg/L. Respecto a la transparencia, los valores variaron entre 0.44 y 0.60 m, y las ecuaciones lineales se desarrollaron utilizando la banda B7 de Landsat 9 – OLI 2, resultando en un R^2 de 0.3401. Finalmente, para la clorofila-a, se utilizaron ecuaciones lineales con la banda B2 de Landsat 9 – OLI 2, alcanzando un R^2 de 0.1894, y los valores de las muestras in situ se ubicaron entre 0.042 y 0.069 mg/L. Este estudio demuestra la viabilidad de aplicar técnicas de teledetección para evaluar la calidad del agua en la laguna Cashibococha.

Nelly & Sánchez (2023), en el lago Yahuarcocha, Ucayali, La investigación analizó la calidad del agua del lago Yahuarcocha de manera espacial y temporal, utilizando

métodos convencionales y sensores remotos. Se tomaron muestras de agua entre agosto y diciembre de 2021, evaluando los parámetros fisicoquímicos y biológicos, y comparándolos con datos de 2017 a 2020, obtenidos de monitoreos realizados por el laboratorio de EMAPA-I. Además, se calculó el índice de vegetación (NDVI) para determinar la distribución temporal de la clorofila “a”. Los resultados revelaron que algunos parámetros fisicoquímicos excedieron los límites permisibles establecidos por la Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes del Ministerio del Ambiente, El pH superó el rango de 6.5-8.5, y la saturación de oxígeno tuvo un promedio de 79.76%, alcanzando un 107% en agosto, lo que excede el límite máximo permitido del 80%. La concentración de clorofila “a” llegó a 150.3 µg/l, lo que indica que el lago se encuentra en un estado hipertrófico. El análisis del NDVI reveló una presencia general de vegetación moderada, destacándose especies como *Typha latifolia*, *Eichhornia crassipes* y *Elodea canadensis*.

1.2.3. ANTECEDENTES LOCALES

Machaca (2018), en el lago Titicaca, Este trabajo de investigación se llevó a cabo en el lago menor del Titicaca, en su lado boliviano, donde la calidad del agua se ha deteriorado gravemente debido a que recibe descargas no tratadas de la agricultura (pesticidas y fertilizantes), la ganadería, así como aguas residuales domésticas, industriales y mineras, exacerbadas por el crecimiento poblacional en los municipios aledaños. Esta situación llevó a la aparición de un bloom en 2015. Utilizando teledetección con el sensor OLI del satélite Landsat-8, se analizaron las firmas espectrales de las imágenes junto con datos espectrales de campo. Para medir las concentraciones de clorofila fitoplanctónica en las columnas de agua, se utilizó la sonda FLUOROPREBE BBE para medir parámetros coincidiendo con el paso del sensor OLI, tras seleccionar puntos de muestreo en zonas de distinto impacto ambiental al norte del lago. La imagen satelital fue analizada mediante firmas espectrales y clasificada según la escala trófica de Carlson (1977), basada en

biomasa de algas. Los resultados mostraron un estado mesotrófico general, excepto en el punto LM-04, con estado eutrófico.

Paulino et al. (2016), en el lago Titicaca, se emplearon imágenes satelitales del sensor MERSI, de 250 metros de resolución espacial, para calcular la concentración de clorofila-a y su vínculo con los productos calibrados de concentración de clorofila-a del MODIS (AQUA) y del VIIRS (NPP), que son procesados por el sistema TERASCAN del IMARPE. Para calcular el nivel de clorofila-a, se utilizaron tres modelos de razón de banda (MOD2-1, MOD2-2 y MOD2-3) basándose en los valores de reflectancia de las imágenes MERSI. El estudio de la presencia de clorofila-a en los perfiles P1 y P2 evidenció que el modelo MOD2-2 se aproximaba más a los valores determinados por VIIRS y MODIS. Las conclusiones mostraron una correlación de $R=0.846$ entre los niveles de clorofila-a del MOD2-2 y VIIRS en el perfil P1, en cambio, en el perfil P2 la correlación fue inferior, $R=0.472$. Sin embargo, se detectó una correlación magnífica para los niveles de clorofila-a dentro de un espectro de 0 a 2 mg/m³, con una $R=0.945$, aproximadamente. Esto subraya la relevancia de la resolución espacial de 250 m del modelo MOD2-2 para la evaluación de la clorofila en el Lago Titicaca, pues facilita la identificación de rasgos que los sensores MODIS no son capaces de capturar. Tanto en zonas abiertas como en regiones con gran vegetación, los productos del MODIS y VIIRS de 1 km pueden saturarse con facilidad, tal como se demostró en la bahía de Puno.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar en el espacio-temporal la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno, periodo 2015 - 2024.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un modelo estadístico para el comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 - 2024.

- Determinar la concentración de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 - 2024.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

Los ecosistemas acuáticos son sistemas biológicos situados en cuerpos de agua, tanto de agua dulce como salada, donde los organismos vivos interactúan entre ellos y con su entorno físico. Comprenden una variedad de hábitats, tales como mares, océanos, ríos, lagos, arroyos, estanques y humedales. En estos ecosistemas, el agua es el elemento principal que ofrece soporte físico y químico, facilitando la disolución de nutrientes y gases esenciales para la vida. La biodiversidad es abundante, con una amplia gama de plantas, animales y microorganismos adaptados a vivir en condiciones específicas que varían en salinidad, temperatura y otros factores ambientales (Bernal et al., 2023).

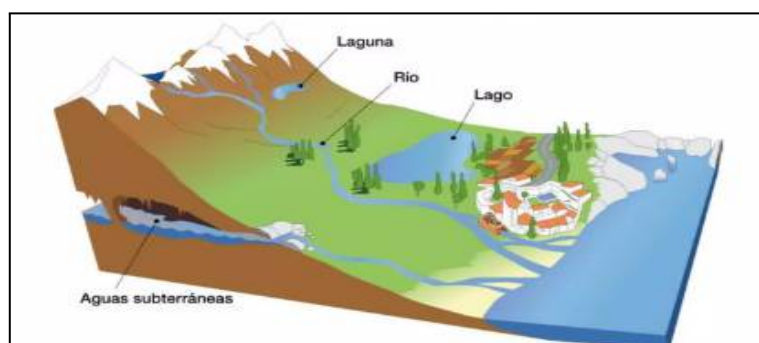


Figura 01: Ecosistemas acuáticos.

Fuente: (Contreras & Gonzalez, 2021).

Los ecosistemas acuáticos son esenciales para el planeta porque desempeñan funciones críticas en la regulación del clima, la provisión de recursos naturales y la prestación de

servicios ecosistémicos. Actúan como almacenes de carbono, influyen en los patrones climáticos, y proporcionan agua potable, alimentos y materiales vitales para los seres humanos. También ofrecen servicios como la purificación del agua, el control de inundaciones y el mantenimiento de hábitats para muchas especies (Bernal et al., 2023).

2.1.2. CARACTERÍSTICAS Y DINÁMICA DE LOS LAGOS ALTOANDINOS

Los lagos altoandinos se encuentran en áreas elevadas de los Andes, a altitudes superiores a 3,000 metros sobre el nivel del mar. Estas regiones experimentan un clima extremo con bajas temperaturas, alta radiación solar y fuertes vientos, que influyen en las características físicas y químicas del agua de los lagos. La salinidad de estos lagos puede fluctuar significativamente a causa de la elevada evaporación y la acumulación de minerales. La biodiversidad en estos lagos es distintiva, con especies adaptadas a las duras y cambiantes condiciones ambientales (Sandoval & Bosque, 2024).



Figura 02: Características y dinámica de los lagos altoandinos.

Fuente: (Coral, 2024).

La dinámica de los lagos altoandinos está condicionada por varios factores. Los ciclos de congelamiento y deshielo afectan el volumen y la estructura del agua, mientras que el aporte hídrico de glaciares cercanos se ve alterado por el cambio climático. El alto grado de evaporación, sumado a las fluctuaciones estacionales en las lluvias, puede afectar el volumen y calidad del agua. Además, las actividades humanas como la extracción de

agua, la agricultura y el turismo ejercen presión sobre estos frágiles ecosistemas, modificando su equilibrio ecológico y sus procesos naturales (Sandoval & Bosque, 2024).

2.1.3. EUTROFIZACIÓN

La eutrofización es un proceso que se produce en cuerpos de agua, caracterizado por un aumento excesivo de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo. Este fenómeno puede ser causado por diversas fuentes, como la escorrentía de fertilizantes agrícolas, aguas residuales, desechos industriales y otros contaminantes (Santana & Sinche, 2023).

La entrada de un exceso de estos nutrientes en un ecosistema acuático provoca un crecimiento descontrolado de algas y fitoplancton, lo que genera cambios significativos en la calidad del agua y la dinámica del ecosistema. Aunque la eutrofización puede incrementar de manera temporal la productividad primaria, sus impactos a largo plazo resultan perjudiciales para la salud del ecosistema acuático (Santana & Sinche, 2023).

2.1.4. CLOROFILA-A

La clorofila-a es un pigmento vital para el proceso de fotosíntesis, presente en plantas, algas y ciertas bacterias. En los ecosistemas acuáticos, este pigmento desempeña un papel vital en la fotosíntesis, el proceso que permite a los organismos transformar la luz solar en energía química. El nivel de clorofila-a funciona como un marcador relevante de la productividad primaria en estos ambientes, evidenciando la presencia de fitoplancton en el agua. Dado que el fitoplancton constituye la base de la cadena alimentaria en muchos ecosistemas acuáticos, su salud y abundancia son esenciales para la sostenibilidad de estos sistemas (Verdugo et al., 2024).



Figura 03: Clorofila-a en cuerpos de agua.

Fuente: (Verdugo et al., 2024).

Además, la evaluación de la clorofila-a en cuerpos de agua ofrece información crucial sobre la calidad del agua y el estado general del ecosistema. Altos niveles de clorofila-a pueden ser un indicativo de eutrofización, un proceso que resulta del exceso de nutrientes y que causa el crecimiento descontrolado de algas. Esta expansión puede provocar dificultades de oxigenación, afectando de manera adversa la vida acuática y la calidad del agua. Así, el seguimiento de la clorofila-a es clave para evaluar el estado de los ecosistemas acuáticos, detectar alteraciones ambientales y desarrollar estrategias de gestión adecuadas (Verdugo et al., 2024).

2.1.5. EFECTOS DEL CAMBIO EN LOS ECOSISTEMAS EN AGUAS DULCES

El impacto del cambio en los ecosistemas de agua dulce se refiere a las modificaciones que experimentan estos sistemas debido a factores naturales y humanos. Estas alteraciones pueden afectar la estructura, función y salud de ecosistemas como ríos, lagos, arroyos, estanques y humedales. Las causas son diversas e incluyen el cambio climático, la contaminación, la extracción excesiva de agua, la construcción de infraestructuras como presas y canales, y la introducción de especies invasoras (Flores, 2024).

Los efectos de estos cambios en los ecosistemas de agua dulce son notables y pueden manifestarse de varias formas. Entre los impactos ecológicos están la pérdida de biodiversidad, la alteración de las cadenas alimentarias y la degradación del hábitat natural. Estos cambios pueden reducir las poblaciones de especies nativas y aumentar la proliferación de especies invasoras, que pueden desplazar a las especies locales. Además, las variaciones en la temperatura y el flujo del agua pueden alterar los patrones de reproducción y migración de las especies acuáticas (Marcillo & Muñiz, 2023).

2.1.6. OBSERVACIÓN REMOTA

Aunque no es el método óptimo debido a sus numerosas limitaciones, la observación a distancia, posible gracias a la teledetección, permite obtener información sin estar físicamente en la región o el entorno que se desea evaluar y/o investigar. Esta observación a distancia se denomina "ciencia de la tierra", ya que su objetivo principal es tomar fotografías con este fin o analizar las imágenes que se recogen (Hurtado, 2019).

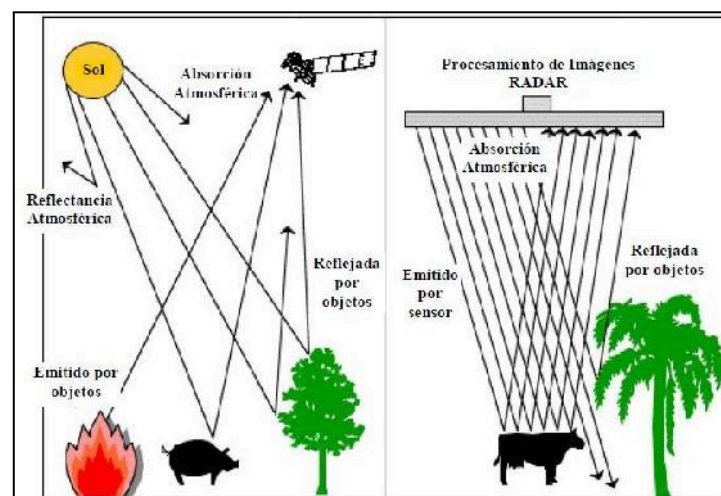


Figura 04: Elemento de un programa de detección a distancia.

Fuente: (Hurtado, 2019).

Las imágenes de satélite, como las de LANDSAT, se utilizan para la observación a distancia. Estas imágenes tienen 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una variedad de imágenes con diferentes colores que pueden utilizarse para trabajos de tipo

interpolación. Como resultado, sus aplicaciones son variadas, incluyendo la vigilancia y/o el análisis térmico. Todo ello es posible gracias a que la resolución espacial de estas imágenes oscila entre 15, 30, 60 y 120 m (Hurtado, 2019).

2.2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

- **El agua:** Es una sustancia química compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, cuya fórmula molecular es H₂O. Es fundamental para la vida en nuestro planeta y puede encontrarse en tres estados: sólido (hielo), líquido (agua) y gaseoso (vapor) (García et al., 2020).
- **Ecosistemas:** Los ecosistemas son sistemas naturales integrados por organismos vivos, tanto vegetales como animales, que interactúan entre sí y con su entorno físico, que incluye elementos abióticos como el suelo, el agua y el clima (González & Meira, 2021).
- **QGIS:** Es un programa de software de suministro abierto para sistemas GNU/Linux, Unix, Mac OS y Microsoft Windows. Permite manejar formatos ráster y vectoriales como shp, además de bases de datos especiales (Del Carmen et al., 2023).
- **Radiación solar:** Debido a la emisión de energía solar en forma de radiación electromagnética, se trata de un fenómeno físico (Lozano et al., 2021).
- **RStudio:** Este entorno de desarrollo integrado en el lenguaje de programación R se centra en el análisis estadístico y las instantáneas. Ofrece funciones de gestión del espacio de trabajo, una consola, gráficos y un editor de sintaxis para la ejecución sencilla de código (Del Carmen et al., 2023).

2.3. MARCO TEÓRICO NORMATIVO

En 2024, Perú refuerza su marco normativo en torno a la gestión de recursos hídricos y la conservación de ecosistemas acuáticos, elementos fundamentales para el desarrollo sostenible y la protección ambiental. La Ley N.º 30509, que promueve la inversión en la gestión sostenible de recursos hídricos, tiene como objetivo fomentar el uso eficiente y

responsable del agua en todos los sectores. Esta legislación establece un marco regulatorio que impulsa la inversión en tecnologías limpias y prácticas sostenibles, así como la recuperación y conservación de fuentes hídricas. Además, subraya la importancia de monitorear la calidad del agua y la necesidad de realizar estudios que analicen el estado de los ecosistemas acuáticos, esto subraya la importancia del estudio espacio-temporal de la concentración de clorofila en la Bahía Interior de Puno, lo que subraya la importancia del estudio espacio-temporal de la concentración de clorofila.

En contraposición, el Decreto Supremo N.o 004-2024-MINAM establece nuevas pautas para la supervisión y administración de la calidad del agua, incluyendo tecnologías de vanguardia como la utilización de imágenes satelitales para valorar los cuerpos de agua. Este decreto enfatiza la importancia de implementar sistemas de vigilancia que permitan la identificación precoz de problemas vinculados a la calidad del agua, tales como la eutrofización y el aumento desmedido de algas, y fomenta medidas preventivas y de mitigación. Asimismo, se estipula que las autoridades ambientales deben colaborar con las comunidades locales y otros actores en la gestión de recursos hídricos, asegurando la participación ciudadana y que las decisiones de manejo se fundamenten en datos precisos y actualizados. En este sentido, el análisis de la concentración de clorofila-a en la Bahía Interior de Puno es esencial para cumplir con estas regulaciones y contribuir al desarrollo de estrategias de conservación que protejan este ecosistema acuático en Puno.

2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

En el espacio-temporal existe una variación significativa al aumentar la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno, periodo 2015 - 2024.

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- El modelo estadístico del comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015-2024 muestran variaciones significativas.
- La concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015-2024 presenta fluctuaciones significativas al aumentar su concentración a lo largo del tiempo.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La Bahía Interior de Puno está situada a lo largo del lago Titicaca, en la zona sur de Perú, concretamente en la localidad de Puno. La bahía posee una superficie de 11.88 km² y se ubica a una altitud cercana a 3,800 metros sobre el nivel del mar. Las coordenadas geográficas son 15°50'22" S de latitud y 69°01'23" W de longitud, con las coordenadas geográficas de 15°50'22" S de latitud y 69°01'23" W de longitud.

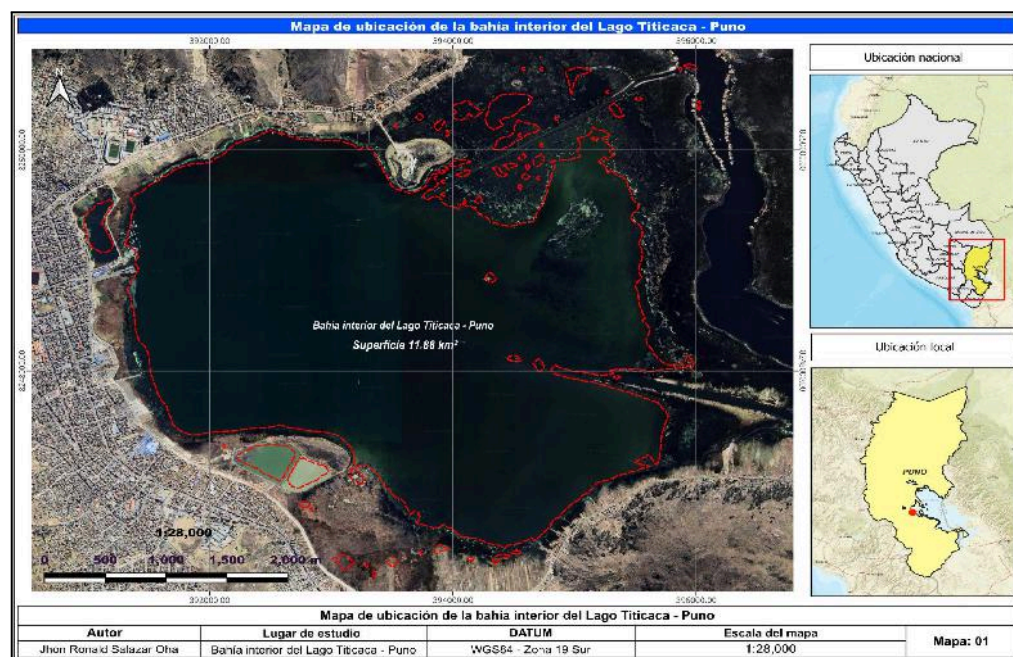


Figura 05: Mapa de ubicación del área de estudio.

También se caracteriza por sus aguas calmadas y poco profundas, rodeada de montañas, lo que le otorga un paisaje espectacular. Es un destino turístico destacado en la región y

sirve como punto de acceso hacia las islas del lago Titicaca, siendo famosa por su belleza natural.

La región de Puno, lugar donde se ubica la Bahía Interior de Puno, tiene un clima predominantemente altiplánico, marcado por temperaturas frías y una notable fluctuación estacional. Durante el día, las temperaturas suelen oscilar entre 15 °C y 20 °C, mientras que por la noche pueden bajar de 0 °C. Las lluvias son más frecuentes de noviembre a marzo, durante la temporada húmeda, lo que afecta la disponibilidad de agua en la laguna y, en consecuencia, la concentración de nutrientes y fitoplancton. Este clima, combinado con la altitud y las particularidades geográficas de la laguna, crea un ambiente adecuado para investigar la clorofila-a y otros factores que impactan la salud del ecosistema acuático, subrayando la relevancia de su análisis en el contexto de los cambios ambientales a nivel global.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

La población fue constituida por toda la extensión con un área de 11.88 km² que cuenta la Bahía Interior de Puno, durante el intervalo de tiempo que va de 2015 y 2024.

3.2.2. MUESTRA

Por otro lado, la muestra fue compuesta por las imágenes satelitales LandSat-8 seleccionadas de manera periódica dentro de la Bahía Interior de Puno, utilizando una resolución de 30 x 30 metros durante los 10 periodos de estudio, ya disponemos de los datos de reflectancia necesarios para calcular los niveles de clorofila-a en la bahía interior de Puno para estimar los niveles de clorofila-a en la bahía interior de Puno.

Muestreo

El muestreo es no aleatorio, la Bahía Interior de Puno se concentró en seleccionar lugares de muestreo que sean más relevantes para las metas del estudio, posibilitando

una valoración minuciosa de la concentración de clorofila-a a través de imágenes satelitales.

3.3. MÉTODOS Y MATERIALES

3.3.1. MÉTODOS

Tipo de investigación

Se consideró una investigación aplicada al análisis espacio-temporal de la concentración de clorofila en la Bahía Interior de Puno, cuyo objetivo es crear conocimientos útiles para solucionar problemas concretos vinculados con la salud del ecosistema acuático. En esta investigación se utilizó imágenes satelitales LandSat-8, lo que permitió recopilar y analizar datos sobre la clorofila-a de manera amplia y con un enfoque temporal. Además, el estudio tiene un diseño cuantitativo, ya que se enfocó en medir y analizar numéricamente variables específicas, lo que facilitó la identificación de patrones, tendencias y relaciones entre la concentración de clorofila-a durante los períodos de 2015 y 2024.

Diseño de Investigación

El diseño de investigación para el análisis espacio-temporal de la concentración de clorofila-a en la Bahía Interior de Puno se basó en un enfoque metodológico que integra la recolección de datos cuantitativos y el análisis de imágenes satelitales. Este es un diseño no experimental, ya que se enfocó en la observación y análisis de la concentración de clorofila-a a lo largo del tiempo y bajo diversas condiciones ambientales, sin manipular las variables.

3.3.2. MATERIALES

Equipos

- Computadora portátil, impresora, scanner.

Programas

- QGis (v3.26.17).

- RStudio (v4.3.1).

3.4. METODOLOGÍA

Método inductivo: Hace referencia a la habilidad de razonamiento inductivo, que se basa en pistas específicas y lleva a deducciones concretas. Para alcanzar una generalización, se fundamenta en el análisis de sucesos específicos (Andrade et al., 2018).

Técnica de observación: Es el proceso de examinar atentamente una cosa para asimilar plenamente la naturaleza del todo, incluido su conjunto de datos, hechos y fenómenos (Andrade et al., 2018).

Diseño metodológico por objetivos:

Metodología para el objetivo específico O1: Establecer un modelo de comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la Bahía Interior de Puno durante el periodo 2015 - 2024.

1.- Selección y adquisición de imágenes satelitales:

- Se descargó el producto de concentración de Clorofila-a Nivel 3 del Sensor SGLI (GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3)), del satélite GCOM-C (Global Change Observation Mission – Climate), correspondientes a la Bahía Interior de Puno.

Tabla 01: Características de la imagen satelital GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3)

Nombre	Unidades	Mín.	Máx.	Descripción
CHLA_AVE	mg/m ³	0	4,000	Concentración del pigmento verde (clorofila-a) en el fitoplancton de la capa superficial del mar

- Se descargaron las imágenes satelitales (LandSat-8), correspondientes a la Bahía Interior de Puno.

Tabla 02: Características de la imagen satelital LandSat-8, del sensor OLI.

Nombre	Tamaño de los píxeles	Longitud de onda	Descripción
B1	30 m	0.43 μm a 0.45 μm	Aerosol costero
B2	30 m	Entre 0.45 y 0.51 μm	Azul
B3	30 m	De 0.53 a 0.59 μm	Verde
B4	30 m	Entre 0.64 y 0.67 μm	Rojo
B5	30 m	0.85 μm a 0.88 μm	Infrarrojo cercano
B6	30 m	Entre 1.57 y 1.65 μm	Infrarrojo de onda corta 1
B7	30 m	2.11 μm a 2.29 μm	Infrarrojo de onda corta 2

2.- Extracción de valores:

- Se extrajeron valores mediante los 12 puntos de muestreo del producto de concentración de Clorofila-a (mg/m^3) Nivel 3 del Sensor SGLI (GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3), como se muestra en la siguiente imagen:

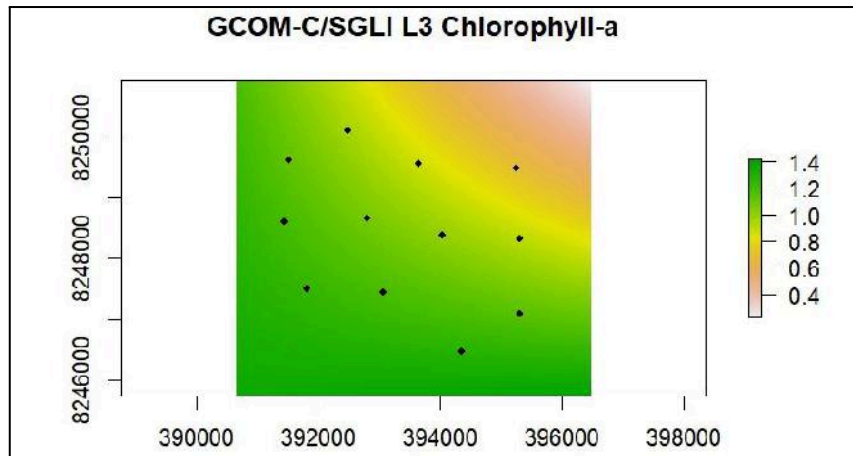


Figura 06: Producto GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a.

- Se extrajeron valores mediante los 12 puntos de muestreo de la imágenes satelitales (LandSat-8), como se muestra en la siguiente imagen:

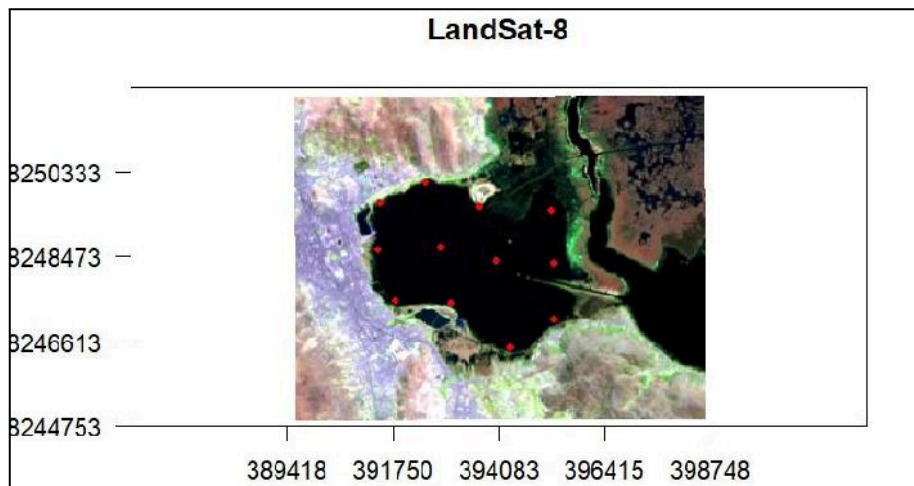


Figura 07: Extracción de valores de la imagen satelital LandSat-8.

3.- Estimación de la Concentración de Clorofila-a:

- Se aplicó el modelo estadístico de tipo logarítmico con regresión lineal múltiple e interacciones, que se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$Chl - a = a + b \cdot R_{red} + c \cdot R_{NIR}$$

Donde: Chl-a = es la concentración de clorofila-a, Rred = es la reflectancia en el espectro rojo, RNIRR = es la reflectancia en el infrarrojo cercano, a,b,c = son coeficientes determinados a partir de estudios de calibración previa.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon$$

Donde: Y= es la variable dependiente (clorofila-a), β_0 = es el intercepto, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ = son los coeficientes de regresión, X_1, X_2, \dots, X_n = son las variables independientes, ϵ = es el término de error.

4.- Validación del Modelo:

- El modelo se validó utilizando el cálculo del el R^2 (coeficiente de determinación) para evaluar la calidad del ajuste.

Metodología para el objetivo específico O2: Determinar la concentración de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la Bahía Interior de Puno durante el periodo 2015 - 2024.

1.- Cálculo de la concentración de clorofila-a:

Una vez estimadas las concentraciones anuales de clorofila-a, los datos fueron organizados en una serie cronológica que permitió analizar su comportamiento a lo largo del periodo 2015–2024 en la Bahía Interior de Puno. Para comprender mejor la dinámica temporal, se calcularon promedios por año y por estación, además de sus respectivas medidas de dispersión. Paralelamente, se generaron mapas temáticos anuales que facilitaron la identificación visual de las zonas con mayores concentraciones, lo que permitió detectar áreas con alta productividad biológica o indicios de procesos de eutrofización.

A partir de esta base de datos, se aplicaron modelos estadísticos de regresión tanto lineales como no lineales con el fin de identificar posibles tendencias en la evolución de la clorofila-a durante el periodo estudiado. Estos análisis ayudaron a reconocer incrementos o descensos en la concentración y vincular estos cambios con factores ambientales o actividades humanas, como el vertimiento de nutrientes al ecosistema o alteraciones en el clima.

La estrategia metodológica empleada permitió un seguimiento eficiente y continuo de la calidad del agua en esta zona lacustre. El uso de tecnología satelital brindó una ventaja significativa al permitir un monitoreo constante y a gran escala, complementando los datos de campo y reduciendo costos logísticos. Este enfoque genera información crucial que puede ser utilizada por entidades gubernamentales, científicas y comunidades locales para desarrollar políticas de manejo ambiental más acertadas.

2.- Visualización de Resultados:

- Se elaboraron mapas temáticos y gráficos de series temporales para mostrar la evolución de la concentración de clorofila-a a lo largo del tiempo.

3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Causa o variable independiente (VI): Imágenes satelitales.

Efecto o variable dependiente (VD): Espacio-temporal de la concentración de clorofila-a

Tabla 03: Operacionalidad de variables.

Variables	Indicadores	Escala de Medición	Tipos de variables
(VI) Imágenes satelitales	- GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a. - LandSat-8.	m	Independiente
(VD) Espacio-temporal de la concentración de clorofila-a	- Concentración.	mg/m ³	Dependiente

3.6. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO

Con el propósito de evaluar los cambios en la concentración de clorofila-a en la Bahía Interior de Puno durante el periodo comprendido entre 2015 y 2024, se utilizaron modelos de regresión lineal, tanto en su versión sencilla como en su versión multifacética. A través de estos modelos, se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2), que permite cuantificar el grado en que la variable temporal (años) explica la variabilidad observada en los niveles de clorofila-a. La determinación de este coeficiente se fundamenta en la siguiente fórmula matemática:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$$

Donde:

y_i - y_i representa los valores medidos

\hat{y} los valores estimados por el modelo

El valor de R^2 próximo a 1 indica que el modelo ofrece una representación adecuada del comportamiento real de los datos.

Por otro lado, se utilizó el valor de probabilidad (*p-value*) para determinar si la relación entre el tiempo y la concentración de clorofila-a tiene una significancia estadística. Este valor permite contrastar la hipótesis nula (que no existe relación) frente a la alternativa (que sí existe una relación significativa). Cuando el p-value es inferior a 0.05, se considera que la evidencia estadística es suficiente para rechazar la hipótesis nula y aceptar la existencia de una tendencia real en los datos. El análisis fue realizado mediante software estadístico especializado, lo que garantizó un procesamiento riguroso y confiable de la información obtenida.

CAPÍTULO IV

EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. DESARROLLAR UN MODELO ESTADÍSTICO PARA EL COMPORTAMIENTO DE LA CLOROFILA-A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO DURANTE EL PERIODO 2015 - 2024.

Se desarrolló y analizó un modelo estadístico logarítmico con múltiples regresiones lineales e interacciones, con el objetivo de examinar la progresión de la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno entre 2015 y 2024. Se basó en la fusión de información satelital proveniente del sensor GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a y del satélite Landsat-8, empleando las bandas espectrales B2, B3, B4 y B5, que abarcan desde el rango visible hasta el infrarrojo cercano. A partir de esta integración, fue posible establecer vínculos significativos entre las concentraciones de clorofila-a y los valores espectrales, incluyendo las interacciones entre bandas. El modelo permitió mostrar variaciones en el tiempo y el espacio en la concentración de la clorofila-a, afectadas principalmente por elementos ambientales y el efecto de acciones humanas. Esto permitió identificar áreas con mayor actividad en la concentración de la clorofila-a, en particular aquellas zonas próximas a las orillas de la bahía interior de Puno. Este método ofrece un instrumento valioso para valorar la concentración de la clorofila-a y tomar decisiones en beneficio.

Tabla 04: Modelo de regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones para la detección de la clorofila-a en la bahía interior de Puno.

Modelo	Ecuación para la detección de la clorofila-a en la bahía interior de Puno	R ²	p-valor
Modelo de regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones	$chl_a \text{ (mg/m}^3\text{)} = 0.553907 + (0.037012 * B2) + (-0.017330 * B3) + (0.006387 * B4) + (0.801607 * B5)$	0.8784	0.01022

Nivel de confianza(95.0%) que equivale al 0.05

Signif. codes: 0*** 0.001** 0.01* **0.05** 0.1 1

En la tabla 04, se muestran los resultados obtenidos a partir del modelo estadístico propuesto para estimar la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno fueron altamente satisfactorios. A través de una regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones, se obtuvo un resultado de 0.8784, explicando un 87.84% de la variabilidad en los datos, lo que demuestra una sólida habilidad predictiva del modelo. Para su elaboración se utilizaron datos espectrales del satélite Landsat-8, específicamente de las bandas B2, B3, B4 y B5, destacando esta última (infrarrojo cercano) por su mayor influencia positiva en los valores estimados, lo que coincide con su sensibilidad a la presencia de vegetación acuática. La fórmula obtenida fue: $chl_a(mg/m^3) = 0.553907 + (0.037012 \times B2) - (0.017330 \times B3) + (0.006387 \times B4) + (0.801607 \times B5)$. Por otro lado, el p-valor registrado (0.01022) confirma la significancia estadística del modelo bajo un

intervalo de confianza del 95%, lo que garantiza la fiabilidad de las estimaciones. En conjunto, esta metodología se posiciona como una herramienta útil para el seguimiento de la calidad del agua y el análisis ambiental del ecosistema lacustre. En contraste con Merchán (2018), tanto en el lago de Ciénaga de Ayapel (Córdoba) como en el Lago de Tota (Boyacá), los resultados para la ciénaga de Ayapel son similares a los de la ciénaga de Ayapel, se encontró una buena correlación entre las variables ($r^2=0,563$) mediante un modelo de regresión múltiple que combina las bandas b3, b2, y b5/b4.

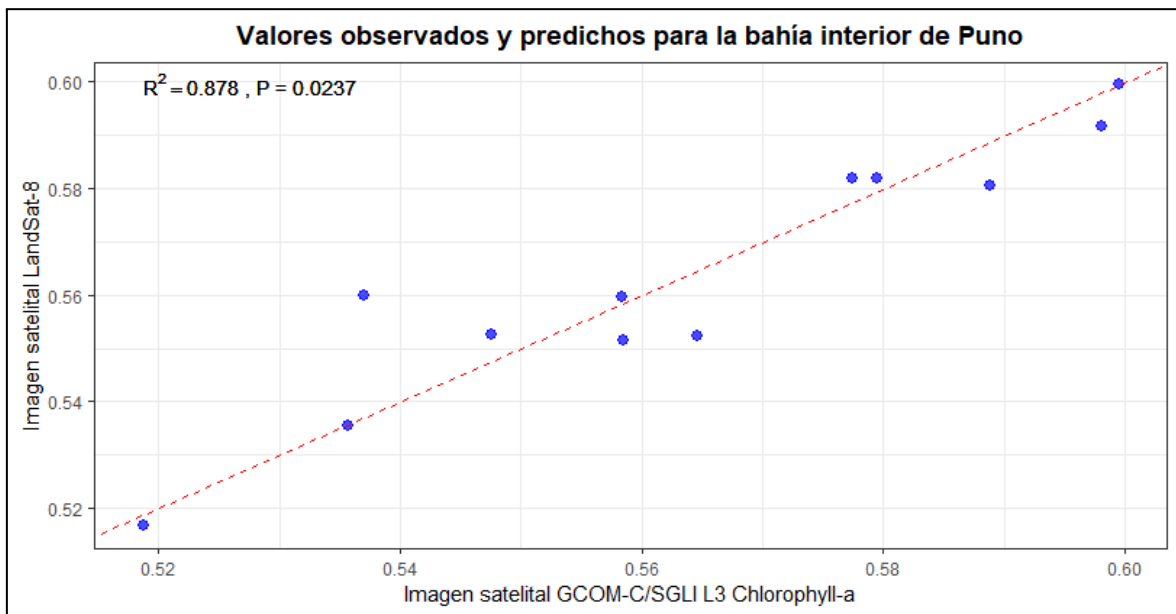


Figura 08: Valores observados y predichos para la bahía interior de Puno.

En la figura 08, se muestra el gráfico de dispersión permite observar la relación entre los valores medidos y los estimados de clorofila-a en la bahía interior de Puno, basándose en información recabada a través de los satélites GCOM-C/SGLI L3 y Landsat-8. Cada punto azul en el gráfico representa una comparación entre ambas fuentes, mientras que la línea discontinua en rojo indica el punto ideal donde las estimaciones coinciden exactamente con los valores reales. El modelo aplicado demuestra una capacidad predictiva sólida, evidenciada por un coeficiente de determinación (R^2) de 0.878, lo que indica que logra explicar una proporción considerable de la variabilidad en los datos. Asimismo, el valor p obtenido (0.0237) confirma que la relación es estadísticamente significativa bajo un nivel

de confianza del 95 %. Como resultado del análisis, se obtuvo la siguiente fórmula para estimar la concentración de clorofila-a en mg/m^3 . Esta expresión matemática evidencia cómo influyen las bandas espectrales B2, B3, B4 y B5 del satélite Landsat-8 en la estimación de esta variable. La ecuación fue derivada de un modelo de regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones y respalda la utilidad del enfoque satelital como herramienta efectiva para el monitoreo de la calidad del agua y la gestión sostenible de la bahía interior de Puno.

4.2. EXPOSICION Y ANALISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CLOROFILA-A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE PUNO DURANTE EL PERIODO 2015 - 2024.

El estudio demostró que es factible analizar la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno, en el periodo comprendido entre 2015 y 2024, a través de un modelo de regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones. La integración de datos de las imágenes satelitales GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a y Landsat-8 permitió desarrollar un modelo estadístico con buena capacidad explicativa y significancia, esto permitió identificar variaciones tanto espaciales como temporales en la presencia de clorofila-a en el área de investigación. Las bandas espectrales utilizadas mostraron una relación significativa con esta variable, lo que confirma la precisión del modelo para su estimación mediante teledetección. En síntesis; estos hallazgos respaldan la utilización de instrumentos satelitales y técnicas estadísticas sofisticadas como una alternativa eficaz para el seguimiento de la calidad del agua en ecosistemas acuáticos.

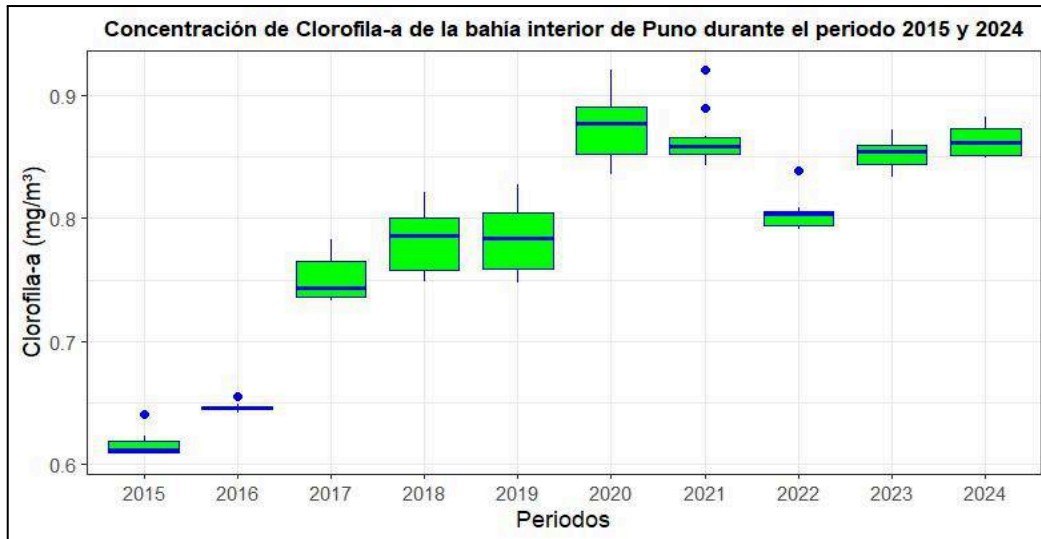


Figura 09: Concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 y 2024.

En la figura 09, se muestra el análisis del gráfico de cajas donde nos permite visualizar la variación en la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 y 2024. Las cajas ilustran la repartición anual de los datos calculados, que incluyen la mediana, los cuartiles y ciertos valores máximos representados por puntos de color azul. A lo largo de estos años, se percibe una tendencia ascendente en los niveles de clorofila-a, lo cual también se evidencia en los promedios anuales que aumentan de 0.615 mg/m³ en 2015 a 0.862 mg/m³ en 2024. Este crecimiento se acentúa a partir de 2017, alcanzando sus valores más altos en 2020 y 2021. Si bien existen ligeras variaciones en ciertos años, la tendencia general muestra un incremento sostenido. Esta situación sugiere un aumento progresivo de la biomasa fitoplanctónica en la bahía interior de Puno. Por otro lado la investigación concuerda con **Nelly & Sánchez (2023)**, en el lago Yahuarcocha, Ucayali, durante el período 2017 a 2020, donde los resultados mostraron concentración de clorofila "a" se alcanzó un nivel de 150.3 µg/l, lo que señala que el lago está en un estado hipertrófico.

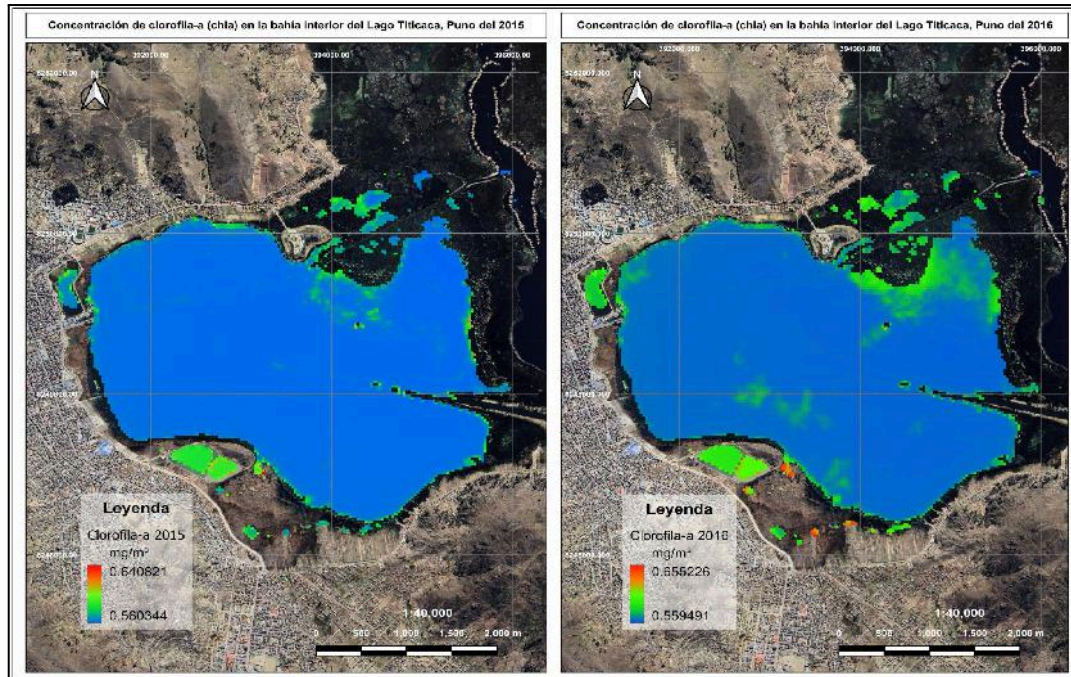


Figura 10: Mapa de concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 y 2016.

En la figura 10, se muestra el mapa de la concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 y 2016. En estos años, se percibe una tendencia ascendente en los niveles de clorofila-a, lo cual también se evidencian los aumentos anuales de concentración de clorofila-a con valores $>$ a 0.640 mg/m^3 que muestran altas concentración de clorofila-a y valores $<$ a 0.560 mg/m^3 muestran agua sin concentración la clorofila-a en 2015. Por otro lado los valores $>$ a 0.655 mg/m^3 que muestran altas concentración de clorofila-a y valores $<$ a 0.559 mg/m^3 muestran agua sin concentración la clorofila-a en 2016.

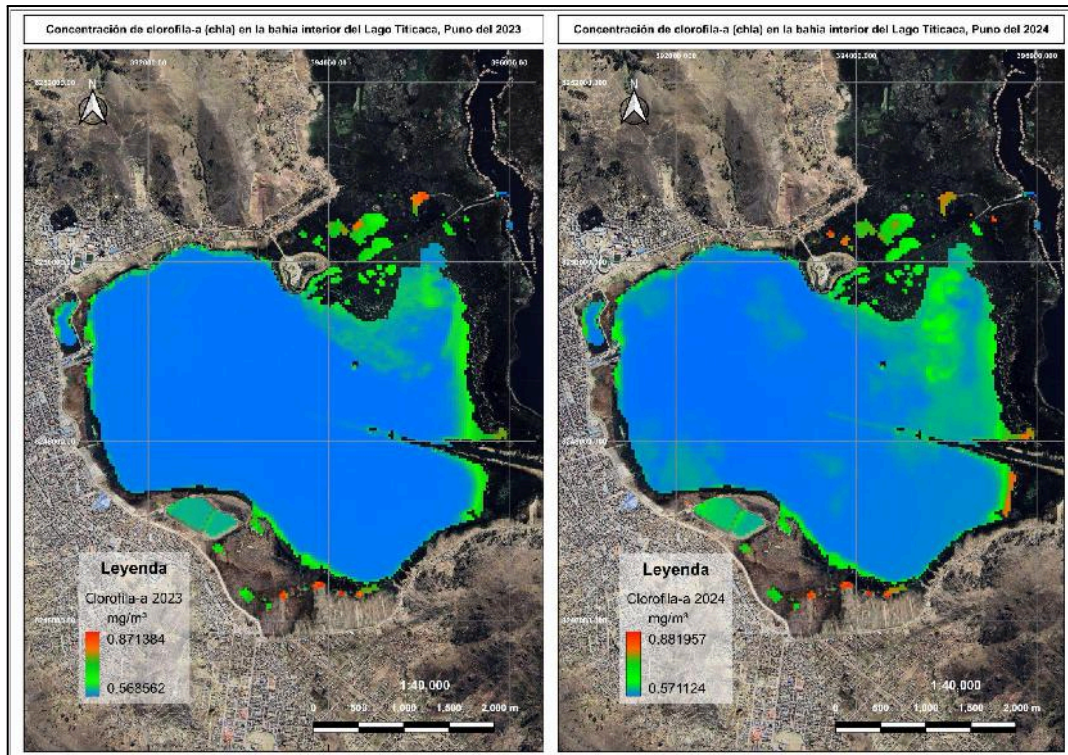


Figura 11: Mapa de concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2023 y 2024.

En la figura 11, se muestra el mapa de la concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2023 y 2024. En estos años, se percibe una tendencia ascendente en los niveles de clorofila-a, lo cual también se evidencian los aumentos anuales de concentración de clorofila-a con valores $>$ a 0.871 mg/m^3 que muestran altas concentración de clorofila-a y valores $<$ a 0.568 mg/m^3 muestran agua sin concentración la clorofila-a en 2023. Por otro lado los valores $>$ a 0.881 mg/m^3 que muestran altas concentración de clorofila-a y valores $<$ a 0.571 mg/m^3 muestran agua sin concentración la clorofila-a en 2024.

Tabla 05: Estadística descriptiva de la concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 y 2024.

Variable	Media	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de asimetría	Mínimo	Máximo
chl-a (mg/m ³)	0.784	0.793	0.091	-0.966	0.615	0.875

Nivel de confianza(95.0%)

En la tabla 05, se muestra el análisis estadístico realizado sobre los niveles de clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el 2015 y 2024, donde evidencia una tendencia creciente en su concentración. El promedio obtenido fue de 0.784 mg/m³ y la mediana llegó a 0.793 mg/m³, lo que señala una distribución bastante uniforme. Sin embargo, el coeficiente de asimetría de -0.966 muestra una leve tendencia hacia valores inferiores, aunque predominan los registros con valores que superan la media, la desviación estándar, de 0.091, señala que existe una dispersión moderada en los datos, la diferencia entre el mínimo (0.615 mg/m³) y el máximo (0.875 mg/m³) también confirma esta tendencia al alza. Considerando un intervalo de confianza del 95%, se puede afirmar que la concentración de clorofila-a ha aumentado de manera sostenida en estos períodos, posiblemente como resultado del crecimiento de la biomasa fitoplanctónica, asociado a la influencia de actividades humanas, descargas de nutrientes u otros factores ambientales que afectan la bahía interior de Puno.

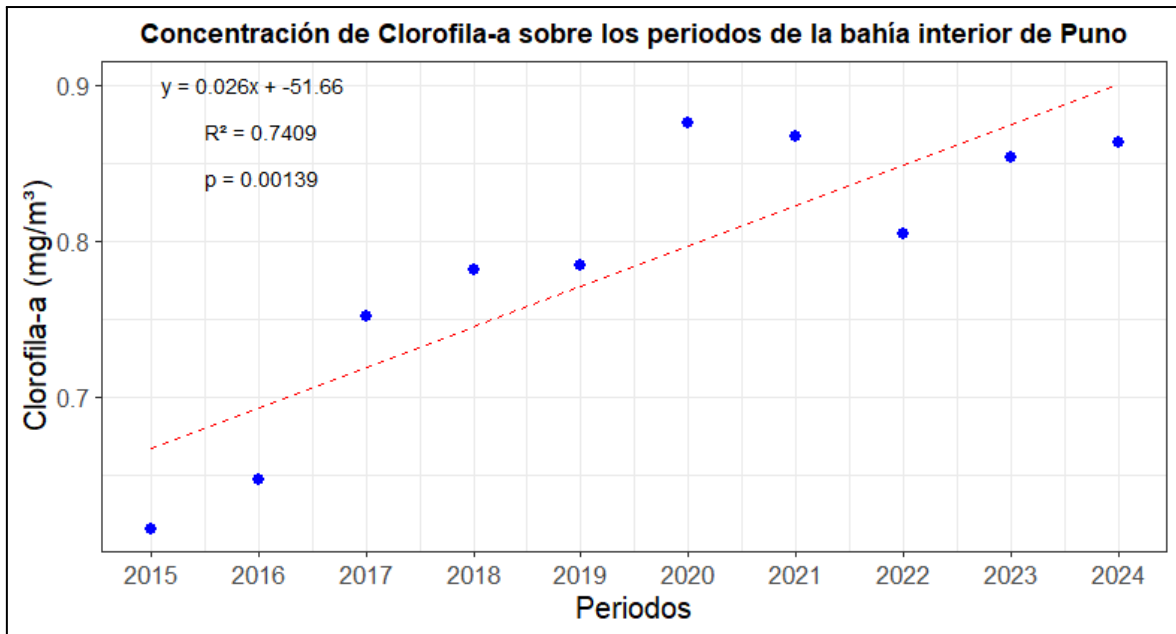


Figura 12: Concentración de clorofila-a sobre los periodos de la bahía interior de Puno.

En la figura 12, se muestra la concentración de clorofila-a sobre los periodos de la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 y 2024, se ha observado un incremento considerable en la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno, elevándose de aproximadamente 0.62 mg/m³ a 0.86 mg/m³, lo que representa un aumento del 38.7 %. Esta evolución ascendente está sustentada por un análisis estadístico que muestra una fuerte correlación con el tiempo ($R^2 = 0.7409$) y una alta significancia ($p = 0.00139$), lo que indica que el paso de los años influye el 74% notablemente en esta variación. Este comportamiento señala una intensificación del proceso de eutrofización de la bahía interior de Puno, posiblemente provocada por el incremento de nutrientes en el cuerpo de agua, asociado a la acción humana. Este fenómeno muestra la calidad del agua y alterando el equilibrio ecológico de la bahía interior de Puno, por lo que se vuelve necesario adoptar estrategias de control y conservación ambiental.

4.3. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS.

Formulación de la prueba de hipótesis para el objetivo específico 1.

Hipótesis alterna (H_1): El modelo estadístico del comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015-2024 muestran variaciones significativas.

Hipótesis nula (H_0): El modelo estadístico del comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015-2024 no muestra variaciones significativas.

Regla de decisión (nivel de significancia $\alpha = 0.05$):

- Si el p-valor obtenido es inferior o equivalente a 0.05, se descarta H_0 y se admite H_1 .
- Si el p-valor supera 0.05, H_0 no se descarta.

Interpretación: En base a la tabla 04, los resultados el *p-valor* obtenido, equivalente a 0.01022, está por debajo del umbral de significancia del 0.05, lo que permite rechazar la H_0 y aceptar la H_1 . Esto corrobora que el modelo estadístico utilizado, fundamentado en el estudio de imágenes satelitales, identifican fluctuaciones importantes en los niveles de clorofila-a en la bahía interior de Puno durante el periodo comprendido entre 2015 y 2024. Esta prueba avala la efectividad del modelo como un instrumento fiable para determinar la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno y potenciar el monitoreo ambiental a través de la teledetección.

Formulación de la prueba de hipótesis para el objetivo específico 2.

Hipótesis alterna (H_1): La concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015-2024 presenta fluctuaciones significativas al aumentar su concentración a lo largo del tiempo.

Hipótesis nula (H_0): La concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015-2024 presenta fluctuaciones significativas al descenso su concentración a lo largo del tiempo.

Regla de decisión (nivel de significancia $\alpha = 0.05$):

- Si el p-valor obtenido es inferior o equivalente a 0.05, se descarta H_0 y se admite H_1 .

→ Si el p -valor supera 0.05, H_0 no se descarta.

Interpretación: En base a la figura 13, los resultados el p -valor obtenido es igual a 0.00139, se encuentra muy por debajo del umbral de significancia del 0.05, lo que lleva a rechazar la H_0 y aceptar la H_1 . Esto evidencia que, según los datos obtenidos mediante imágenes satelitales, la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno, durante el periodo comprendido entre 2015 y 2024, ha mostrado variaciones significativas con una tendencia creciente. Estadísticamente los niveles de clorofila-a han aumentado de manera constante, posiblemente como resultado del incremento en la biomasa fitoplanctónica, de un mayor aporte de nutrientes al cuerpo de agua o de la influencia directa de las actividades humanas sobre el ecosistema del lago.

CONCLUSIONES

PRIMERA: El análisis espacio-temporal de la concentración de clorofila-a en la bahía interior de Puno, durante el periodo comprendido entre 2015 y 2024, evidenció un incremento progresivo en sus niveles, a través del procesamiento de imágenes satelitales GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a y del satélite Landsat-8, Esta tendencia ascendente en la presencia de clorofila-a en ecosistema acuático de la bahía interior de Puno, esto constituye una señal de advertencia respecto a la condición de calidad del agua.

SEGUNDA: El modelo estadístico de regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones como; $chl_a (mg/m^3) = 0.553907 + (0.037012 * B2) + (-0.017330 * B3) + (0.006387 * B4) + (0.801607 * B5)$, presentó una alta capacidad explicativa y un nivel de significancia estadística adecuado de 87.8%, lo que respalda su utilidad, el modelo integró las bandas B2, B3, B4 y B5 del satélite Landsat-8, siendo la banda del infrarrojo cercano (B5) la de mayor peso en la estimación de los niveles de clorofila-a, esta herramienta permitió establecer una relación confiable entre la respuesta espectral de las imágenes LandSat-8 y la imagen GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a, consolidando así una metodología útil para el monitoreo ambiental de la concentración de la clorofila-a en la bahía interior de Puno a partir de datos satelitales.

TERCERA: Los valores obtenidos de la concentración promedio anual de clorofila-a, mostró un crecimiento continuo del 74% a medida que van pasando los años, este comportamiento se corroboró a través del análisis estadístico y la representación gráfica,

demostrando ser estadísticamente relevante, evidenciando posibles procesos de eutrofización gradual en la bahía interior de Puno.

RECOMENDACIONES

PRIMERA: Al Ministerio del Ambiente (MINAM) fortalecer el monitoreo ambiental mediante el uso de tecnologías satelitales e Incorporar imágenes de teledetección en los sistemas de vigilancia, que permitirían un control más oportuno y eficaz sobre la calidad del agua. Para reforzar implementar estaciones de medición en tierra que validen los datos obtenidos desde el espacio. Igualmente, es necesario proponer programas de concienciación ambiental destinados a las comunidades ribereñas con el fin de promover buenas prácticas que contribuyan a disminuir la polución de la bahía interior de Puno.

SEGUNDA: A la Autoridad Nacional del Agua (ANA), aprovechar el modelo estadístico empleado en este análisis como un instrumento técnico aplicable al monitoreo de cuerpos hídricos como el lago Titicaca. El modelo, basado en una regresión logarítmica múltiple con interacción de variables, demostró ser estadísticamente consistente y confiable, por lo que su uso podría mejorar la detección de áreas con alta concentración de clorofila-a.

TERCERA: Finalmente, Al Gobierno Regional de Puno priorizar políticas orientadas a la conservación de los ecosistemas lacustres, considerando la tendencia creciente de clorofila-a observada durante los años analizados, es fundamental invertir en obras de tratamiento de aguas residuales, controlar la escorrentía agrícola y restaurar áreas degradadas. Del mismo modo, impulsar investigaciones científicas locales que utilicen herramientas satelitales, promoviendo así capacidades técnicas regionales y una gestión ambiental eficiente basada en información objetiva y actualizada.

BIBLIOGRAFÍA

- Bernal, D., Torres, J., & Pérez, J. (2023, Junio 16). *Análisis bibliométrico de la producción científica sobre fósforo y nitrógeno en ecosistemas acuáticos ecuatorianos, periodo 2000-2019*. SciELO Ecuador. Retrieved Octubre 5, 2024, from http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-76972023000100079&script=sci_arttext
- Bravo, J. (2021, 04 12). *Diagnóstico de la condición trófica del Lago Villarrica utilizando imágenes satelitales*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181628?show=full>
- Corcho, J., & Valle, A. (2023, Diciembre 18). *Empleo de técnicas de percepción remota para la estimación de clorofila-a en el embalse Abreus*. Revista Cubana de Geomática. Retrieved Octubre 5, 2024, from <https://geomatica.geocuba.cu/rcg/article/view/76>
- Escudero, L., Ledesma, J., Xu, H., & Grados, D. (2024, 05 22). *Análisis comparativo de la clorofila-a del sensor Modis-Aqua con datos in situ frente a la costa peruana durante el verano 2018*. https://revistas.imarpe.gob.pe/index.php/boletin/article/view/clorofila_Modisaqua_Peru
- Estrada, L., & Macahuachi, D. (2023, 04 22). *Análisis del comportamiento espacial de la concentración de clorofila-a, sólidos suspendidos totales y transparencia en la laguna Yarinacocha con imágenes satelitales, Ucayali 2022*. <https://repositorio.unu.edu.pe/items/2991cba7-873f-4f8f-a570-15c492e04661>
- Machaca, D. (2018, December 11). *Análisis de la clorofila-a en el agua con técnicas de teledetección en lago Titicaca (Lago Menor): Daniel Callisaya Machaca | Apthapi*. Apthapi. Retrieved October 5, 2024, from <https://apthapi.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/229>
- Merchán, Z. (2018, 11 12). *Identificación espacio temporal de clorofila-a mediante*

imágenes de satélite en sistemas acuáticos.

<http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/3065>

Navarro, V. (2023, Enero 20). *Evaluación de algoritmos de aprendizaje automático para la determinación de parámetros de calidad del agua mediante teledetección.*

<https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/147355>

Nelly, Q., & Sánchez, A. (2023, March 22). *Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte: Análisis espacio temporal de la calidad de agua del Lago Yahuarcocha utilizando métodos convencionales y sensores remotos.* Repositorio UTN.

Retrieved October 5, 2024, from

<https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13660>

Neyra, A. (2023, Abril 14). *Determinación de tres parámetros de la calidad del agua de la laguna Cashibococha mediante el uso de imágenes satelitales, Ucayali, 2023.*

Repositorio UNU. Retrieved Octubre 5, 2024, from

<https://repositorio.unu.edu.pe/items/88442984-7e15-4cdb-b2f7-d64746db6f44>

Paulino, C., Xu, H., Alburqueque, E., & Velaochaga, G. (2016, 04 12). *Estimación de concentración de clorofila-a en el lago Titicaca usando imágenes satelitales*

MERSI. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/3111>

Sandoval, E., & Bosque, G. (2024, September 11). *Repositorio Digital Universidad Técnica del Norte: Evaluación del funcionamiento ecológico del lago altoandino*

San Marcos, provincia de Pichincha. Repositorio UTN. Retrieved October 5, 2024,

from <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16431>

Santana, E., & Sinche, J. (2023, May 27). *Repositorio Continental: Influencia del nasturtium officinale (berros) en la disminución de la eutrofización del humedal*

Pucush Uclo-Chupaca, 2021. Repositorio Continental. Retrieved October 5, 2024,

from <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12958>

Torrez, J. (2024, April 30). *Evaluación de la utilidad de los sensores remotos Landsat- 8 y*

Sentinel-2 para el monitoreo de calidad de agua en la Laguna de Apoyo, 2021.

Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria. Retrieved October 5, 2024, from <https://repositorio.una.edu.ni/4726/>

Verdugo, G., Martínez, A., & Lara, R. C. (2024, July 16). *Efectos de una de una proliferación de Myrionecta rubra sobre la productividad primaria y concentración de clorofila a en el Parque Nacional de Loreto, BCS.* CICIMAR Océánides. Retrieved October 5, 2024, from <https://cicimaroceanides.mx/index.php/revista/article/view/304>

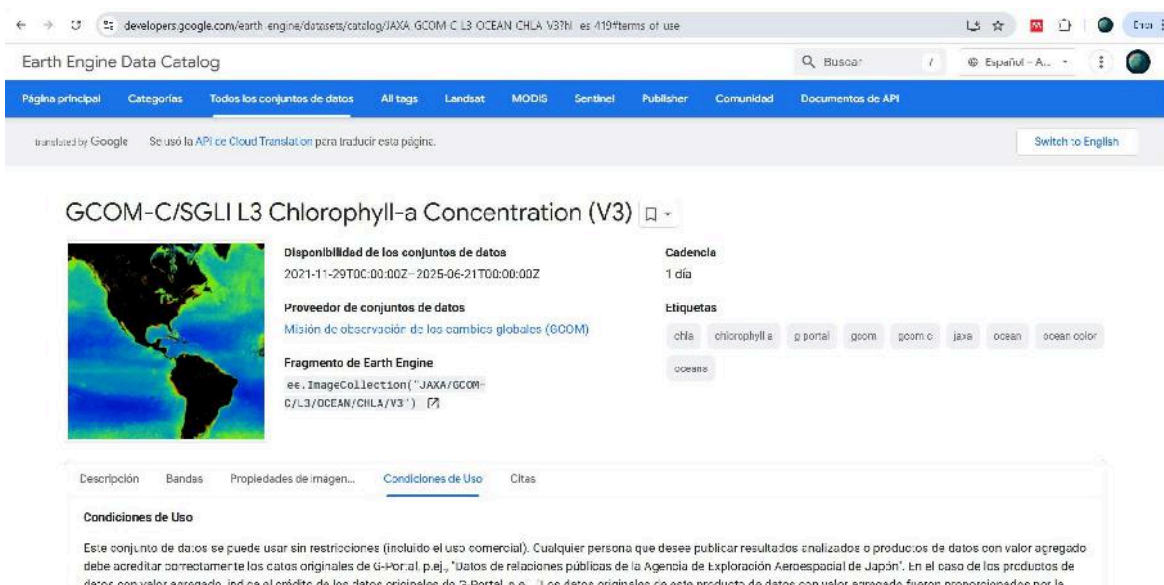
ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia

“Análisis espacio-temporal de la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno, periodo 2015 - 2024”

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	INSTRUMENTOS	TÉCNICA DE PROCESAMIENTO DE DATOS METODOLÓGICA
<p>GENERAL</p> <p>¿Cómo es el análisis espacio-temporal de la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno, periodo 2015 - 2024?</p> <p>ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cómo es el modelo de comportamiento de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 - 2024 ? ¿Cuál es la concentración de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 - 2024? 	<p>GENERAL</p> <p>Analizar en el espacio-temporal la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno, periodo 2015 - 2024.</p> <p>ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> Desarrollar un modelo para el comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 - 2024. Determinar la concentración de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015 - 2024. 	<p>GENERAL</p> <p>En el espacio-temporal existe una variación significativa al aumentar la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno, periodo 2015 - 2024.</p> <p>ESPECÍFICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> El modelo de comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015-2024 muestran variaciones significativas. La concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la bahía interior de Puno durante el periodo 2015-2024 presenta fluctuaciones significativas al aumentar su concentración a lo largo del tiempo. 	<p>Variable Independiente</p> <p>:</p> <p>Imágenes satelitales</p> <p>Variable Dependiente:</p> <p>Espacio-temporal de la concentración de clorofila-a</p>	<p>Imágenes aéreas</p> <ul style="list-style-type: none"> LandSat-8 <p>Concentración de la clorofila</p> <p>Concentración de Clorofila-a (mg/m³)</p>	<p>Softwares</p> <p>R-Studio (v4.3.1)</p> <p>Software QGIS (v3.26.17)</p>	<p>Información de las imágenes satelitales LandSat-8.</p> <p>Tipo de Investigación</p> <ul style="list-style-type: none"> Descriptivo y correlacional. Aplicada de enfoque cuantitativo. <p>Diseño de Investigación</p> <ul style="list-style-type: none"> No Experimental <p>Método</p> <ul style="list-style-type: none"> Deductivo Inductivo.

Anexo 02: Descarga del producto GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3)



Earth Engine Data Catalog

GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3)

Disponibilidad de los conjuntos de datos
2021-11-29T00:00:00Z - 2025-06-21T00:00:00Z

Proveedor de conjuntos de datos
Misión de observación de los cambios globales (GCOM)

Fragmento de Earth Engine
ee.ImageCollection("JAXA/GCOM-C/L3/OCEAN/CHLA/V3")

Cadencia
1 día

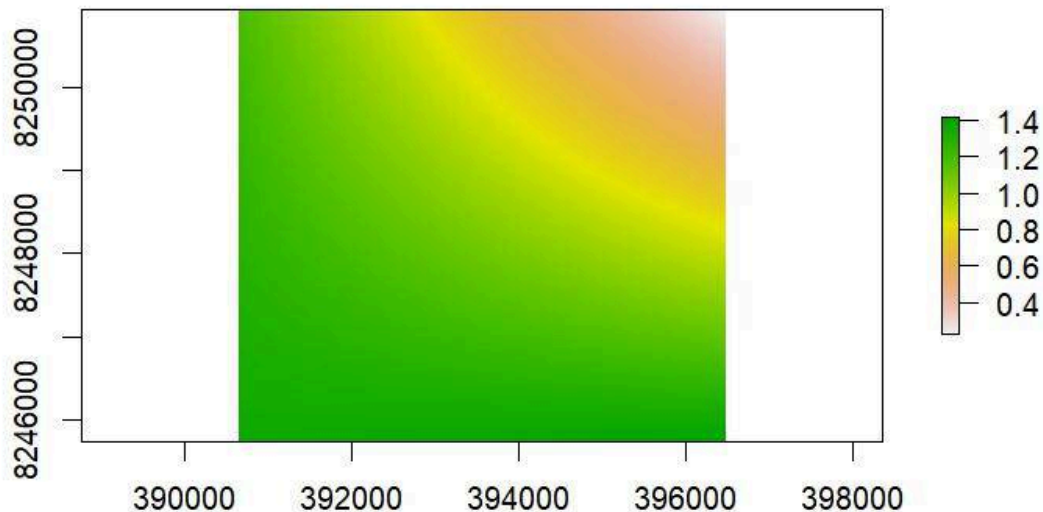
Etiquetas
chl_a chlorophyll_a gportal gcom gcom_c java ocean ocean_color

Descripción Bandas Propiedades de imagen... **Condiciones de Uso** Citas

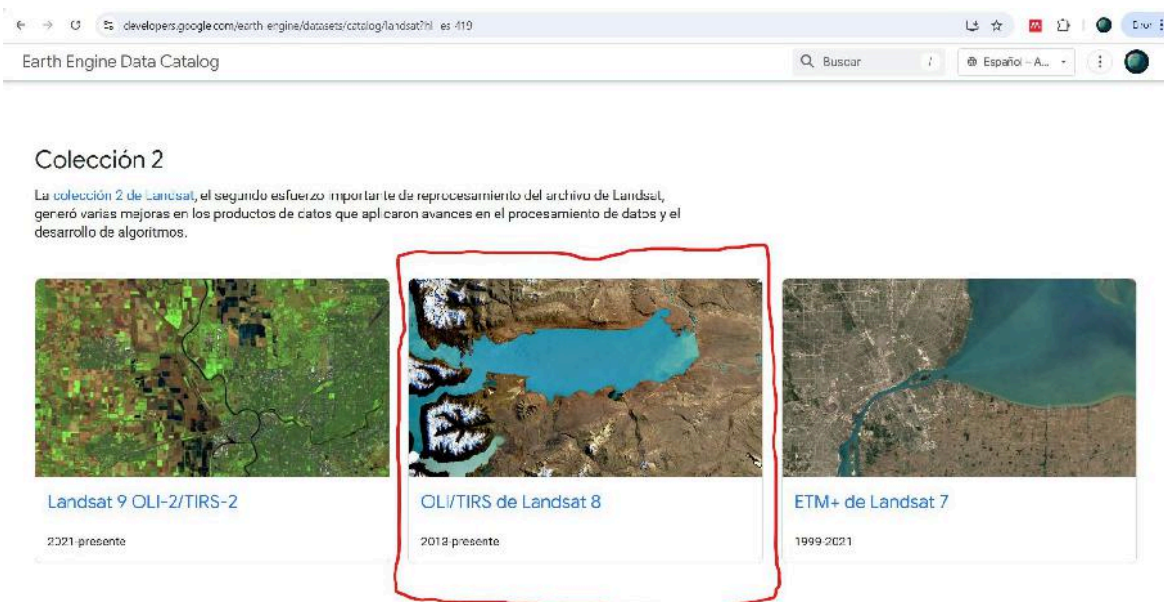
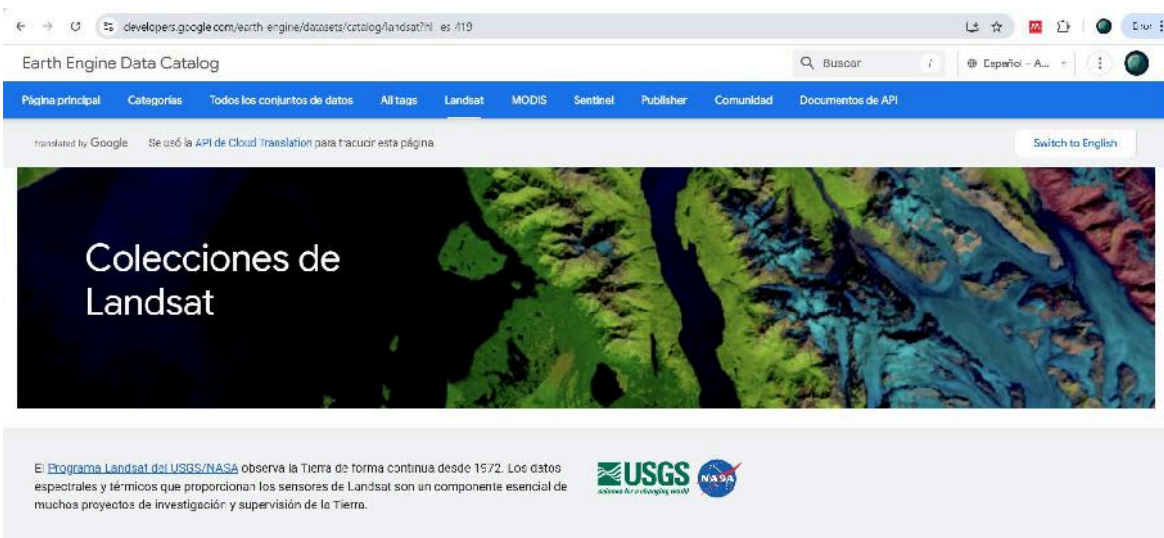
Condiciones de Uso

Este conjunto de datos se puede usar sin restricciones (incluido el uso comercial). Cualquier persona que desee publicar resultados analizados o productos de datos con valor agregado debe acreditar correctamente los datos originales de G-Portal, p.ej., "Datos de relaciones públicas de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón". En el caso de los productos de datos con valor agregado, indica el crédito de los datos originales de G-Portal, p.ej., "Los datos originales de este producto de datos con valor agregado fueron proporcionados por la".

GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a

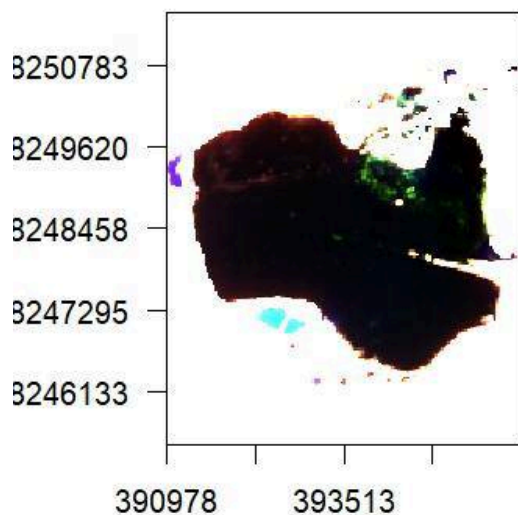


Anexo 03: Descarga de la imagen satelital LandSat-8.

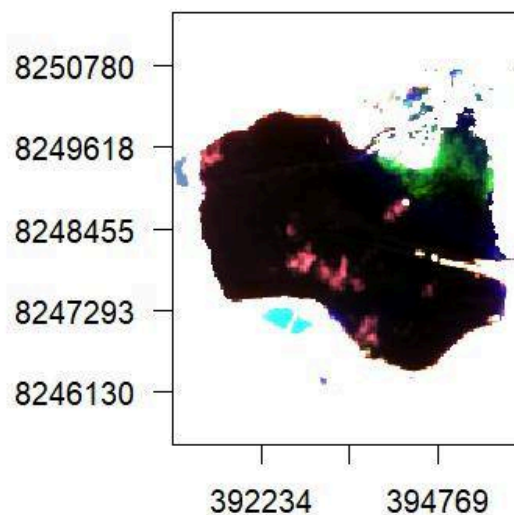


Anexo 04: Imagen satelital LandSat-8

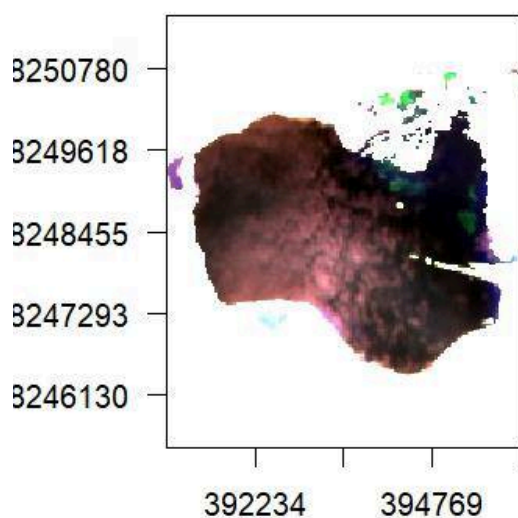
LandSat-8, 2015



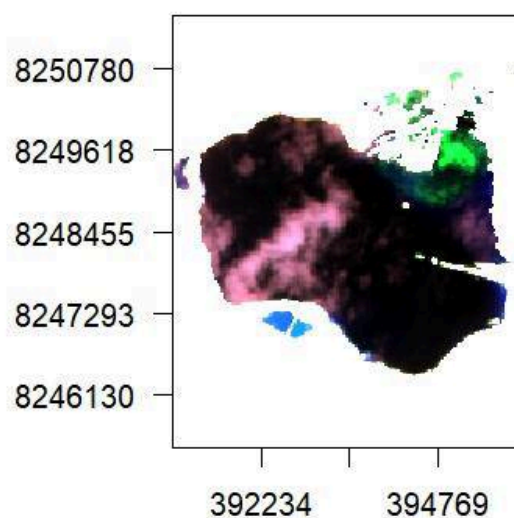
LandSat-8, 2016



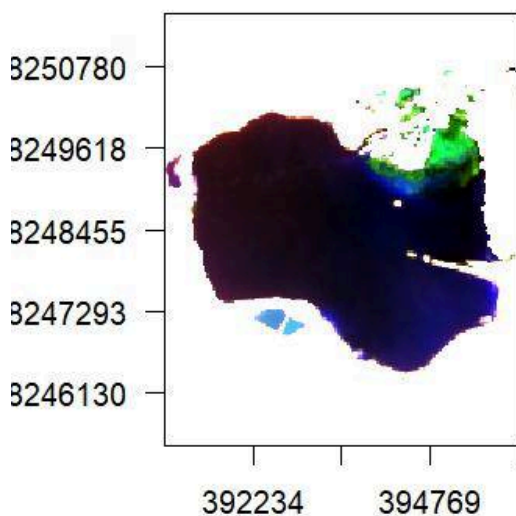
LandSat-8, 2017



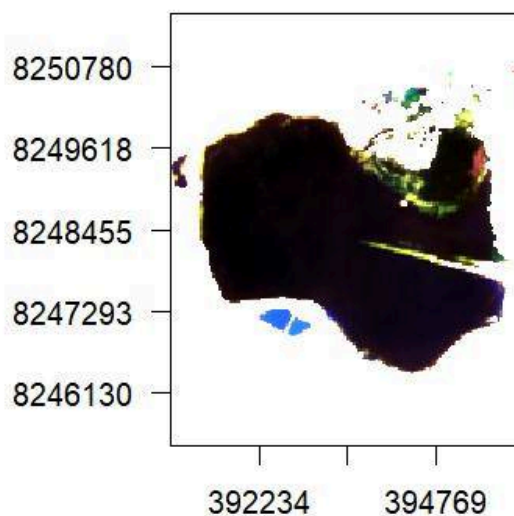
LandSat-8, 2018



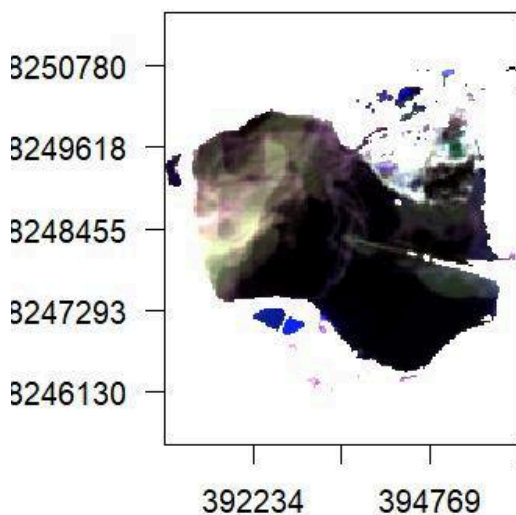
LandSat-8, 2019



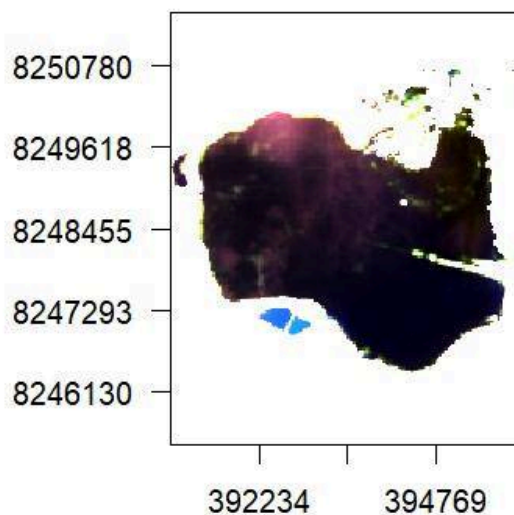
LandSat-8, 2020



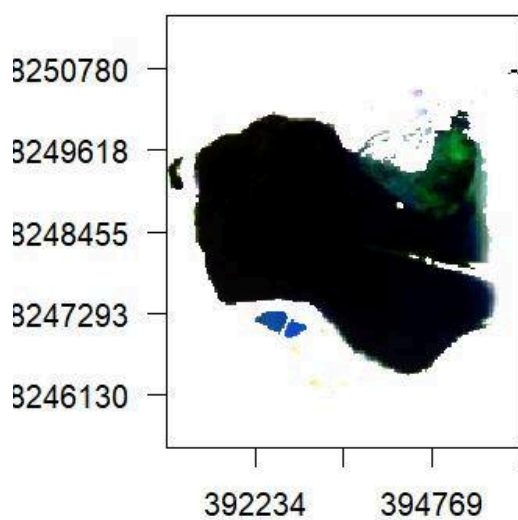
LandSat-8, 2021



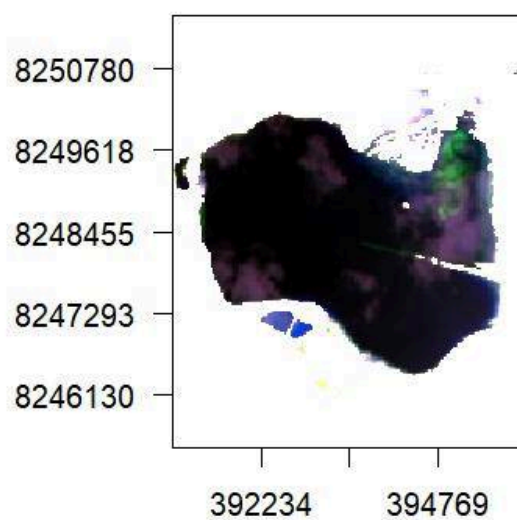
LandSat-8, 2022



LandSat-8, 2023



LandSat-8, 2024



Anexo 05: Extracción de valores de píxeles de las imágenes satelitales

chla (mg/m ³)	B2	B3	B4	B5
1.81850731	0.07223512	0.06333595	0.03807714	0.01883768
1.78518093	0.07139261	0.06115554	0.03675413	0.0176536
1.74786317	0.07033591	0.06106653	0.03630844	0.01801394
1.80181694	0.07173132	0.06385228	0.0384953	0.01824378
1.75880349	0.07017969	0.06050508	0.03503133	0.01511831
1.7108022	0.07038815	0.06146879	0.03661265	0.01815903
1.82115507	0.07400779	0.06845523	0.04155175	0.01875234
1.74804342	0.07070253	0.06439131	0.03695596	0.01462724
1.70849991	0.06873624	0.0583452	0.03701136	0.0160205
1.78134084	0.07323951	0.06888911	0.04079883	0.01720277
1.7290709	0.07020763	0.06029446	0.03501555	0.0136171
1.67992377	0.06695814	0.05583232	0.03846513	0.0323443

Anexo 06: Modelo estadístico de tipo logarítmico con regresión lineal múltiple e interacciones

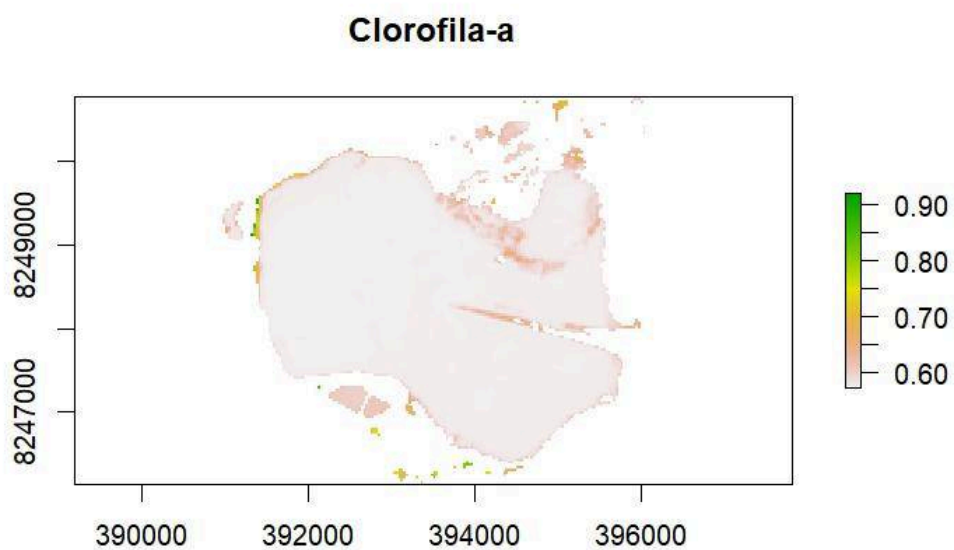
```
Call:
lm(formula = log(ch1a) ~ B2 * B3 + B4 + B5, data = ch)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.0230570 -0.0028970  0.0000655  0.0064007  0.0123348

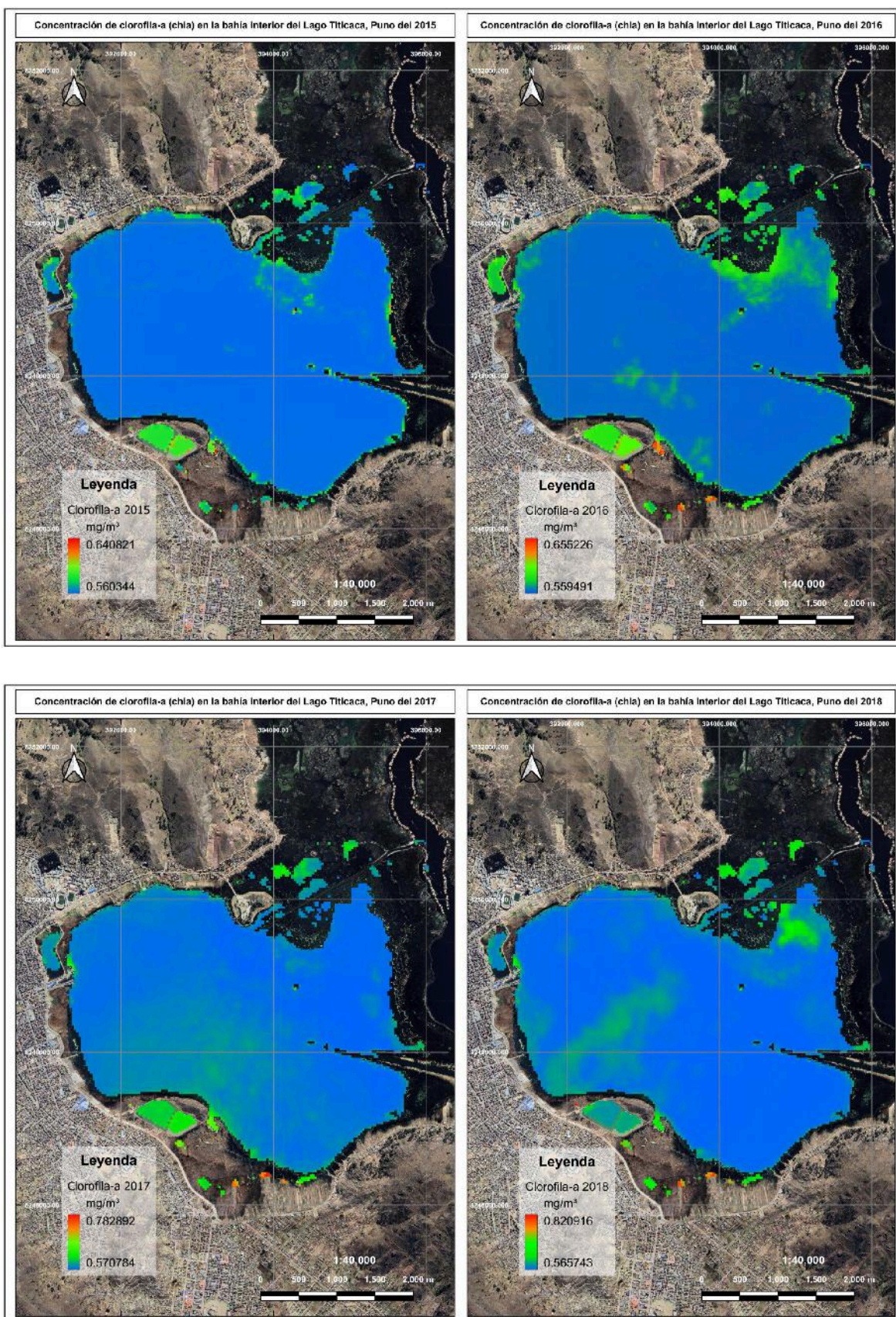
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.553907   0.030825  17.970 1.91e-06 ***
B2           0.037012   0.012290   3.011  0.0237 *
B3          -0.017330   0.014252  -1.216  0.2697
B4           0.006387   0.013365   0.478  0.6496
B5           0.801607   1.664951   0.481  0.6472
B2:B3       -0.005670   0.006996  -0.810  0.4486
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

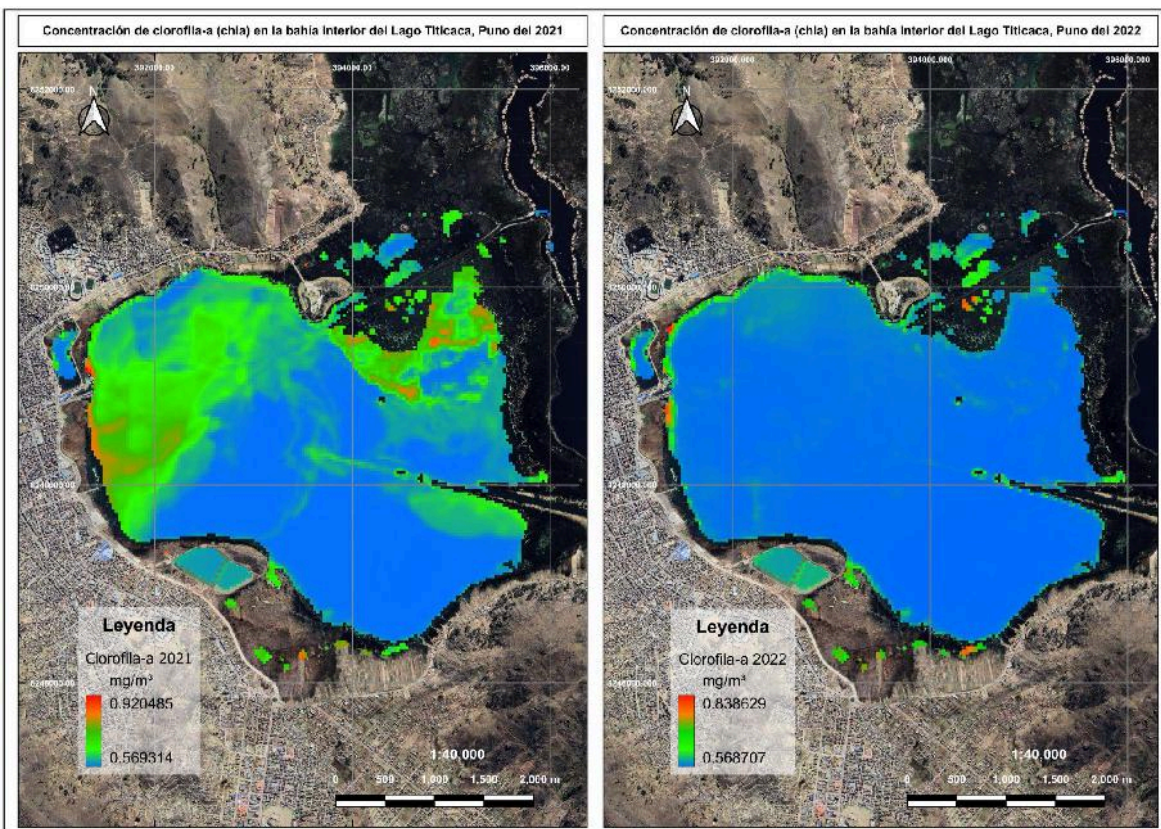
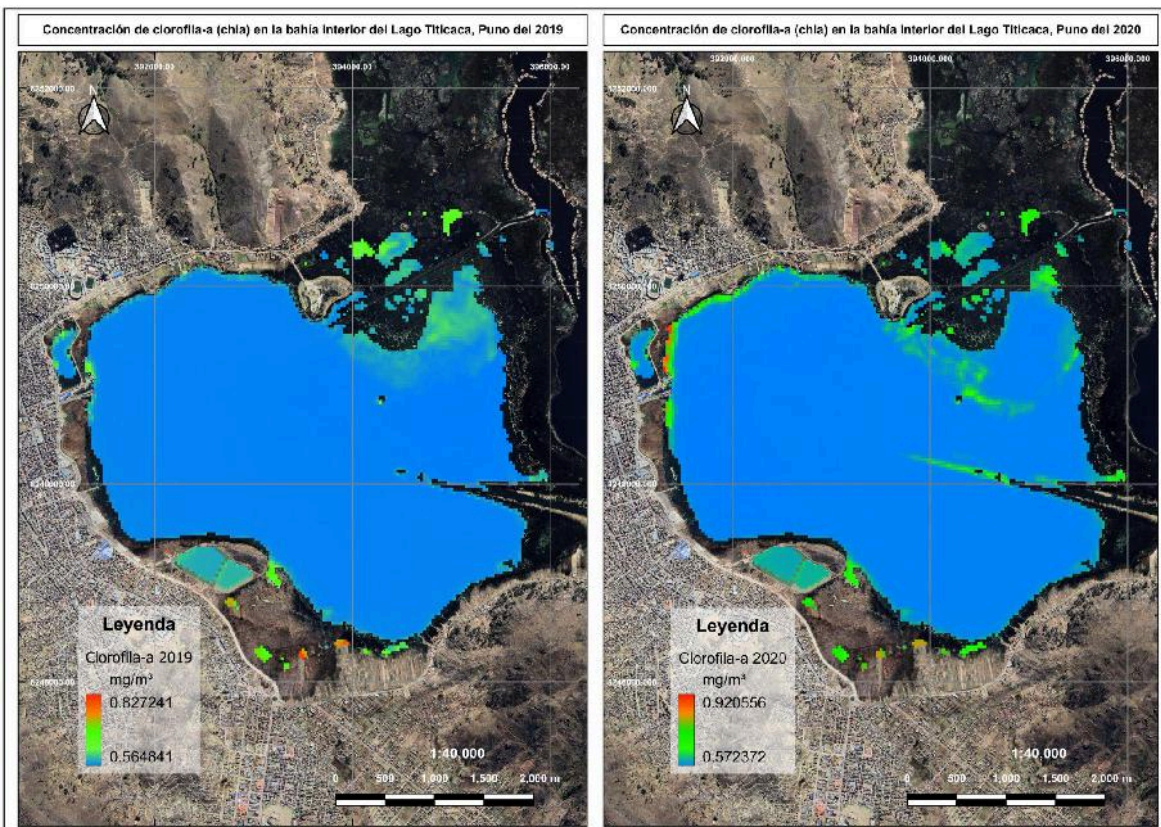
Residual standard error: 0.01222 on 6 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8784,    Adjusted R-squared:  0.7771
F-statistic: 8.669 on 5 and 6 DF,  p-value: 0.01022
```

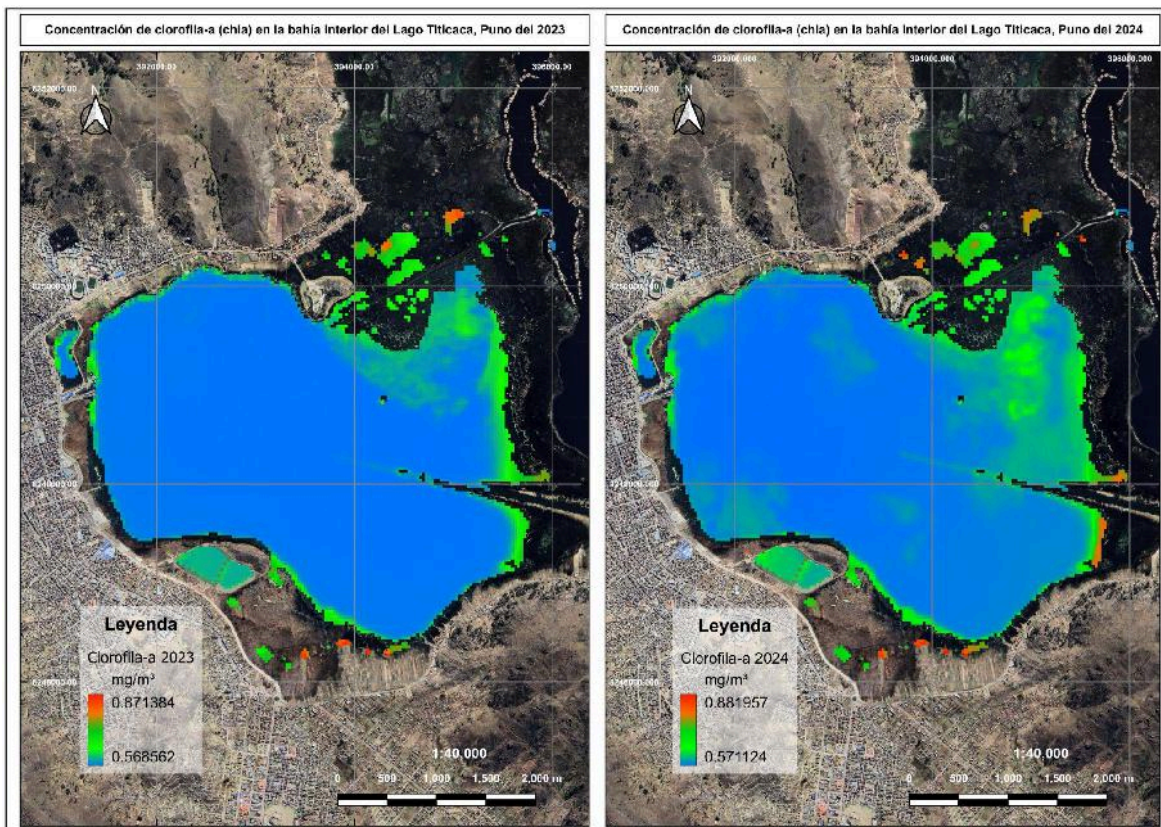
Anexo 07: Resultado de detección de clorofila-a en la bahía interior de Puno



Anexo 08: Mapas de detección de clorofila-a en la bahía interior de Puno







Anexo 09: Concentración de clorofila-a (mg/m^3) en la bahía interior de Puno

Periodos	Chla (mg/m^3)
2015	0.61517222
2016	0.64648178
2017	0.75143205
2018	0.78179051
2019	0.78376628
2020	0.8757421
2021	0.86644402
2022	0.80409677
2023	0.85306943
2024	0.86289304

Anexo 10: Panel fotográfico

