

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 LAGUNA LAGUNILLAS DEL
DISTRITO DE SANTA LUCIA, LAMPA, PUNO, PERIODO 2021 - 2024**

PRESENTADA POR:

RUBY DIANA RAMOS QUISPE

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/)



8.74%

SIMILARITY OVERALL

SCANNED ON: 28 SEP 2025, 6:27 PM

Similarity report

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

● IDENTICAL
1.16%

● CHANGED TEXT
7.58%

Report #28870807

RUBY DIANA RAMOS QUISPE // ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA-A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA LAGUNA LAGUNILLAS DEL DISTRITO DE SANTA LUCIA, LAMPA, PUNO, PERIODO 2021 -

2024 RESUMEN La laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía enfrenta desafíos significativos en cuanto a la calidad del agua y la concentración de la clorofila-a. 3 El objetivo de la presente

investigación fue analizar en el espacio-temporal la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucia, Lampa, Puno, periodo 2021 - 2024. 3 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. En el resultado se obtuvo que

el modelo para la detección de la clorofila-a presenta un coeficiente de determinación $r^2 = 0.719$ y un p-valor = 0.006 menor ($<$) al $\alpha = 0.05$ con un nivel de significancia al 95% indicand

o que el modelo es una herramienta efectiva para el monitoreo satelital de la concentración de la clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, por otro lado la

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 LAGUNA LAGUNILLAS DEL
DISTRITO DE SANTA LUCIA, LAMPA, PUNO, PERIODO 2021 - 2024**

PRESENTADA POR:

RUBY DIANA RAMOS QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

: 
Mg. KATIA ELIZABETH ANDRADE LINAREZ

PRIMER MIEMBRO

: 
Mg. JULIO WILFREDO CANO OJEDA

SEGUNDO MIEMBRO

: 
M.Sc. FREDY APARICIO CASTILLO SUAQUITA

ASESOR DE TESIS

: 
Mg. ELVIRA ANANI DURAND GOYZUETA

Área: Ingeniería, Tecnología.

Sub área: Ingeniería Ambiental.

Líneas de investigación: Sensores Remotos.

Puno, 07 de octubre del 2025.

DEDICATORIA

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

A mi madre, a quienes debo más de lo que las palabras pueden expresar. Gracias por su amor incondicional, por su ejemplo de perseverancia y por estar ahí en cada etapa 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.

Ruby Diana Ramos Quispe

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, agradezco a mi asesor Mg. Elvira Anani Durand Goyzueta, por su dedicación, por compartir su experiencia y por brindarme orientación a lo largo de todo este proceso. 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.*

Ruby Diana Ramos Quispe

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ANEXOS	8
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1.1. PROBLEMA GENERAL	15
1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	15
1.2. ANTECEDENTES	16
1.2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	16
1.2.2. ANTECEDENTES NACIONALES	18
1.2.3. ANTECEDENTES LOCALES	20
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	22
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	22
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO	23
2.1.1. ECOSISTEMAS ACUÁTICOS	23
2.1.2. CARACTERÍSTICAS Y DINÁMICA DE LOS LAGOS ALTOANDINOS	24
2.1.3. EUTROFIZACIÓN.	25
2.1.4. CLOROFILA-A	25
2.1.5. IMPACTO DEL CAMBIO EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS	26
2.1.6. OBSERVACIÓN REMOTA	27
2.2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	28
2.3. MARCO TEÓRICO NORMATIVO	29
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	30
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	30
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	30

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO	31
3.2. POBLACIÓN Y TAMAÑO DE MUESTRA	32
3.2.1. POBLACIÓN	32
3.2.2. MUESTRA	32
3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS	33
3.3.1. MÉTODOS	33
3.3.2. MATERIALES	33
3.3.3. METODOLOGÍA	34
3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	38
3.5. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO	39

CAPÍTULO IV

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. EXPOSICION Y ANALISIS DEL MODELO PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LA CLOROFILA-A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA LAGUNA LAGUNILLAS DURANTE EL PERIODO 2021 - 2024.	41
4.2. EXPOSICION Y ANALISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CLOROFILA -A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA LAGUNA LAGUNILLAS DURANTE EL PERIODO 2021 - 2024.	44
4.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	51
4.4. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS.	52
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXOS	61

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01: Características de la imagen satelital GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3)	35
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 laguna Lagunillas.	42
Tabla 05: Estadística descriptiva de la concentración de la clorofila-a en la época de lluvia durante el periodo 2021 y 2024.	48
Tabla 06: Estadística descriptiva de la concentración de la clorofila-a en la época de estiaje durante el periodo 2021 y 2024.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Ecosistemas acuáticos.	23
Figura 02: Características y Dinámica de los lagos altoandinos.	24
Figura 03: Clorofila-a en cuerpos de agua.	26
Figura 04: Elemento de un programa de detección a distancia.	27
Figura 05: Mapa de ubicación de la laguna Lagunillas.	31
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 laguna Lagunillas.	43
Figura 09: Concentración de la clorofila-a en la época de estiaje y lluvia durante el periodo 2021 y 2024.	45
Figura 10: Mapa de concentración de la clorofila-a durante la época de estiaje y lluvia en el periodo 2021.	46
Figura 11: Mapa de concentración de la clorofila-a durante la época de estiaje y lluvia en el periodo 2024.	47
Figura 12: Concentración de clorofila-a durante la época de estiaje y lluvia en el 2021 y 2024.	50

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01: Matriz de consistencia	62
Anexo 02: Descarga del producto GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a Concentration (V3)	63
Anexo 03: Descarga de la imagen satelital LandSat-8.	64
Anexo 04: Imagen satelital LandSat-8	65
Anexo 05: Extracción de valores de píxeles de las imágenes satelitales	67
Anexo 06: Modelo estadístico de tipo logarítmico con regresión lineal múltiple e interacciones.	68
Anexo 07: Resultado de detección de clorofila-a en la laguna Lagunillas.	68
Anexo 08: Mapas de detección de clorofila-a en la laguna Lagunillas	69
Anexo 09: Concentración de clorofila-a (mg/m^3) en la laguna Lagunillas.	71
Anexo 10: Panel fotográfico	72

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

C2RCC	: Caso 2 (Aguas turbias o estuarinas de Color Costero)
CEAC	: Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos
CHLA	: Clorofila-a
IMARPE	: Instituto del Mar del Perú
MERSI	: Sensor Espectral de Resolución Media
MOD2-1,2,3	: Modelos de razón de banda desarrollados con datos MODIS
MODIS	: Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada
NDVI	: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NPP	: Satélite Suomi National Polar-orbiting Partnership
OC2	: Ocean Color 2 (Color del Océano, versión 2 del algoritmo)
OC4	: Ocean Color 4 (Color del Océano, versión 4 del algoritmo)
OC5	: Ocean Color 5 (Color del Océano, versión 5 del algoritmo)
OLI	: Sensor de Imágenes Terrestres Operacionales del satélite Landsat-8
pH	: Potencial de Hidrógeno
QGIS	: Sistema de Información Geográfica de Código Abierto
SST	: Sólidos Suspendidos Totales
SVM	: Máquina de Vectores de Soporte
TERASCAN	: Sistema de Procesamiento de Datos Satelitales
VIIRS	: Conjunto de Radiómetros de Imágenes en el Visible e Infrarrojo

RESUMEN

La laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía 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 en el espacio-temporal la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, Lampa, Puno, periodo 2021 - 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. En el resultado se obtuvo que el modelo para la detección de la clorofila-a presenta un coeficiente de determinación $r^2 = 0.719$ y un p -valor = 0.006 menor (<) al $\alpha = 0.05$ con un nivel de significancia al 95% indicando que el modelo es una herramienta efectiva para el monitoreo satelital de la concentración de la clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, por otro lado la concentración de la clorofila-a en la época de estiaje se evidencia un aumento de 0.526 mg/m³ en 2021 a 0.529 mg/m³ en 2024 y en la en la época de lluvia se evidencia un aumento de 0.563 mg/m³ en 2021 a 0.585 mg/m³ en 2024, esta evolución ascendente indica que con el paso de los años influye el 1.6% notablemente al aumento de la concentración de la clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía. Concluyendo que la concentración de la clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía presenta una tendencia ascendente con el paso de los años.

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

ABSTRACT

The Lagunillas lagoon in the Santa Lucía district faces significant challenges regarding water quality and chlorophyll-a concentration. The objective of this research was to analyze the spatiotemporal concentration of chlorophyll-a using satellite images in the Lagunillas lagoon in the Santa Lucia district, Lampa, Puno, period 2021 - 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 Qgis and RStudio programs, to determine the concentration of chlorophyll-a was developed using the logarithmic statistical model with multiple linear regression and interactions. In the result it was obtained that the model for the detection of chlorophyll-a presents a coefficient of determination $r^2 = 0.719$ and a p-value = 0.006 lower ($<$) than $\alpha = 0.05$ with a significance level of 95% indicating that the model is an effective tool for satellite monitoring of the concentration of chlorophyll-a in the Lagunillas lagoon of the Santa Lucía district, on the other hand, the concentration of chlorophyll-a in the dry season shows an increase from 0.526 mg / m³ in 2021 to 0.529 mg / m³ in 2024 and in the rainy season there is an increase from 0.563 mg / m³ in 2021 to 0.585 mg / m³ in 2024, this upward evolution indicates that over the years it influences 1.6% notably the increase in Chlorophyll-a concentration in Lagunillas Lagoon, Santa Lucía District. It was concluded that chlorophyll-a concentration in Lagunillas Lagoon, Santa Lucía District, has shown an upward trend over the years.

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

INTRODUCCIÓN

La laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía enfrenta desafíos significativos en cuanto a la calidad del agua y la biodiversidad. Las actividades agrícolas y ganaderas en las cercanías de la laguna Lagunillas están aumentando la escorrentía de nutrientes, lo que está provocando un incremento en la concentración de clorofila-a (Merchán, 2018). Este fenómeno puede causar problemas como la eutrofización, que afecta negativamente la salud del ecosistema acuático y la fauna local. El distrito de Santa Lucía, Lampa depende de la laguna Lagunillas 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 ($r^2=0,151$), lo que se atribuye a la profundidad del ecosistema y a la presencia de sólidos disueltos 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 laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, Lampa, Puno, periodo 2021 - 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, se aborda la metodología de la investigación como la ubicación del área de estudio así también la metodología por objetivo de la investigación, en el capítulo IV, se muestran los resultados de la investigación, también las conclusiones y las recomendaciones.

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 clave del estado de los ecosistemas acuáticos y del bienestar ambiental. La cantidad de clorofila-a es un indicador clave que refleja la productividad primaria en los cuerpos de agua, funcionando como una señal de la eutrofización y del estado de salud ecológica. El crecimiento de la actividad humana, como la agricultura intensiva y la urbanización, ha incrementado los nutrientes en muchos cuerpos de agua, lo que fomenta la proliferación de algas y la degradación de la calidad del agua a nivel global. 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, ya que estos cuerpos de agua son esenciales para la biodiversidad local y para las comunidades que dependen de ellos para su sustento y actividades económicas. La laguna Lagunillas, situada en el lago Titicaca, Puno, representa un ecosistema que enfrenta diversas presiones ambientales y humanas. 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 Laguna Lagunillas enfrenta desafíos significativos en cuanto a la calidad del agua y la biodiversidad. Las actividades agrícolas y ganaderas en las cercanías de la laguna 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 laguna, complicando la identificación de las razones detrás de estos cambios y la aplicación de estrategias efectivas para su mitigación.

La comunidad local depende de la Laguna Lagunillas para actividades como la pesca 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 laguna y fomentando prácticas que aseguren la conservación de este ecosistema crucial.

1.1.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cómo es la concentración espacio-temporal de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas del distrito de Santa Lucia, Lampa, Puno, periodo 2021 - 2024?

1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cómo es el modelo de comportamiento de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas durante el periodo 2021 - 2024?
- ¿Cuál es la concentración de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la

laguna lagunillas durante el periodo 2021 - 2024?

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Corcho & Valle (2023), en la localidad de Abreus, en la provincia de Cienfuegos, Cuba. La finalidad de esta investigación consistió en utilizar métodos de Percepción Remota para calcular la concentración de clorofila-a. Mediante la utilización de datos de campo recogidos entre 2016 y 2021 por el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos (CEAC) y imágenes del satélite Landsat 8 adquiridas de Earth Explorer, se emplearon técnicas de regresión para elegir y validar tres modelos de regresión simple que facilitan la estimación de la concentración de clorofila-a. El modelo más preciso, que utiliza el cociente B4/B5, registró un R^2 del 98,93% y un RMSE de 2,12 $\mu\text{g/L}$. Este modelo se aplicó a una fotografía satelital del 12 de junio de 2019, creando un mapa temático que representa la distribución espacial de la clorofila-a en ese día.

Merchán (2018), El propósito de esta investigación fue examinar las fluctuaciones espaciales y temporales en la concentración de clorofila y el estado trófico de dos ecosistemas acuáticos con particularidades ambientales, empleando imágenes del satélite Landsat-8 (SR). En la ciénaga de Ayapel, se detectó una correlación significativa entre las variables ($R^2 = 0,563$) a través de un modelo multivariante de regresión que fusiona las bandas b3, b2 y b5/b4. No obstante, en el Lago de Tota, un modelo de regresión simple que se fundamenta en la media de las bandas b3 y b4 evidenció una correlación reducida ($R^2=0,151$), lo que se debe a la profundidad del ecosistema y a la existencia de sólidos disueltos y suspendidos.

Navarro (2023), El estudio se centra en el embalse El Val (Aragón), España. Su propósito es examinar la aplicación de técnicas sofisticadas de teledetección y algoritmos de aprendizaje automático para supervisar parámetros vinculados con la calidad del agua en el sitio, visto como una región vulnerable y en peligro ambiental. Con el propósito de

calcular la turbidez y la concentración de clorofila-a desde enero de 2018 hasta diciembre de 2022, se validaron las imágenes ópticas del sensor MSI de Sentinel, y para establecer la temperatura superficial del agua, se validaron las térmicas del sensor TIRS de Landsat. Con un error de 1 °C y utilizando datos de campo, se estimó la temperatura por medio de un modelo lineal de regresión ($R^2 = 0.98$). Se llevaron a cabo ensayos con los algoritmos SVM, Decision Tree y Random Forest para calcular la turbidez y la clorofila-a. Los hiperparámetros fueron mejorados y se utilizó una validación cruzada con cinco divisiones estratificadas. Decision Tree y Random Forest consiguieron justificar el 88% de las discrepancias en la estimación de clorofila-a, con errores que oscilan entre 10-15 mg/l, mientras que los modelos de turbidez no reflejan de manera correcta 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. En lo que respecta a Sentinel 2, se analizaron las combinaciones de bandas azul-verde, verde-rojo y rojo-NIR, así como los satélites oceanográficos OC2 y OC4. Se llevaron a cabo evaluaciones de los algoritmos OC5 y C2RCC para Sentinel 3. Los hallazgos señalaron que el lago muestra una magnitud espectral media baja, con un máximo en la zona azul, lo que promueve la aplicación de algoritmos de color azul-verde para identificar trofia. Se alcanzaron los resultados más sobresalientes al emplear los algoritmos OC2 y OC4 en datos de Sentinel 2, superando al OC5 de Sentinel 3. 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. Los datos se examinaron empleando los programas libres QGIS y R. Se extrajeron fotografías 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. Además, se encontraron correlaciones de intensidad media y alta entre la conductividad eléctrica y varias bandas, siendo las más notables B04 (0.73), B05 (0.78), B06 (0.81), B07 (0.81), B08 (0.80) y B08A (0.81) en el infrarrojo cercano y de onda corta. No se encontró una correlación relevante entre la clorofila y la turbidez. Durante la elaboración del modelo, los parámetros de pH y conductividad eléctrica exhibieron capacidades de predicción del 21.6% y 69.5%, respectivamente. Se determina que el sensor Landsat 8 no registró datos relevantes, en cambio, Sentinel-2 mostró datos relevantes para la predicción del pH y la conductividad eléctrica, siendo este último el sensor más adecuado para dichas estimaciones.

1.2.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Estrada & Macahuachi (2023), examinaron el comportamiento espacial de la concentración de clorofila, sólidos suspendidos totales y transparencia en la laguna Yarinacocha, Ucayali, con el fin de entender la distribución de estos indicadores. Se utilizaron firmas espectrales, además de realizar regresiones y correlaciones entre las

características de calidad del agua y la reflectividad superficial derivada de las imágenes satelitales de Sentinel 2. Para rectificar las imágenes, se empleó el procedimiento de Chávez, que consiste en la extracción de objetos sombríos mediante la sustracción. En los hallazgos, no se pudo establecer una ecuación empírica para la clorofila-a ya que su concentración no llegó al límite de detección establecido por el método de análisis de laboratorio. Se determinó una ecuación empírica polinómica de segundo grado para los sólidos suspendidos totales, fundamentada en la relación de bandas B5/B2, con un R^2 de 0.99. Se logró un modelo tribanda con la relación $B4 - 1/2 (B11 + R2)$, logrando un R^2 de 0.98. Al contrastar los hallazgos con la regulación peruana ECA-agua, se descubrió que el 10.4% de la laguna supera los 25 mg/l en la concentración total de sólidos suspendidos, mientras que la clorofila-a se mantiene por debajo de los parámetros fijados.

Neyra (2023), El principal propósito de la investigación en la laguna Cashibococha, situada en el departamento de Ucayali, fue establecer tres parámetros de calidad del agua en la laguna Cashibococha mediante el uso de imágenes satelitales. Los indicadores evaluados incluyeron los Sólidos Suspendidos Totales (SST), la Transparencia (SD) y la Clorofila-a (Chl-a). En los SST, se crearon ecuaciones lineales utilizando la banda multiespectral B2 del satélite Landsat 9 – OLI 2, logrando un R^2 de 0.087, con valores que oscilaron entre 11.60 mg/L y 26.50 mg/L. En cuanto a la transparencia, los valores oscilaron entre 0.44 y 0.60 m. Para los SST, se elaboraron ecuaciones lineales utilizando la banda B7 del satélite Landsat 9 – OLI 2, lo que resultó en un R^2 de 0.3401. Para la clorofila-a, se emplearon ecuaciones lineales con la banda B2 de Landsat 9 - OLI 2, logrando un R^2 de 0.1894, y los valores de las muestras en el lugar se situaron entre 0.042 y 0.069 mg/L. Este análisis evidencia la factibilidad de emplear métodos de teledetección para valorar la calidad del agua en la laguna Cashibococha.

Nelly & Sánchez (2023), En el lago Yahuarcocha, Ucayali, el estudio examinó de forma espacial y temporal la calidad del agua del lago Yahuarcocha, empleando técnicas tradicionales y sensores a distancia. Se recolectaron ejemplares de agua desde agosto hasta diciembre de 2021, evaluando los parámetros fisicoquímicos y biológicos, y contrastarlos con información de 2017 a 2020, derivada de monitoreos efectuados por el laboratorio de EMAPA-I. Además, se determinó el índice de vegetación (NDVI) para establecer la distribución temporal de la clorofila "a" en el agua. Los hallazgos mostraron que ciertos indicadores fisicoquímicos sobrepasaron los límites permitidos por la Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes del Ministerio del Ambiente. El pH excedió el intervalo de 6.5-8.5, y la saturación de oxígeno registró un promedio del 79.76%, llegando a un 107% en agosto, superando así el límite máximo permitido del 80%. El nivel de clorofila "a" alcanzó 150.3 µg/l, lo que señala que el lago está en una condición hipertrófica. El estudio del NDVI mostró una presencia general de vegetación de moderada intensidad, resaltando especies como *Typha latifolia*, *Eichhornia crassipes* y *Elodea Canadensis*.

1.2.3. ANTECEDENTES LOCALES

Machaca (2018), Este estudio se realizó en el lago Titicaca menor, en su parte boliviana, donde la calidad del agua ha sufrido un grave deterioro debido a las descargas no tratadas provenientes de la agricultura (pesticidas y fertilizantes), la ganadería, además de aguas residuales domésticas, industriales y mineras, agravadas por el aumento de la población en los municipios circundantes. Esta circunstancia provocó la emergencia de un bloom en 2015. Mediante el uso de teledetección utilizando el sensor OLI del satélite Landsat-8, se examinaron las firmas espectrales de las imágenes en combinación con datos espectrales de campo. Para cuantificar los niveles de clorofila fitoplanctónica en las columnas de agua, se empleó la sonda FLUOROPREBE BBE para registrar parámetros en consonancia con la acción del sensor OLI, luego de escoger puntos de muestreo en

áreas de variado impacto ambiental al norte del lago. Se examinó la imagen satelital a través de firmas espectrales y categorizada de acuerdo a la escala trófica de Carlson (1977), fundamentada en la biomasa de algas. Los hallazgos indicaron un estado generalmente mesotrófico, a excepción del punto LM-04, que presentó un estado eutrófico.

Paulino et al. (2016), En el lago Titicaca, se emplearon imágenes satelitales del sensor MERIS, 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 MERIS. 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, $R^2 = 0.472$. 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 $R^2 = 0.945$. 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 logran 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 laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucia, Lampa, Puno, periodo 2021 - 2024.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar un modelo para determinar el comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna Lagunillas durante el periodo 2021 - 2024.
- Determinar la concentración de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna Lagunillas durante el periodo 2021 - 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 ubicados en cuerpos de agua, ya sean de agua dulce o salada, en los que los seres vivos se relacionan entre sí y con su ambiente físico. Comprenden una variedad de ecosistemas, tales como mares, océanos, ríos, lagos, arroyos, estanques y zonas húmedas. La biodiversidad es numerosa, con una extensa variedad de plantas, animales y microorganismos que se han adaptado a subsistir en condiciones particulares que difieren en términos de salinidad, temperatura y otros elementos del entorno (Bernal et al., 2023).

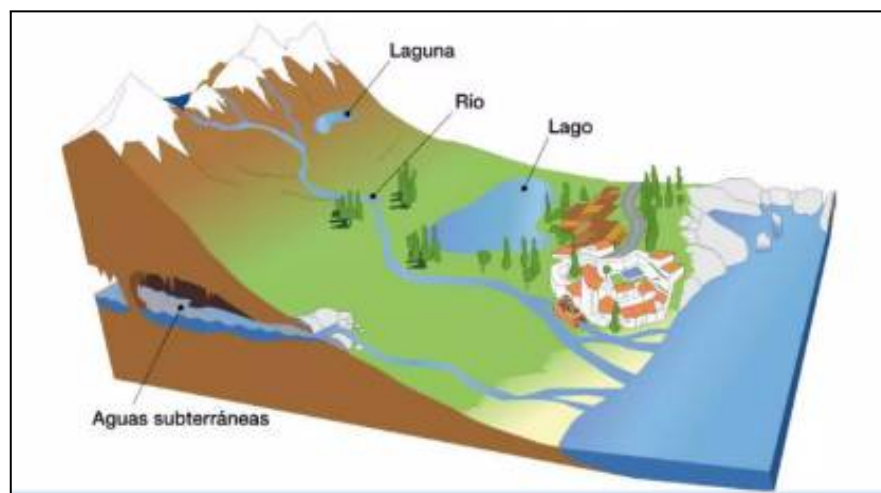


Figura 01: Ecosistemas acuáticos.

Fuente: Contreras & Gonzalez (2021).

Los ecosistemas acuáticos son fundamentales para la Tierra ya que cumplen roles clave en la regulación climática, la provisión de recursos naturales y la provisión de servicios ecosistémicos. Funcionan como depósitos de carbono, inciden en los modelos climáticos y suministran agua para consumo, alimentos y materiales esenciales para las personas. Además, brindan servicios como la limpieza del agua, la prevención de inundaciones y la conservación de hábitats para numerosas especies (Bernal et al., 2023).

2.1.2. CARACTERÍSTICAS Y DINÁMICA DE LOS LAGOS ALTOANDINOS

Los lagos altoandinos están localizados en regiones altas de los Andes, a altitudes que superan los 3,000 metros sobre el nivel del mar. Estas zonas atraviesan un clima severo con temperaturas bajas, intensa radiación solar y vientos intensos, factores que afectan las propiedades físicas y químicas del agua de los lagos. La salinidad de estos lagos puede fluctuar considerablemente a causa del alto nivel de evaporación y la acumulación de minerales. La diversidad biológica en estos lagos es única, con especies que se han ajustado a las severas y variables condiciones del entorno (Sandoval & Bosque, 2024).



Figura 02: Características y Dinámica de los lagos altoandinos.

Fuente: Coral (2024).

Varios factores influyen en la dinámica de los lagos altoandinos. Los procesos de congelamiento y deshielo influyen en el volumen y la estructura del agua, mientras que la

provisión de agua de los glaciares próximos se ve modificada 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. Adicionalmente, acciones humanas tales como la extracción de agua, la agricultura y el turismo ejercen presión sobre estos delicados ecosistemas, alterando su balance ecológico y sus procesos naturales (Sandoval & Bosque, 2024).

2.1.3. EUTROFIZACIÓN.

El proceso de eutrofización ocurre en cuerpos acuáticos, marcado por un incremento desmedido de nutrientes, en particular nitrógeno y fósforo. Este suceso puede originarse por múltiples fuentes, tales como la escorrentía de fertilizantes agrícolas, aguas residuales, residuos industriales y otros agentes contaminantes (Santana & Sinche, 2023).

La introducción de un exceso de estos nutrientes en un ecosistema acuático causa un desarrollo desmedido de algas y fitoplancton, provocando alteraciones importantes 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 componente esencial de la fotosíntesis que se encuentra en plantas, algas y algunas bacterias. Este pigmento juega un rol crucial en la fotosíntesis, el proceso que posibilita a los seres vivos convertir la luz del sol en energía química. La presencia de clorofila-a funciona como un marcador relevante de la productividad primaria en estos ambientes, evidenciando la presencia de fitoplancton en el agua. Ya que el fitoplancton es el fundamento de la cadena alimenticia en numerosos ecosistemas acuáticos, su bienestar y abundancia son vitales para la perdurabilidad de estos sistemas (Verdugo et al., 2024).



Figura 03: Clorofila-a en cuerpos de agua.

Fuente: Coral (2024).

Además, el análisis de la clorofila-a en los cuerpos acuáticos proporciona datos esenciales acerca de la calidad del agua y la condición global del ecosistema. Los elevados niveles de clorofila-a pueden ser una señal de eutrofización, un fenómeno que surge de la sobreabundancia de nutrientes y provoca el desarrollo desmedido de algas. Esta expansión puede provocar dificultades de oxigenación, afectando de manera adversa la vida acuática y la calidad del agua. Así pues, el seguimiento de la clorofila-a es esencial para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos, detectar alteraciones ambientales y definir estrategias de administración eficaces (Verdugo et al., 2024).

2.1.5. IMPACTO DEL CAMBIO EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS

La repercusión de la transformación en los ecosistemas de agua dulce hace referencia a las alteraciones que sufren estos sistemas a causa de elementos naturales y humanos. Estas modificaciones pueden impactar en la formación, funcionamiento y bienestar de ecosistemas tales como ríos, lagos, arroyos, estanques y zonas húmedas. Las razones varían y comprenden el cambio climático, la contaminación, la extracción desmedida de agua, la edificación de infraestructuras como presas y canales, y la introducción de especies invasoras (Flores, 2024).

Los impactos de estas modificaciones en los ecosistemas acuáticos son significativos y pueden expresarse de diversas maneras. Dentro de los efectos ecológicos se incluyen la disminución de la biodiversidad, la modificación de las cadenas de alimentación y el deterioro del entorno natural. Estas modificaciones pueden disminuir las poblaciones de especies autóctonas y potenciar la expansión de especies invasoras, capaces de reubicar a las especies autóctonas. Adicionalmente, las fluctuaciones en la temperatura y el caudal del agua pueden modificar los patrones de reproducción y desplazamiento de las especies acuáticas (Marcillo & Muñiz, 2023).

2.1.6. OBSERVACIÓN REMOTA

A pesar de que no es el método ideal debido a sus múltiples restricciones, la observación remota, posible mediante la teledetección, facilita la recolección de datos sin la necesidad de estar presencialmente en la zona o el ambiente que se pretende analizar e/o investigar. Esta observación remota se conoce como "ciencia de la tierra", dado que su propósito principal es capturar imágenes para este propósito o examinar las imágenes que se recolectan (Hurtado, 2019).

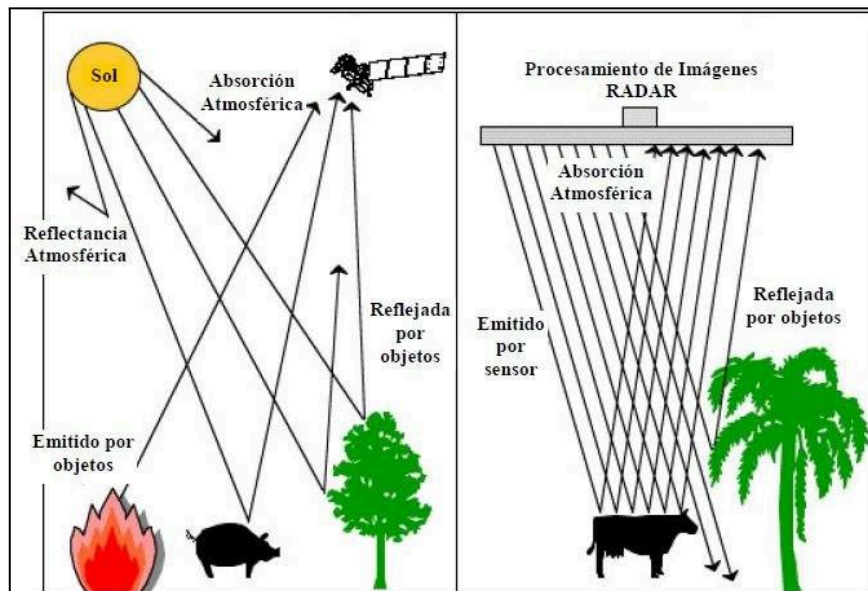


Figura 04: Elemento de un programa de detección a distancia.

Fuente: Chuvieco (2019).

Se emplean imágenes satelitales, como las de LANDSAT, para la observación remota. Estas fotografías poseen 8 bandas espectrales, las cuales al fusionarse generan una diversidad de imágenes de distintos colores que pueden emplearse en tareas de interpolación. En consecuencia, sus usos son diversos, incluyendo la supervisión y/o el estudio del calor. Esto es factible debido a que la resolución espacial de estas imágenes varía entre 15, 30, 60 y 120 metros (Hurtado, 2019).

2.2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

El agua: Se trata de un compuesto químico compuesto por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, conocido como H₂O. Es fundamental para la vida en nuestro planeta y está presente en tres estados: sólido (hielo), líquido (agua) y gaseoso (vapor) (García et al., 2020).

Ecosistemas: Los ecosistemas son estructuras naturales formadas por seres vivos, ya sean vegetales o animales, que se relacionan entre ellos y con su ambiente físico, que comprende elementos abióticos como el suelo, el agua y el clima (González & Meira, 2021).

QGIS: Se trata de un software de fuente abierta destinado a sistemas GNU/Linux, Unix, Mac OS y Windows. Facilita la gestión de formatos ráster y vectoriales como shp, junto con bases de datos espaciales (Del Carmen et al., 2023).

Radiación solar: El fenómeno físico se produce cuando la energía solar se libera en forma de radiación electromagnética (Lozano et al., 2021).

R-Studio: Este ambiente de desarrollo incorporado en el lenguaje R se enfoca en el análisis estadístico y las instantáneas. Proporciona funciones para la administración del espacio laboral, una consola, gráficos y un editor de sintaxis para la ejecución fácil de código (Del Carmen et al., 2023).

2.3. MARCO TEÓRICO NORMATIVO

En 2024, Perú fortalece su marco regulatorio relacionado con la administración de recursos acuáticos y la preservación de ecosistemas acuáticos, factores esenciales para el progreso sostenible y la salvaguarda del medio ambiente. La Ley N.º 30509, que incentiva la inversión en la administración sostenible de recursos acuáticos, busca promover un uso eficaz y consciente del agua en todos los ámbitos. Esta ley define un marco normativo que promueve la inversión en tecnologías ecológicas y acciones sustentables, además de la restauración y preservación de fuentes de agua. Además, resalta la relevancia de supervisar la calidad del agua y la necesidad de llevar a cabo investigaciones que examinen la condición de los ecosistemas acuáticos, lo que subraya la importancia del estudio espacio-temporal de la concentración de clorofila en la Laguna Lagunillas. Esto subraya la importancia del análisis espacio-temporal de la concentración de clorofila en la Laguna Lagunillas.

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. Además, se propone que las autoridades medioambientales deben cooperar con las comunidades locales y otros participantes en la administración de recursos acuáticos, garantizando la implicación de los ciudadanos y que las decisiones de gestión se basen en información exacta y reciente. En este contexto, es crucial examinar la concentración de clorofila-a en la Laguna Lagunillas para acatar estas normativas y aportar al desarrollo de estrategias de conservación que salvaguarden 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 laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucia, Lampa, Puno, periodo 2021 - 2024.

2.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- El modelo de comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna Lagunillas durante el periodo 2021-2024 muestran variaciones estacionales significativas.
- La concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna Lagunillas durante el periodo 2021-2024 presenta fluctuaciones significativas al aumentar su concentración a lo largo del tiempo.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La Laguna Lagunillas se encuentra situada en el distrito de Santa Lucía, perteneciente a la provincia de Lampa, en la zona de Puno, en Perú. Se encuentra a una altitud de cerca de 4,200 metros sobre el nivel del mar y sus coordenadas geográficas son alrededor de 14° 30' latitud sur y 69° 23' longitud oeste.

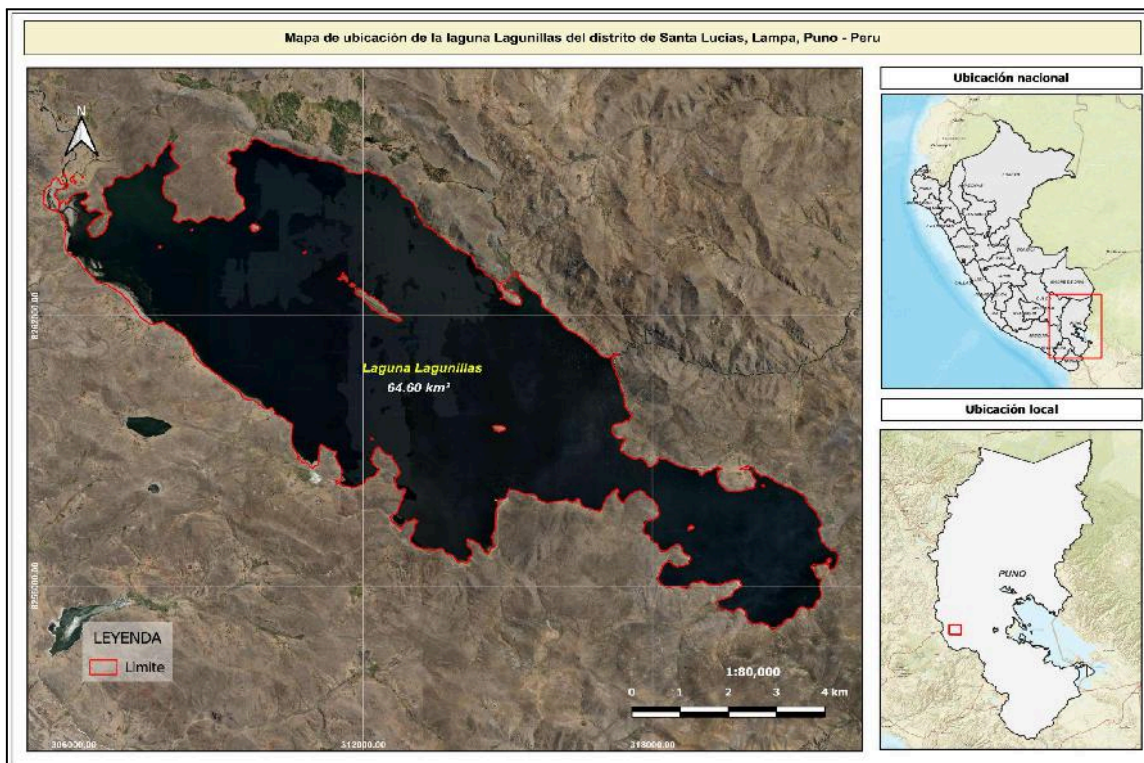


Figura 05: Mapa de ubicación de la laguna Lagunillas.

Esta localización en la meseta andina, abundante en biodiversidad, la hace un ecosistema único, integrándose a la cuenca del lago Titicaca, reconocido como el lago de

navegación más elevado del planeta y un importante recurso de agua a escala mundial. El bienestar ecológico de la Laguna Lagunillas repercute más allá de los límites nacionales, dado que puede impactar en la biodiversidad y los recursos acuáticos de la zona andina, alterando las dinámicas ambientales en un escenario más extenso.

En la región de Puno, lugar en el que se ubica la Laguna Lagunillas, predomina el clima altiplánico, marcado por temperaturas frías y una notable fluctuación estacional. Las temperaturas diurnas suelen fluctuar entre los 15 °C y 20 °C, mientras que en la noche pueden descender hasta los 0 °C. Las precipitaciones son más habituales de noviembre a marzo, durante la estación húmeda, lo que repercute en la disponibilidad de agua en la laguna y, por ende, en la concentración de nutrientes y fitoplancton. Este clima, unido a la altitud y las características geográficas específicas de la laguna, genera un entorno apropiado para estudiar la clorofila-a y otros elementos que afectan la salud del ecosistema acuático, resaltando la importancia de su estudio en el marco de las alteraciones ambientales a escala mundial.

3.2. POBLACIÓN Y TAMAÑO DE MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

La población fue constituida por las escenas de las imágenes satelitales LandSat-8 perteneciente a la Laguna Lagunillas, para los periodo del 2021 y 2024, las cuales son en total de 8 imágenes satelitales que van a ser utilizadas durante las épocas de estiaje y de lluvias.

3.2.2. MUESTRA

La muestra fue conformada por los píxeles de la imagen satelital LandSat-8, con una resolución de 30 x 30 metros, donde cada píxel nos mostró el agua sin clorofila-a y el agua con clorofila-a.

Muestreo

El muestreo no probabilístico en el estudio de la laguna Lagunillas se enfoca en elegir sitios de muestreo que sean más pertinentes para los objetivos del análisis, facilitando una evaluación exhaustiva de la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales.

3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

3.3.1. MÉTODOS

Tipo de investigación

El estudio espacio-temporal de la concentración de clorofila en la Laguna Lagunillas se categoriza como una investigación aplicada, cuyo objetivo es crear saberes útiles para tratar problemas específicos vinculados con la salud del ecosistema acuático. Esta investigación empleó imágenes satelitales, lo que facilitó la recolección y análisis de información acerca de la clorofila-a de forma extensa y con una perspectiva temporal. Además, la investigación adoptó un enfoque cuantitativo, puesto que se centra en medir y examinar numéricamente variables concretas, lo que simplifica la detección de patrones, tendencias y vínculos entre la concentración de clorofila-a durante el periodo comprendido entre 2021 y 2024.

Diseño de Investigación.

La estrategia de investigación para el estudio espacio-temporal de la concentración de clorofila-a en la Laguna Lagunillas se fundamenta en un método que combina la recopilación de información cuantitativa con el estudio de imágenes satelitales. Este es un diseño no experimental, puesto que se centra en el seguimiento y estudio de la concentración de clorofila-a a través del tiempo y en diferentes condiciones ambientales, sin alterar las variables.

3.3.2. MATERIALES

Equipos

- Cámara fotográfica

- Computadora portátil, impresora, scanner.

Programas

- QGis (v3.26.17).
- R-Studio (v4.3.1).

3.3.3. 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 procedimiento de analizar minuciosamente un objeto con el fin de comprender completamente la esencia del todo, incluyendo su conjunto de datos, hechos y fenómenos (Andrade et al., 2018).

Metodología para el objetivo específico O1: Establecer un modelo de comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas durante el periodo 2021 - 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 laguna Lagunillas.

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 o lagos

- Se descargaron las imágenes satelitales (LandSat-8), correspondientes a la laguna Lagunillas.

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 14 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:

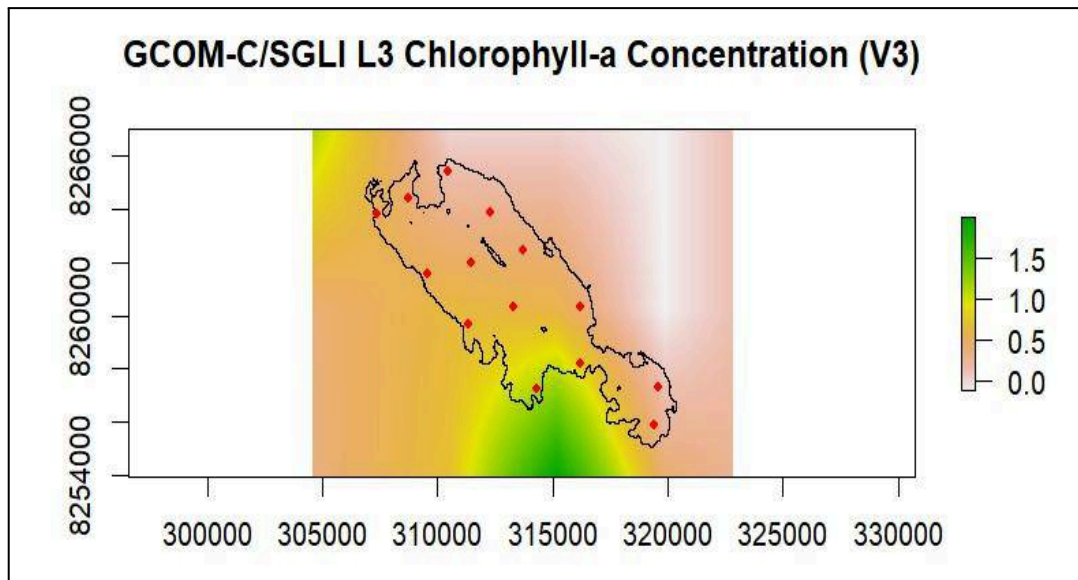


Figura 06: Producto GCOM-C/SGLI L3 Chlorophyll-a.

- Se extrajeron valores mediante los 14 puntos de muestreo de la imágenes satelitales (LandSat-8), como se muestra en la siguiente imagen:

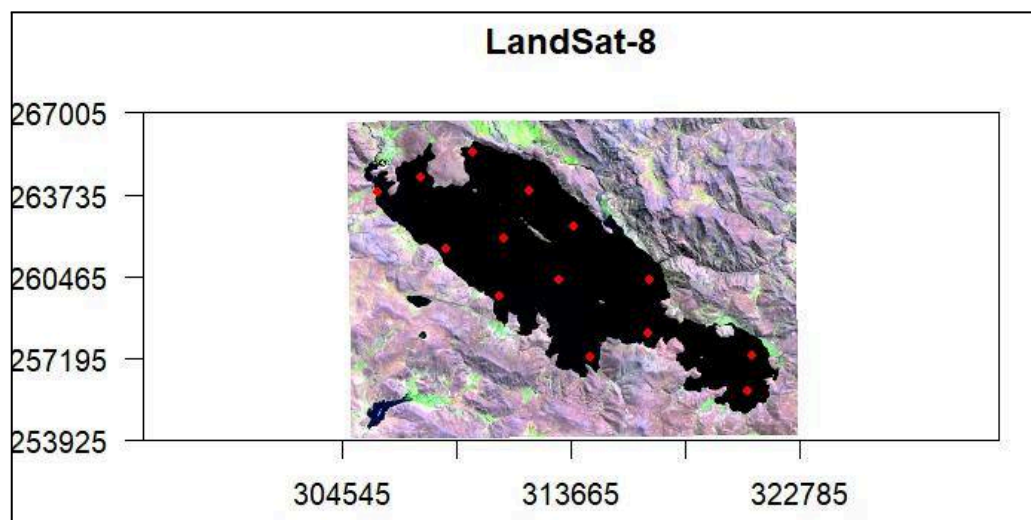


Figura 07: Extracción de valores de la imagen satelital LandSat-8.

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, RNIR = 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 laguna lagunillas durante el periodo 2021 - 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 en épocas de lluvias y estiaje a lo largo del periodo 2021 - 2024 en la laguna Lagunillas. 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 las épocas y 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 la laguna Lagunillas. 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.

3.4. 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.

Variab	Indicadores	Escala de Medición	Tipos de variables
(VI) Imágenes satelitales	LandSat-8 Sentinel-2	m	Independiente
(VD)	Concentración	mg/m ³	Dependiente

Espacio-temporal de la
concentración de
clorofila-a

3.5. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO

Con el propósito de evaluar los cambios en la concentración de clorofila-a en la laguna Lagunillas durante las épocas de lluvias y estiaje en el periodo comprendido entre 2021 y 2024, se aplicaron modelos de regresión lineal, tanto en su forma simple como múltiple. A través de estos modelos, se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2), que permitió cuantificar el grado en que la variable temporal (años) explica la variabilidad observada en los niveles de clorofila-a. El cálculo de este coeficiente se basa en la siguiente expresión matemática.

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

Donde:

$y_i - \hat{y}_i$ representa los valores medidos

\hat{y}_i 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

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. EXPOSICION Y ANALISIS DEL MODELO PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LA CLOROFILA-A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA LAGUNA LAGUNILLAS DURANTE EL PERIODO 2021 - 2024.

Se construyó y evaluó un modelo estadístico de tipo logarítmico con regresión lineal múltiple e interacciones, con el propósito de analizar la evolución de la concentración de clorofila-a en la laguna lagunillas del distrito de Santa Lucía durante el periodo 2021 y 2024 durante las épocas de estiaje y lluvias. 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 evidenciar diferencias temporales y espaciales en la concentración de la clorofila-a, influidas principalmente por factores ambientales y el impacto de actividades humanas, que facilitó la identificación de zonas con mayor actividad de concentración de la clorofila-a, especialmente aquellas áreas cercanas a las orillas de la laguna lagunillas del distrito de Santa Lucía, este enfoque proporciona una herramienta útil para evaluar la concentración de la clorofila-a y la toma de decisiones en favor de la conservación del ecosistema de la laguna lagunillas.

Tabla 04: Modelo de regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones para la detección de la clorofila-a en la laguna Lagunillas.

Ecuación para la detección de la clorofila-a en			
Modelo	la laguna Lagunillas del distrito de Santa	R²	p-valor
Lucía			
Modelo de regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones	$chl_a \text{ (mg/m}^3\text{)} = -0.48984 + (0.13281 * B2) + (-0.09939 * B3) + (0.66787 * B4) + (-0.04786 * B5)$	0.719	0.006
<i>Nivel de confianza(95.0%) que equivale al 0.05</i>			
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 laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, fueron altamente satisfactorios. Mediante una regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones el r^2 resultado 0.719, lo que se logró explicar un 71.9% de la variabilidad en los datos, lo cual refleja una fuerte capacidad 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: $chl_a(mg/m^3) = -0.48984 + (0.13281 * B2) + (-0.09939 * B3) + (0.66787 * B4) + (-0.04786 * B5)$. Por otro lado, el p-valor

registrado (0.006) 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 de la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía.

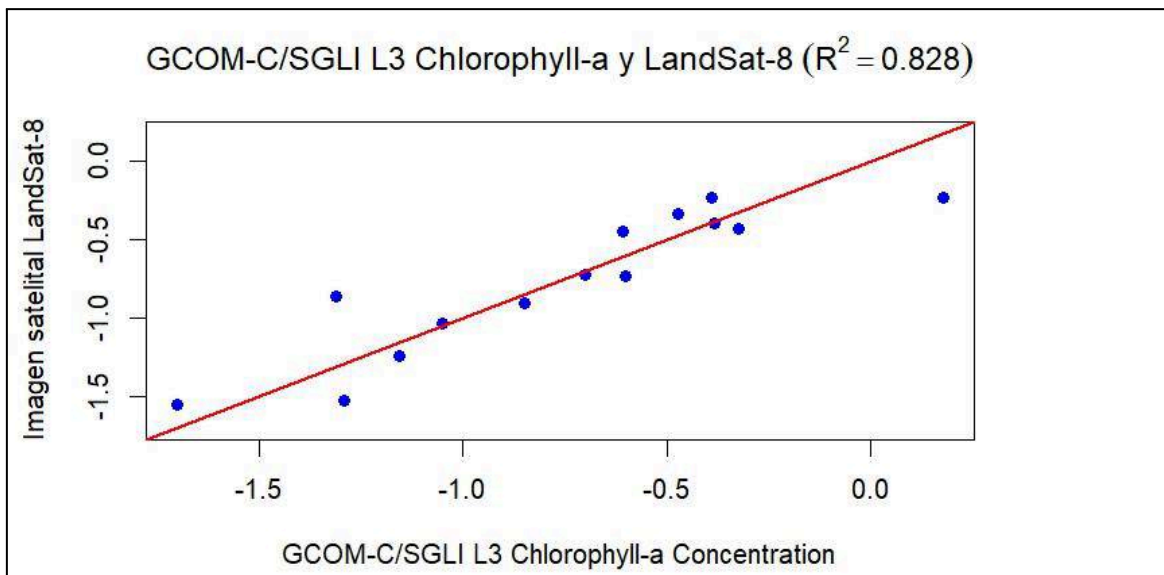


Figura 08: Valores observados y predichos para la laguna Lagunillas.

En la figura 08, se muestra el gráfico de dispersión que permite observar la relación entre los valores medidos y los estimados de clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, a partir de datos obtenidos mediante los satélites GCOM-C/SGLI L3 (Aqua) 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 0.828, lo que indica que logra explicar una proporción considerable de la variabilidad en los datos. Asimismo, el valor p obtenido (0.0011) 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 laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía.

4.2. EXPOSICION Y ANALISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CLOROFILA-A MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES EN LA LAGUNA LAGUNILLAS DURANTE EL PERIODO 2021 - 2024.

El estudio demostró que es factible analizar la concentración de clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, en el periodo comprendido entre 2021 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, lo cual facilitó la identificación de cambios tanto espaciales, temporales y en épocas en la presencia de clorofila-a en la laguna Lagunillas. Las bandas espectrales utilizadas mostraron una relación significativa con esta variable, lo que confirma la precisión del modelo para su estimación mediante teledetección. En conjunto, estos resultados avalan el uso de herramientas satelitales y métodos estadísticos avanzados como una opción efectiva para el monitoreo de la calidad del agua en ecosistemas de la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía.

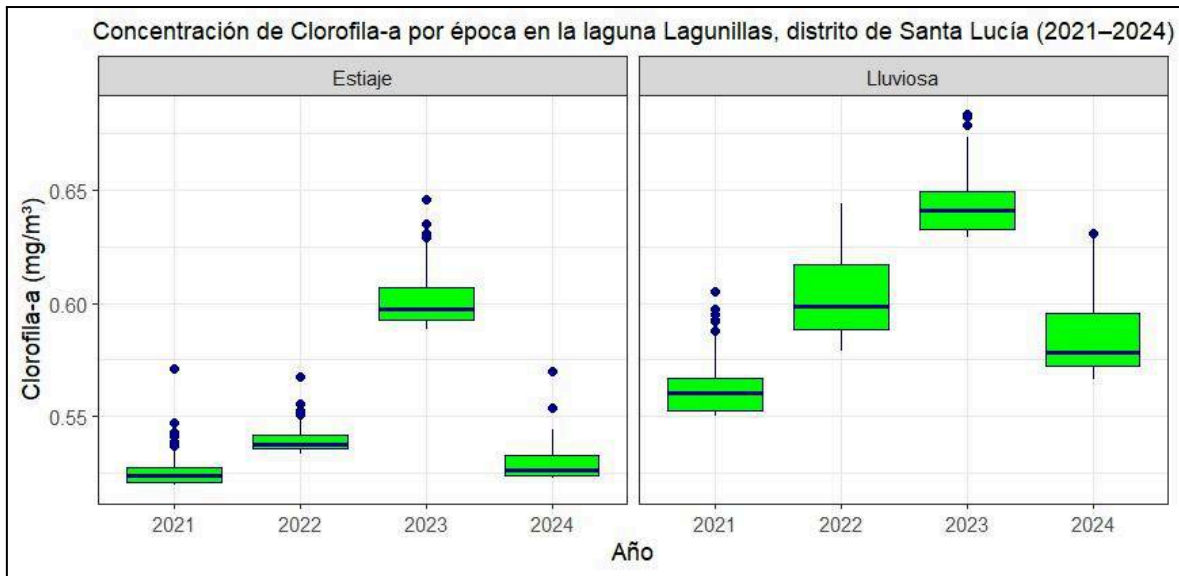


Figura 09: Concentración de la clorofila-a en la época de estiaje y lluvia durante el periodo 2021 y 2024.

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 laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía durante la época de estiaje y lluvia del periodo 2021 y 2024. Las cajas reflejan la distribución por épocas donde los datos estimados, incluyendo la mediana, los cuartiles y algunos valores extremos representados por puntos azules. A lo largo de estos años y en la época de estiaje se percibe una tendencia ascendente en los niveles de clorofila-a, lo cual también se evidencia en los promedios anuales que aumentan de 0.526 mg/m³ en 2021 a 0.529 mg/m³ en 2024, también en la época de lluvia se percibe una tendencia ascendente en los niveles de clorofila-a, lo cual también se evidencia en los promedios anuales que aumentan de 0.563 mg/m³ en 2021 a 0.585 mg/m³ en 2024. Esta situación sugiere un aumento progresivo de la biomasa fitoplanctónica en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía.

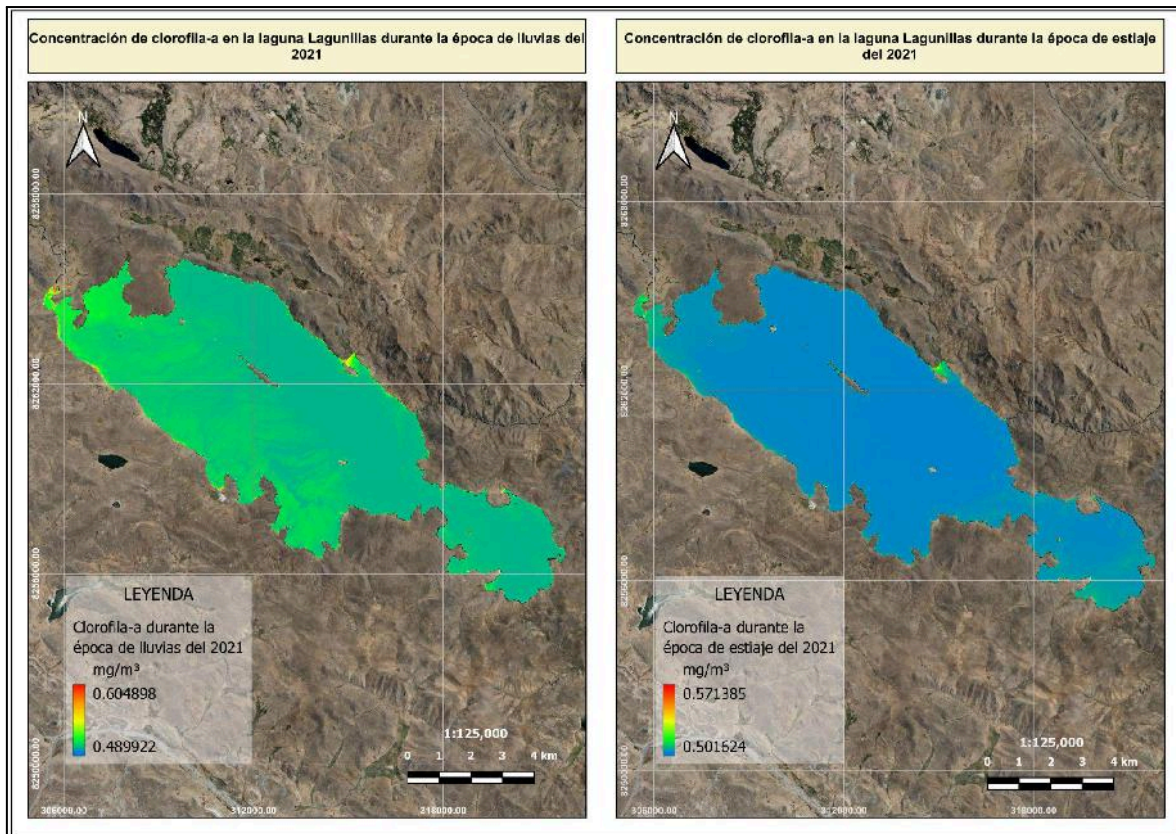


Figura 10: Mapa de concentración de la clorofila-a durante la época de estiaje y lluvia en el periodo 2021.

En la figura 10, se muestra el mapa de la concentración de la clorofila-a durante la época de estiaje y lluvia en el periodo 2021. En este año, para las dos épocas se percibe una tendencia ascendente en los niveles de clorofila-a, lo cual también se evidencian los aumentos en épocas de lluvia la concentración de clorofila-a con valores $>$ a 0.604 mg/m^3 que muestran altas concentración de clorofila-a y valores $<$ a 0.489 mg/m^3 muestran agua sin concentración la clorofila-a en 2021. Por otro lado en la época de estiaje los valores $>$ a 0.571 mg/m^3 que muestran altas concentración de clorofila-a y valores $<$ a 0.501 mg/m^3 muestran agua sin concentración la clorofila-a en 2021.

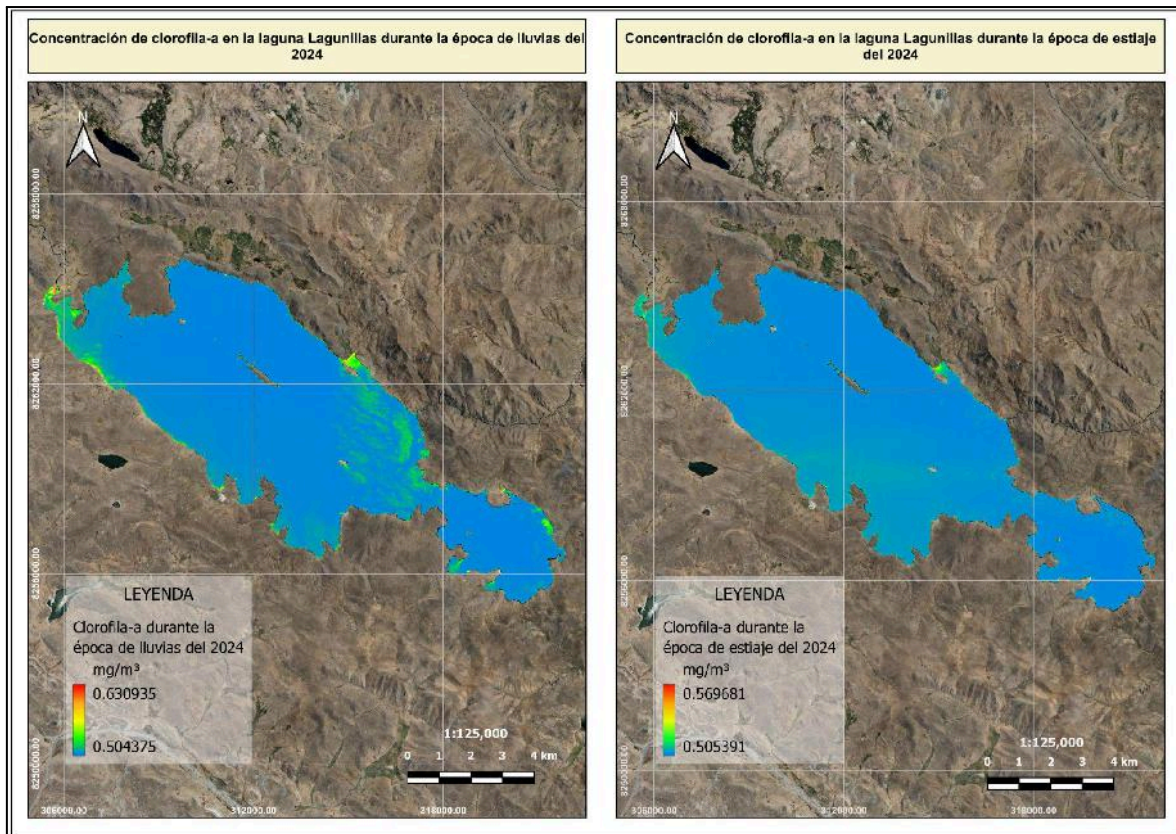


Figura 11: Mapa de concentración de la clorofila-a durante la época de estiaje y lluvia en el periodo 2024.

En la figura 11, se muestra el mapa de la concentración de la clorofila-a durante la época de estiaje y lluvia en el periodo 2024. En este año, para las dos épocas se percibe una tendencia ascendente en los niveles de clorofila-a, lo cual también se evidencian los aumentos en épocas de lluvia la concentración de clorofila-a con valores $>$ a 0.630 mg/m^3 que muestran altas concentración de clorofila-a y valores $<$ a 0.504 mg/m^3 muestran agua sin concentración la clorofila-a en 2024. Por otro lado en la época de estiaje los valores $>$ a 0.569 mg/m^3 que muestran altas concentración de clorofila-a y valores $<$ a 0.505 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 época de lluvia durante el periodo 2021 y 2024.

Variable	Media	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de asimetría	Mínimo	Máximo
chl a (mg/m ³)	0.598	0.594	0.0336	0.720	0.563	0.643

Nivel de confianza(95.0%)

En la tabla 05, se muestra el análisis estadístico realizado sobre los niveles de clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía durante la época de lluvia en el 2021 y 2024, donde evidencia una tendencia creciente en su concentración. El valor medio obtenido fue de 0.598 mg/m³ y la mediana alcanzó los 0.594 mg/m³, lo cual indica una distribución relativamente uniforme, no obstante, el coeficiente de asimetría de 0.720 revela una ligera inclinación hacia valores más bajos, aunque predominan los registros con niveles superiores a la media, la desviación estándar, de 0.0336, señala que existe una dispersión moderada en los datos, la diferencia entre el mínimo (0.563 mg/m³) y el máximo (0.643 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 a la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía.

Tabla 06: Estadística descriptiva de la concentración de la clorofila-a en la época de estiaje durante el periodo 2021 y 2024.

Variable	Media	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de asimetría	Mínimo	Máximo
chl _a (mg/m ³)	0.549	0.534	0.035	1.851	0.526	0.602

Nivel de confianza(95.0%)

En la tabla 06, se muestra el análisis estadístico realizado sobre los niveles de clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía durante la época de estiaje en el 2021 y 2024, donde evidencia una tendencia creciente en su concentración. El valor medio obtenido fue de 0.549 mg/m³ y la mediana alcanzó los 0.534 mg/m³, lo cual indica una distribución relativamente uniforme, no obstante, el coeficiente de asimetría de 1.851 revela una ligera inclinación hacia valores más bajos, aunque predominan los registros con niveles superiores a la media, la desviación estándar, de 0.035, señala que existe una dispersión moderada en los datos, la diferencia entre el mínimo (0.526 mg/m³) y el máximo (0.602 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 a la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía.

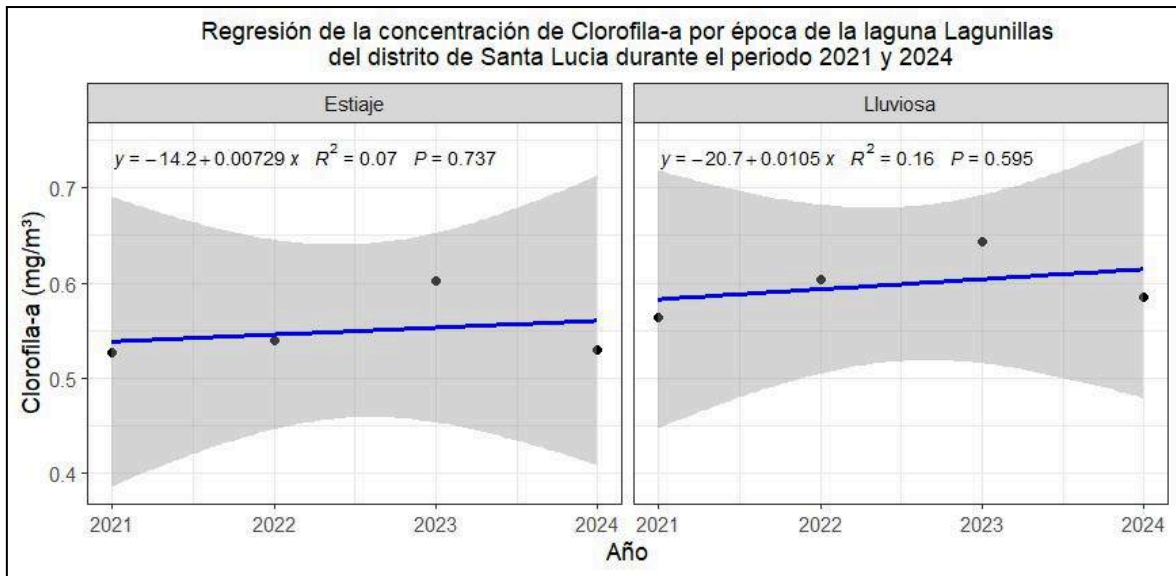


Figura 12: Concentración de clorofila-a durante la época de estiaje y lluvia en el 2021 y 2024.

En la figura 12, se muestra la concentración de clorofila-a durante la época de estiaje y lluvia en el 2021 y 2024, en la época de estiaje se ha observado un incremento considerable en la concentración de clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, elevándose de aproximadamente 0.526 mg/m^3 a 0.529 mg/m^3 , lo que representa un aumento del 0.7 %, esta evolución ascendente está sustentada por un análisis estadístico que muestra una correlación con el tiempo ($R^2 = 0.07$) y una significancia ($p = 0.737$), lo que indica que el paso de los años influye el 0.7% notablemente en esta variación. Por otro lado en la época de lluvia se ha observado un incremento considerable en la concentración de clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, elevándose de aproximadamente 0.563 mg/m^3 a 0.585 mg/m^3 , lo que representa un aumento del 1.6 %, esta evolución ascendente está sustentada por un análisis estadístico que muestra una correlación con el tiempo ($R^2 = 0.16$) y una significancia ($p = 0.595$), lo que indica que el paso de los años influye el 1.6% notablemente en esta variación. Este comportamiento señala una intensificación del proceso de eutrofización de la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, 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 laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, por lo que se vuelve necesario adoptar estrategias de control y conservación ambiental.

4.3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para estimar la concentración de clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, fueron altamente satisfactorios. Mediante una regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones el r^2 resultado 0.719, lo que se logró explicar un 71.9% de la variabilidad en los datos, lo cual refleja una fuerte capacidad 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. Por otro lado coincide con **(Estrada & Macahuachi, 2023)** en sus resultados determinaron una ecuación empírica polinómica de segundo grado para los sólidos suspendidos totales, fundamentada en la relación de bandas B5/B2, con un R^2 de 0.99. Se logró un modelo tribanda con la relación $B4 - 1/2 (B11 + B2)$, logrando un R^2 de 0.98. Al contrastar los hallazgos con la regulación peruana ECA-agua, se descubrió que el 10.4% de la laguna supera los 25 mg/l en la concentración total de sólidos suspendidos, mientras que la clorofila-a se mantiene por debajo de los parámetros fijados. También coincide con **(Corcho & Valle, 2023)** en sus resultados donde emplearon técnicas de regresión para elegir y validar tres modelos de regresión simple que facilitan la estimación de la concentración de clorofila-a. El modelo más preciso, que utiliza el cociente B4/B5, registró un R^2 del 98,93% y un RMSE de 2,12 $\mu\text{g/L}$. Este modelo se aplicó a una fotografía satelital del 12 de junio de 2019, creando un mapa temático que representa la distribución espacial de la clorofila-a en ese día.

La concentración de clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía durante la época de estiaje y lluvia del periodo 2021 y 2024. Las cajas reflejan la distribución por épocas donde los datos estimados, incluyendo la mediana, los cuartiles y algunos valores extremos representados por puntos azules. A lo largo de estos años y en la época de estiaje se percibe una tendencia ascendente en los niveles de clorofila-a, lo cual también se evidencia en los promedios anuales que aumentan de 0.526 mg/m³ en 2021 a 0.529 mg/m³ en 2024, también en la época de lluvia se percibe una tendencia ascendente en los niveles de clorofila-a, lo cual también se evidencia en los promedios anuales que aumentan de 0.563 mg/m³ en 2021 a 0.585 mg/m³ en 2024. Esta situación sugiere un aumento progresivo de la biomasa fitoplanctónica en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía. Por otro lado coincide con **(Neyra, 2023)** los resultados en la laguna Cashibococha de Ucayali, para la clorofila-a, se emplearon ecuaciones lineales con la banda B2 de Landsat 9 - OLI 2, logrando un R² de 0.1894, y los valores de las muestras en el lugar se situaron entre 0.042 y 0.069 mg/L. Este análisis evidencia la factibilidad de emplear métodos de teledetección para valorar la calidad del agua en la laguna Cashibococha. También coincide con **(Nelly & Sánchez, 2023)** en sus resultados de la calidad del agua del lago Yahuarcocha durante el 2017 a 2020, el nivel de clorofila "a" alcanzó 150.3 µg/l, lo que señala que el lago está en una condición hipertrófica. El estudio del NDVI mostró una presencia general de vegetación de moderada intensidad, resaltando especies como *Typha latifolia*, *Eichhornia crassipes* y *Elodea Canadensis*.

4.4. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS.

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

Hipótesis alterna (H₁): El modelo de comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna Lagunillas durante el periodo 2021-2024 muestran variaciones estacionales significativas.

Hipótesis nula (H_0): El modelo de comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna Lagunillas durante el periodo 2021-2024 no muestra variaciones estacionales significativas.

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

- Si el *p-valor* calculado es menor o igual a 0.05, se rechaza H_0 y se acepta H_1 .
- Si el *p-valor* es mayor a 0.05, no se rechaza H_0 .

Interpretación: En base a la tabla 04, los resultados el *p-valor* obtenido, equivalente a 0.006, está por debajo del umbral de significancia del 0.05, lo que permite rechazar la H_0 y aceptar la H_1 . Esto confirma que el modelo estadístico aplicado, basado en el análisis de imágenes satelitales, detecta variaciones significativas en los niveles de clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía durante el periodo 2021 - 2024. Esta evidencia respalda la eficacia del modelo como una herramienta válida para interpretar la concentración de la clorofila-a en la laguna Lagunillas y fortalecer el seguimiento ambiental mediante 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 laguna Lagunillas durante el periodo 2021-2024 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 laguna Lagunillas durante el periodo 2021-2024 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* calculado es menor o igual a 0.05, se rechaza H_0 y se acepta H_1 .
- Si el *p-valor* es mayor a 0.05, no se rechaza H_0 .

Interpretación: En base a la figura 13, los resultados muestran una regresión al incremento de la concentración de la clorofila-a al 1.6% a medida que pasan los años, 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 laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, durante el periodo comprendido entre 2021 y 2024, ha mostrado variaciones 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 de la laguna Lagunillas.

CONCLUSIONES

PRIMERA: El análisis espacio-temporal de la concentración de clorofila-a en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía, durante la época de lluvia y estiaje en el periodo comprendido entre 2021 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 laguna Lagunillas, lo cual representa una señal de alerta sobre el estado de calidad del agua.

SEGUNDA: El modelo estadístico de regresión lineal múltiple logarítmica con interacciones, presentó una alta capacidad explicativa y un nivel de significancia estadística adecuado de 71.9%, 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 laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía a partir de datos satelitales.

TERCERA: Los valores obtenidos de la concentración promedio anual de clorofila-a, en las épocas de lluvia y estiaje mostró un crecimiento continuo del 1.6% a medida que van pasando los años, este comportamiento se confirmó mediante el análisis estadístico,

mostrando posibles procesos de eutrofización progresiva en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía.

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, para fomentar buenas prácticas que ayuden a reducir la contaminación de la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía.

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 en la laguna Lagunillas del distrito de Santa Lucía. 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 distrito de Santa Lucía y a la provincia de Lampa priorizar políticas orientadas a la conservación de los ecosistemas acuáticos, 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>

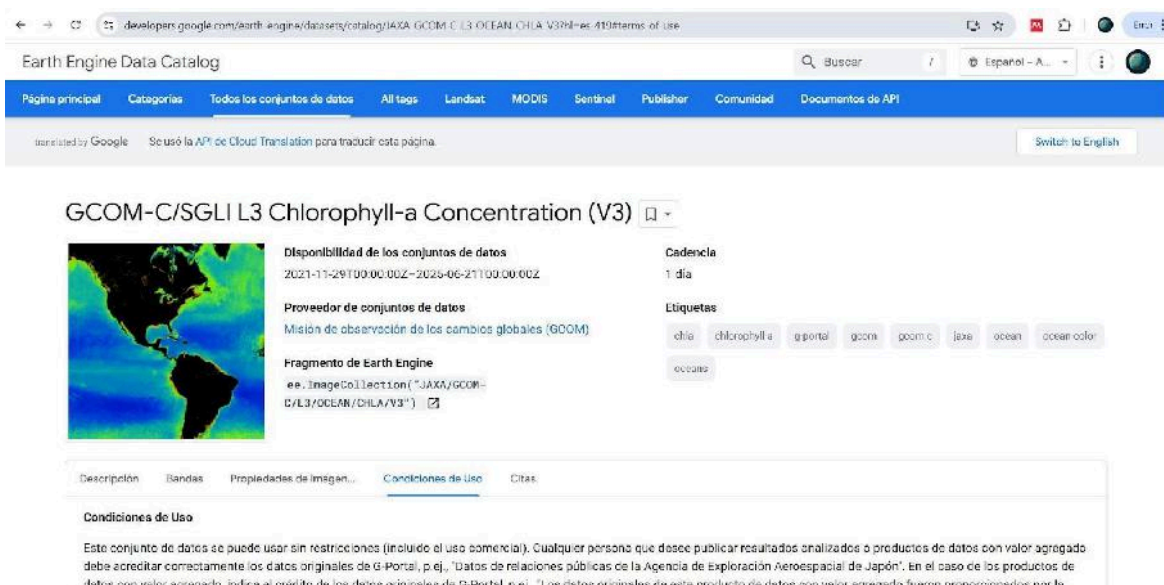
ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia

"Análisis espacio-temporal de la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas del distrito de Santa Lucia, Lampa, Puno, periodo 2021 - 2024".

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	INSTRUMENTOS	TÉCNICA DE PROCESAMIENTO DE DATOS
<p>PROBLEMA GENERAL ¿Cómo es el análisis espacio-temporal de la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas del distrito de Santa Lucia, Lampa, Puno, periodo 2021 - 2024?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cómo es el modelo de comportamiento de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas durante el periodo 2021 - 2024 ? ¿Cuál es la concentración de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas durante el periodo 2021 - 2024? 	<p>OBJETIVO GENERAL Analizar en el espacio-temporal la concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas del distrito de Santa Lucia, Lampa, Puno, periodo 2021 - 2024.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> Desarrollar un modelo para el comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas durante el periodo 2021 - 2024. Determinar la concentración de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas durante el periodo 2021 - 2024. 	<p>HIPÓTESIS GENERAL En el espacio-temporal existe una variación significativa al aumentar las concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna lagunillas del distrito de Santa Lucia, Lampa, Puno, periodo 2021 - 2024.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> El modelo de comportamiento de la clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna Lagunillas durante el periodo 2021-2024 muestran variaciones estacionales significativas La concentración de clorofila-a mediante imágenes satelitales en la laguna Lagunillas durante el periodo 2021-2024 presenta fluctuaciones significativas al aumentar su concentración a lo largo del tiempo. 	<p>Variable Independiente :</p> <p>Imágenes satelitales</p> <p>Variable Dependiente: 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> <ul style="list-style-type: none"> mg/m³ 	<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-2026-06-21T03:00:00Z

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")

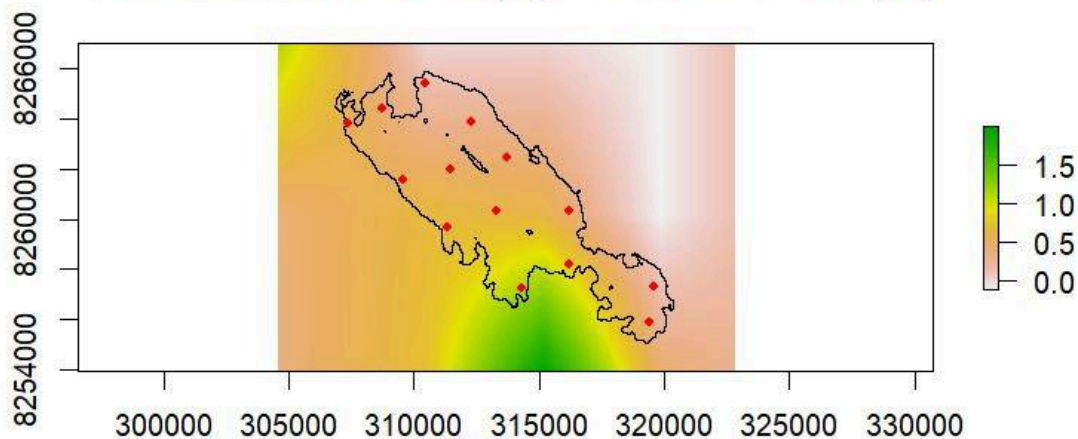
Cadencia
1 día

Etiquetas
chlo chlorophyll a gportal gcom gcom c jaxa ocean ocean color

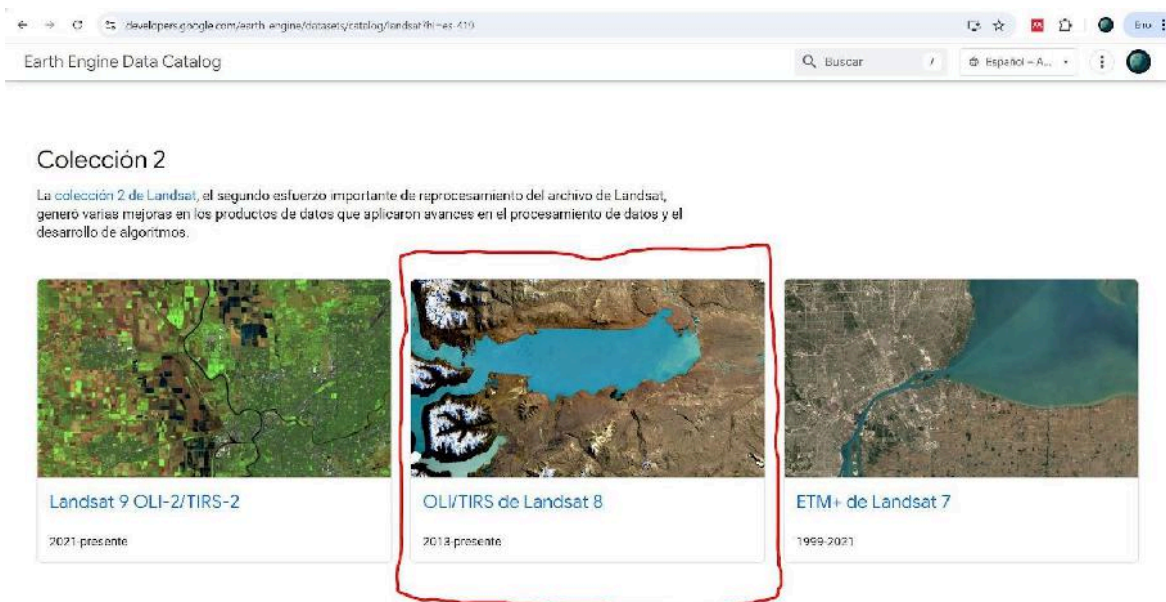
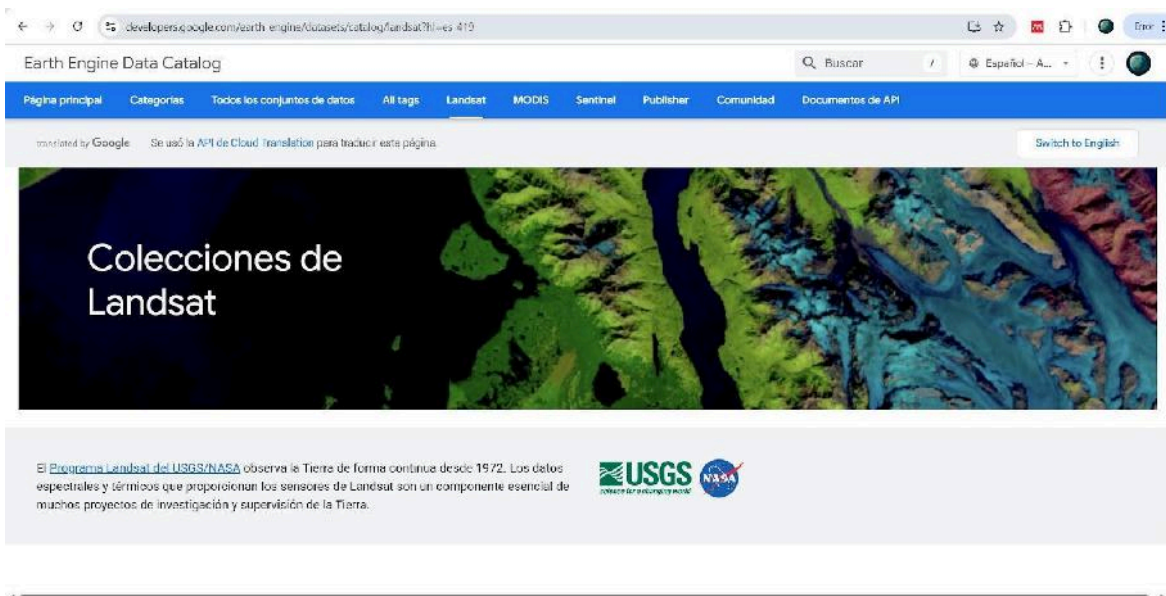
Condiciones de Uso

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 en el título de los datos analizados de este conjunto de datos con valor agregado.

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

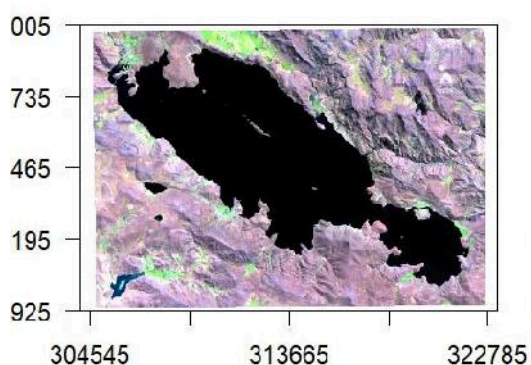


Anexo 03: Descarga de la imagen satelital LandSat-8.

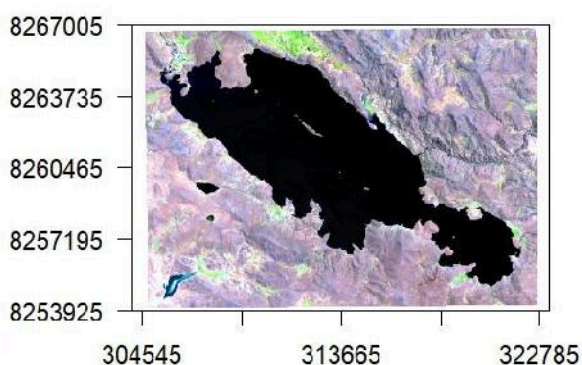


Anexo 04: Imagen satelital LandSat-8

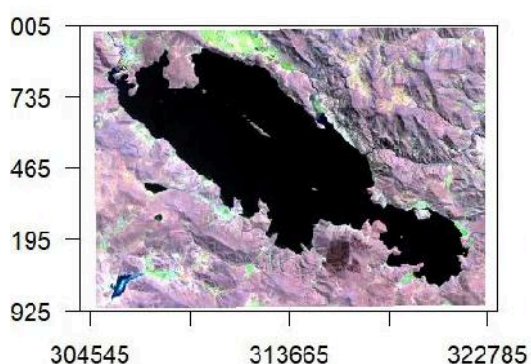
LandSat-8 del 2021 epoca de estiaje



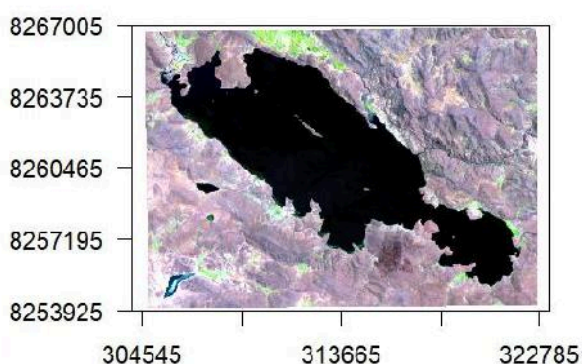
LandSat-8 del 2021 epoca de lluvia



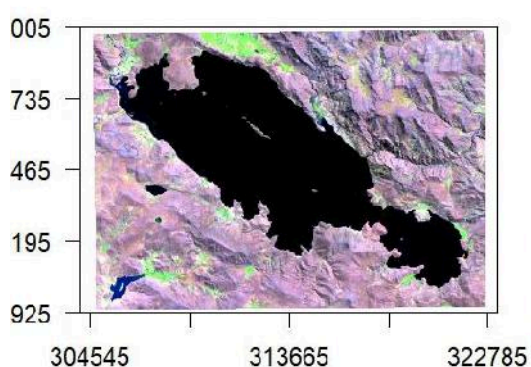
LandSat-8 del 2022 epoca de estiaje



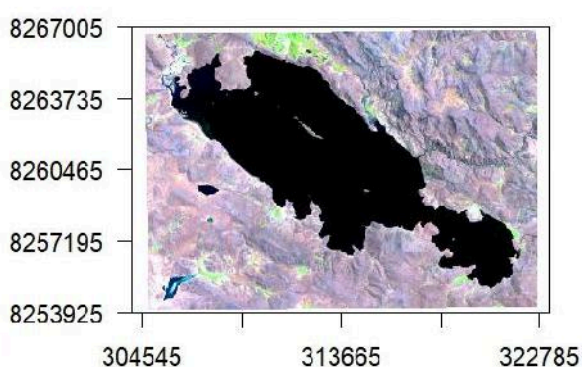
LandSat-8 del 2022 epoca de lluvia



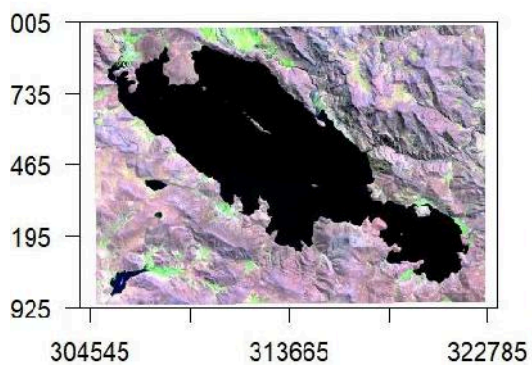
LandSat-8 del 2023 epoca de estiaje



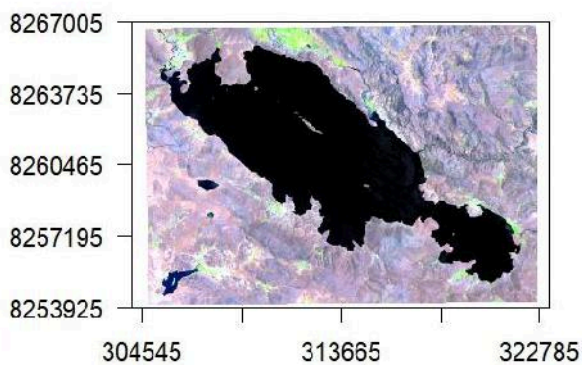
LandSat-8 del 2023 epoca de lluvia



LandSat-8 del 2024 epoca de estiaje



LandSat-8 del 2024 epoca de lluvia



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

chla	B2	B3	B4	B5
1.19264865	0.05805457	0.04149365	0.02520671	0.01165962
0.67534536	0.05908963	0.04277225	0.02642442	0.0132731
0.54773206	0.05668464	0.03814493	0.02319748	0.01068545
0.68005961	0.05975938	0.04584698	0.02867719	0.01141608
0.27491587	0.05540605	0.03704899	0.02207109	0.01013748
0.72279418	0.05671509	0.04079346	0.02444563	0.0122076
0.62342733	0.05784147	0.04118922	0.02471962	0.0111421
0.4967238	0.05619756	0.03972796	0.02347146	0.01028969
0.54484427	0.05711085	0.03936265	0.02389766	0.01044191
0.18239065	0.05491896	0.0376274	0.02231463	0.01059412
0.34922141	0.05577136	0.03896689	0.02274083	0.00931552
0.4271487	0.05543649	0.03832759	0.02334969	0.00916331
0.31481996	0.0553756	0.03817537	0.02258862	0.00971128
0.26939657	0.05610623	0.03860157	0.02316703	0.01035058

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

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

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.44384 -0.14305  0.01681  0.10234  0.40681

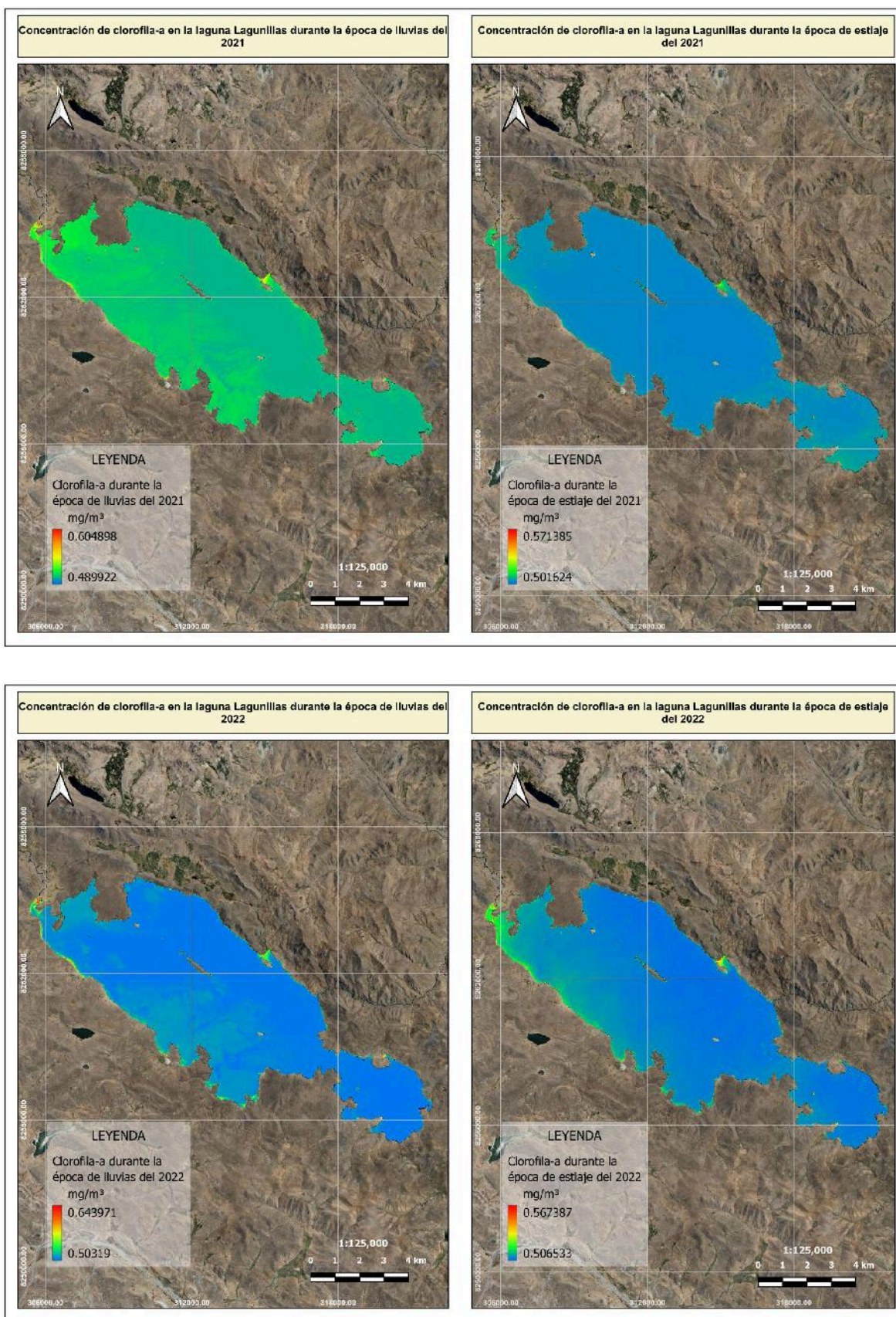
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -0.48984    0.11040  -4.437  0.00218 **
B2           0.13281    0.29025   0.458  0.65943
B3          -0.09939    0.41365  -0.240  0.81616
B4           0.66787    0.57207   1.167  0.27664
B5          -0.04786    0.11200  -0.427  0.68043
B2:B3       -0.31445    0.09839  -3.196  0.01269 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

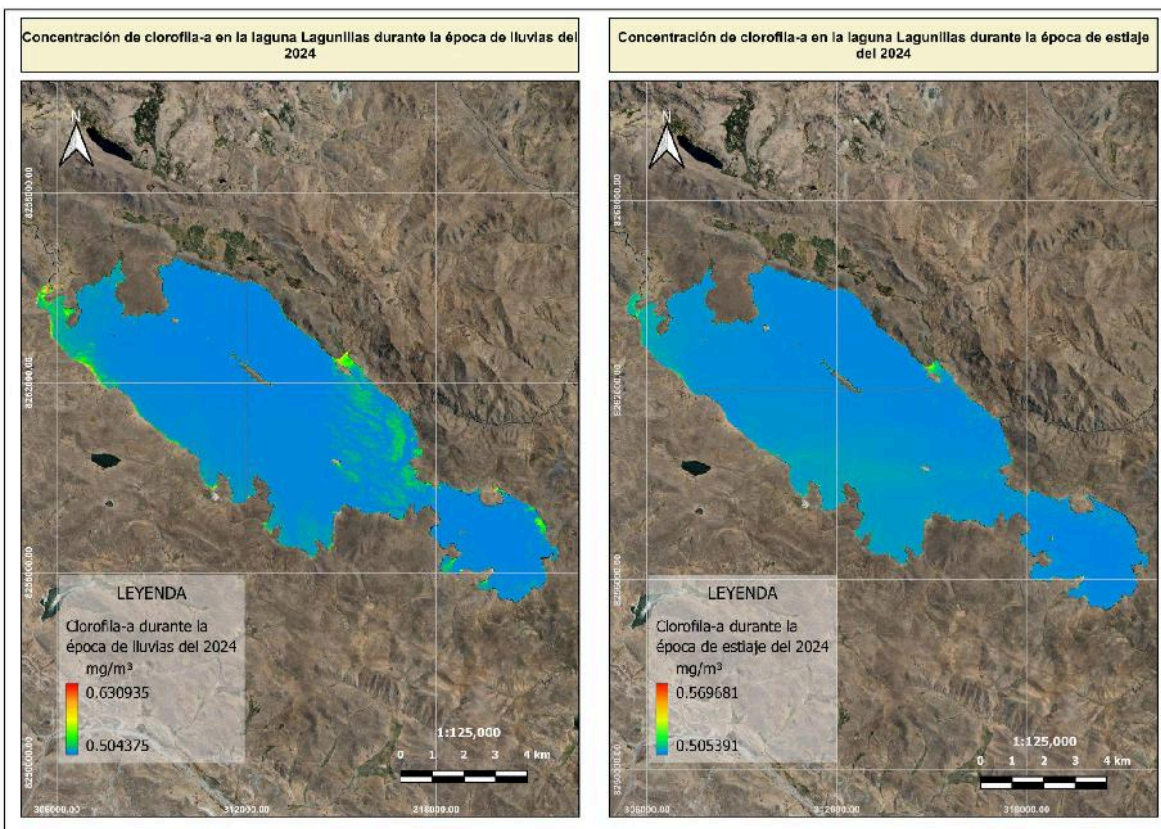
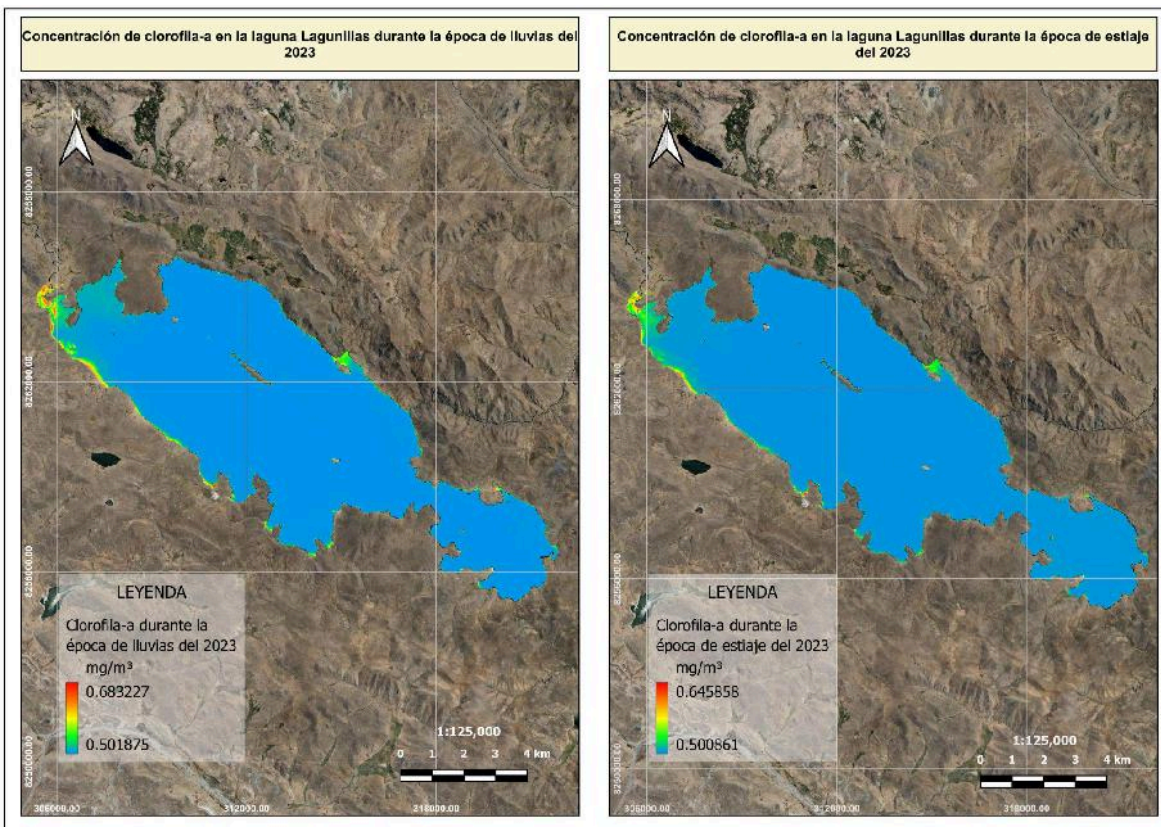
Residual standard error: 0.2626 on 8 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8275,    Adjusted R-squared:  0.7198
F-statistic: 7.678 on 5 and 8 DF,  p-value: 0.00639
```

Anexo 07: Resultado de detección de clorofila-a en la laguna Lagunillas.

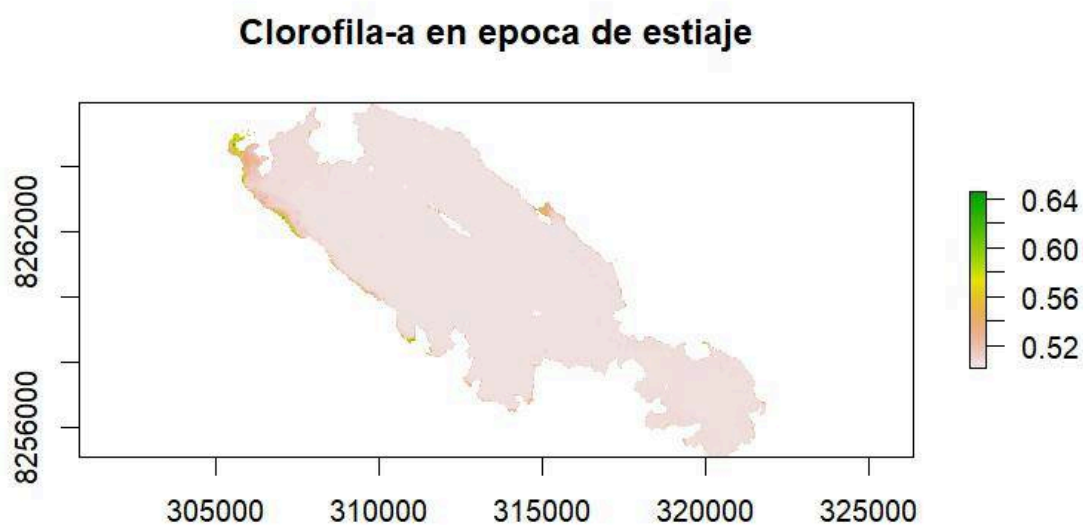
id	Year	Chla
1	2021_E.est.	0.52625764
2	2021_E.lluv.	0.56369734
3	2022_E.est.	0.53974405
4	2022_E.lluv.	0.60304588
5	2023_E.est.	0.60251431
6	2023_E.lluv.	0.64310423
7	2024_E.est.	0.5296245
8	2024_E.lluv.	0.58548623

Anexo 08: Mapas de detección de clorofila-a en la laguna Lagunillas

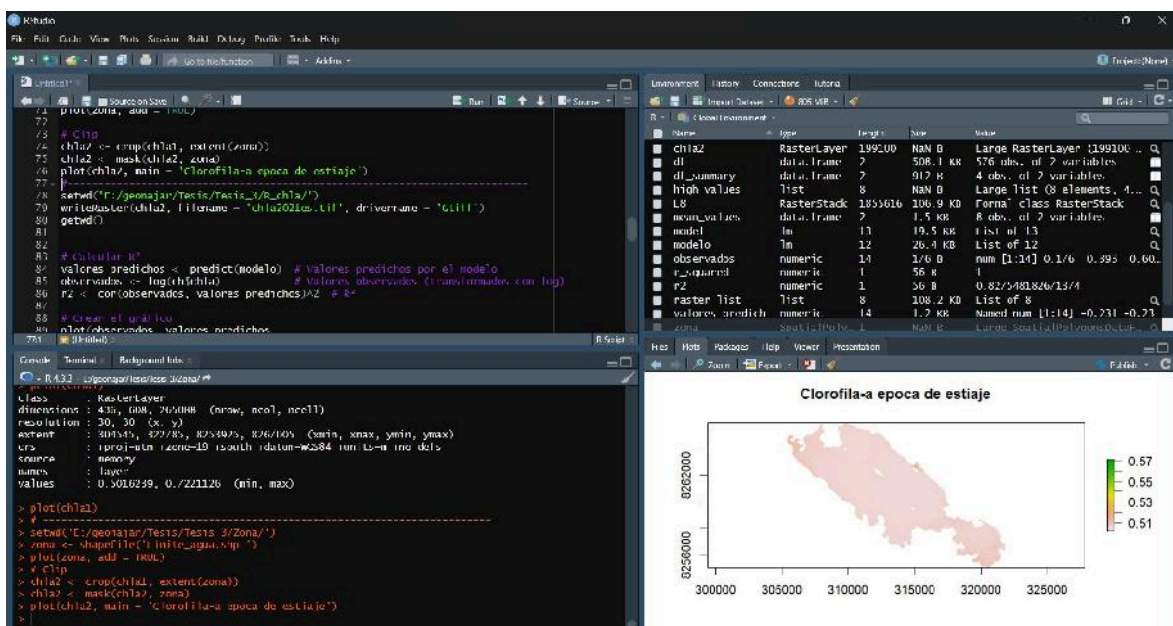
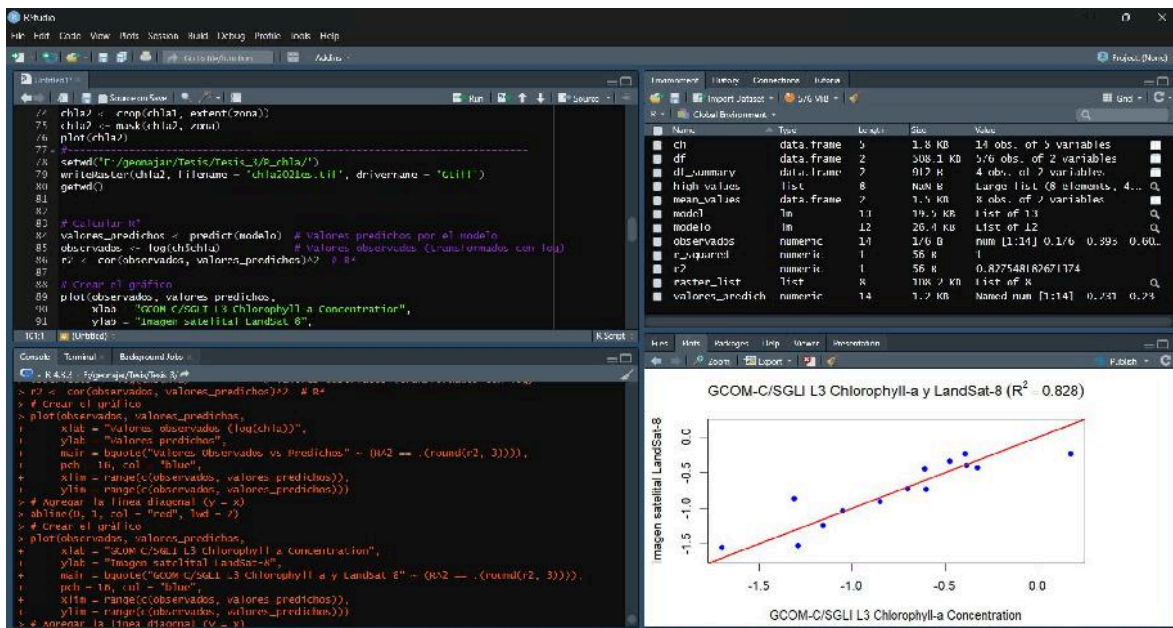


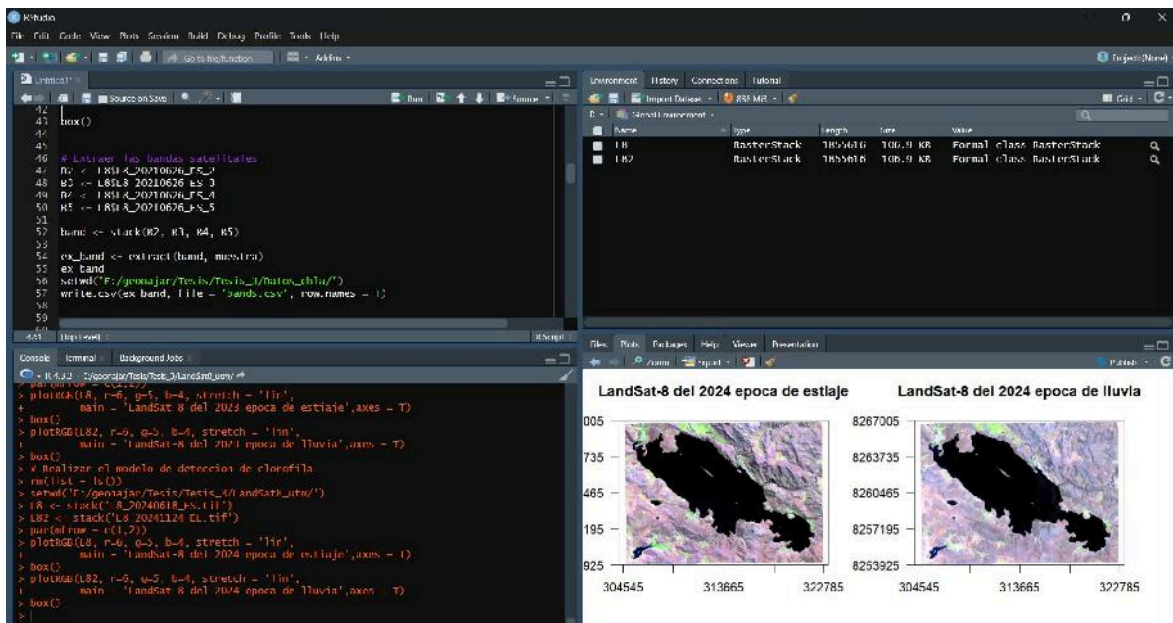


Anexo 09: Concentración de clorofila-a (mg/m^3) en la laguna Lagunillas.



Anexo 10: Panel fotográfico





The screenshot shows an RStudio session with the following R code in the script editor:

```

42 box()
43
44
45
46 # Extraer las bandas satelitales
47 R1 <- L8L1_20210626_RS_0
48 R2 <- L8L2_20210626_RS_0
49 R3 <- L8L3_20210626_RS_0
50 R5 <- L8L5_20210626_RS_0
51
52 band <- stack(R2, R3, R4, R5)
53
54 ex_band <- extract(band, muestra)
55 ex_band
56
57 setwd("F:/geografia/Tesis/Tesis_1/Mater_ch14/")
58 write.csv(ex_band, file = "band.csv", row.names = 1)
59
60
61

```

The Environment pane shows the following objects:

Name	Type	Length	Size	Value
R1	RasterStack	185x160	106.9 KB	Formal class 'RasterStack'
R2	RasterStack	185x160	106.9 KB	Formal class 'RasterStack'

The Console shows the execution of the following R code:

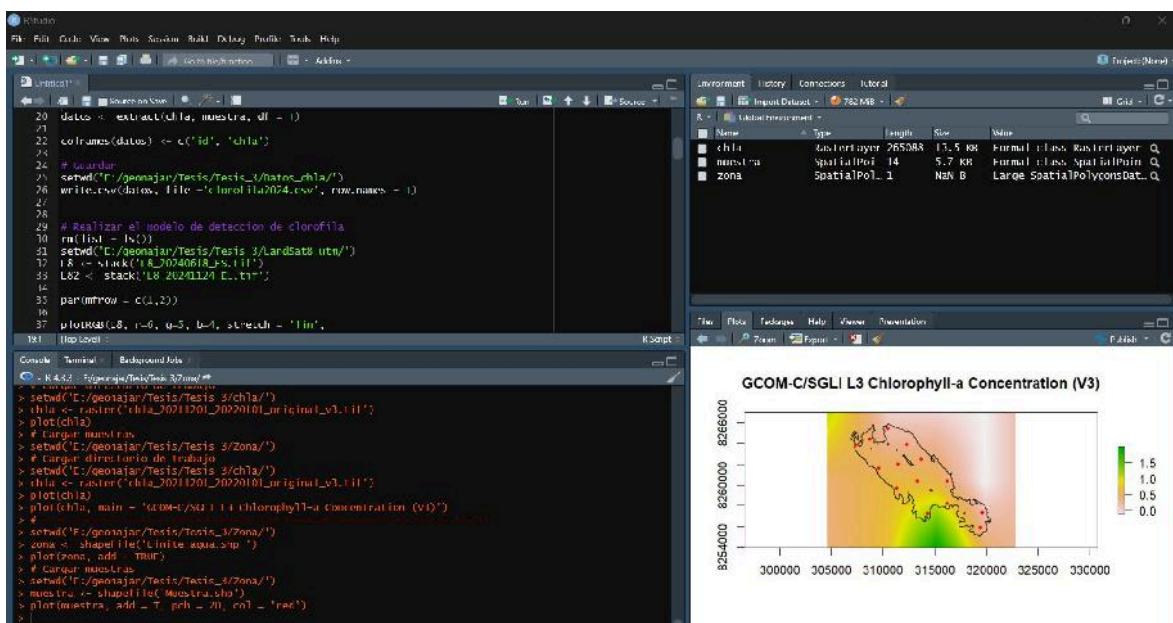
```

> par(mfrow = c(2,2))
> plotRGB(L8, r=6, g=3, b=4, stretch = "lin",
+ main = "LandSat 8 del 2021 epoca de estiaje", axes = T)
> box()
> plotRGB(L82, r=6, g=3, b=4, stretch = "lin",
+ main = "LandSat-8 del 2021 epoca de lluvia", axes = T)
> box()
> # Realizar el modelo de detección de clorofila
> ml(list = ls())
> setwd("F:/geografia/Tesis/Tesis_1/LandSat8 utm/")
> R <- stack("R_20210626_RS.tif")
> L82 <- stack("L8_20211201_L.tif")
> par(mfrow = c(1,2))
> plotRGB(L8, r=6, g=3, b=4, stretch = "lin",
+ main = "LandSat-8 del 2024 epoca de estiaje", axes = T)
> box()
> plotRGB(L82, r=6, g=3, b=4, stretch = "lin",
+ main = "LandSat 8 del 2024 epoca de lluvia", axes = T)
> box()

```

Two satellite images are displayed side-by-side:

- LandSat-8 del 2024 epoca de estiaje**: A satellite image showing a lake and surrounding land. Coordinates: X-axis (304545, 313665, 322785), Y-axis (925, 195, 465, 735, 1005).
- LandSat-8 del 2024 epoca de lluvia**: A satellite image showing the same area during the rainy season. Coordinates: X-axis (304545, 313665, 322785), Y-axis (8253925, 8260465, 8267005).



The screenshot shows an RStudio session with the following R code in the script editor:

```

20 datos <- extract(ch1a, muestra, df = 1)
21
22 columnas(datos) <- c("id", "ch1a")
23
24
25 # guardar
26 setwd("F:/geografia/Tesis/Tesis_1/Mater_ch14/")
27 write.csv(datos, file = "clorofila2024.csv", row.names = 1)
28
29
30 # Realizar el modelo de detección de clorofila
31 ml(list = ls())
32
33 setwd("F:/geografia/Tesis/Tesis_1/LandSat8 utm/")
34 R <- stack("R_20210626_RS.tif")
35 L82 <- stack("L8_20211201_L.tif")
36
37 par(mfrow = c(1,2))
38
39 plotRGB(L8, r=6, g=3, b=4, stretch = "lin",

```

The Environment pane shows the following objects:

Name	Type	Length	Size	Value
ch1a	RasterLayer	265384	15.5 KB	Formal class 'RasterLayer'
muestra	SpatialPoly	14	5.7 KB	Formal class 'SpatialPoly'
zona	SpatialPoly	1	NaN B	Large SpatialPolygonsData

The Console shows the execution of the following R code:

```

> setwd("F:/geografia/Tesis/Tesis_1/ch1a/")
> ch1a <- raster("ch1a_20211201_20220101_origina_v3.tif")
> plot(ch1a)
> # Cargar muestra
> setwd("F:/geografia/Tesis/Tesis_1/zona/")
> # Cargar directorio de trabajo
> setwd("F:/geografia/Tesis/Tesis_1/ch1a/")
> ch1a <- raster("ch1a_20211201_20220101_origina_v3.tif")
> plot(ch1a)
> plot(ch1a, main = "GCOM-C/SGL3 Chlorophyll-a concentration (V3)")
> #
> setwd("F:/geografia/Tesis/Tesis_1/zona/")
> zona <- shapefile("Llave zona.shp")
> plot(zona, add = TRUE)
> # Cargar muestra
> setwd("F:/geografia/Tesis/Tesis_1/zona/")
> muestra <- shapefile("muestra.shp")
> plot(muestra, add = T, pch = 20, col = "red")
>

```

A heatmap titled "GCOM-C/SGL3 Chlorophyll-a Concentration (V3)" is displayed. The x-axis ranges from 300000 to 330000, and the y-axis ranges from 8254000 to 8266000. A color scale on the right indicates concentrations from 0.0 (blue) to 1.5 (red).