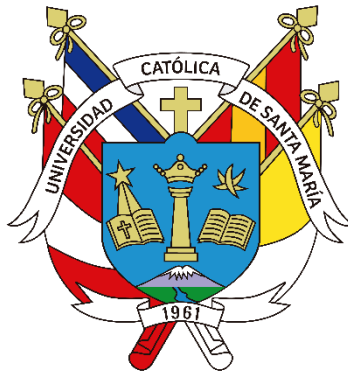


Universidad Católica de Santa María
Facultad de Arquitectura Ingeniería Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Evaluación del estado trófico de la laguna Iberia sur (Santuario Nacional
Lagunas De Mejía) mediante la correlación de índices de clorofila a y
técnicas de teledetección - periodo 2018-2020.**

Tesis presentada por los Bachilleres:

López Poch, Rodrigo Guillermo

ORCID: 0009-0000-2601-6623

Zúñiga Villanueva, Jesús Francisco

ORCID: 0009-0003-3775-0235

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor:

Mg. Cárdenas Pillco, Berly Edinsson

ORCID: 0000-0003-0555-8540

Arequipa- Perú

2024

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA AMBIENTAL
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 10 de Diciembre del 2023

Dictamen: 005647-C-EPIA-2023

Visto el borrador del expediente 005647, presentado por:

2016101951 - ZUÑIGA VILLANUEVA JESUS FRANCISCO

2016203811 - LOPEZ POCH RODRIGO GUILLERMO

Titulado:

**EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE LA LAGUNA IBERIA SUR (SANTUARIO NACIONAL
LAGUNAS DE MEJÍA) MEDIANTE LA CORRELACIÓN DE ÍNDICES DE CLOROFILA A Y TÉCNICAS
DE TELEDETECCIÓN - PERIODO 2018-2020.**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

**29603068 - DELGADO ALVARADO GUSTAVO ALONSO
DICTAMINADOR**



**29611452 - ARENAZAS RODRIGUEZ ARMANDO JACINTO
DICTAMINADOR**



**46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA
DICTAMINADOR**



Evaluación del estado trófico de la laguna Iberia sur (Santuario Nacional Lagunas De Mejía) mediante la correlación de índices de clorofila a y técnicas de teledetección - periodo 2018-2020

ORIGINALITY REPORT

8%

SIMILARITY INDEX

10%

INTERNET SOURCES

1%

PUBLICATIONS

3%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repositorio.unsa.edu.pe Internet Source	2%
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Student Paper	2%
3	repositorio.upct.es Internet Source	1%
4	hdl.handle.net Internet Source	1%
5	repositorio.lamolina.edu.pe Internet Source	1%
6	cdn.www.gob.pe Internet Source	1%
7	repositorio.espe.edu.ec Internet Source	1%

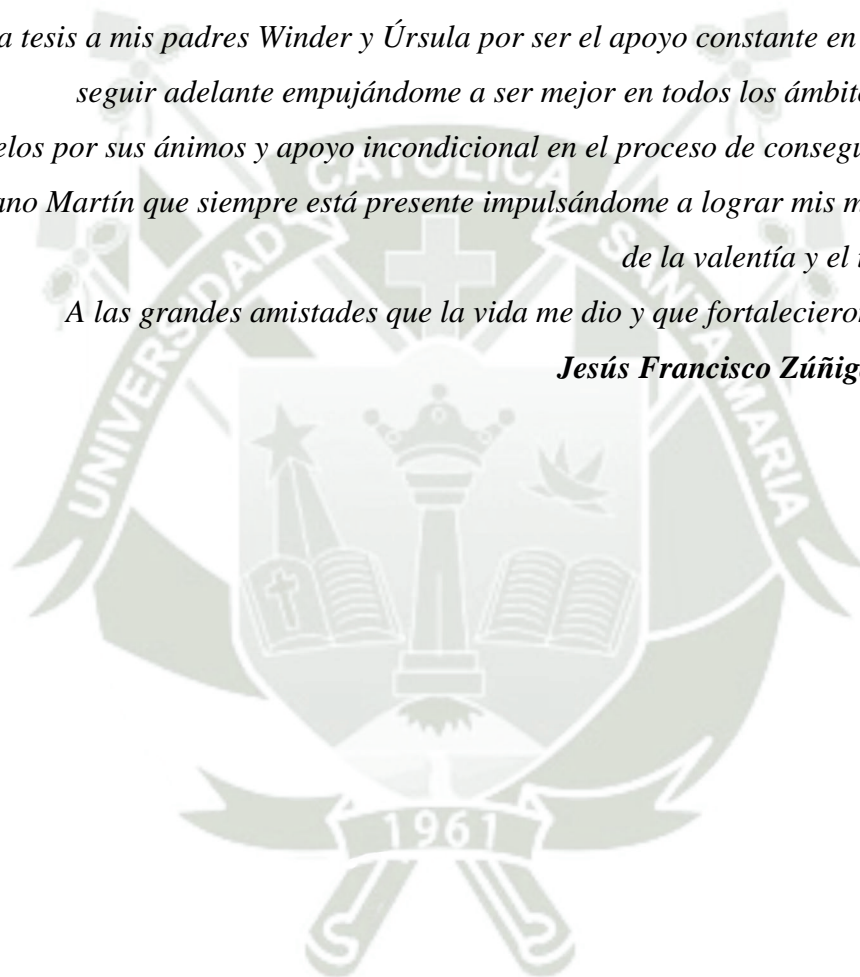
Dedicatoria

Quiero dedicar esta tesis a mis padres por siempre apoyarme en este proceso y a cumplir mis sueños, a mi abuelita Gloria por depositar su confianza y creer en mí en cada motivación que me alentaron en el proceso de mi carrera.

Rodrigo Guillermo López Poch

Dedico esta tesis a mis padres Winder y Úrsula por ser el apoyo constante en mi vida para seguir adelante empujándome a ser mejor en todos los ámbitos de la vida. A mis abuelos por sus ánimos y apoyo incondicional en el proceso de conseguir esta meta. A mi hermano Martín que siempre está presente impulsándome a lograr mis metas a través de la valentía y el trabajo duro. A las grandes amistades que la vida me dio y que fortalecieron mi espíritu.

Jesús Francisco Zúñiga Villanueva



Agradecimientos

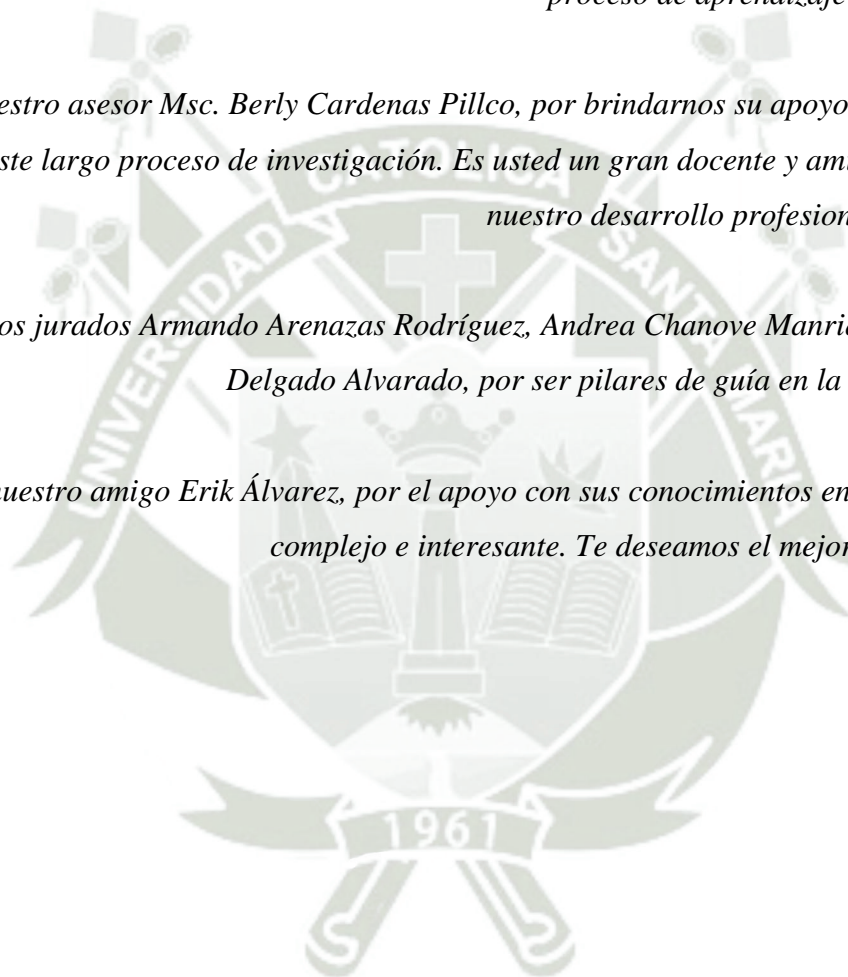
A Dios por darnos la fuerza para culminar nuestra carrera profesional y guiar nuestros pasos a lo largo de nuestras vidas.

A nuestra alma máter, la UCSM, por habernos acogido en el arduo pero satisfactorio proceso de aprendizaje universitario.

A nuestro asesor Msc. Berly Cardenas Pillco, por brindarnos su apoyo y orientarnos durante este largo proceso de investigación. Es usted un gran docente y amigo, vital para nuestro desarrollo profesional y personal.

A nuestros jurados Armando Arenazas Rodríguez, Andrea Chanove Manrique y Gustavo Delgado Alvarado, por ser pilares de guía en la investigación.

A nuestro amigo Erik Álvarez, por el apoyo con sus conocimientos en este tema tan complejo e interesante. Te deseamos el mejor de los éxitos.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS	11
ÍNDICE DE ÍNDICES	13
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	13
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
CAPITULO I.....	17
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.1. Problemática de la investigación	18
1.2. Formulación del Problema.....	19
1.3. Objetivos.....	19
1.3.1. Objetivo General.....	19
1.3.2. Objetivos Específicos	20
1.4. Justificación	20
a) Ambiental.....	20
b) Económica - social.....	21
c) Científica.....	21
d) Institucional	22
CAPÍTULO II.....	23
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	24
2.1 Antecedentes de la investigación.....	24

2.2. Marco Teórico.....	27
2.2.1. Eutrofización	27
2.2.2. La Teledetección.....	33
2.2.1.1. Principios físicos.....	35
2.2.1.2. Influencia de la atmósfera en la teledetección	36
2.2.3. Satélites.....	36
2.2.4. Imágenes Satelitales.	38
2.2.5. Imagen multiespectral.....	40
2.2.6. Espectro electromagnético.....	41
2.2.7. Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	42
2.2.8. Santuario Nacional Lagunas de Mejía.....	44
2.3. Marco Legal	46
2.3.1. Nacional.....	46
2.3.2. Internacional	48
CAPÍTULO III	50
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	51
3.1. Tipo y nivel de investigación.....	51
3.2. Diseño de la investigación	51
3.3. Ubicación Espacial	51
a) Área de estudio (física)	51
b) Área de estudio (científico).....	52
3.4. Métodos de la investigación	52
3.4.1. Diagnóstico de la zona de estudio (laguna Iberia Sur)	52
3.4.2. Cálculo de los índices de clorofila MCI y MPH a través del procesamiento de imágenes satelitales Sentinel 2.....	54

3.4.3	Determinación de los niveles de clorofila “a” in situ y por teledetección.....	60
3.4.4.	Analizar la variación espacio-temporal de la distribución de clorofila “a” en el cuerpo de agua en el periodo 2018-2020.	67
CAPÍTULO IV		71
4	RESULTADOS Y DISCUSIONES	72
4.1.	Diagnóstico de la zona de estudio (laguna Iberia Sur)	72
4.1.1	Delimitación y descripción del área de estudio	72
4.1.2	Hidrografía.....	78
4.1.3.	Meteorología.....	81
4.1.4.	Relieve de terreno.....	82
4.1.5.	Suelo	83
4.2.	Cálculo de los índices de clorofila MCI y MPH a través del procesamiento de imágenes satelitales Sentinel 2.	84
4.2.1.	Selección y descarga de imágenes satelitales Sentinel 2A con nubosidad <15% 84	
4.2.2.	Corrección atmosférica y remuestreo de bandas satelitales	88
4.2.3.	Separación tierra-agua mediante máscara NDWI	90
4.2.4.	Cálculo de índices MCI y MPH	93
4.2.5.	Correlación de índices MCI y MPH.....	93
4.3.	Determinación de los niveles de clorofila “a” in situ y por teledetección	94
4.3.1.	Recolección y análisis de muestras de agua de la laguna Iberia	94
4.3.2.	Determinación de niveles de Clorofila “a” por teledetección	95
4.4.	Análisis de la variación espacio-temporal de la distribución de clorofila “a” en el cuerpo de agua en el periodo 2018-2020	118
4.4.1.	Cálculo de la desviación estándar, media, mínimo y máximo de la concentración de clorofila.....	118

4.4.2. Identificación y frecuencia de valores de clorofila extremos altos	126
CAPÍTULO V	132
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
5.1 Conclusiones	133
5.2 Recomendaciones	135
REFERENCIAS	137
ANEXOS	138
ANEXO N°1 – Resultados de laboratorio.....	149
ANEXO N°1.1 Resultados de laboratorio – Informe de ensayo de clorofila (28/09/2022)	150
ANEXO N°1.2 Resultados de laboratorio – Informe de ensayo de clorofila (15/03/2023)	154
ANEXO N°2 – Permiso de ingreso al Santuario Nacional Lagunas de Mejía.....	158
ANEXO N°3 – Mapas de índices MCI – MPH.....	163
ANEXO N°4 – Gráficos de dispersión de índices MCI – MPH	179
ANEXO N°5 – Mapas de concentración de Clorofila, según las ecuaciones 2 y 4.	186
ANEXO N°6 – Mapas de desviación estándar, media, mínimo y máximo de concentración de clorofila para los años 2018, 2019 y 2020.....	205

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de valores límites de la OCDE para la clasificación trófica	31
Tabla 2. Localización geográfica de la laguna Iberia	51
Tabla 3. Coordenadas de puntos de muestreo	61
Tabla 4. Cronograma de actividades de muestreo en el SNLM	65
Tabla 5. Coordenadas de Reconocimiento Inicial	72
Tabla 6. Actividades Antrópicas Reveladas	74
Tabla 7. Descripción de los ecosistemas aledaños a la laguna Iberia.....	76
Tabla 8. Características de la laguna Iberia.....	77
Tabla 9. Datos Meteorológicos del SNLM.....	81
Tabla 10. Características de imágenes descargadas del Satélite Sentinel 2	84
Tabla 11. Máscaras NDWI generadas	90
Tabla 12. Coeficiente de correlación r de Pearson por año y estación para los índices MCI y MPH	93
Tabla 13. Resultados de análisis de clorofila en laboratorio	94
Tabla 14. Resumen de estadísticos de validación de las ecuaciones empíricas	99
Tabla 15. Coeficiente de determinación (R^2) de calibración de Ecuaciones Propias.....	102
Tabla 16. Resumen de rangos y clasificación OCDE de concentraciones de clorofila.....	117
Tabla 17. Resumen de estadísticos (Desviación estándar, media, mínimo y máximo) por estaciones.....	124
Tabla 18. Resumen de estadísticos (Desviación estándar, media, mínimo y máximo) anuales y para el periodo de estudio.....	125
Tabla 19. Identificación de fechas con valores de clorofila extremos altos	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de eutrofización	29
Figura 2. Componentes de un Sistema de teledetección	35
Figura 3. Principios físicos de la teledetección	36
Figura 4. Configuración orbital del satélite Sentinel 2.....	38
Figura 5. Imágenes multiespectrales (5 bandas) e índices cuantitativos derivados.....	40
Figura 6. El espectro electromagnético aplicado a la teledetección	42
Figura 7. Vista general de la aplicación ArcMap	43
Figura 8. Mapa de ubicación del área de estudio	52
Figura 9. Portal de descarga Copernicus	55
Figura 10. Paquete de bandas descargadas en formato JP2.....	56
Figura 11. Procesamiento de corrección y remuestreo de bandas.....	57
Figura 12. Proceso de recorte de bandas por capa de máscara NDWI.....	58
Figura 13. Proceso de Calculadora ráster para hallar el índice MCI.....	59
Figura 14. Mapa de ubicación de puntos de muestreo	64
Figura 15. Cálculo del promedio de clorofila del año 2018 usando la herramienta Estadística de celda.....	68
Figura 16. Uso de Calculadora ráster para identificar los píxeles atípicos extremos altos ..	69
Figura 17. Uso de herramienta Frecuencia de igualdad para determinar la frecuencia de píxeles atípicos altos.....	70
Figura 18. Fotografías de reconocimiento inicial de la laguna Iberia Sur.....	72
Figura 19. Imagen satelital del Sistema de Lagunas del SNLM	73
Figura 20. Mapa de delimitación de la laguna Iberia Sur.....	75
Figura 21. Mapa de Ecosistemas del SNLM	76
Figura 22. Mapa de Cuenca Hidrográfica	78
Figura 23. Mapa de escorrentías.....	79
Figura 24. Drenes tributarios	80
Figura 25. Mapa de relieve de terreno.....	82
Figura 26. Mapa de Tipo de Suelo	83
Figura 27. Corrección y remuestreo de bandas satelitales	88

Figura 28. Gráfica de dispersión de Concentración de clorofila estimada por la Ecuación 1 vs Concentración de clorofila in situ	96
Figura 29. Gráfica de dispersión de Concentración de clorofila estimada por la Ecuación 2 vs Concentración de clorofila in situ	97
Figura 30. Gráfica de dispersión de Concentración de clorofila estimada por la Ecuación 3 vs Concentración de clorofila in situ	98
Figura 31. Gráfica de dispersión de Concentración de clorofila estimada por la Ecuación 4 vs Concentración de clorofila in situ	99
Figura 32. Gráfica de dispersión de índice MCI vs Concentración de clorofila in situ	100
Figura 33. Gráfica de dispersión de índice MPH vs Concentración de clorofila in situ	101
Figura 34. Concentración de Clorofila para verano 2018 – Ecuación Propia MPH	102
Figura 35. Concentración de Clorofila para otoño 2018 – Ecuación Propia MPH	104
Figura 36. Concentración de Clorofila para invierno 2018 – Ecuación Propia MPH	105
Figura 37. Concentración de Clorofila para primavera 2018 – Ecuación Propia MPH	106
Figura 38. Concentración de Clorofila para verano 2019 – Ecuación Propia MPH	107
Figura 39. Concentración de Clorofila para otoño 2019 – Ecuación Propia MPH	109
Figura 40. Concentración de Clorofila para invierno 2019 – Ecuación Propia MPH	110
Figura 41. Concentración de Clorofila para primavera 2019 – Ecuación Propia MPH	111
Figura 42. Concentración de Clorofila para verano 2020 – Ecuación Propia MPH	112
Figura 43. Concentración de Clorofila para otoño 2020 – Ecuación Propia MPH	113
Figura 44. Concentración de Clorofila para invierno 2020 – Ecuación Propia MPH	114
Figura 45. Concentración de Clorofila para primavera 2020 – Ecuación Propia MPH	116
Figura 46. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila de la estación de verano	119
Figura 47. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila de la estación de otoño	120
Figura 48. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila de la estación de invierno	121
Figura 49. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila de la estación de primavera	122

Figura 50. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila por píxel para el total del periodo de estudio..... 123

Figura 51. Gráfico de concentración de clorofila media estacional - anual 125

Figura 52. Mapa de identificación y frecuencia de píxeles atípicos extremos altos 128

ÍNDICE DE ÍNDICES

Índice 1. Índice de Clorofila Máxima (MCI) 33

Índice 2. Índice de Altura Máximo de Pico (MPH) 33

Índice 3. Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI)..... 57

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Relación con MCI - 1 66

Ecuación 2. Relación con MCI - 2 66

Ecuación 3. Relación con MPH - 3 66

Ecuación 4. Relación con MPH - 4 66

Ecuación 5. Valores atípicos extremos altos 69

Ecuación 6. Ecuación Propia MCI 101

Ecuación 7. Ecuación Propia MPH 101

RESUMEN

A nivel mundial se puede evidenciar la vulnerabilidad de los cuerpos de agua a los efectos de la contaminación, como resultado de las actividades antrópicas. El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el estado trófico de la laguna Iberia Sur mediante la correlación de índices de clorofila "a" y técnicas de teledetección durante el período 2018-2020. El diagnóstico ambiental permitió establecer una línea base para el estudio, incluyendo aspectos como la hidrografía, meteorología y relieve del terreno; revelando que la laguna es susceptible a procesos de eutrofización. La correlación MCI-MPH demostró distintos patrones anuales y estacionales, con una correlación más alta en verano y otoño, y mucho menor el año 2020; sin embargo, ambos índices resultaron idóneos para calcular las concentraciones de clorofila en la Laguna Iberia Sur. Se generó una ecuación propia que relaciona el índice MPH con mediciones *in situ*, obteniendo un R^2 de 0.8274.

Los niveles más altos de clorofila se registraron en la primavera de 2018 y 2019, lo que sugiere un ambiente propicio para la proliferación de algas o fitoplancton. La estación de invierno, en especial la del año 2018, también mostró altas concentraciones de clorofila, desafiando la expectativa de niveles más bajos debido a la reducción de luz solar y temperaturas más frías. Del 2018 al 2019, se notó un incremento en la concentración de clorofila en verano y una disminución en primavera. En 2020, se registró una disminución general en todas las estaciones.

Para el periodo 2018 – 2020, los valores medios de concentración, según la clasificación trófica de la OCDE, mostraron que la laguna Iberia Sur posee un estado primordialmente eutrófico. Las estaciones de verano y otoño indicaron categorías de lago mesotrófico - eutrófico, mientras que las estaciones de invierno y primavera mostraron categorías de lago eutrófico - hipereutrófico.

PALABRAS CLAVE

Eutrofización, Teledetección de cuerpos de agua, Índice de Clorofila Máximo (MCI), Altura Máxima de Pico (MPH), Clorofila a, Sentinel 2.

ABSTRACT

At a global level, the vulnerability of water bodies to the effects of pollution as a result of anthropogenic activities can be evidenced. The main objective of this research was to evaluate the trophic status of the Iberia Sur lagoon by correlating chlorophyll "a" indices and remote sensing techniques during the period 2018-2020. The environmental diagnosis made it possible to establish a baseline for the study, including aspects such as hydrography, meteorology and terrain relief; revealing that the lagoon is susceptible to eutrophication processes. The MCI-MPH correlation showed distinct annual and seasonal patterns, with a higher correlation in summer and fall, and much lower in 2020; however, both indices were suitable for calculating chlorophyll concentrations in the South Iberia Lagoon. A proprietary equation was generated that relates the MPH index with in situ measurements, obtaining an R^2 of 0.8274.

The highest chlorophyll levels were recorded in the spring of 2018 and 2019, suggesting an environment conducive to algal or phytoplankton blooms. The winter season, especially in 2018, also showed high concentrations of chlorophyll, defying expectations of lower levels due to reduced sunlight and cooler temperatures. From 2018 to 2019, an increase in chlorophyll concentration was noted in summer and a decrease in spring. In 2020, an overall decline was recorded across all seasons.

For the period 2018 – 2020, the average concentration values, according to the OECD trophic classification, showed that the Iberia Sur lagoon has a primarily eutrophic state. The summer and autumn seasons indicated mesotrophic lake categories - eutrophic, while the winter and spring seasons showed eutrophic lake categories - hypereutrophic.

KEYWORDS

Eutrophication, Remote sensing of water bodies, Maximum Chlorophyll index (MCI), Maximum Peak Height (MPH), Chlorophyll a, Sentinel 2.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se puede evidenciar la vulnerabilidad de los cuerpos de agua a los efectos de la contaminación, como resultado de las actividades antrópicas que acarrear consecuencias como la carga de nutrientes y la eutrofización de los humedales que sigue siendo una de las mayores problemáticas en materia de calidad de estas aguas (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2018).

Este proceso de eutrofización se ha incrementado en los últimos años debido al crecimiento poblacional urbano acompañado de actividades antropogénicas como agricultura, piscicultura, ganadería, etc., ocasionando mayor concentración de residuos sólidos y líquidos, los cuales intensifican la concentración de nutrientes en los cuerpos de agua lénticos ya que para mejorar la producción en estas actividades muchas veces se requiere de nutrientes adicionales (Mateu, 2016).

Los humedales del SNLM forman parte de la lista de los 13 sitios que hay en el Perú del Convenio Internacional Ramsar, localizados a lo largo del litoral nacional, y también son considerados en la Estrategia Regional para la Conservación y utilización sostenible de la Diversidad Biológica, pues son ecosistemas de gran biodiversidad y servicios ecosistémicos vitales para las poblaciones de aves acuáticas, residentes y migratorias sirviendo como ambiente propicio para el descanso de diversas especies en sus rutas migratorias (Carpio, 2019).

La discontinuidad de datos referentes al estado trófico, sobre todo en ecosistemas frágiles como el SNLM, muestra el descuido en mantener en condiciones apropiadas este recurso hídrico que brinda una amplia gama de beneficios (Zúñiga, 2020). Estos vacíos de datos provocan que no se tenga conocimiento de cómo ha sido y es la calidad de agua de las lagunas en el transcurrir del tiempo (Quezada, 2020).

Al considerar que sólo existen datos discontinuos de monitoreo in situ y ninguno sobre niveles de clorofila, siendo material insuficiente para la adecuada gestión de las aguas lagunares, es que esta investigación es de utilidad para su gestión e investigaciones posteriores



CAPITULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la investigación

El fenómeno de eutrofización en aguas ocurre por el enriquecimiento de nutrientes de manera natural o antropogénica, ocasionando proliferación de algas y otras plantas acuáticas invasivas las cuáles sedimentan y acumulan al morir en el fondo de los lagos, originando residuos orgánicos que al descomponerse consumen gran cantidad de oxígeno disuelto y; por consiguiente, alteran la biota acuática provocando su muerte por asfixia (Moreta, 2008; Soncco & Alvarez, 2020). La eutrofización es el comienzo de una cadena completa de eventos de enriquecimiento de nutrientes, crecimiento y muerte de fitoplancton, acumulación de sedimentos, crecimiento bacteriano, producción y acumulación de toxinas, hipoxia y asfixia de organismos superiores (EPA, 2018; Nebel & Wright, 1999). Este proceso se ha incrementado en los últimos años debido al crecimiento poblacional urbano acompañado de actividades antropogénicas como agricultura, piscicultura, ganadería, etc., ocasionando mayor concentración de residuos sólidos y líquidos, los cuales intensifican la concentración de nutrientes en los cuerpos de agua lénticos ya que para mejorar la producción en estas actividades muchas veces se requiere de nutrientes adicionales como el nitrógeno y fósforo. Pero como no suelen utilizarse por completo, el porcentaje restante aumenta significativamente el estado trófico en las lagunas (Mateu, 2016).

Los humedales son considerados uno de los ecosistemas más complejos y productivos del mundo, pero a la vez más susceptibles ante cualquier cambio en su medio. Hoy se encuentran amenazados por el crecimiento urbano, la contaminación y la expansión agrícola sin planificación, siendo considerado el proceso de eutrofización como el principal causante de contaminación hídrica, tanto por la cantidad de masas de agua afectadas, como por las diversas consecuencias sociales, económicas y ambientales de este tipo de contaminación (Bellido, 2019).

El Santuario Nacional Lagunas de Mejía (SNLM) fue declarado Área Natural Protegida el 24 de febrero de 1984 con una extensión de 690,60 hectáreas con el objetivo de conservar el hábitat óptimo de poblaciones de aves migratorias y endémicas, flora silvestre típica de estos

ecosistemas y sus recursos naturales (Jefatura del Santuario Nacional Lagunas de Mejía, 2001). Al ser uno de los humedales más importantes en la zona costera del Pacífico pertenece a la convención RAMSAR y es considerado desde el 2008 como Área de Importancia para la Conservación de Aves-IBA por la Birdlife International (SERNANP, 2015)

Las Lagunas de Mejía se han visto seriamente afectadas por rehabilitación de tierras agrícolas de irrigaciones colindantes, manifiestan colmatación y pérdida de su espejo lagunar, poniendo en riesgo a la flora y fauna existente en el lugar, significando la pérdida de gran parte del humedal. La calidad del agua en las lagunas se ve afectada por efectos de pesticidas y agroquímicos usados en la actividad agrícola aledaña al ANP, además de residuos sólidos, ingreso de aguas residuales y arrastre de gran cantidad de sedimentos que acceden por filtración, escorrentías superficiales y un sistema de drenes de las Irrigaciones Iberia, la Ensenada; alterando la cadena trófica de este ecosistema y favoreciendo los procesos de eutrofización en el cuerpo de agua (Cheneaux, 2015; Riva & Fau, 2020) Debido a que el SNLM se encuentra ubicado en una zona de transición sujeta a diferentes cambios físicos y químicos donde la actividad agrícola y la actividad antropogénica es poco controlada, es una desventaja para su conservación la insuficiente información y estudios para la cuantificación o estimación del estado trófico (Zúñiga, 2020).

1.2. Formulación del Problema

Según los niveles de índices de clorofila "a" a determinarse en la presente investigación, en combinación con técnicas de teledetección satelital, ¿qué grado de eutrofización se determinaría en la Laguna Iberia Sur del Santuario Nacional de Lagunas de Mejía, departamento de Arequipa, para el período comprendido entre 2018 y 2020?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el estado trófico de la laguna Iberia Sur (Santuario Nacional Lagunas de Mejía) mediante la correlación de índices de clorofila "a" y técnicas de teledetección, para el periodo 2018-2020.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico ambiental de la zona de estudio (laguna Iberia Sur) dentro del Santuario Nacional Lagunas de Mejía.
- Calcular el índice de clorofila MCI y MPH a través del procesamiento de imágenes satelitales Sentinel 2A.
- Determinar los niveles del parámetro de clorofila “a” in situ y por teledetección.
- Analizar la variación espacio-temporal de la distribución de clorofila “a” en el cuerpo de agua en el periodo 2018-2020.

1.4. Justificación

a) Ambiental

Los humedales, reconocidos como uno de los ecosistemas más productivos del planeta que brindan además variados servicios ecosistémicos están actualmente en peligro debido al crecimiento urbano desorganizado, la polución y la expansión agrícola sin una planificación adecuada (Cheneaux, 2015). El Santuario Nacional Lagunas de Mejía (SNLM) es un Área Natural Protegida (ANP), sitio RAMSAR y Área de Importancia para la Conservación de Aves – IBA, con múltiples servicios ecosistémicos: reserva de biodiversidad, mantención de cadena trófica, retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes, depuración de aguas, recarga de aguas subterráneas, brindar materias primas y recursos naturales, zona de descanso y reproducción de aves migratorias y permanentes, valor cultural, recreación y turismo; por eso la necesidad de la conservación de estos humedales (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2018).

La falta de una cuantificación o estimación del estado trófico de las lagunas es una desventaja para su protección, ya que se sitúa en una zona de transición donde la actividad agrícola y humana no está adecuadamente regulada (Zúñiga, 2020). El uso de imágenes satelitales tomadas en diferentes fechas brinda la oportunidad de comprender el desarrollo de la contaminación y la respuesta de los humedales a las estrategias de conservación y recuperación (Loayza et al., 2017), permitiendo prevenir impactos negativos que puedan alterar los servicios ecosistémicos que esta ANP ofrece.

Cabe resaltar que para la zona de las lagunas del SNLM este trabajo de tesis es el primero relacionado con el estado trófico de estos cuerpos de agua, por lo que servirá como precedente para futuras investigaciones que fortalezcan la gestión y conservación de esta ANP.

b) Económica - social

La aportación de los humedales al bienestar de las personas suele ser ignorada o infravalorada en muchas ocasiones, por lo tanto, la pérdida de sus bienes y servicios tiene repercusiones tanto en el ámbito económico como en el social. La baja calidad del agua deteriora los humedales, pero, por otro lado, los humedales mejoran la calidad del agua gracias a los servicios de regulación que ofrecen como ecosistema (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2018), por lo que el conocer el estado trófico de las lagunas permitirá planificar acciones y tomar decisiones para su adecuada gestión, de tal manera que la población local tenga un libre acceso a los servicios ecosistémicos brindados, así como también a materia prima para la elaboración de artesanías (sillas, mesas, pisos, canastas, esteras, persianas, alfombras, sombreros) que son un aporte económico importante en el lugar, sobre todo en los meses de verano (Jefatura del Santuario Nacional Lagunas de Mejía, 2001).

Así mismo, este trabajo de tesis será un paso importante en la conservación de estos cuerpos lagunares, siendo beneficioso para los tres tipos de atractivos turísticos del SNLM: biodiversidad, paisajes y actividades de producción (aprovechamiento de Matara y Junco), lo cual generará una fuente de ingreso importante para la población de la provincia de Islay, la región Arequipa y la macrorregión Sur, aumentando el valor económico y sociocultural al Santuario.

c) Científica

La discontinuidad de datos referentes al estado trófico, sobre todo en ecosistemas frágiles como el Santuario Nacional Lagunas de Mejía, muestra el descuido en mantener en condiciones apropiadas este recurso hídrico que brinda una amplia gama de beneficios a la población local y nacional. El empleo de imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica será una herramienta de gestión para la actualización de datos para el SNLM sobre estado trófico del cuerpo de agua, apoyando así a la adecuada gestión de sus recursos naturales (Carpio, 2019).

Este trabajo de investigación es de importancia científica al ser realizado para una zona perteneciente a un ANP que a su vez es un sitio Ramsar e IBA, teniendo en cuenta que no se dispone de investigaciones previas ni de datos suficientes para su manejo y gestión, se presenta una oportunidad para llevar a cabo estudios posteriores sobre el tema.

d) Institucional

La vigilancia y monitoreo de calidad de agua de la laguna mediante imágenes satelitales favorece a la implementación de las líneas de acción establecidas en el aspecto ambiental del Plan Maestro del Santuario Nacional Lagunas de Mejía, el cual es reconocido como IBA y protegido por la Convención RAMSAR, ésta última establece la prioridad a la cartografía de zonas húmedas recomendando el uso de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica para elaborar inventarios de humedales (SERNANP, 2015). Considerando que sólo existen datos discontinuos de monitoreo in situ, los cuales son insuficiente para la adecuada gestión de las aguas lagunares, es que esta investigación es de utilidad para su gestión e investigaciones posteriores.



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

A nivel global, la principal preocupación en lo que respecta a la calidad del agua son la sobrecarga de nutrientes y la eutrofización de los humedales. Previéndose que la degradación aumentará conforme persistan el cambio climático, el progreso económico y la expansión e intensificación de la actividad agrícola, lo cual dará lugar a mayores riesgos para el bienestar humano, los humedales y el desarrollo sostenible (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2018).

Los grandes lagos de América del Norte están experimentando una mayor eutrofización debido al aumento de las fuentes difusas provenientes de la agricultura y los céspedes domésticos, tal es el caso del lago Erie que se está volviendo más eutrófico, ante esta situación, Mollae (2018) da seguimiento a las floraciones algales usando el potencial de los datos de Sentinel-3 y Sentinel-2 evaluó la capacidad del procesador temático del agua, el índice máximo de clorofila (MCI) y el MCI S2, con el fin de estimar la concentración de clorofila. Los resultados muestran que los algoritmos FLH se limitan a lagos con concentraciones de clorofila menores a 8 mg/m³. Sugiriéndose el MCI de Sentinel-3 para concentraciones mayores de 20 mg/m³ y el MCI de Sentinel 2 para concentraciones mayores a los 8 mg/m³; por lo que este último índice logró un mayor rendimiento para la recuperación de clorofila “a”.

Casi un tercio de las masas de agua en 17 países miembros de la Unión Europea son impactadas por la eutrofización, principalmente debido a la contaminación difusa, esto se evidencia en la investigación de Peppia et al. (2020) donde mediante la aplicación de algoritmos de detección de clorofila, y el uso de imágenes satelitales Sentinel-2 se investiga la eutrofización en el lago para el periodo 2016-2018. Los algoritmos utilizados son el Índice Máximo de Clorofila (MCI) y Altura Máxima de Pico (MPH) aplicados a los datos de reflectancia de la parte superior de la atmósfera. Ambos algoritmos se correlacionaron entre ellos y se estimó la concentración de clorofila “a” aplicando una ecuación empírica que correlaciona dichos índices y la concentración de clorofila; para

luego analizar e interpretar con métodos estadísticos espaciales, para entender el patrón de distribución espacial de la eutrofización en el área de estudio; los resultados demostraron que el lago Pamvotis en Grecia es un lago eutrófico y que la mayor concentración de clorofila se encuentra en el este y sureste del lago. Bajo este mismo enfoque Shaik et al. (2021) analizó la distribución espacio temporal de la clorofila-a en las aguas turbias costeras de Yanan y Kakinada utilizando algoritmos de altura de línea de fluorescencia (FLH) y el índice máximo de clorofila (MCI) a partir de datos Sentinel-2 y Sentinel-3 donde se demostró que el producto del S2MCI daba mejores resultados en comparación al S3MCI, con un error cuadrático medio $RMSE=0,73$ y $RMSE=0.59$ respectivamente. De manera similar Merve & Ates (2018) analizó la distribución espacio temporal de la clorofila-a en la bahía de Marmaris, Turquía, usando un algoritmo de combinación de bandas mostrando resultados con valores de rango de clorofila entre 0.01 a 5.5 $\mu\text{g/L}$ para mayo de 2017 y valores de 0.028 a 8.00 $\mu\text{g/L}$ para mayo de 2018.

Existen en la literatura variado número de ecuaciones o modelos empíricos para estimar la concentración de clorofila como indicador de la eutrofización de un cuerpo de agua y la biomasa de fitoplancton presente, tal es el caso de Grendaitè et al. (2018) que comprobó la idoneidad de los datos de Sentinel-2 Imagen Multiespectral para observar las floraciones de cianobacterias en los lagos eutróficos de Lituania probando ecuaciones empíricas derivadas de otros estudios para comprobar si podían utilizarse sin necesidad de adaptarla a las condiciones locales. Casos similares reportan Soria-Perpinyá et al. (2021), Bellido (2019) y Rodriguez (2019), cuyos estudios también utilizaron imágenes satelitales Sentinel 2 al igual que algoritmos que fueron validados mediante estadísticas de error como el coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE) y error cuadrático medio relativo (RRMSE). Otro caso es el de Bramich et al. (2021) que realiza la validación de una versión mejorada de un algoritmo semi analítico de recuperación de clorofila consiguiendo La mejora del rendimiento mediante la sustitución de un coeficiente de absorción específico de clorofila fijo (a^*) por un modelo variable.

Otro antecedente relevante a nivel mundial se realizó en la región este de China donde se desarrolló un nuevo modelo empírico para mapear el estado trófico del cuerpo hídrico, por lo que se calculó el TSI in situ y se dividió aleatoriamente en un conjunto de datos para calibración y validación en MATLAB 14.0. Adicionalmente se evaluó el rendimiento teniendo en cuenta el coeficiente de regresión, la pendiente de ajuste y los errores, utilizando estos resultados para establecer el modelo TSI. Finalmente, el modelo de TSI resultante se utilizó para cartografiar las distribuciones del estado trófico de los lagos en la región de estudio dándonos como resultados que más lagos eran eutróficos en otoño (94,28%) que en primavera (>77,14%), lo que indica una grave eutrofización de los lagos orientales (S. Li et al., 2022).

Y. Li et al. (2022) desarrolló modelos de recuperación de la concentración de Clorofila-a con espectros simulados de Sentinel-2 MSI para las concentraciones de Chla in situ en el embalse de Pingzhai. Se descargaron imágenes de Sentinel-2 MSI que fueron corregidas atmosférica, radiométrica y resampleadas usando Sen2Cor del programa SNAP. Se simuló la reflectancia de la banda de teledetección de Sentinel-2 y se aplicó un Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI). Finalmente se llevó a cabo un análisis estadístico usando indicadores estadísticos (coeficiente de determinación, R^2 , y error cuadrático medio (RMSE) para examinar si los valores estimados y medidos eran coherentes y para evaluar la precisión del modelo. El modelo desarrollado fue tan acertado que está siendo aplicado a cuerpos lagunares cerca del lugar de estudio.

En regiones semiáridas de Brasil se utilizaron imágenes de reflectancia TOA nivel 1C de Sentinel-2 para estimar remotamente la concentración de clorofila-a, donde el método espectrofotométrico fue el utilizado por el laboratorio para analizar la concentración de clorofila recogida in situ. Se adoptó un modelo empírico de reflectancia ampliamente utilizado en la literatura para aguas interiores. Como resultados los productos de nivel 1C se comportaron bien logrando un RMSE relativo del 28% y un $R^2=0.80$. Durante el año 2019, la calidad del agua del embalse mostró una fuerte variación, con una concentración que fluctúa entre 30 y 95 $\mu\text{g/L}$, indicando un estado eutrófico e hipereutrófico (Aranha et al., 2022).

A nivel nacional la mayor parte de antecedentes relevantes con los que se cuenta pertenecen a investigaciones en cuerpos lagunares como el que describe Carrasco (2020) quien realiza un estudio del nivel de eutrofización en la laguna San Nicolás, Cajamarca, mediante teledetección satelital en un periodo de 20 años. A través de la evaluación de parámetros como la concentración de turbiedad y clorofila “a”, y las metodologías de Carlson y el Índice de Estado Trófico (TSI) para la evaluación del cuerpo de agua, obteniendo resultados positivos que, por medio de una correlación de ambos, se observó que la Laguna de San Nicolás paso de un estado eutrófico a mesotrófico en un periodo de 20 años.

El trabajo de Loayza et al. (2017) tuvo como finalidad evaluar el grado de contaminación del humedal El Cascajo mediante la caracterización de parámetros fisicoquímicos y la técnica de teledetección. Se realizó la combinación de bandas de los diferentes espectros para los años estudiados lográndose imágenes de falso color (COLOR NIR 4-3-2), clasificación supervisada de imágenes e índice de vegetación (MCI). Estos valores fueron comparados con los valores de Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para este tipo de cuerpo de agua. Obteniendo como resultado que el humedal se encuentre en un estado de eutrofización avanzada.

La investigación de Gonzales & Solano (2019) tuvo como objetivo evaluar el estado trófico de la Laguna de Paca, mediante teledetección y datos in situ a través de la cuantificación de 3 indicadores que son la clorofila “a”, fosfato y transparencia en los meses de abril, mayo y noviembre del 2019. Ambos valores se correlacionaron (satélite y campo) generando así una ecuación que permita obtener una imagen con valores en unidades conocidas de cada indicador. Concluyendo así que el estado trófico de la Laguna de Paca va de eutrófico a hipereutrófico.

2.2. Marco Teórico

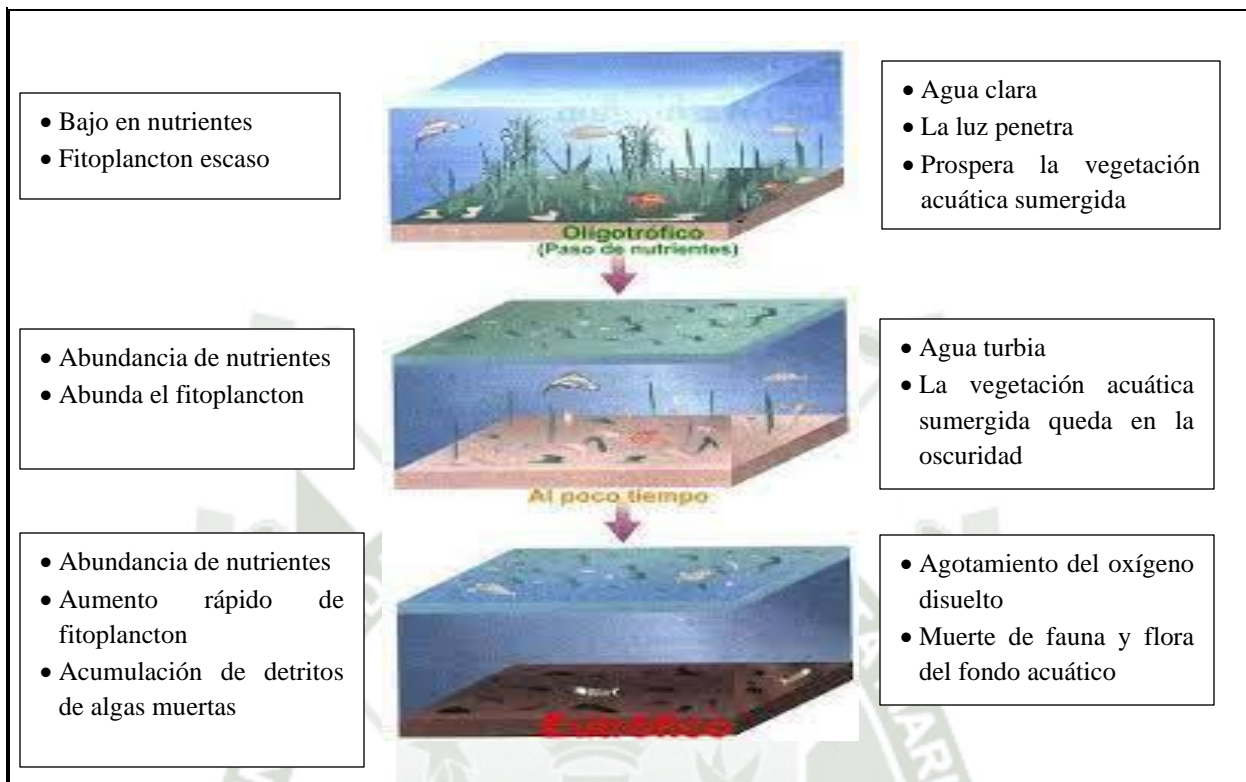
2.2.1. Eutrofización

La eutrofización es el proceso ecológico, natural o antropogénico, más importante y común de contaminación en las masas de aguas interiores, ya sea por la cantidad numérica de masas de agua afectadas hoy en día, como por las diversas e importantes consecuencias sociales, económicas y ambientales que este tipo de contaminación acarrea. El exceso de nutrientes de las aguas residuales, los residuos industriales, la agricultura o la acuicultura causan eutrofización, que cambia la diversidad biológica, la calidad del agua, la biomasa y los niveles de oxígeno (Duan et al., 2006; Peppia et al., 2020; Zhang et al., 2016).

La OCDE define la eutrofización como: “enriquecimiento de las aguas con sustancias nutritivas que conducen generalmente a modificaciones sintomáticas tales como producción acelerada de algas y plantas acuáticas, degradación de la pesca, deterioro de la calidad del agua, así como de todos sus usos en general”. La presencia de eutrofización se asocia comúnmente con la aparición de una capa verde limo que reduce la penetración de la luz, así como la mezcla de oxígeno, lo que limita el crecimiento de otras especies en la masa de agua (Mssanzya, 2010).

El proceso de eutrofización está relacionado a la tendencia de la calidad de agua que influye fuertemente en la producción primaria a través de la fotosíntesis que utiliza la energía solar, el dióxido de carbono, el agua, el nitrato, el fosfato y otros oligoelementos para producir fitoplancton y oxígeno disuelto como producto final. La adición externa de nutrientes, por escorrentía agrícola u otras causas, aumentará considerablemente el proceso de fotosíntesis, manteniendo constantes los demás factores, originando competencia por los recursos entre las especies debido al aumento en su población (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2018).

Figura 1. Proceso de eutrofización



Fuente: (Nebel & Wright, 1999)

2.2.1.1. Clorofila “a”

La clorofila es el pigmento fotorreceptor que permite a las algas utilizar la luz solar para fabricar su propio alimento. De hecho, la mayoría de las algas dependen tanto de los pigmentos de clorofila para sobrevivir que una medición de la concentración de todos los pigmentos de clorofila en una muestra de agua puede utilizarse para estimar en forma indirecta la cantidad total de biomasa de algas y fitoplancton que flotan libremente en esa masa de agua (Bellido, 2019; Dimberg et al., 2013).

La clorofila “a” es el pigmento verde dominante que se encuentra en todas las especies de fitoplancton que forman el elemento base de la producción primaria de los cuerpos de agua, pues indica la biomasa fitoplanctónica presente. Por ello la concentración de clorofila “a” puede utilizarse como un parámetro de calidad del agua para indicar el estado trófico de los cuerpos de agua (Florida Lake Watch, 2015).

2.2.1.2. Teledetección en el seguimiento y evaluación de la eutrofización

El uso de datos de observación de la Tierra obtenido por los sensores remotos, entre ellos Sentinel 2, combinado con mediciones in situ, es una herramienta fiable y asequible para controlar y predecir la eutrofización en aguas continentales. La teledetección por satélite permite estimar las concentraciones acuáticas de clorofila midiendo la radiación visible que deja el agua en cada longitud de onda, siendo mayor absorptividad cuanto mayor sea la longitud de onda (Chuvieco, 1995).

Las técnicas de teledetección proporcionan un mejor conocimiento espacial de las variables ambientales y mejoran el contenido de la información sobre la calidad del agua continental al estar ésta caracterizada ópticamente por altas concentraciones de materia suspendida coloreada, diversos pigmentos de fitoplancton y materia orgánica disuelta coloreada. Con la mejora de la resolución espacial y espectral de los sensores la teledetección por satélite se ha utilizado para vigilar las aguas interiores mediante la correlación entre la reflectancia de bandas y otras propiedades de la columna de agua, como la profundidad del disco de Secchi, concentraciones de clorofila, carga de pigmentos, sedimentos suspendidos totales, temperatura y datos de calidad de agua analizados en un laboratorio (Qiu et al., 2006).

2.2.1.3. Índices de Estado Trófico

2.2.1.3.1. Índice del estado trófico de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE)

En 1982 la OCDE propuso una clasificación del grado de eutrofia de lagos y embalses proporcionando categorías de estado trófico para estos cuerpos de agua a partir del análisis de nutrientes (concentración de fósforo), de la capacidad de generar biomasa (clorofila “a”) y de la disponibilidad de espectro fotosintético en la vertical de la columna de agua (transparencia de la columna de agua). La Tabla 1 muestra la clasificación de los cuerpos de agua según la concentración de clorofila “a” (Carrasco, 2020; Moreno et al., 2010).

- Ultraoligotrófico: Cuerpo de agua muy pobre en nutrientes, posee aguas claras, permitiendo una gran penetración de la luz solar. La concentración de clorofila característico de este cuerpo de agua es $< 1\mu\text{g/L}$
- Oligotrófico: Representa el estado normal y saludable de un ecosistema, pobre en nutrientes, el agua posee una transparencia considerable y con presencia de peces. La concentración de clorofila característico de este cuerpo de agua se encuentra entre $1 - 2.5 \mu\text{g/L}$.
- Mesotrófico: Poseen un nivel intermedio de nutrientes, de productividad moderada, claridad de agua y muestra signos emergentes de problemas de calidad de agua. Los valores de clorofila característicos en este cuerpo de agua van entre los 2.5 a $8 \mu\text{g/L}$.
- Eutrófico: la masa de agua es rica en nutrientes, muy productiva en términos de vida animal y vegetal acuática, poca claridad de agua y muestra signos crecientes de problemas de calidad del agua. Los valores de clorofila son entre 8 a $25 \mu\text{g/L}$.
- Hipereutrófico: Excesivo contenido de nutrientes, muy poca claridad de agua y abundantes plantas acuáticas; los problemas de calidad de agua son graves y casi continuos. La vegetación que se encuentra por debajo del umbral fótico muere y muchas de las algas flotantes se hunden hasta el fondo del cuerpo de agua debido al agotamiento de nutrientes causado por el crecimiento exponencial de estas algas. Los valores de clorofila “a” son mayores a los $25 \mu\text{g/L}$.

Tabla 1. Resumen de valores límites de la OCDE para la clasificación trófica

Categoría Trófica	Clorofila “a” ($\mu\text{g/L}$)	Profundidad Secchi (metros)	Fósforo total ($\mu\text{g/L}$)
Ultraoligotrófico	< 1	> 12	< 4
Oligotrófico	1 a 2.5	$6 - 12$	4 a 10
Mesotrófico	2.5 a 8	$3 - 6$	10 a 35

Eutrófico	8 a 25	1.5 – 3	35 a 100
Hipereutrófico	>25	< 1.5	> 100

Fuente: (López & Madroño, 2015)

2.2.1.3.2. Índices basados en la relación NIR/Red

La relación de bandas entre el infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (Red) se utiliza frecuentemente para estimar la clorofila “a” en las aguas debido a una reflectividad positiva de la clorofila “a” en el NIR y un comportamiento inverso en el rojo (Yang et al., 2017). Estos algoritmos NIR-Red han demostrado también tener el mejor rendimiento para diferentes tipos de fuentes de datos, incluyendo la reflectancia hiperespectral in situ, la reflectancia de banda ancha simulada o la reflectancia derivada del satélite; permitiendo inferir datos de distribución espacial de clorofila incluso sin realizarse ningún tipo de corrección atmosférica (Le et al., 2013; Moses et al., 2012; Pirasteh et al., 2020).

Índices de clorofila máxima (MCI)

El índice MCI se desarrolló originalmente para los datos del sensor MERIS con el propósito de producir datos diarios para el seguimiento, detección y cartografía del fitoplancton y la vegetación acuática. El MCI mide la altura de su pico de reflectancia a 705nm del espectro electromagnético, mientras que se utiliza como línea de base para el rango entre las regiones de 665nm y 740nm para las bandas de Sentinel-2. La amplitud del pico cerca de los 705nm se asocia a niveles elevados de clorofila en los océanos, aguas costeras y terrestres. La optimización del algoritmo MCI se ha logrado mediante la inclusión de un factor para que su eficacia no se vea afectada por las nubes finas (Binding et al., 2013; Mollae, 2018).

Según Peppas et al. (2020), el MCI aplicado a los datos Sentinel-2 se describe en el Índice 1.

Índice 1. Índice de Clorofila Máxima (MCI)

$$MCI = B5 - 1.005 \left[B4 + \frac{(B6 - B4)(\lambda_{B5} - \lambda_{B4})}{(\lambda_{B6} - \lambda_{B4})} \right]$$

Donde B4, B5 y B6 son la reflectancia y $\lambda_{B4} = 665$ nm, $\lambda_{B5} = 705$ nm y $\lambda_{B6} = 740$ nm son las longitudes de onda centrales de las bandas correspondientes de Sentinel-2.

Altura Máxima de Pico (MPH)

Este algoritmo es una modificación del MCI. Define una longitud de onda a 705nm del espectro electromagnético para las bandas Sentinel-2 definiéndola como punto máximo de reflectancia en las aguas eutróficas y es el punto activo de la clorofila (Grendaité et al., 2018).

El MPH está diseñado para proporcionar la determinación del estado trófico y para manejar tres tipos de aguas: (1) aguas mixtas oligotróficas/mesotróficas con biomasa baja o media; (2) biomasa alta en aguas eutróficas y (3) biomasa extremadamente alta con algas o vegetación acuática en suspensión en la superficie (Matthews et al., 2012).

Según Peppas et al. (2020), el MPH aplicado a los datos Sentinel-2 se calcula según el Índice 2:

Índice 2. Índice de Altura Máximo de Pico (MPH)

$$MPH = B5 - B4 - \frac{(B8A - B4)(\lambda_{B5} - \lambda_{B4})}{\lambda_{B8A} - \lambda_{B4}}$$

Donde B4, B5 y B8A son la reflectancia y $\lambda_{B4} = 665$ nm, $\lambda_{B5} = 705$ nm y $\lambda_{B8A} = 865$ nm son las longitudes de onda centrales de las bandas correspondientes de Sentinel-2.

2.2.1.1. La Teledetección

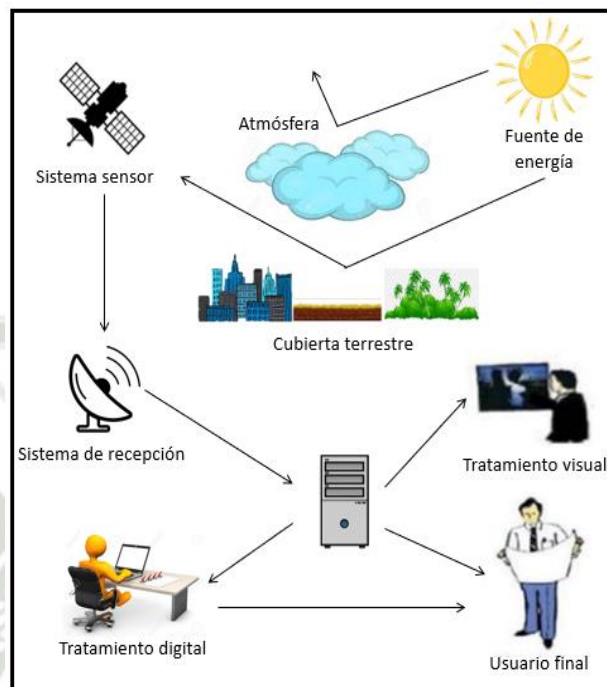
La curiosidad de la humanidad por comprender e interpretar su entorno es la que ha permitido el desarrollo de la teledetección hasta la actualidad. La teledetección o percepción remota “Remote sensing” integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías usadas para la observación, análisis e interpretación de fenómenos terrestres

y atmosféricos, teniendo como principales fuentes de información a las medidas e imágenes obtenidas a través de las plataformas y sensores satelitales (González et al., 2013).

La gran cantidad de plataformas y sensores que actualmente se encuentran en órbita proporcionan una gran fuente de datos y unido al avance de la tecnología empleada proporciona una nueva forma de estudiar la superficie terrestre.

Según Chuvieco (1995), Un sistema de teledetección espacial está conformado por los siguientes elementos:

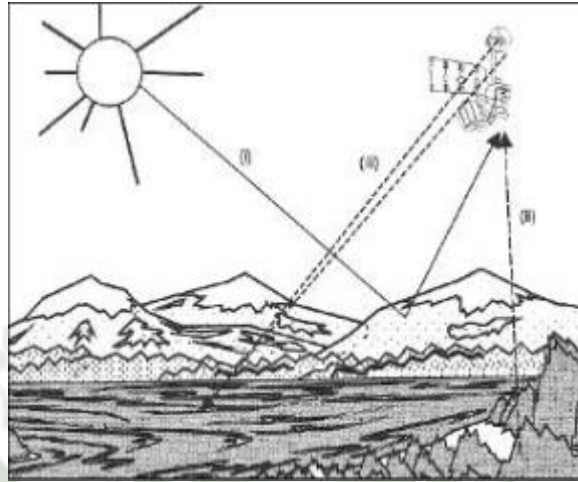
- a) Fuente de energía: el origen de la radiación electro magnética que detecta el sensor. Pudiendo ser pasiva si es un foco externo a éste, o activa si es mediante un haz energético emitido por el sensor.
- b) Cubierta terrestre: conformada por diversas masas de suelo, vegetación, agua e infraestructuras humanas que reciben la señal energética de la fuente y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
- c) Sistema sensor: compuesto por el sensor y la plataforma que lo alberga. Tiene por objetivo recibir y/o captar la energía procedente de la cubierta terrestre, codificarlas y grabarlas o enviarla directamente al sistema de recepción.
- d) Sistema de recepción-comercialización: aquí se recibe la información transmitida por la plataforma/sensor, grabándose en un formato apropiado, para realizar las respectivas correcciones y así distribuirlo a los interesados.
- e) Intérprete: convierte los datos en información temática de interés, ya sea visual o digital, con la finalidad de facilitar la evaluación del problema en estudio.
- f) Usuario final: encargado del análisis del documento obtenido de la interpretación, así como de dictaminar las consecuencias que deriven de éste.

Figura 2. Componentes de un Sistema de teledetección

Fuente: (Chuvieco,1995)

2.2.1.1. Principios físicos

La interacción del sensor del satélite con la superficie, se establecerá mediante tres principios como la reflexión que es cuando el sensor capta un flujo energético proveniente del Sol reflejado por la superficie terrestre; la emisión que es cuando un dispositivo situado en la superficie emite una señal al espacio y es captada por el sensor; finalmente la reflexión-emisión que es cuando el propio sensor es quien emite y capta la onda una vez reflejada en el objeto que se pretende estudiar como en el caso de sensores activos (Mas Monsonis, 2017).

Figura 3. Principios físicos de la teledetección

Fuente: (Chuvieco, 1995)

2.2.1.2. Influencia de la atmósfera en la teledetección

La radiación electromagnética se ve considerablemente afectada por ciertos componentes presentes en la atmósfera, ya que muchos de estos dispersan o absorben diferentes longitudes de onda, lo que hace trabajoso la observación remota de la superficie terrestre. La pérdida de la cantidad e intensidad del flujo incidente, la dispersión del flujo incidente en dirección de la superficie y del campo de visión, la dispersión del flujo reflejado en dirección del campo de visión y la radiación emitida por otras cubiertas en dirección del campo de visión son algunos procesos que interfieren en el flujo de radiación electromagnética (Quezada, 2020).

Debido a que la atmósfera es un medio de constante cambio, es necesario adoptar operaciones de corrección pertinentes (radiométrica o geométrica) a cada situación. De este modo se obtendrá una comparación y detección efectiva de dos imágenes de la misma zona sin interferencia alguna (Mas Monsonis, 2017).

2.2.3. Satélites

Un satélite de teledetección lleva uno o varios instrumentos para registrar imágenes de la Tierra, que se transmiten a una estación receptora mediante ondas de radio. El satélite

medirá el flujo de radiación entrante y saliente de la parte superior de la atmósfera. En la actualidad, la NASA utiliza 14 satélites de diferentes tipos de órbitas (sincrónica solar y geosincrónica) con diferentes tipos de sensores (sensores pasivos, que registran la radiación electromagnética que se produce de forma natural en la parte superior de la atmósfera, y sensores activos que emiten radiación electromagnética hacia la Tierra y miden su dispersión/reflexión (Matthews et al., 2012).

2.2.3.1. Sensores satelitales

El sensor, tanto si forma parte de un instrumento pasivo como activo, detecta la radiación electromagnética después de que ésta haya interactuado con el material "objetivo" o haya sido emitida por él. En los satélites se utilizan sensores para identificar la radiación emitida o reflejada y utilizar estos datos para obtener otra información valiosa sobre el objeto o la superficie que la refleja o emite. Algunos ejemplos de sensores son: captadores de imágenes, espectrómetros, radiómetros y una combinación de ellos. Cada uno de ellos proporciona una resolución adicional para determinados aspectos perseguidos (Bakker et al., 2004).

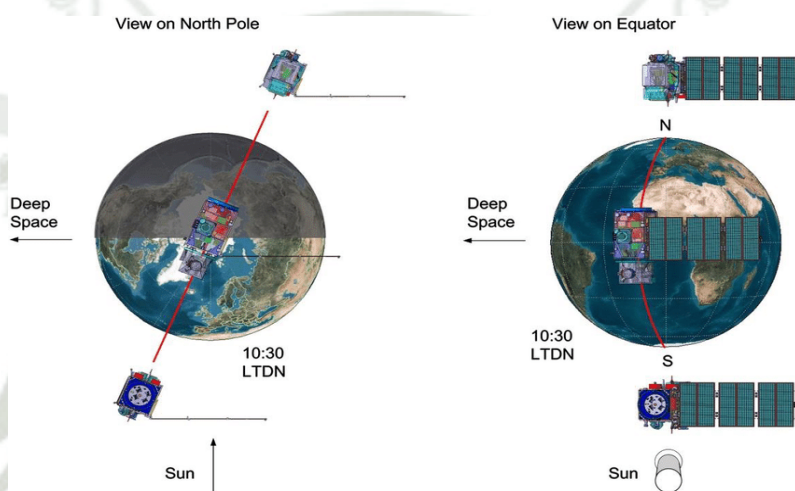
Hay dos tipos de sensores a bordo de las plataformas de los satélites: los pasivos (por ejemplo, sensores espectrales radiométricos) y sensores activos (por ejemplo, radar, lidar, etc.). Los sensores pasivos miden la energía naturalmente reflejada o emitida por la superficie terrestre. Los sensores activos proporcionan su propia fuente de radiación electromagnética emitida hacia el objeto a estudiar que luego se refleja en el sensor.

2.2.3.2. Satélite Sentinel 2A

El satélite Sentinel-2A es el primer satélite óptico de observación y vigilancia de la Tierra en el programa europeo Copernicus, desarrollado por la European Space Agency (ESA), lanzado al espacio el 23 de junio de 2015 y cuya misión es desarrollar observaciones de la superficie terrestre para observar y evaluar los cambios en la superficie terrestre: cambios de uso y manejo de suelo, estado de la vegetación, erosión del suelo, incendios, localización, cobertura y estado de los cuerpos de agua en la superficie y zonas costeras (Bellido, 2019; Peppas et al., 2020).

El satélite está compuesto con el sensor MSI (Multispectral Instrument) el cual consta de 13 bandas espectrales (443-2190nm), con un ancho de franja de 290 km y una resolución espacial de 10 m (cuatro bandas visibles e infrarrojas cercanas), 20 m (seis bandas infrarrojas de borde rojo y onda corta) y 60 m (tres bandas de corrección atmosférica). Dicho satélite tiene una resolución temporal de 10 días llegando incluso a una resolución temporal de 5 días, que en comparación de los demás programas (LandSat o SPOT) permite obtener una visión global sin nubes cada 15 o 30 días (Grendaité et al., 2018).

Figura 4. Configuración orbital del satélite Sentinel 2



Fuente: (Drusch et al., 2012)

2.2.4. Imágenes Satelitales.

Las imágenes de satélite representan la superficie de la Tierra con distintas resoluciones espectrales, temporales, radiométricas y espaciales cada vez más detalladas, según lo que determina el dispositivo de detección de cada sistema de captación y la trayectoria orbital de su plataforma de reconocimiento (Qiu et al., 2006).

2.2.4.1. Procesamiento de imágenes satelitales

La técnica de procesamiento subyacente a todos los métodos de fusión de imágenes se basa en la aplicación de una función matemática sobre los píxeles corregidos del conjunto

de imágenes fusionadas, lo que permite obtener una única imagen optimizada para su interpretación visual. Los procedimientos de procesamiento de imágenes se basan en las correcciones atmosféricas, tratamiento de bandas y otros artefactos de ruido (Bakker et al., 2004).

2.2.4.2. Corrección radiométrica

El sensor es el principal causante de las distorsiones radiométricas por banda de imagen o entre bandas. Los procesos de corrección radiométrica tienen que ser específicos para el tipo de distorsión que se ha provocado, es necesario realizar una evaluación de datos de calibración interna, externa y por último la generación de factores de corrección (Gonzales & Solano, 2019). Habiendo dicho esto, se distinguen las siguientes técnicas de corrección, cada una de ellas destinadas a un error en concreto:

- Corrección radiométrica del bandeo: Se consigue eliminar este efecto desplazando los histogramas parciales de la imagen, de forma que obtengamos el mismo promedio y desviación típica una vez aplicada la corrección.
- Corrección de píxeles y líneas perdidas: Se realiza cuando, por un funcionamiento anormal del sensor, este no logra transmitir el nivel digital a un píxel o grupo de ellos.
- Corrección atmosférica: Es necesario convertir la reflectividad aparente de arriba de la atmósfera (TOA) a reflectividad de la superficie terrestre, es decir debajo de la atmósfera (BOA), para utilizar la información radiométrica de las imágenes. Se aplica una corrección atmosférica debido a que las imágenes de la superficie terrestre, adquiridas en el espectro solar y que son tomadas por el satélite de observación, se encuentran contaminadas por la luz solar dispersada hacia el sensor por las moléculas atmosféricas, los aerosoles y las nubes en suspensión. Además, la energía solar que es reflejada desde la Tierra se encuentra atenuada por los efectos atmosféricos. Estos efectos atmosféricos son dependientes de la longitud de onda (siendo variables en tiempo y espacio), así como de la reflectividad de la superficie y su variación espacial (Tong et al., 2004).

2.2.4.3. Método de Substracción de Píxeles Oscuros

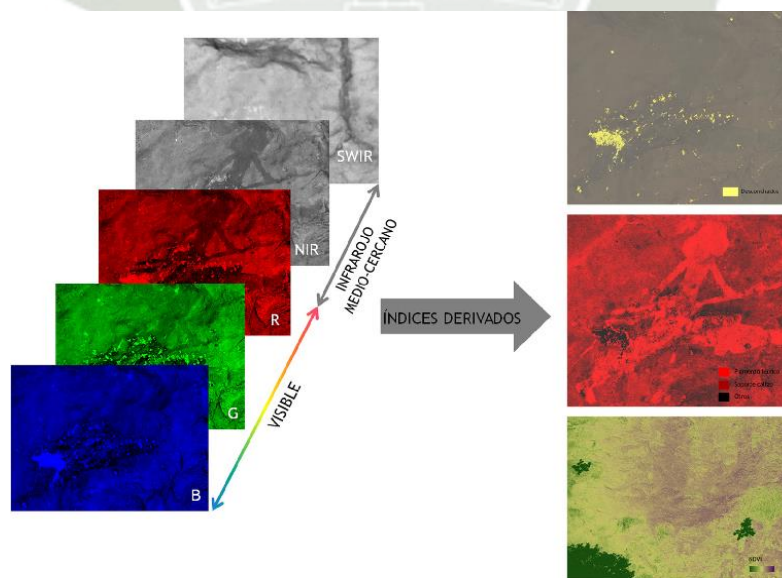
El método de "Dark Object Subtraction" (DOS) es una técnica utilizada en teledetección y procesamiento de imágenes para corregir imágenes satelitales en busca de objetos oscuros, como sombras, en las imágenes. Se utiliza para eliminar el efecto de objetos oscuros en una imagen, como edificios o vegetación densa, que pueden generar sombras y afectar la interpretación de los datos.

En el contexto de QGIS, que es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto, el DOS (Dark Object Subtraction) es una técnica que se puede aplicar para mejorar la calidad de las imágenes satelitales o aéreas y permitir un análisis más preciso de la información.

2.2.5. Imagen multiespectral

La imagen satelital multiespectral asocia valores numéricos a cada píxel tanto como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor, siendo el tipo de producto más útil puesto que nos proporciona, de alguna forma, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Es captada mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas (Bellido, 2019; Guo et al., 2017).

Figura 5. Imágenes multiespectrales (5 bandas) e índices cuantitativos derivados.



Fuente: (Sebastián et al., 2011)

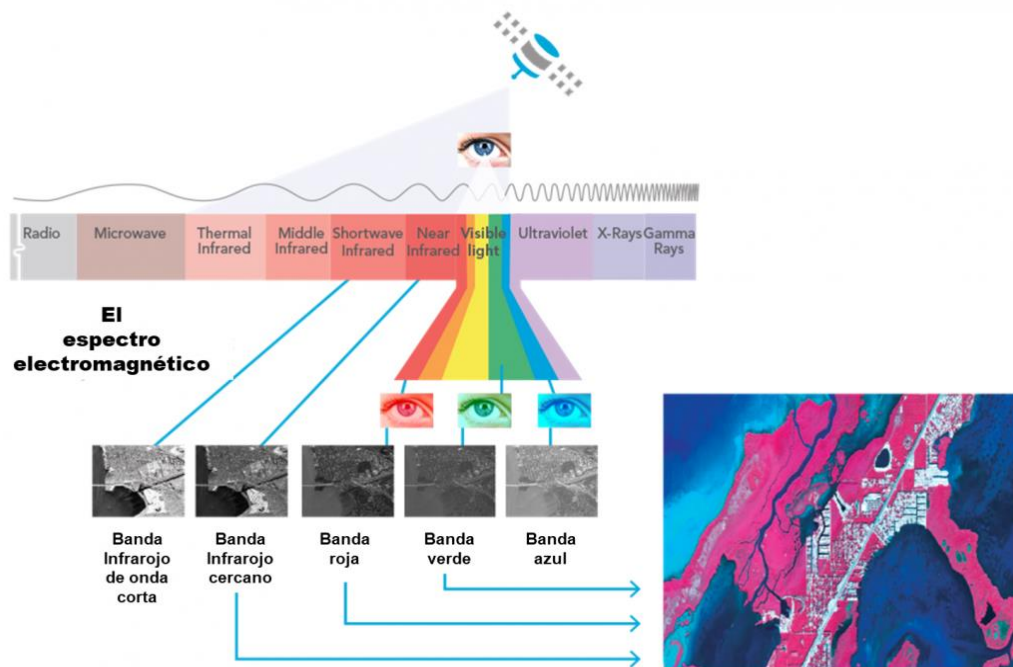
2.2.6. Espectro electromagnético

El Espectro electromagnético es el sistema que clasifica, de acuerdo con la longitud de onda, toda energía que se mueve a la velocidad constante de la luz. Cuando una longitud es menor entonces podremos decir que existe un aumento de la energía contenida por la radiación electromagnética (Brivio et al., 2001). Se define espectro electromagnético como la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe una sustancia u objeto. Las longitudes de onda que componen la radiación, en conjunto, se conocen como espectro electromagnético (Avila, 2019).

De acuerdo a Mas Monsonis, (2017) en relación con el uso aplicado a la teledetección, es necesario destacar cinco bandas espectrales, las cuales son las más comúnmente empleadas en la tecnología actual.

- Espectro visible (0.4 - 0.7 μm): Rango de frecuencias del ojo humano. Subdividido en tres bandas: Rojo (0.6 - 0.7 μm), Verde (0.5 - 0.6 μm) y Azul (0.4 - 0.5 μm).
- Infrarrojo cercano (0.7 - 1.3 μm) NIR-Near Infrared: Resulta de especial importancia para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad porque estas cubiertas tienen picos de reflectancia en este intervalo del espectro.
- Infrarrojo medio (1.3 - 8 μm) SWIR-Short Wave Infrared: En esta región del espectro se entremezclan los procesos de reflexión solar en objetos y la emisión de energía electromagnética desde la superficie terrestre. Se puede estimar la humedad contenida en los suelos y para identificar y detectar incendios forestales.
- Infrarrojo térmico (8 - 14 μm) TIR-Thermal Infrared: Radiaciones emitidas por los propios cuerpos, es decir, se detecta con gran claridad el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- Microondas (1mm-1m): Es un tipo de energía muy transparente a la atmósfera terrestre. Las perturbaciones atmosféricas son menores y es transparente a las nubes.

Figura 6. El espectro electromagnético aplicado a la teledetección



Fuente: (Sánchez, 2020)

2.2.6.1. Firmas espectrales

La firma espectral es la reflectancia como una función de longitud de onda; cada material tiene una firma única, por lo tanto, se puede utilizar para la clasificación de materiales. En otras palabras, cada elemento, dependiendo de su composición química, reflejará, transmitirá y absorberá la energía solar de una manera única; existiendo en la actualidad bancos de firmas espectrales dónde se relaciona cada firma con el determinado elemento en cuestión (Avila, 2019).

2.2.7. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un sistema de información geográfica (SIG) es una base de datos espacial, conformada por hardware, software, datos geográficos georreferenciados y personal capacitado, organizados para capturar, almacenar, manipular, analizar y producir datos geoespaciales (Puerta et al., 2011). Las características de un SIG son su capacidad de representar objetos geoméricamente definidos, como puntos, líneas, polígonos, redes y superficies, y de

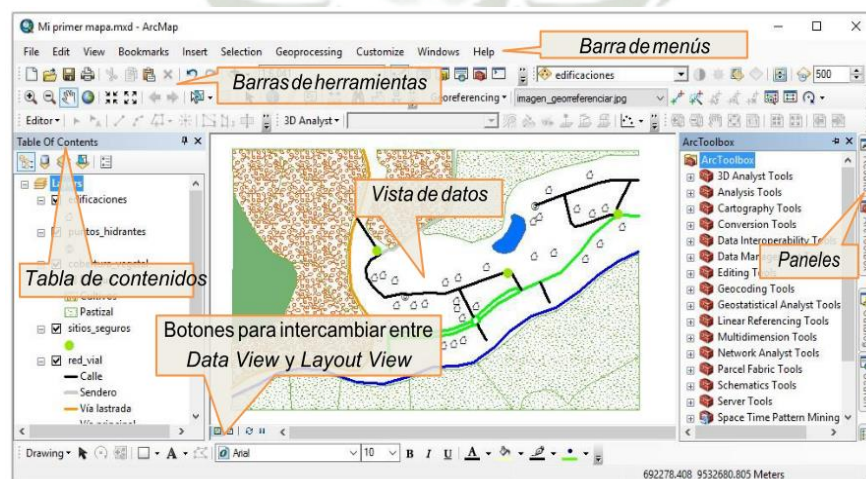
representar varias capas de datos y ser capaz de combinar la información de las capas mediante el álgebra cartográfica (Nieto & Cárdenas, 2018).

2.2.7.1. ArcGIS

Es un programa de sistema de información geográfica (SIG) producido y comercializado por Environmental Systems Research Institute (ESRI) que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Está conformado por un conjunto de aplicaciones que permiten resolver problemas geográficos del mundo real a través de una serie de operaciones espaciales. ArcGIS se compone de tres aplicaciones que incluyen ArcInfo, ArcEditor y ArcView, las cuales son ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox (Cánovas et al., 2017).

ArcMap es la aplicación que permite realizar las principales tareas y análisis avanzado; garantizando la incorporación de ráster, vectores e imágenes para el modelamiento de capas temáticas, creación y edición de datos, análisis espacial, geocodificación de direcciones, etc. La interfaz de ArcMap está compuesta por la tabla de contenidos donde se listan las capas que dan forma al mapa, la ventana donde se muestra el mapa, un conjunto de barra de herramientas y barra de menús, y para explorar la información existe la Vista de datos y la Vista de composición del mapa (Puerta et al., 2011).

Figura 7. Vista general de la aplicación ArcMap



Fuente: (Cánovas et al., 2017)

2.2.7.2. SNAP ESA

Es un programa de información de sistemas geográficos de acceso libre ofrecido por la Agencia Espacial Europea. Se utiliza específicamente para trabajar y corregir imágenes satelitales que proporcionan los sensores Sentinel, pudiéndosele incorporar herramientas Sentinel toolboxes desde su web de descarga. Además puede ser utilizada para procesar las imágenes de otros sensores como las provenientes de los satélites Landsat, Spot, Terra, Modis, etc (Fincke & Consult, 2019).

Otra de las grandes ventajas del programa SNAP, recae en la facilidad de integración que poseen sus productos en programas dedicados a los sistemas de información geográfica, produciendo rasters y vectores que pueden ser utilizados en presentaciones o integrados (Mas Monsonis, 2017).

2.2.8. Santuario Nacional Lagunas de Mejía

El Santuario Nacional Lagunas de Mejía se encuentra en la costa sur del Perú, en los distritos de Mejía, Dean Valdivia y una pequeña parte de la Punta de Bombón, pertenecientes a la provincia de Islay, en el departamento de Arequipa. Inmerso dentro de la ecorregión Desierto Costanero del Pacífico limita por el lado norte con la planta de bombeo y el canal de evacuación de agua de la Irrigación Iberia, por el este con la carretera asfaltada de Mollendo-Valle de Tambo-Irrigación Iberia-El Boquerón, por el sur con tierras agrícolas de Punta de Bombón y el estuario del Río Tambo y por el oeste con la playa del Mar de Grau (Cheneaux, 2015). Además, presenta 6 ecosistemas: el Arenal, Gramadal – Juncal, Mataral, Lagunas, Río Tambo y Monte Ribereño. Se encuentra conformado por lagunas salobres, cuya agua acumulada en ellas se debe al efecto de los desbordes del río en épocas de lluvias y por filtraciones de las irrigaciones aledañas (Irrigación Iberia, La Ensenada y otras zonas de cultivo) (Carpio, 2019).

Fue declarada Área Natural Protegida (ANP) el 24 de febrero de 1984 con una extensión de 690.60 hectáreas que conserva una parte importante de los ecosistemas de humedales costeros del Perú, los cuáles son uno de los ecosistemas más complejos e impactados

debido a las actividades humanas como expansiones agrícolas y urbanas; por lo que se encuentra protegida por el estado peruano con una categoría de carácter intangible; teniendo por objetivo el conservar el hábitat óptimo de poblaciones de aves migratorias y endémicas, flora silvestre típica y sus recursos naturales (Jefatura del Santuario Nacional Lagunas de Mejía, 2001). El SNLM fue designado como sitio RAMSAR en 1992 y es considerado desde el 2008 como Área de Importancia para la Conservación de Aves – IBA debido a la importancia de este humedal en la zona costera del Pacífico.

El humedal mantiene una vegetación ribereña y al mantenerse en el extremo final de la cuenca del río Tambo se convierte en el depósito final de sedimentos, almacenando una elevada cantidad de nutrientes y como consecuencia una gran diversidad biológica que mantiene altas poblaciones cuyas relaciones tróficas permiten continua renovación y balance de sus ciclos.

2.2.8.1. Las lagunas

Las lagunas se encuentran paralelas al mar, manteniéndose gracias a escorrentías superficiales y al aporte de la napa freática e intrusión marina. Se encuentran constituidas por tres complejos lagunares: la laguna Mejía, de las que quedan unas 04 has. de espejo de agua y el resto como zona húmeda al ser directamente afectada por el sistema de drenaje; la laguna Iberia (38 has), el principal cuerpo de agua, cortada en tres espejos por la invasión de junco y la laguna Boquerón (02 has) un complejo de pequeñas lagunas que tienen influencia directa del río Tambo (Riva & Fau, 2020).

Los sistemas de lagunas Iberia y Mejía, situadas en el sector norte de la desembocadura del río Tambo, son en realidad afloramientos de agua de retorno de irrigaciones localizadas en las Pampas de Iberia. El agua que origina estas lagunas proviene de filtraciones y flujos superficiales de la irrigación Ensenada - Mejía – Mollendo, que data de año 1942. La irrigación Iberia influye en la laguna Iberia por efecto de filtraciones y escorrentías superficiales. Mientras que la laguna Boquerón se alimenta principalmente por agua proveniente del río Tambo. El sistema de lagunas cuenta con distintos regímenes hidrológicos los cuáles están en función del balance entre el abastecimiento de agua de las mismas y las pérdidas. Las pérdidas del sistema son ocasionadas por percolaciones hacia

el Océano Pacífico (30%), por evaporación (50-60%) y por percolación al sistema de drenaje de la Irrigación Iberia (10-20%) (INRENA, 2000).

Las lagunas sufren de manera permanente un impacto por contaminantes provenientes de la agricultura aledaña al ANP, principalmente por agroquímicos, residuos sólidos y arrastre de sedimentos, los cuáles pueden ingresar a las lagunas por filtración, así como de manera superficial cuando la disponibilidad hídrica es alta (Riva & Fau, 2020).

2.3. Marco Legal

2.3.1. Nacional

a) **Constitución Política del Perú**

En el capítulo II “Del Ambiente y los Recursos Naturales” se menciona que los recursos naturales renovables y no renovables son patrimonio de la Nación, y el estado es soberano en su aprovechamiento. Además, el estado determina la política nacional del ambiente promoviendo el uso sostenible de sus recursos naturales. Dentro del mismo capítulo el artículo 68 indica la obligación del Estado para promover la conservación de la diversidad biológica y de las áreas naturales protegidas.

b) **Ley N°28611. Ley General del Ambiente**

En el artículo 98 se menciona que: “la conservación de los ecosistemas se orienta a conservar los ciclos y procesos ecológicos, a prevenir procesos de su fragmentación por actividades antrópicas y a dictar medidas de recuperación y rehabilitación, dando prioridad a ecosistemas especiales a frágiles”.

c) **D.S. N°012-2009-MINAM. Política Nacional del Ambiente (PNA)**

En el eje de política 1 - Conservación y Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales y de la Diversidad Biológica – se menciona como objetivos el conservar y aprovechar de manera sostenible la diversidad biológica, los recursos naturales renovables y no renovables del país. Entre los lineamientos de política para los Ecosistemas Marino-Costeros tenemos el fortalecimiento de la gestión integrada de

zonas marino-costeras y sus recursos con un enfoque ecosistémico, protegiendo los ecosistemas frágiles como humedales y promoviendo la investigación en estos ecosistemas con tecnologías adecuadas.

d) **Ley N°29338. Ley de Recursos Hídricos**

El Estado promueve y controla el aprovechamiento y conservación sostenible de los recursos hídricos previniendo la afectación de su calidad ambiental y de las condiciones naturales de su entorno, como parte del ecosistema dónde se encuentran.

e) **Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos del Perú**

Este documento menciona en el Eje de Política 2, el mantener y/o mejorar la calidad del agua en las fuentes naturales continentales y marítimas y en sus bienes asociados mediante el fortalecimiento de la vigilancia y monitoreo de la calidad del agua en fuentes naturales y el desarrollo de investigación destinada a mejorar la calidad del agua mediante la aplicación de nuevas y/o mejores tecnologías.

f) **Ley N°26821. Ley Orgánica para el Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales**

El artículo 12 indica la obligación del Estado a fomentar la conservación de áreas naturales que cuentan con importante diversidad biológica, paisaje y otros componentes del patrimonio natural de la Nación, en forma de Áreas Naturales Protegidas en cuyo ámbito el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales estará sujeto a normatividad especial.

g) **D.S. 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y Establecen Disposiciones Complementarias**

Se establecen los niveles de concentración de los elementos, sustancias, parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el agua en su condición de cuerpo receptor y componente básico de los sistemas acuáticos. Aquí, la Categoría 4: Conservación del ambiente acuático, comprende a los cuerpos naturales de agua superficiales que forman parte de ecosistemas frágiles, áreas naturales protegidas y/o zonas de amortiguamiento cuyas características requieren ser protegidas.

h) **Ley N°26834. Ley de Áreas Naturales Protegidas**

La ley nombra que las Áreas Naturales Protegidas constituyen patrimonio de la Nación y éstas son consideradas espacios continentales y/o marinos del territorio nacional para la conservación de la diversidad biológica y demás valores asociados de interés cultural, paisajístico y científico, así como por su contribución al desarrollo sostenible del país; teniendo entre sus objetivos el evitar la extinción de especies de flora y fauna silvestre, asegurar la captación, flujo y calidad de agua y se controle la erosión y sedimentación, proporcionar oportunidades para el monitoreo del estado del medio ambiente y el restaurar ecosistemas deteriorados.

i) **Resolución Presidencial N°144-2020-SERNANP. Plan Maestro del Santuario Nacional Lagunas de Mejía**

Se aprueba el Plan Maestro del Santuario Nacional Lagunas de Mejía, período 2020-2024, como el documento de planificación de más alto nivel, definiendo como objetivos la conservación de los ecosistemas propios de humedales costeros del Desierto Costanero del Pacífico, ordenar el desarrollo de actividades económicas compatibles con la conservación del SNLM y el fortalecimiento de la gestión participativa del SNLM con acciones de investigación y educación ambiental con los actores locales.

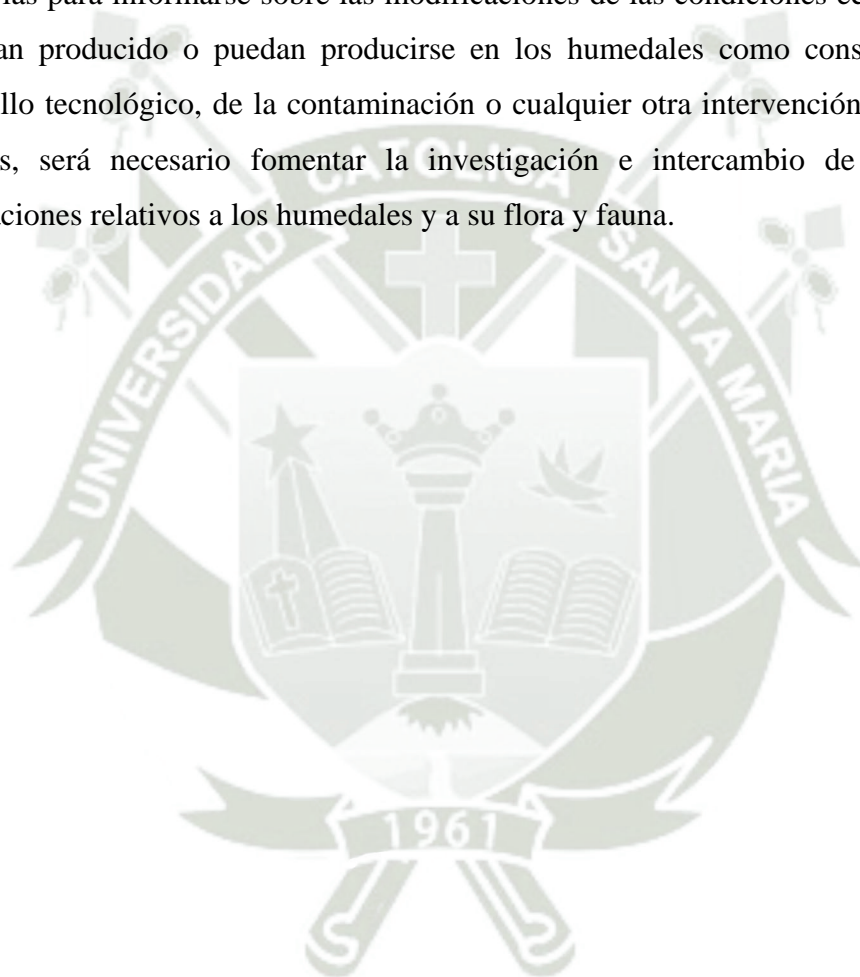
j) **Estrategia Nacional de Humedales**

Tiene por objetivo promover la conservación y uso sostenible de humedales a través de la prevención, reducción y mitigación de la degradación de estos ecosistemas; mediante la reducción de la vulnerabilidad de estos ecosistemas ante presiones naturales o humanas, fortalecimiento del marco normativo y capacidad de gestión del humedal, fortalecimiento de la gestión participativa, y la promoción de conocimientos y técnicas tradicionales de pueblos indígenas u originarios

2.3.2. Internacional

k) **Convenio relativo a Humedales de Importancia Internacional (Ramsar, Irán, 1971), suscrito por el Perú el 28 de agosto de 1986 mediante Resolución Legislativa N°25353**

Se reconocen las funciones ecológicas fundamentales de los humedales como reguladores de los regímenes hidrológicos y como hábitat de especies de flora y fauna, especialmente de aves acuáticas, comprometiendo a cada parte contratante a designar humedales idóneos en su territorio para ser incluidos en la Lista de Humedales de Importancia Internacional o sitios Ramsar, en base a criterios ecológicos, botánicos, zoológicos, limnológicos o hidrológicos. Las partes contratantes tomarán las medidas necesarias para informarse sobre las modificaciones de las condiciones ecológicas que se hayan producido o puedan producirse en los humedales como consecuencia del desarrollo tecnológico, de la contaminación o cualquier otra intervención del hombre. Además, será necesario fomentar la investigación e intercambio de datos y de publicaciones relativos a los humedales y a su flora y fauna.





CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y nivel de investigación

La presente investigación es de tipo no experimental con enfoque cuantitativo ya que se van a relacionar los niveles de reflectancia de las imágenes satelitales para obtener una medición numérica del indicador de la variable en estudio correspondiente a los niveles de clorofila obtenida en la laguna para así cumplir con los objetivos planteados en la investigación.

El nivel de la investigación es longitudinal de tendencia ya que se analizarán los cambios producidos a lo largo del tiempo en cuanto al estado trófico de la laguna del SNLM.

3.2. Diseño de la investigación

La investigación es descriptiva – correlacional

3.3. Ubicación Espacial

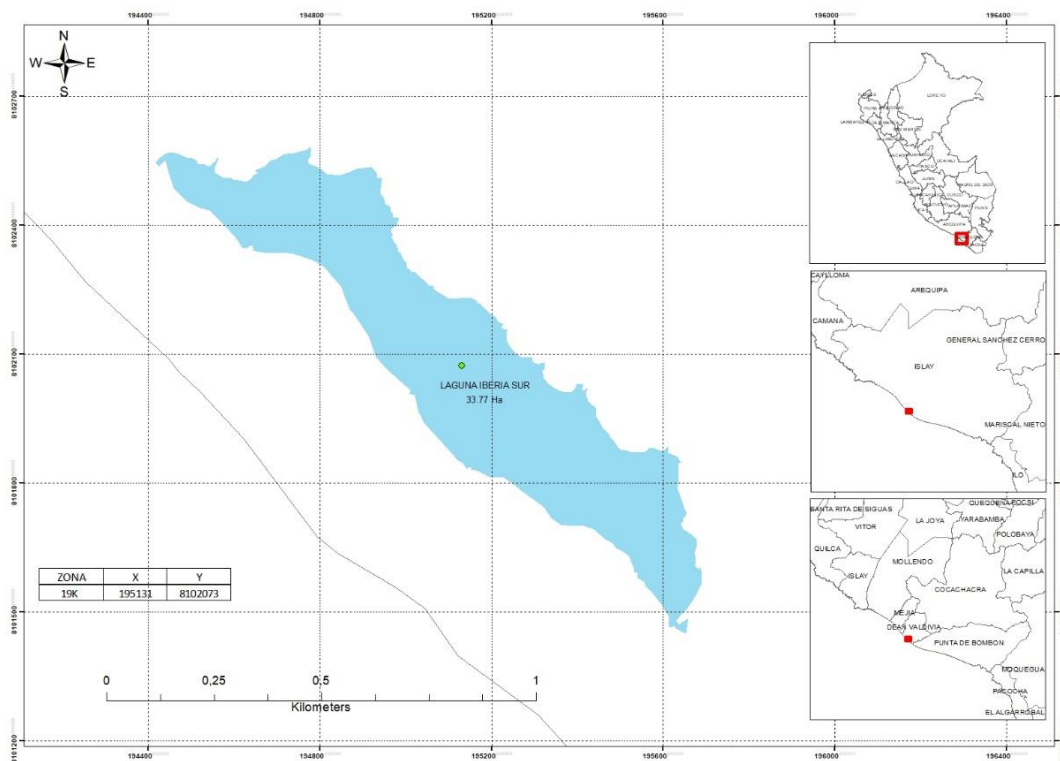
a) Área de estudio (física)

La presente investigación tuvo como locación la laguna Iberia Sur, que pertenece al SNLM, ubicado en el distrito de Mejía y Dean Valdivia, provincia de Islay, departamento de Arequipa, el mapa y las coordenadas de ubicación geográfica de la laguna se detallan a continuación:

Tabla 2. Localización geográfica de la laguna Iberia

Dato	Descripción
Coordenadas UTM (Zona 19K)	E: 195131 S: 8102073

Figura 8. Mapa de ubicación del área de estudio



b) Área de estudio (científico)

Teledetección ambiental

3.4. Métodos de la investigación

3.4.1. Diagnóstico de la zona de estudio (laguna Iberia Sur)

Se realizó la delimitación y descripción del área de estudio física (laguna Iberia Sur), así como la de los ecosistemas aledaños para revelar actividades antrópicas que pudieran afectar a la laguna. Debido a que la calidad de agua está determinada por un conjunto de interacciones ecológicas dentro de un espacio y tiempo, se tomaron en cuenta aspectos hidrográficos, meteorológicos, de relieve y tipo de suelo (Carrasco, 2020; Peppas et al., 2020; Rodríguez, 2019).

- **Delimitación y descripción**

Se visitó el Santuario Nacional Lagunas de Mejía, recorriendo las principales lagunas, hasta llegar a la laguna Iberia Sur, donde usando GPS Garmin TREX se marcaron algunas coordenadas UTM referenciales generando puntos KML, trasladando dichos puntos vectoriales generados utilizando la herramienta GO to XY a ArcGis para elaborar el mapa de delimitación.

- **Hidrografía**

Se creó un mapa de cuenca hidrográfica consultando datos en formato shapefile del geportal del ANA correspondientes a cuencas hidrográficas del Perú. Además de ello se consultó información bibliográfica sobre características hidrográficas de la zona de estudio.

Se obtuvo información de SERNANP respecto a los drenes artificiales de la laguna y se generó un mapa de escorrentía en base a la diferencia de altitudes en el área de estudio.

Se descargó un modelo de elevación digital (DEM) de la página web <https://search.asf.alaska.edu/> que usa información del satélite Alos Palsar, que se cargó al software ArcGIS; usando el buscador de herramientas de ArcGIS, dentro de las herramientas de análisis espacial se localizaron las herramientas de hidrología. Luego se utilizó la herramienta “Relleno”, seguido de la herramienta “Dirección de Flujo”, una vez obtenido este archivo se procedió a usar la herramienta “Acumulación de Flujo”. Finalmente, se procedió a utilizar la herramienta “Calculadora Ráster” para definir límites de elevación.

- **Meteorología**

Con el fin de conocer las condiciones meteorológicas del lugar se precisa de información de fuentes como SENAMHI y organismos internacionales; se accedió al portal web del Senamhi para descargar datos meteorológicos de la estación cercana Pampa Blanca, estos datos corresponden a la temperatura promedio, humedad relativa, precipitación media. Mientras que los datos de dirección y velocidad del viento fueron obtenidos del sitio web WindFinder (<https://es.windfinder.com/>). Con estos datos se elaboró una tabla resumen de los parámetros meteorológicos mencionados anteriormente para la zona de estudio.

- **Relieve del terreno**

Se obtuvo información de fuentes bibliográficas, además se generó un mapa de relieve de la zona, se describe a continuación la metodología de elaboración del mapa:

Para realizar el mapa de relieve de terreno se descargó primeramente un modelo de elevación digital (DEM) de la página web <https://search.asf.alaska.edu/> que usa información del satélite Alos Palsar. Posteriormente en el software ArcGIS se carga este modelo de elevación digital (de la zona de estudio) y se procede a generar las curvas de nivel con la herramienta “Contorno” y generador de curvas de nivel de Global Mapper. Es importante que el DEM descargado se encuentre georreferenciado en el sistema UTM correspondiente. Se realizó una clasificación de rangos de altitudes para la zona costera del SNLM en base al modelo de elevación digital usado.

- **Suelos**

Se obtuvo información bibliográfica sobre el tipo y condición del suelo en el SNLM.

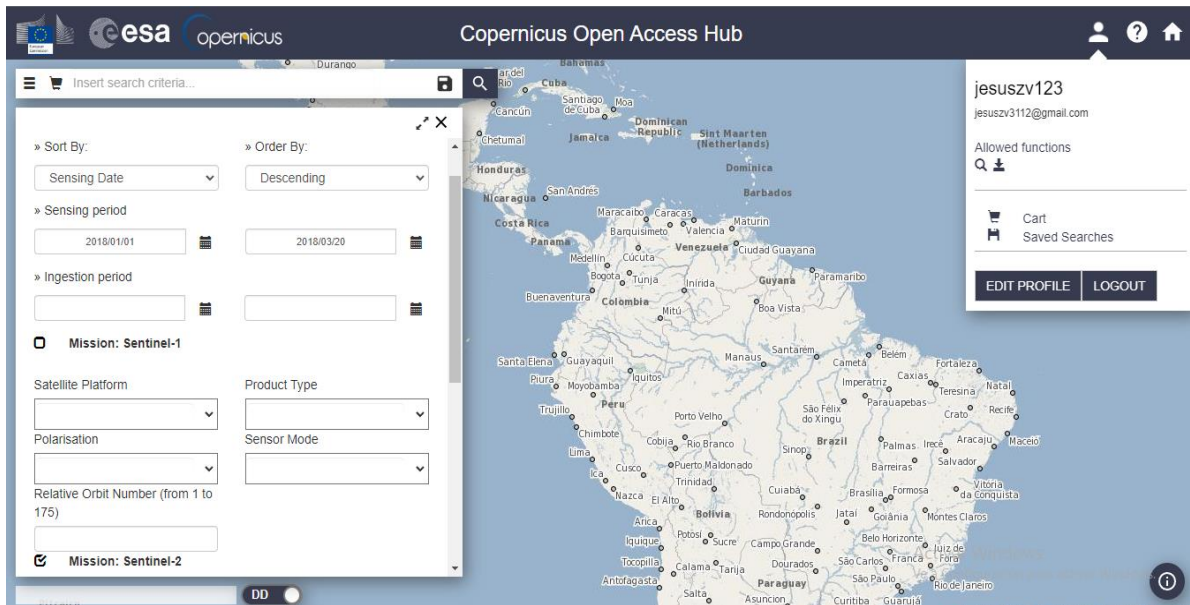
Se realizó el mapa de tipo de suelo descargando en primer lugar información geográfica en formato shapefile de la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, dicha información se trasladó al software ArcGIS, procediendo a identificar los suelos existentes en el lugar de estudio.

3.4.2. Cálculo de los índices de clorofila MCI y MPH a través del procesamiento de imágenes satelitales Sentinel 2.

3.4.2.1. Selección y descarga de imágenes satelitales Sentinel con nubosidad <15%

Se descargaron imágenes Sentinel 2 de tipo L1C desde el portal de datos de los productos COPÉRNICO (Figura 9), creado por la Agencia Espacial Europea, a través del siguiente enlace: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. El acceso a los paquetes de datos satelitales es gratuito mediante el registro de un usuario.

Figura 9. Portal de descarga Copernicus



Para obtener mejores resultados, se filtraron las imágenes que tengan una cobertura de nubes inferior al 15%. Para esto se seleccionó la zona de interés (SNLM), filtrando la búsqueda por periodo deseado, satélite (Sentinel 2), tipo de producto (nivel 1C) y porcentaje de nubosidad menor al 15%. (Grendaité et al., 2018). Sin embargo, no todos los paquetes de imágenes descargadas poseen una cobertura de nubes inferior al 15% debido al limitado número de imágenes en cada periodo, pero fueron seleccionadas aquellas con el mínimo de nubes posible sobre la zona de estudio.

En total se descargaron 12 imágenes anuales para el periodo 2018-2020 (3 de primavera, 3 de verano, 3 de otoño y 3 de invierno) siendo un total de 36 imágenes que fueron descargadas en formato JP2. Una vez descargado el paquete de la imagen se procedió a descomprimir el fichero ZIP, para así visualizar la metadata de sus bandas (Figura 10).

Figura 10. Paquete de bandas descargadas en formato JP2

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
T18KZG_20180115T145719_B01.jp2	15/1/2018 15:11	Archivo JP2	3,669 KB
T18KZG_20180115T145719_B02.jp2	15/1/2018 15:12	Archivo JP2	105,922 KB
T18KZG_20180115T145719_B03.jp2	15/1/2018 15:12	Archivo JP2	107,943 KB
T18KZG_20180115T145719_B04.jp2	15/1/2018 15:12	Archivo JP2	112,010 KB
T18KZG_20180115T145719_B05.jp2	15/1/2018 15:11	Archivo JP2	32,046 KB
T18KZG_20180115T145719_B06.jp2	15/1/2018 15:11	Archivo JP2	32,287 KB
T18KZG_20180115T145719_B07.jp2	15/1/2018 15:11	Archivo JP2	32,326 KB
T18KZG_20180115T145719_B08.jp2	15/1/2018 15:12	Archivo JP2	113,391 KB
T18KZG_20180115T145719_B8A.jp2	15/1/2018 15:11	Archivo JP2	32,489 KB
T18KZG_20180115T145719_B09.jp2	15/1/2018 15:11	Archivo JP2	3,555 KB
T18KZG_20180115T145719_B10.jp2	15/1/2018 15:11	Archivo JP2	1,622 KB
T18KZG_20180115T145719_B11.jp2	15/1/2018 15:11	Archivo JP2	31,753 KB
T18KZG_20180115T145719_B12.jp2	15/1/2018 15:11	Archivo JP2	31,733 KB
T18KZG_20180115T145719_TCI.jp2	15/1/2018 15:12	Archivo JP2	132,151 KB

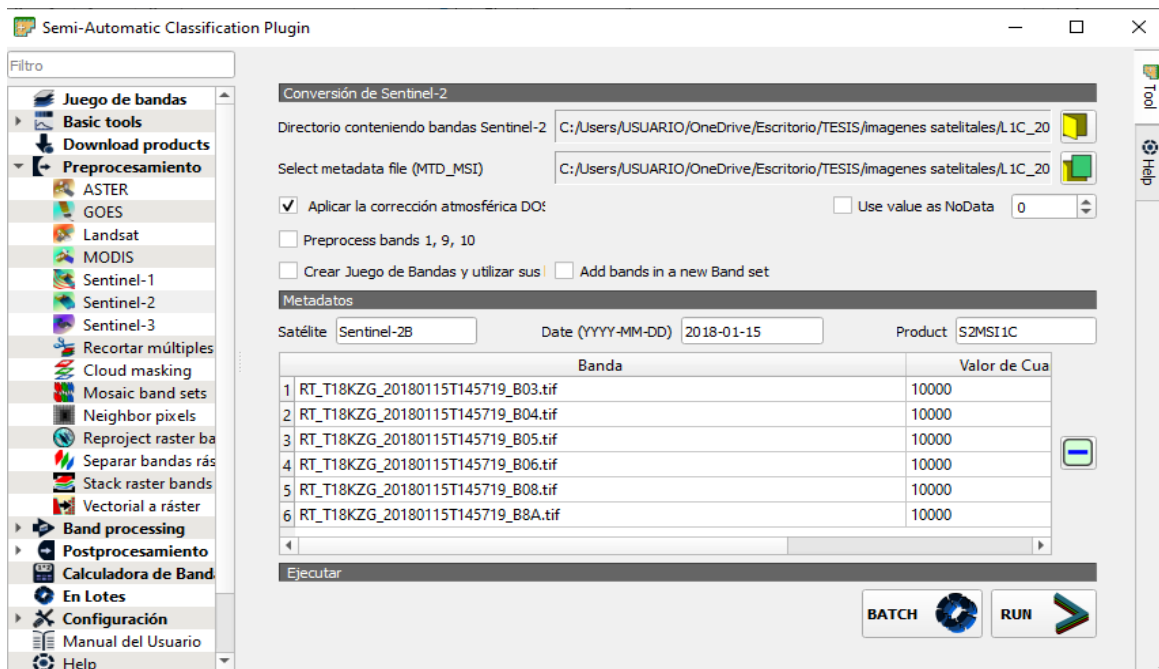
3.4.2.2. Corrección atmosférica y remuestreo de bandas satelitales

Se usó el software QGIS para realizar las correcciones radiométricas y atmosféricas de las imágenes satelitales Sentinel 2 con el objetivo de transformar los números digitales en radiancia y eliminar el efecto de los aerosoles atmosféricos (Gonzales & Solano, 2019).

La figura 11 muestra la herramienta de pre-procesamiento “Plugin de Clasificación Semiautomática” (SCP), para luego seleccionar Sentinel 2, dentro de la ventana que se abre añadimos las bandas a corregir (3, 4, 5, 6, 8 y 8A) y la metadata de corrección “MTD_MSIL1C”, que se obtiene al descargar la imagen del portal web Copernicus, permitiendo así convertir los datos de nivel 1C a nivel 2A, corrigiendo las imperfecciones que pueda dar la atmosfera a las bandas (Grendaité et al., 2018; Mas Monsonis, 2017). El proceso usado es el conocido como DOS – Método de Substracción de Píxeles Oscuros (Bellido, 2019).

Este proceso de conversión de las imágenes satelitales del nivel 1C al nivel 2A también ejecuta un remuestreo de conversión de tamaño de píxeles a 10x10 m de resolución espacial. Este proceso se realizó específicamente sobre las bandas 3, 4, 5, 6, 8 y 8A ya que son las necesarias para la determinación de índices y niveles de clorofila.

Figura 11. Procesamiento de corrección y remuestreo de bandas



3.4.2.3. Separación tierra-agua mediante máscara NDWI

De acuerdo a McFeeters, (1996), se aplicó el índice de diferencia de agua normalizado (NDWI) según el índice 3 para desarrollar una máscara que permita separar la tierra del agua de la laguna, de la siguiente manera:

Índice 3. Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NDWI)

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR}$$

Donde G es la banda 3 (verde) y NIR es la banda 8 (infrarrojo cercano). Los valores del NDWI van del -1 al +1, donde los valores positivos corresponden a las zonas de agua y los negativos a las características del suelo, la vegetación y el paisaje urbano (Peppia et al., 2020).

Se usó la herramienta “Calculadora ráster” para hallar el NDWI, para luego hacer un recorte hacia una capa polígono vectorial creada que bordea la laguna. Luego se volvió a aplicar la herramienta “Calculadora ráster” sobre la capa cortada para obtener aquellos valores mayores a 0.012; que corresponde a cuerpos de agua. Finalmente, el ráster obtenido se representa mediante Valores de Paleta Únicos, eliminándose el valor de 0 (que corresponde a arenales

y zonas de vegetación), para finalmente mediante la herramienta “Poligonizar” convertir este ráster a capa vectorial (Carpio, 2019).

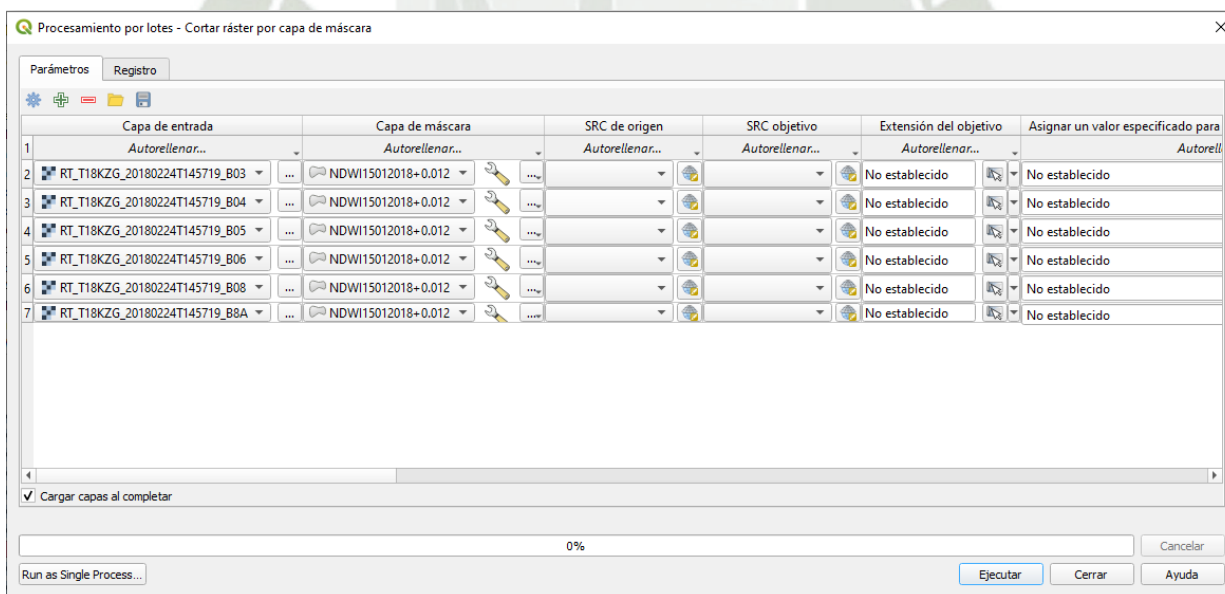
Esta máscara se realizó sobre una fecha de imagen satelital sin nubes sobre la laguna Iberia para cada estación de cada año y será usada en el siguiente paso para hacer los recortes de las bandas de todas las fechas según su estación y año.

3.4.2.4. Recorte de bandas seleccionadas

Para el posterior análisis de las imágenes satelitales se realizaron recortes de la zona de interés (área de estudio física), procedimiento que facilitará y aumentará la velocidad de procesamiento de las imágenes satelitales (Mas Monsonis, 2017).

La figura 12 muestra cómo se utilizó la herramienta de “Extracción por capa de Mascara” por lotes del software QGIS, en donde las capas de entrada fueron las bandas anteriormente corregidas y la capa máscara de corte fue la generada en el paso anterior en el proceso de NDWI para cada estación y año.

Figura 12. Proceso de recorte de bandas por capa de máscara NDWI



3.4.2.5. Cálculo de índices MCI y MPH

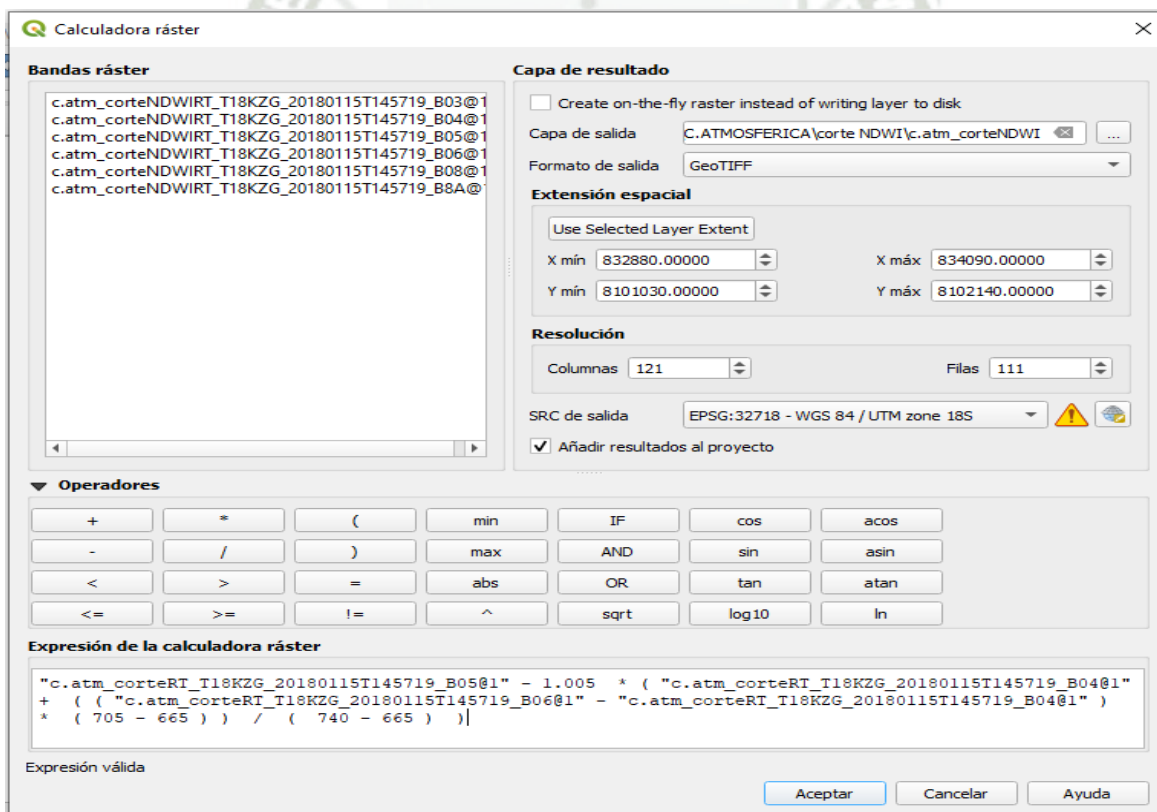
Una vez obtenida las bandas corregidas atmosféricamente y recortadas hacia la laguna Iberia se usó la herramienta “Calculadora ráster” del programa QGIS (Figura 13) para hallar los índices MCI y MPH para las 36 fechas seleccionadas.

La expresión que se utilizó para la matemática de bandas del cálculo de MCI estuvo de acuerdo a la Ecuación 1 mostrada previamente (Peppas et al., 2020). La optimización del algoritmo MCI se ha logrado mediante la inclusión de un factor, de modo que su eficacia no se ve afectada por las nubes finas (Liu et al., 2021).

La ecuación de MPH aplicada a los datos Sentinel-2 está de acuerdo a la Ecuación 2 mostrada previamente (Peppas et al., 2020).

Finalmente usamos la herramienta de conversión Píxeles ráster a puntos para extraer los valores de cada píxel en formato CSV.

Figura 13. Proceso de Calculadora ráster para hallar el índice MCI



3.4.2.6. Correlación de índices MCI y MPH

Se exportaron los datos obtenidos previamente al software Microsoft Excel para identificar si existe una fuerte correlación entre ambos algoritmos o no. Las evaluaciones se realizaron mediante la estimación del coeficiente de correlación R de Pearson, para medir la fuerza de la asociación entre los valores de MCI y MPH para los 36 períodos de tiempo del estudio (año 2018: 12 imágenes, año 2019: 12 imágenes, año 2020: 12 imágenes). De esta forma obtendremos valores de correlación anuales y por estación (Peppa et al., 2020).



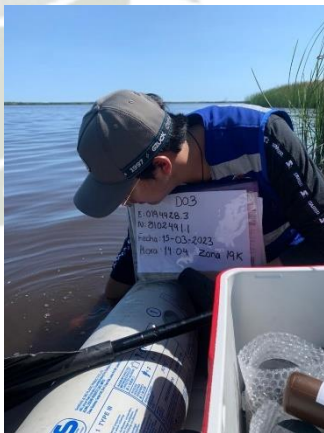
3.4.3 Determinación de los niveles de clorofila “a” in situ y por teledetección

3.4.3.1 Recolección y análisis de muestras de agua de la laguna Iberia

Se realizó una toma de muestras de tipo aleatoria estratificada, debido a la poca homogeneidad de la laguna, pues está conformada por el ingreso del sistema de drenaje de las irrigaciones Iberia, la Ensenada y otras zonas de cultivo aledañas al SNLM (Carpio, 2019; INRENA, 2000).

Se establecieron 8 puntos aleatorios, dentro de los estratos en la laguna Iberia Sur (3 en la cercanía a drenes de ingreso de agua, 2 en la zona media del cuerpo de agua y 3 en las orillas del lado cercano a la playa). Se elaboró una tabla de coordenadas para las fechas de muestreos (Tabla 3) y un mapa de ubicación de los puntos de muestreo donde los colores usados fueron el azul, verde y café, respectivamente. En la Tabla 3 se muestran las coordenadas proyectadas UTM de los puntos de muestreo en la laguna Iberia Sur, los cuales se codificaron usando las letras D, C y P seguido del número de punto, la D hace referencia a aquellos puntos próximos a los drenes afluentes, la C hace referencia a los puntos en zonas centrales de la laguna y la P a los puntos ubicados próximos a la orilla de playa. La zona UTM corresponde a la franja 19K y se adjuntan imágenes de la recolección de la muestra en cada punto.

Tabla 3. Coordenadas de puntos de muestreo

Punto	UTM Este	UTM Norte	Zona	Imagen
D01	195618.1	8101855.1	19k	
D02	195139.5	8102217.3	19k	
D03	194928.3	8102491.1	19k	

C04 195261.4 8101972.9 19k



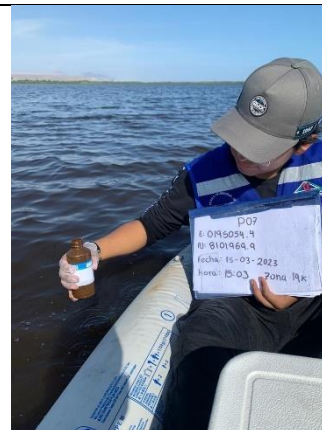
C05 194870.5 8102397.9 19k



P06 194514.3 8102485 19k



P07 195054.4 8101969.9 19k



P08 195383.3 8101728.6 19k



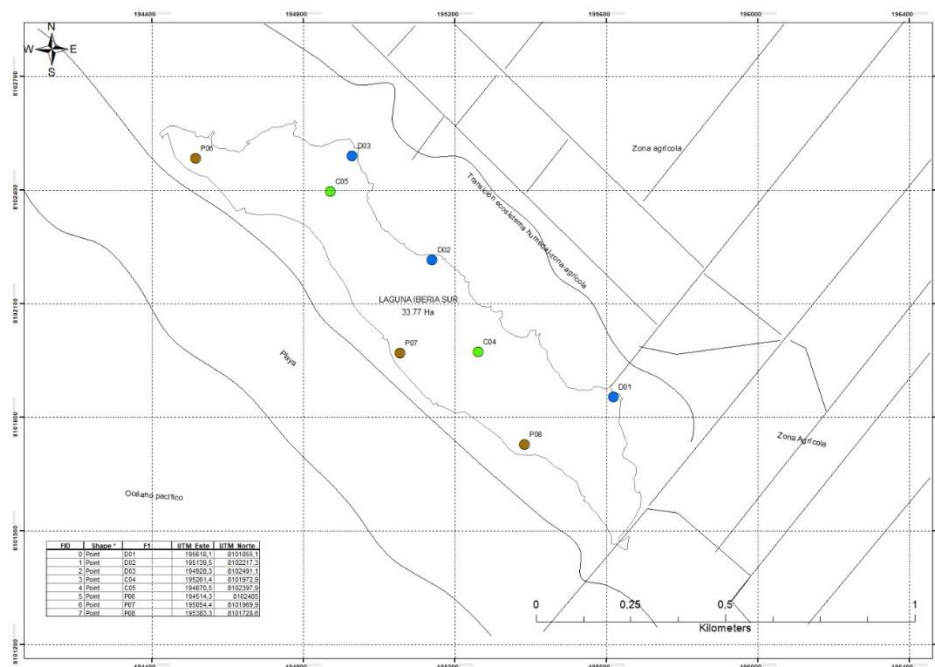
Estos puntos fueron seleccionados por conveniencia dentro de estos estratos (drenes afluentes, zona media y orillas cercanas al mar) y en base a diseños similares de otros autores (Hernández et al., 2014). El establecimiento de la red de los puntos de monitoreo en el cuerpo de agua laguna Iberia considera los siguientes criterios:

-Los puntos de monitoreo deben ser ubicados cerca de donde se desarrollen actividades específicas como lo son las zonas de ingreso de afluentes (drenes de las irrigaciones).

-El número de puntos de monitoreo debe estar definido en función del propósito de estudio y del tamaño de la zona de interés, debiendo estar ubicadas en las orillas y en la parte central del cuerpo de agua, en este caso para 38 hectáreas de la laguna Iberia tomaremos 8 puntos de muestreo (Riva & Fau, 2020).

-La laguna Iberia posee una profundidad de 145cm en la mira central, siendo considerada una laguna superficial, por lo que las muestras serán tomadas de superficie a 20-30cm de profundidad (Cheneaux, 2015).

Figura 14. Mapa de ubicación de puntos de muestreo



Se georreferenciaron los puntos de muestreo que se indican en la Tabla 3 para elaborar el mapa de ubicación de puntos de muestreo (Figura 14), donde los puntos coloreados de azul son los próximos a los drenes afluentes de la zona agrícola, los verdes son los puntos recolectados en la zona central de la laguna y los de color café son aquellos puntos recolectados próximos a la orilla de playa.

Los puntos fueron geo-referenciados en la toma de datos para compararlos luego con la correspondiente zona en la imagen satelital. Dichas muestras fueron colectadas, rotuladas, almacenadas y conservadas adecuadamente según el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales, emitido por la Autoridad Nacional del Agua mediante Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA y el cronograma de actividades de muestreo presentado al SERNANP (Tabla 4).

Tabla 4. Cronograma de actividades de muestreo en el SNLM

ACTIVIDADES		FECHAS	
		DIA 1 (28/09/2022)	DIA 2 (15/03/2023)
MUESTREO		HORA	HORA
Preparación de indumentaria y equipos de campo.		8:00 am.	8:00 am.
Ingreso al SNLM		8:15 am.	8:15 am.
Ubicación GPS de los puntos ya georreferenciados.		8:25 am.	8:25 am.
Recolección de muestras	Toma de muestra D01	9:15 am.	9:15 am.
	Toma de muestra D02	9:45 am.	9:45 am.
	Toma de muestra D03	10:15 am.	10:15 am.
	Toma de muestra C04	10:45 am.	10:45 am.
	Toma de muestra C05	11:15 am.	11:15 am.
	Toma de muestra P06	11:45 am.	11:45 am.
	Toma de muestra P07	12:15 pm.	12:15 pm.
	Toma de muestra P08	12:45 pm.	12:45 pm.
POST-MUESTREO		HORA A.M.	HORA A.M.
Salida del Santuario Nacional Lagunas de Mejía		1:00 pm.	1:00 pm.
Transporte de muestras al laboratorio		1:30 pm.	1:30 pm.
Consignación de las muestras en el Laboratorio para su análisis.		4:30 pm.	4:30 pm.

Se derivaron las muestras a un laboratorio acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) para realizar el análisis de clorofila “a” de acuerdo con la norma de referencia SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 10200 H, 23rd Ed. 2017. Se elaboraron tablas para

mostrar los resultados del ensayo de clorofila “a”. También se adjuntan los resultados originales en el ANEXO 1.1 y ANEXO 1.2

3.4.3.2. Determinar niveles de Clorofila “a” por teledetección.

- Cálculo y generación de mapas de clorofila usando las ecuaciones empíricas

Para recuperar la concentración de la clorofila se hizo uso de ecuaciones empíricas desarrolladas para otra zona de estudio a partir de mediciones in situ y datos satelitales (Grendaité et al., 2018). Las ecuaciones empíricas bibliográficas correlacionan ambos índices, MCI y MPH, con la concentración de clorofila para los datos de Sentinel 2 Nivel-1C.

Con la aplicación del software QGIS, se transformó el valor de MCI y MPH de cada píxel a contenido de clorofila en mg/L utilizando la herramienta “Calculadora ráster”. Obteniéndose como resultado un mapa ráster con el mismo número de píxeles que el inicial, pero con valor distinto (Mas Monsonis, 2017).

La Ecuación 1, Ecuación 2, Ecuación 3 y Ecuación 4 son las ecuaciones empíricas utilizadas:
-Relación con MCI (Mas Monsonis, 2017; Mollae, 2018)

Ecuación 1. Relación con MCI - 1

$$Chla (mg/m^3) = 1457 * MCI + 2.895$$

Ecuación 2. Relación con MCI - 2

$$Chla (mg/m^3) = 2158 * MCI + 3.9$$

-Relación con MPH (Grendaité et al., 2018; Matthews et al., 2012; Peppia et al., 2020)

Ecuación 3. Relación con MPH - 3

$$Chla (\mu g/L) = 2223.18 * MPH + 24.03$$

Ecuación 4. Relación con MPH - 4

$$Chla (\mu g/L) = 1726.50 * MPH + 18.29$$

Los rásters obtenidos fueron convertidos a shapefile de puntos con la herramienta “Píxeles ráster a puntos”, para luego seleccionar aquellos más próximos a los puntos de muestreo *in situ* en un radio de 3x3 píxeles de 10 metros cada uno (Caballero et al., 2022). Estos valores

próximos al punto de muestreo luego fueron exportados al software Excel y promediados. Para la validación de estas ecuaciones se elaboraron gráficos de dispersión que muestran el coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (ECM) y error absoluto medio (EAM) calculados mediante la comparación de la clorofila recuperada por las ecuaciones con las concentraciones de clorofila *in situ* (Palmer et al., 2015; Soria-Perpinyá et al., 2021).

- Elaboración de Ecuación Propia para la laguna Iberia Sur

Con el fin de obtener una Ecuación Propia (Ecuación 6 y Ecuación 7) que describa la concentración de clorofila en la zona de estudio se relacionaron los índices MCI y MPH con las concentraciones *in situ*, respectivamente.

A partir de los shapefile de puntos generados para los valores de MCI y MPH, se escogieron aquellos más próximos a los puntos de muestreo *in situ* en un radio de 3x3 píxeles de 10 metros cada uno (Caballero et al., 2022). Estos valores próximos al punto de muestreo luego fueron exportados al software Excel y promediados. Con el fin de establecer una relación entre estos índices y la clorofila obtenida previamente *in situ* se elaboraron gráficos de dispersión que muestren las ecuaciones de la recta (Ecuación 6 y Ecuación 7) y el coeficiente de determinación (R^2).

Posteriormente, usando la Ecuación 7 de la recta obtenida con mayor R^2 , y utilizando la herramienta “Calculadora ráster”, generamos los mapas ráster correspondientes.

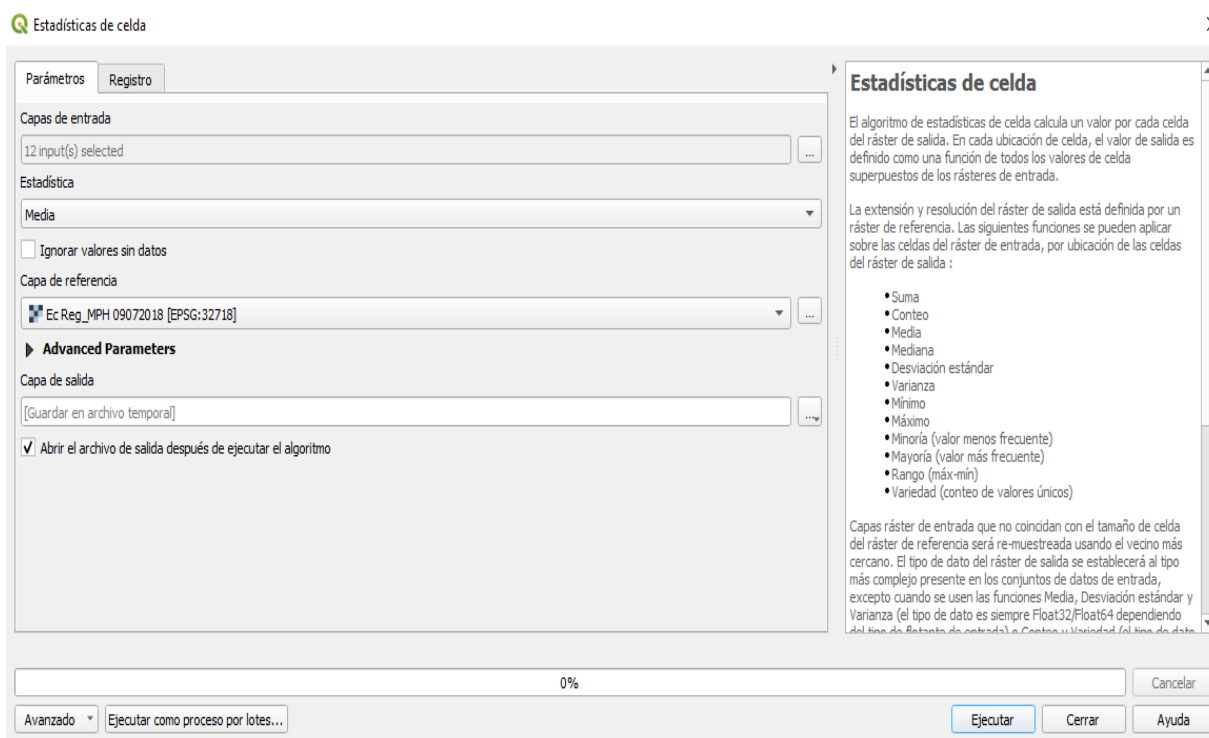
3.4.4. Analizar la variación espacio-temporal de la distribución de clorofila “a” en el cuerpo de agua en el periodo 2018-2020.

3.4.4.1. Cálculo de la desviación estándar, media, mínimo y máximo de la concentración de clorofila

Para cada píxel de nuestra área de estudio, se calculó y cartografió la desviación estándar, media, mínimo y máximo de la concentración de clorofila de forma anual (2018,2019,2020) y para todo el período de estudio; para esto se ingresaron como capas de entrada los ráster generados en el paso anterior (Ecuación 7) que obtuvieron el mayor R^2 . También se calculó el promedio de clorofila estacional de cada año, cuyo resultado fue expresado en un gráfico de barras, aquí se ingresaron como capas de entrada los ráster de las 3 fechas de la estación de cada año, para luego exportar estos datos a Excel y elaborar el gráfico. Para todas estas

operaciones se usó la herramienta de análisis ráster “Estadísticas de celda” del programa QGIS (Peppa et al., 2020). La Figura 15 muestra el cálculo de estadístico “Media” para el año 2018, donde se ingresaron los 12 ráster de concentración de clorofila de ese año.

Figura 15. Cálculo del promedio de clorofila del año 2018 usando la herramienta Estadística de celda



3.4.4.2. Identificación y frecuencia de valores de clorofila extremos altos

En el análisis estadístico, un paso importante en el análisis de una variable es encontrar y tratar los valores extremos que se presentan como desviaciones apareciendo en lugares donde no se espera según el patrón de distribución de la variable. Para esto se utilizará el método del rango intercuartil (IQR), que utiliza la diferencia entre el primer y el tercer cuartil de los datos ($Q_3 - Q_1$). El primer cuartil (Q_1) es el valor de los datos con el 25% de los valores por debajo de él. El tercer cuartil (Q_3) es el valor de los datos con el 25% de los valores por encima de él. En concordancia con Whaley, (2005), se identificaron en el presente estudio sólo los píxeles con valores extremos altos según la Ecuación 5.

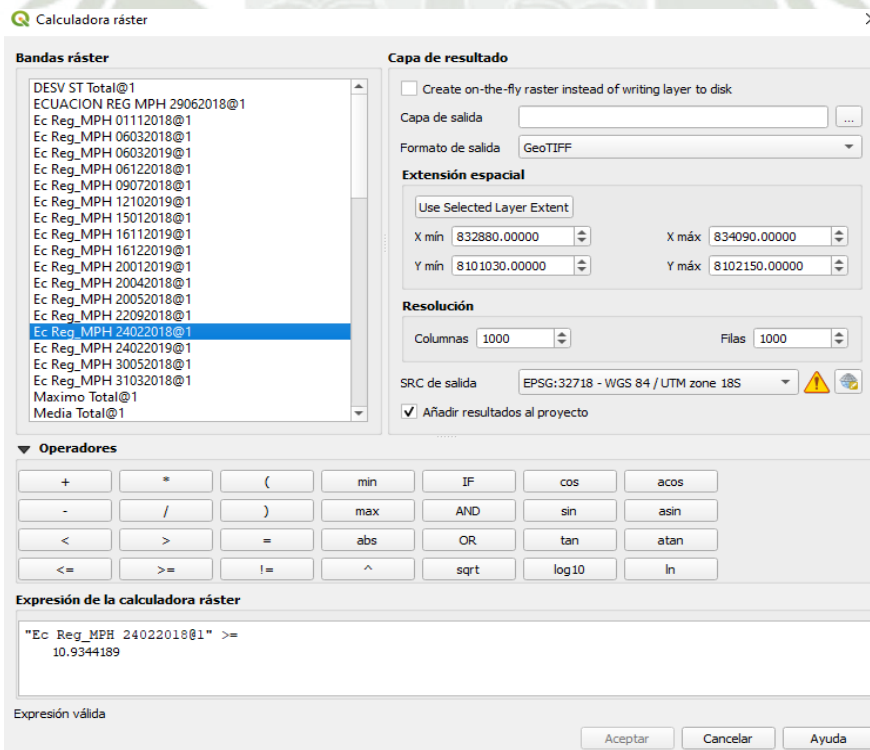
Ecuación 5. Valores atípicos extremos altos

$$\text{Valores atípicos} = Q_3 + 1.5 * IQR$$

Para la identificación se convirtieron los ráster de las concentraciones de clorofila obtenidas previamente con la Ecuación 7 a puntos vectoriales usando la herramienta “Píxeles ráster a puntos”, luego mediante su tabla de atributos se calcularon los cuartiles 3 (Q3) y cuartiles 1 (Q1), estos valores fueron exportados a Excel para hallar los límites de valores atípicos extremos de cada fecha, de acuerdo a la Ecuación 5.

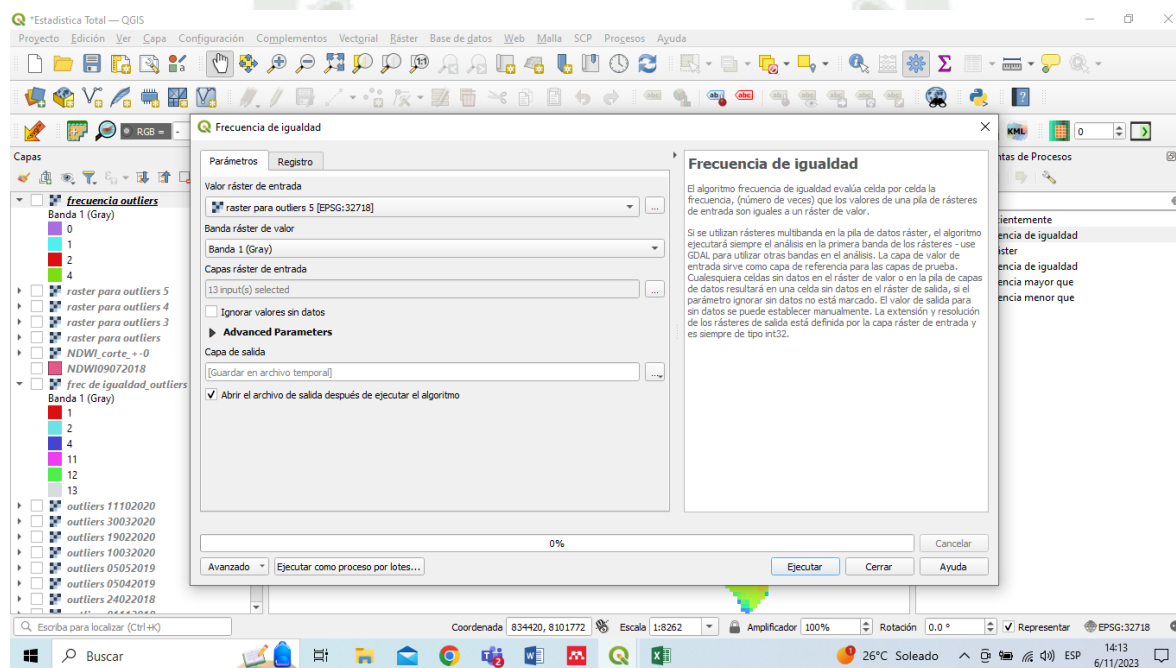
Posteriormente, en Excel, se determinó qué fechas presentan valores atípicos comparando los límites máximos con los valores atípicos máximos de cada fecha obtenidos en el paso anterior. Luego, se utilizó la “Calculadora ráster” de QGIS para identificar aquellos píxeles clasificados como atípicos dentro de las fechas determinadas en el anterior paso (Figura 16); para esto ingresamos los ráster correspondientes a esas fechas expresando que nos dé como capa resultante aquellos píxeles mayores o iguales que (\geq) el valor atípico extremo alto correspondiente a esa fecha.

Figura 16. Uso de Calculadora ráster para identificar los píxeles atípicos extremos altos



Finalmente, los resultados ráster de las fechas con valores atípicos se sobrepusieron uno sobre otro para identificar la mayor frecuencia de los píxeles considerados como atípicos extremos altos, la Figura 17 muestra el uso de la herramienta “Frecuencia de igualdad” del software QGIS, donde se ingresaron como capas de entrada los ráster con píxeles atípicos obtenidos previamente.

Figura 17. Uso de herramienta Frecuencia de igualdad para determinar la frecuencia de píxeles atípicos altos





CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Diagnóstico de la zona de estudio (laguna Iberia Sur)

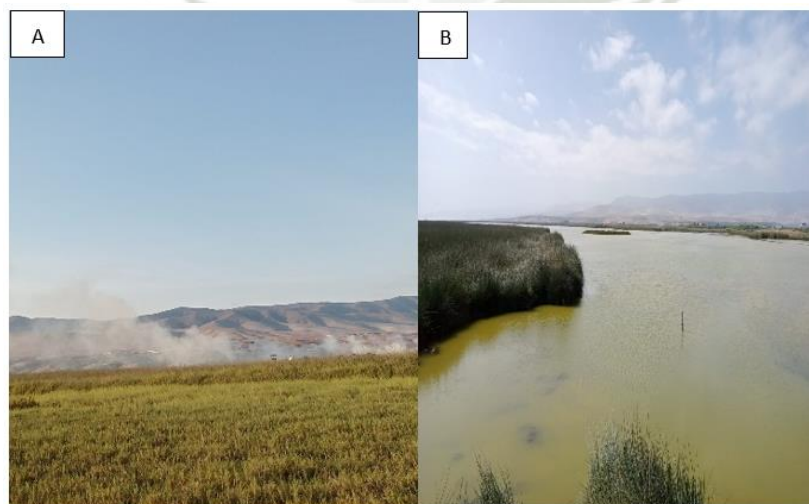
4.1.1 Delimitación y descripción del área de estudio

Se visitó el Santuario Nacional Lagunas de Mejía, recorriendo las principales lagunas, hasta llegar a la laguna Iberia Sur, donde usando GPS Garmin TREX se marcaron las coordenadas en el sistema UTM referenciales de la laguna para posteriormente localizarlas en el software Google Earth Pro, se muestran las coordenadas en la Tabla 5.

Tabla 5. Coordenadas de Reconocimiento Inicial

PUNTO GPS	X UTM	Y UTM	Zona	Descripción
1	193602	8103897	19K	Ingreso al SNLM
2	194454	8102443	19K	Zona norte de la laguna Iberia
3	195545	8101373	19K	Zona Sur de la laguna Iberia
4	195735	8101578	19K	Dren afluente

Figura 18. Fotografías de reconocimiento inicial de la laguna Iberia Sur



La Figura 18 muestra la fotografía A correspondiente a la quema de biomasa vegetal en zona agrícola aledaña a la laguna Iberia Sur y la fotografía B muestra la zona Sur de la laguna Iberia, donde se aprecia una coloración verdosa típica de los bordes de esta laguna.

Figura 19. Imagen satelital del Sistema de Lagunas del SNLM



Fuente: Google Earth Pro

En la imagen satelital mostrada en la Figura 19 se identifican los puntos de reconocimiento inicial mencionados en la Tabla 5, de la primera salida de campo, siendo estos puntos correspondientes al ingreso al SNLM, Zona Norte de la laguna Iberia, Zona Sur de la laguna Iberia y dren afluente. La imagen corresponde a dos cuadrantes de distintas fechas, 2020 y 2021, tiene una altitud de ojo de 7.81Km, que permite visualizar toda del área del SNLM, zonas agrícolas aledañas, parte del río Tambo, zonas de playa, vías y accesos de transporte.

La Figura 19 además muestra la ubicación del SNLM en la costa sur del Perú en los distritos de Mejía, Dean Valdivia y Punta de Bombón, dentro de la provincia de Islay, en el departamento de Arequipa, dentro del siguiente rango de coordenadas GMS: 17°07'09'' y 17°10'03'' de latitud Sur y 71°49'49'' y 71°53'19'' de longitud Oeste.

Las lagunas se hallan paralelas al mar y se mantienen debido al aporte de escorrentías superficiales y la napa freática de la cuenca. Las lagunas del Santuario Nacional Lagunas de Mejía están conformadas por tres complejos de lagunas (SERNANP, 2015).

-La laguna Mejía con 04 has. de espejo de agua y el resto como zona húmeda al estar directamente influenciada por el sistema de drenajes.

-La laguna Iberia con 38 has. es el principal cuerpo de agua que está dividida en tres espejos de agua debido a la invasión de junco y totora.

-La laguna Boquerón con 02 has. que comprende un conjunto de pequeñas lagunas con influencia directa del río Tambo.

Las lagunas son consideradas superficiales, ya que la profundidad media de sus aguas fluctúa entre los 80 y los 195 cm, con fuertes variaciones estacionales, considerándose un nivel de 145 cm en la mira central Iberia el área de la laguna Iberia es de 38 has., y con 195 cm aumenta a 80 has de área. El agua que da origen a estas lagunas proviene de las filtraciones y escorrentías superficiales de la Irrigación La Ensenada-Mejía-Mollendo, que data del año 1942, siendo la irrigación Pampas de Iberia la que posee influencia directa sobre la laguna Iberia (Riva & Fau, 2020).

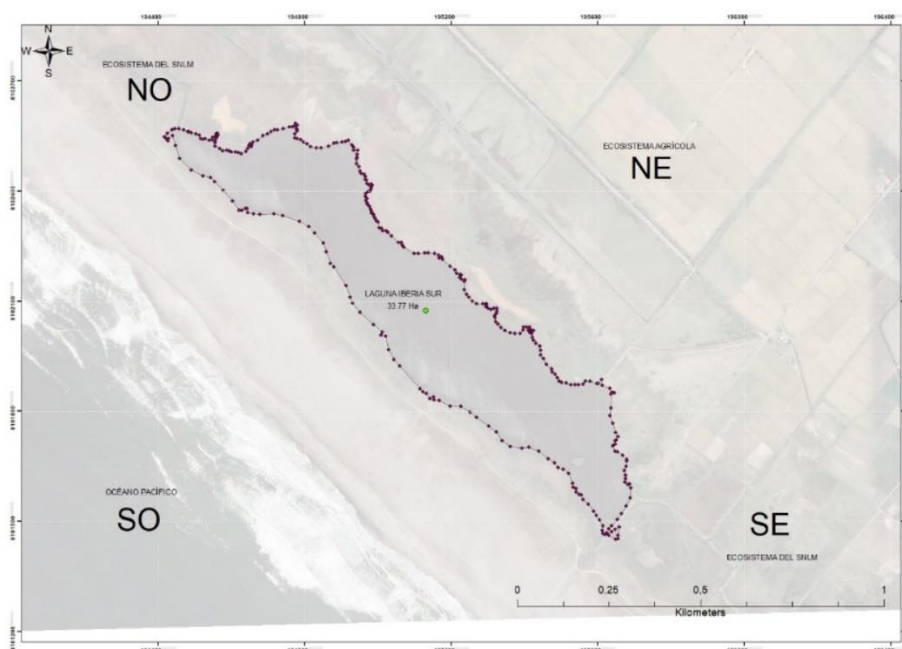
Tabla 6. Actividades Antrópicas Reveladas

ACTIVIDADES ANTRÓPICAS	SI	NO
ECOSISTEMA AGRÍCOLA	X	
PESCA		X
QUEMA DE VEGETACIÓN	X	
CONSTRUCCIONES ALEDAÑAS DE OTROS PROYECTOS		X
PRESENCIA DE RESIDUOS SÓLIDOS	X	
ACTIVIDADES AGROPECUARIAS CERCANAS	X	
TURISMO	X	

Se evidenciaron las actividades antrópicas de agricultura en la zona NE; no se evidenció pesca, se evidenció quema en la zona NE (zona agrícola), solo se evidenciaron construcciones propias del Santuario; se evidenció presencia de residuos sólidos en los canales provenientes

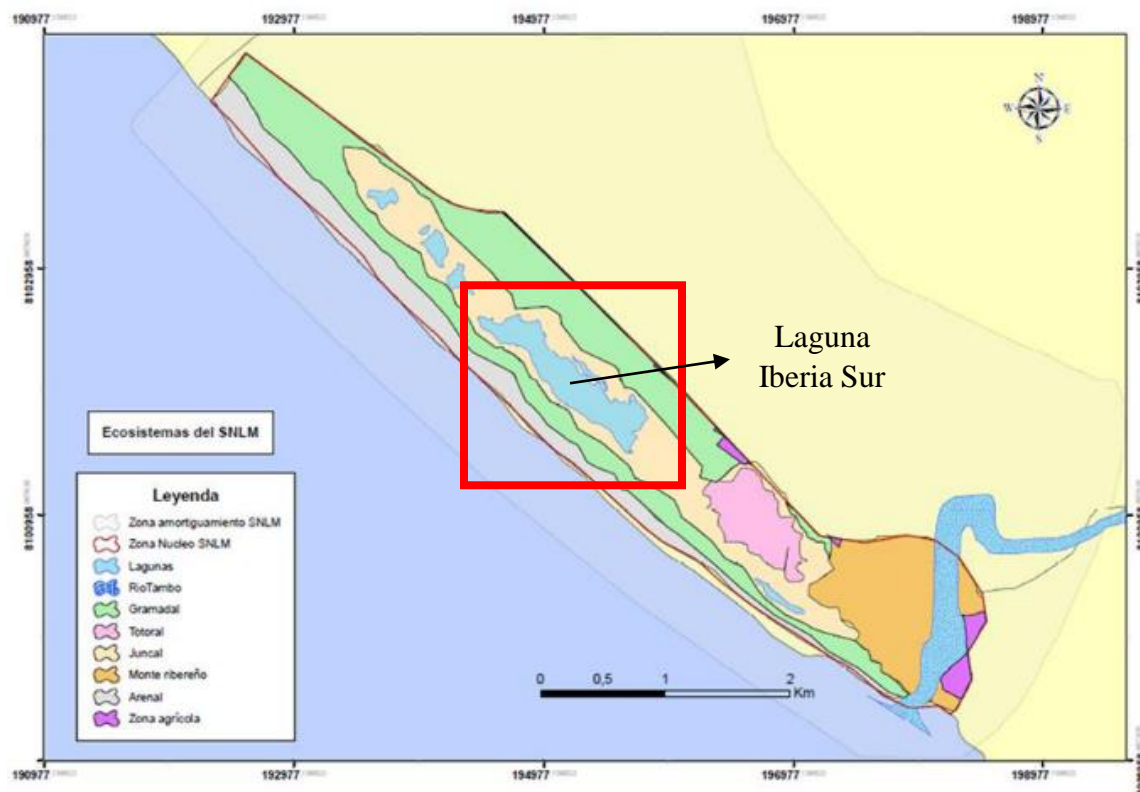
de la zona agrícola: así también la presencia de turismo, y actividades agropecuarias en la zona de amortiguamiento.

Figura 20. Mapa de delimitación de la laguna Iberia Sur



La Figura 20 muestra el mapa de delimitación de la laguna Iberia Sur en la que se han generado 313 vértices y lados con el software ArcGIS. La laguna Iberia limita al norte con la Planta de Bombas y el canal de Evacuación de Agua de Drenaje de la Irrigación Iberia, por el este con la carretera asfaltada Costanera (Mollendo-Valle de Tambo-Irrigación Iberia-el Boquerón), por el sur con terrenos agrícolas de Punta de Bombón y por el oeste con la línea de playa del Océano Pacífico (INRENA, 2000).

Figura 21. Mapa de Ecosistemas del SNLM



Fuente: Adaptado del Plan Maestro del SNLM 2015-2019

En la Figura 21 se identifican dentro del cuadrante rojo los ecosistemas más próximos a la laguna Iberia Sur, así como también se pueden apreciar otros ecosistemas del SNLM. En la Tabla 7 se hace especial énfasis en estos ecosistemas.

Tabla 7. Descripción de los ecosistemas aledaños a la laguna Iberia

Ecosistema	Descripción
Arenal (Playa)	Esta zona tiene una longitud de 7.78 km y está formada por franjas de suelo arenoso de 100 a 200 metros de ancho paralelas a las lagunas y playas. La extensión es de alrededor de 98 has. y se encuentra a 90 metros aproximadamente de la laguna Iberia. El área cercana a la desembocadura del río Tambo se distingue por la presencia de restos de vegetación removida por el mar. Además, las mareas acumulan una gran cantidad de desechos sólidos.

Gramadal (Pastizal) - Juncal	<p>Esta zona se caracteriza por presentar agrupaciones de asociaciones vegetales. En esta zona se puede diferenciar 3 áreas diferentes:</p> <p>-Gramadal (<i>Distichis spicata</i>): No es una planta hidrófila por lo que ocupa todo el territorio entre la zona de playas y los juncales, usualmente bordeando el complejo de humedales.</p> <p>-Juncal (<i>Scirpus americanus</i>): Se encuentran en suelos inundados cercanos a las lagunas centrales y del sur.</p> <p>-Salicornia (<i>Salicornia fruticosa</i>): Se encuentra principalmente en el sector Norte del ANP, alrededores de la laguna Mejía y lado Este de la laguna Iberia.</p> <p>Las áreas que se encuentran principalmente alrededor de las lagunas son el juncal y el salicornial. Se localizan rodeando a la laguna Iberia cubriendo superficies variables que reducen el área de espejo lagunar.</p>
Lagunas	<p>Ubicadas en línea recta con el mar (Océano Pacífico) dependen de las escorrentías superficiales, aportes de la napa freática e intrusión marina.</p>

Fuente: Adaptado del Plan Maestro 2015-2019 y 2020-2024

Tabla 8. Características de la laguna Iberia

Indicación	Descripción
Grupo	Laguna superficial
Locación	195131 E, 8102073 S
Máxima profundidad	1.60 m
Mínima profundidad	0.50 cm
Temperatura media anual	19.8°C
Precipitación total promedio anual	10.8 mm
Extensión	38 ha
Entrada principal	Escorrentías superficiales, aporte de la napa freática e intrusión marina
Salidas	Infiltración marina

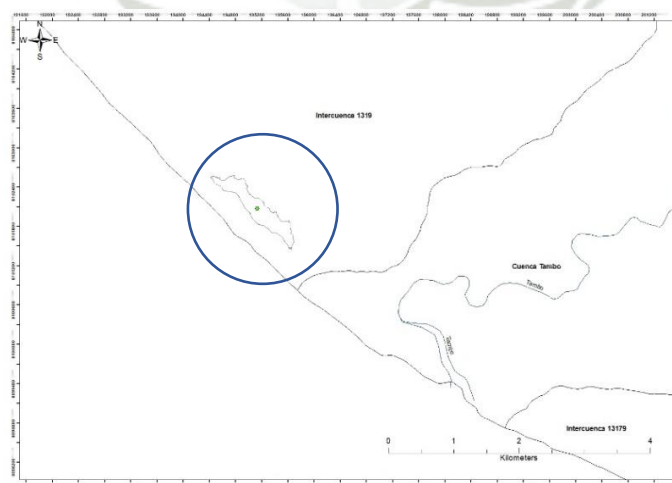
Fuente: Adaptado del Plan Maestro 2015-2019 y 2020-2024

Al analizar la Tabla 8 sobre las características de la Laguna Iberia vamos que:

- Tipo de laguna: La Laguna Iberia es una laguna superficial, lo que significa que no es una masa de agua subterránea, sino que se encuentra en la superficie de la tierra.
- Ubicación geográfica: La laguna se encuentra en las coordenadas 195131 E, 8102073 S, lo que indica su posición en términos de longitud y latitud.
- Profundidad: La profundidad máxima de la laguna es de 1.60 metros, mientras que la profundidad mínima es de tan solo 0.50 centímetros. Esto indica que la laguna tiene una variabilidad considerable en términos de profundidad.
- Temperatura: La temperatura media anual de la laguna es de 19.8°C. Esta información es relevante para comprender el clima y el entorno en el que se encuentra la laguna.
- Precipitación: La precipitación total promedio anual en la laguna es de 10.8 mm. Esta cifra indica la cantidad de agua que recibe la laguna a través de la lluvia durante un año.
- Extensión: La laguna tiene una extensión de 38 hectáreas, lo que proporciona una idea de su tamaño.
- Entradas y salidas de agua: La laguna recibe agua de diferentes fuentes, como escorrentías superficiales, aporte de la napa freática e intrusión marina. La infiltración marina es la salida de agua principal de la laguna.

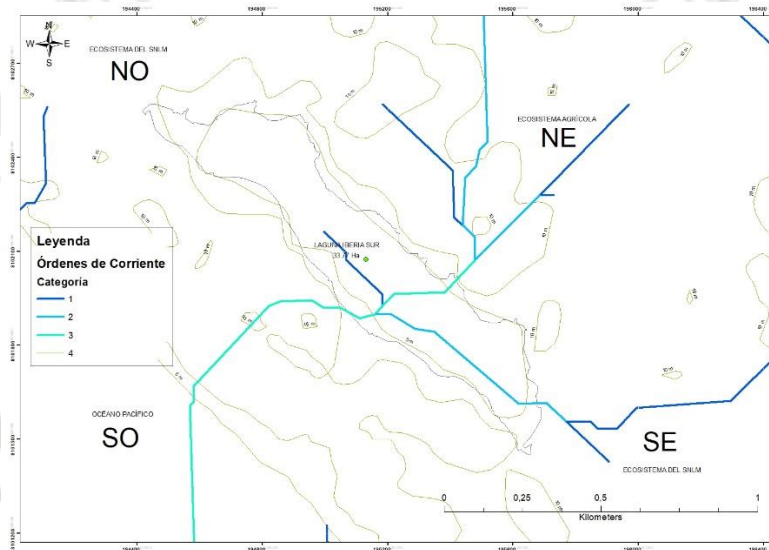
4.1.2 Hidrografía

Figura 22. Mapa de Cuenca Hidrográfica



La Figura 22 muestra la posición de la laguna Iberia Sur en relación a las cuencas hidrográficas del lugar, encontrándose la Intercuenca 1319 y la cuenca Tambo, correspondientes a la región hidrográfica del Pacífico. El único río más cercano que se muestra es el río Tambo que cuenta con un sistema hidrológico similar al de los ríos costeros de la Cuenca del Océano Pacífico, con una gran cantidad de lluvias durante el período típico de diciembre a marzo y un escaso estiaje durante el período de agosto a diciembre (INRENA, 2000).

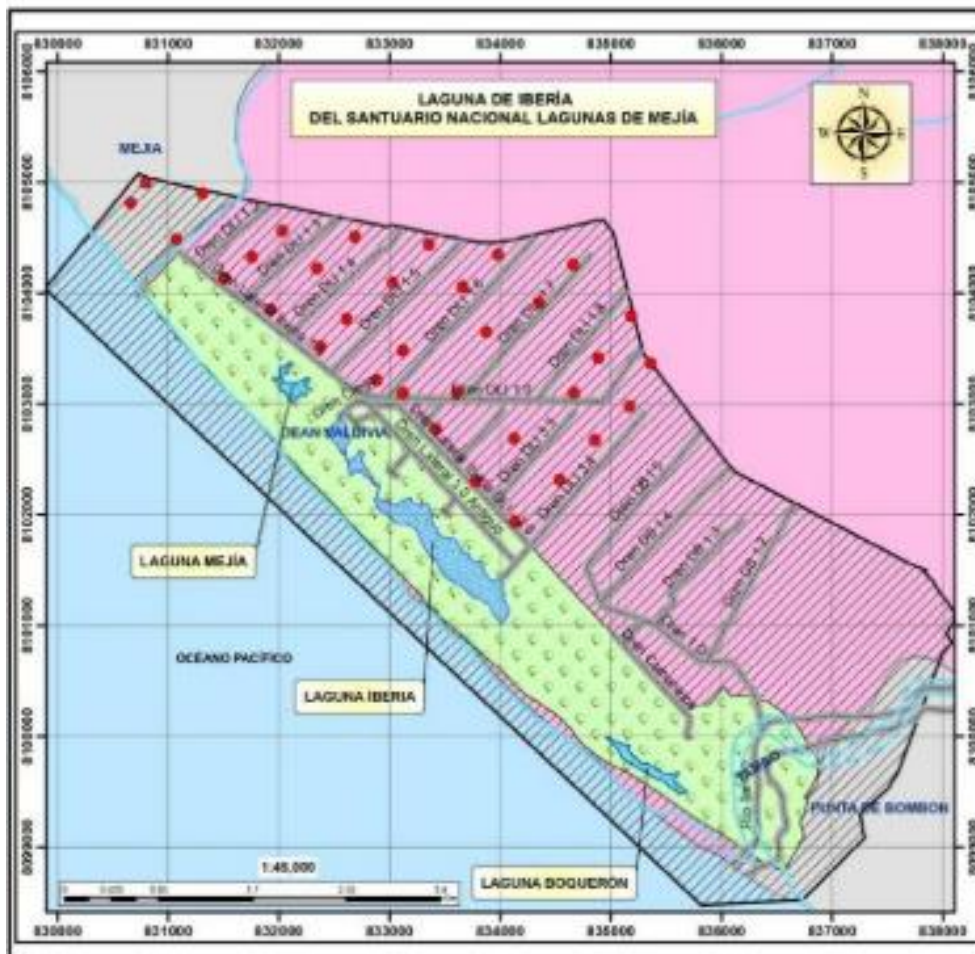
Figura 23. Mapa de escorrentías



En la figura 23 se muestran las órdenes de corriente que se basan en la topografía del terreno y se utilizan para comprender cómo el agua fluye hacia el cuerpo de agua en el área de estudio. Una corriente sin tributarios se clasifica como de orden 1, cuando 2 corrientes de orden 1 se unen, forman una corriente de orden 2, y así formando mayores órdenes.

En la parte más baja del valle, debido a una disminución abrupta de la inclinación del terreno, se desarrolla una llanura que se forma a partir de la acumulación de sedimentos transportados por el agua, conocidos como depósitos aluviales (Boluarte & Ninaja, 2018). Debido a su ubicación en el extremo final de la cuenca del río Tambo, el humedal actúa como un punto de acumulación de sedimentos, especialmente en la zona del estuario. Esta acumulación de sedimentos es responsable de una notable riqueza de nutrientes, lo que a su vez genera una gran diversidad biológica en el área (Castillo Fernández et al., 2011).

Figura 24. Drenes tributarios



Fuente: Plan Maestro del SNLM 2015-2019

Se muestra aquí (Figura 24), el sistema de drenes artificiales existentes de la zona agrícola adyacente al SNLM, en la que se observa el área de color verde claro que representa el SNLM y el rosa la zona agrícola aledaña del distrito Dean Valdivia; 3 drenes principales son los que aportan directamente a la laguna Iberia Sur (Dren 32, Dren 33 y Dren 34), sin embargo, también recibe aportes por los drenes que ingresan por la parte Norte de esta laguna.

Este mapa guarda relación con el mapa de escorrentías mostrado en la figura 23. Según el plan maestro del SNLM 2015-2019, en la actualidad, las lagunas situadas dentro del Área Natural Protegida son abastecidas por una serie de drenajes que desembocan en el Sistema Nacional de Límites Marítimos. Estos drenes son esenciales, ya que transportan el exceso de

agua de los campos de riego de Iberia, y sin este flujo constante durante el año, existe el riesgo de que tanto las lagunas como las plantas que dependen de esta agua y humedad se sequen y eventualmente desaparezcan. La infraestructura consiste en un dren colector principal y varios drenes subterráneos ubicados cerca de la laguna Iberia.

4.1.3. Meteorología

Según los datos obtenidos de la estación meteorológica más cercana, Pampa Blanca, el SNLM tiene un clima principalmente seco, templado cálido o desértico superárido. Considerado hidrológicamente seco, las precipitaciones son nulas en algunos años. La corriente peruana, también conocida como corriente de Humboldt, transporta aguas frías del continente antártico, lo que hace que esta región sea extremadamente seca.

Según un artículo de investigación de Chávez et al. (2016), el clima del Santuario Nacional Mejía, donde se encuentran las Lagunas de Mejía, se caracteriza por un ambiente desértico con una temperatura media de 21,8°C, con máximas de hasta 30°C y mínimas de 13,3°C. La precipitación media anual de la región es de unos 16,5 mm, y la mayor parte se produce entre enero y marzo. Sin embargo, el estudio señala que hay variaciones significativas en el clima de las distintas partes del santuario, con algunas zonas con mayores precipitaciones y condiciones más húmedas que otras.

Tabla 9. Datos Meteorológicos del SNLM

Mes	Temperatura Máx (°C)	Temperatura Mín (°C)	Precipitación (mm)	Humedad (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento
Enero	28.75	18.88	0	70.50	2.570 m/s.	SE-NO
Febrero	30.37	21.18	0	76.52	2.056 m/s.	SE-NO
Marzo	29.67	21.13	0	82.5	2.056 m/s.	SE-NO
Abril	26.41	17.34	0	76.39	3.084 m/s.	SE-NO
Mayo	25.15	15.42	0	80.64	3.084 m/s.	SE-NO
Junio	22.57	15.72	0	80.17	3.084 m/s.	SE-NO
Julio	21.60	13.04	0	77.31	2.570 m/s.	SE-NO
Agosto	20.91	13.96	0	77.84	2.570 m/s.	SE-NO
Septiembre	21.15	14.33	0	81.82	2.570 m/s.	SE-NO
Octubre	23.17	15.22	0	77.35	2.056 m/s.	SE-NO
Noviembre	25.01	15.91	0	74.64	2.570 m/s.	SE-NO
Diciembre	28.82	18.76	0	69.68	2.570 m/s.	SE-NO

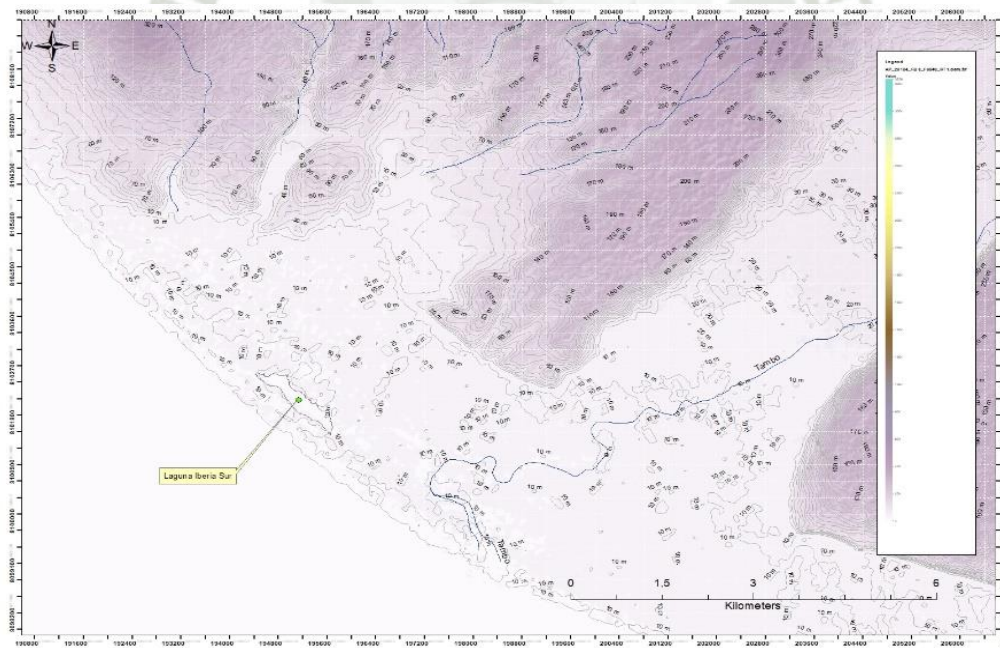
Fuente: SENAMHI, 2019

El viento tiene una dirección sur y una velocidad promedio de 2m/s, con un porcentaje de humedad promedio del 81.7 %. La Tabla 9 muestra las temperaturas y precipitaciones mensuales de la región, con una temperatura promedio de 19,6°C y una precipitación promedio de 20 mm al año. Agosto es el mes más seco, con 0 mm de precipitación; en enero, la precipitación alcanza su punto máximo, con 4 mm en promedio. El mes más caluroso del año es febrero con una temperatura promedio de 23.1 °C; el mes más frío del año es agosto con una temperatura promedio de 16.4 °C.

La diferencia de precipitación entre el mes más seco y el más lluvioso es de solo 4 mm. La temperatura anual varía alrededor de 16,7 °C; siendo Febrero el mes con la temperatura más alta del año con una temperatura promedio de 22,2 °C y Agosto el mes más frío del año con una temperatura de 18.1 °C.

4.1.4. Relieve de terreno

Figura 25. Mapa de relieve de terreno



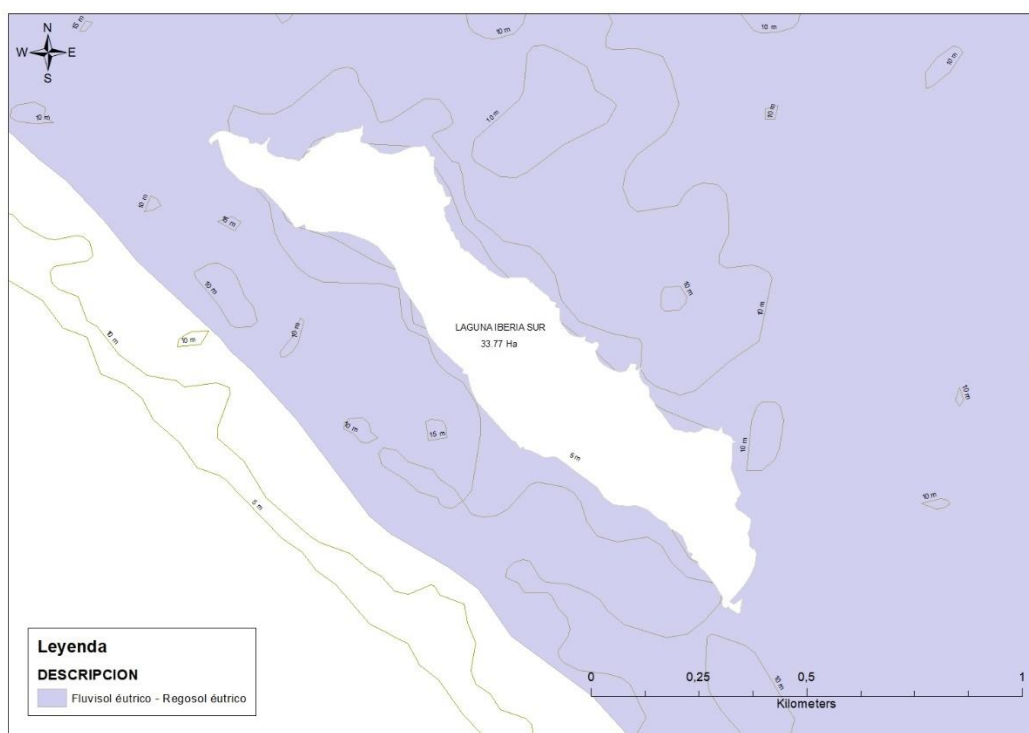
La Figura 25 muestra el relieve de terreno y las curvas de nivel en un área aproximada de 15Km de largo por 8 Km de ancho. Este mapa fue generado para conocer las diferencias de elevación de la planicie costanera, la zona del Valle Tambo, cerros, lomas y zonas agrícolas.

El SNLM se encuentra dentro de la zona de la planicie costanera prácticamente a nivel del mar. Para este cuadrante de mapa se pueden apreciar los colores morado con degradación hacia el blanco, que corresponden a una altitud mayor hacia una menor, respectivamente.

El SNLM se encuentra a nivel del mar con una cota máxima de 3.50 m.s.n.m. y una cota mínima de 0.50 m.s.n.m., teniendo una superficie total de 690.6 has. que incluye a las lagunas y terrenos aledaños. Además, tiene un dique natural que separa el mar de las lagunas con una altura máxima de 3.40 m.s.n.m (INRENA, 2000).

4.1.5. Suelo

Figura 26. Mapa de Tipo de Suelo



El mapa de tipo de suelo (Figura 26) muestra que los terrenos de esta Área Natural Protegida que rodean la laguna Iberia presentan una consistencia bastante homogénea, con suelos de tipo Fluvisol Eutrófico – Rugosol eutrófico, que poseen propiedades gléyicas por debajo de los 50 cm, con presencia de una capa freática entre 80 y 120 cm de profundidad, procedente de 51% de materiales no consolidados y susceptibilidad a la erosión moderada alta.

Las capas superficiales son predominantemente arenosas y exhiben una leve variación justo debajo de un metro de profundidad. Sin embargo, a una profundidad de aproximadamente 1.5 metros y cerca de las lagunas, se pueden hallar suelos que combinan características arcillosas y arenosas (Ramos Aro, 2019; SERNANP, 2015). Los suelos en el SNLM son mayormente superficiales y presentan problemas de salinidad y/o drenaje deficiente. Debido a este mal drenaje, el nivel freático se acerca a la superficie (el rango de nivel de agua subterránea oscila entre 0.30 hasta 1.60m), lo que da lugar a la presencia de lagunas como Iberia, Boquerón y Mejía, sobre todo en la estación de invierno por influencia de los cambios de marea (ONERN, 1974).

El acuífero libre denominado Mejía, dentro del cual se desarrollan las lagunas del SNLM, abarca aproximadamente una superficie de 94,92 Km²; es de tipo poroso no consolidado de extensión regional y se encuentra en una zona desértica o de poca precipitación pluvial, está formado por depósitos cuaternarios marinos, fluviales y aluviales (el de mayor proporción) materiales que en la mayoría de los casos tienen propiedades de permeabilidad o porosidad favorables para la circulación o almacenamiento de aguas subterráneas

4.2. Cálculo de los índices de clorofila MCI y MPH a través del procesamiento de imágenes satelitales Sentinel 2.

4.2.1. Selección y descarga de imágenes satelitales Sentinel 2A con nubosidad <15%

Se obtuvo la Tabla 10 que describe las características de las 36 imágenes satelitales descargadas para las diferentes estaciones y años.

Tabla 10. Características de imágenes descargadas del Satélite Sentinel 2

Nº	ID de la escena	Estación	Fecha de la imagen	Cobertura de nubes (%)
1	S2B_MSIL1C_20180115T145719_N0206_R039_T18KZG_20180115T164328	Verano	15/1/2018	4.3429
2	S2B_MSIL1C_20180224T145719_N0206_R039_T18KZG_20180224T200101	Verano	24/2/2018	7.7393

3	S2B_MSIL1C_20180306T145719_N02 06_R039_T18KZG_20180306T193832	Verano	6/3/2018	6.2955
4	S2A_MSIL1C_20180331T145721_N02 06_R039_T18KZG_20180331T200747	Otoño	31/3/2018	7.1422
5	S2A_MSIL1C_20180420T145731_N02 06_R039_T18KZG_20180420T181954	Otoño	20/4/2018	0.674
6	S2A_MSIL1C_20180520T145731_N02 06_R039_T18KZG_20180520T181925	Otoño	20/5/2018	15.7594
7	S2A_MSIL1C_20180530T145731_N02 06_R039_T18KZG_20180530T182205	Invierno	30/5/2018	29.4151
8	S2A_MSIL1C_20180629T145731_N02 06_R039_T18KZG_20180629T195723	Invierno	29/6/2018	3.1005
9	S2A_MSIL1C_20180709T145731_N02 06_R039_T18KZG_20180709T194250	Invierno	9/7/2018	0.4324
10	S2B_MSIL1C_20180922T145719_N02 06_R039_T18KZG_20180922T201428	Primavera	22/9/2018	24.2161
11	S2B_MSIL1C_20181101T145729_N02 06_R039_T18KZG_20181103T202529	Primavera	1/11/2018	6.0408
12	S2A_MSIL1C_20181206T145721_N02 07_R039_T18KZG_20181206T181157	Primavera	6/12/2018	1.0135
13	S2B_MSIL1C_20190120T145729_N02 07_R039_T18KZG_20190120T181147	Verano	20/1/2019	10.4866
14	S2A_MSIL1C_20190224T145721_N02 07_R039_T18KZG_20190224T193936	Verano	24/2/2019	12.5545
15	S2A_MSIL1C_20190306T145721_N02 07_R039_T18KZG_20190306T194421	Verano	6/3/2019	5.5786
16	S2A_MSIL1C_20190405T145731_N02 07_R039_T18KZG_20190405T182052	Otoño	5/4/2019	3.9114
17	S2A_MSIL1C_20190505T145731_N02 07_R039_T18KZG_20190505T181544	Otoño	5/5/2019	0.7865

18	S2B_MSIL1C_20190609T145739_N02 07_R039_T18KZG_20190609T182008	Otoño	9/6/2019	1.2472
19	S2A_MSIL1C_20190624T145731_N02 07_R039_T18KZG_20190624T181605	Invierno	24/6/2019	15.601
20	S2A_MSIL1C_20190823T145731_N02 08_R039_T18KZG_20190823T181544	Invierno	23/8/2019	4.7123
21	S2A_MSIL1C_20190902T145731_N02 08_R039_T18KZG_20190902T181526	Invierno	2/9/2019	5.2435
22	S2A_MSIL1C_20191012T145731_N02 08_R039_T18KZG_20191012T181142	Primavera	12/10/2019	2.7458
23	S2B_MSIL1C_20191116T145729_N02 08_R039_T18KZG_20191116T181159	Primavera	16/11/2019	3.5738
24	S2B_MSIL1C_20191216T145719_N02 08_R039_T18KZG_20191216T180957	Primavera	16/12/2019	3.9466
25	S2A_MSIL1C_20200130T145721_N02 08_R039_T18KZG_20200130T181246	Verano	30/1/2020	25.1087
26	S2A_MSIL1C_20200219T145721_N02 09_R039_T18KZG_20200219T181530	Verano	19/2/2020	10.6704
27	S2A_MSIL1C_20200310T145721_N02 09_R039_T18KZG_20200310T181514	Verano	10/3/2020	6.4203
28	S2A_MSIL1C_20200330T145721_N02 09_R039_T18KZG_20200330T181720	Otoño	30/3/2020	7.7082
29	S2B_MSIL1C_20200424T145719_N02 09_R039_T18KZG_20200424T181351	Otoño	24/4/2020	0.3248
30	S2B_MSIL1C_20200524T145729_N02 09_R039_T18KZG_20200524T181438	Otoño	24/5/2020	13.9982
31	S2A_MSIL1C_20200628T145731_N02 09_R039_T18KZG_20200628T181717	Invierno	28/6/2020	27.8211
32	S2B_MSIL1C_20200713T145729_N02 09_R039_T18KZG_20200713T181120	Invierno	13/7/2020	1.5389

33	S2B_MSIL1C_20200921T145729_N02 09_R039_T18KZG_20200921T182727	Invierno	21/9/2020	10.3352
34	S2B_MSIL1C_20201011T145729_N02 09_R039_T18KZG_20201011T182541	Primavera	11/10/2020	5.1983
35	S2A_MSIL1C_20201105T145731_N02 09_R039_T18KZG_20201105T182645	Primavera	5/11/2020	0.6042
36	S2A_MSIL1C_20201205T145721_N02 09_R039_T18KZG_20201205T183320	Primavera	5/12/2020	10.8699

Los paquetes de imágenes descargadas vienen codificados por el ID de la escena que nos brinda la misma página web de descarga COPÉRNICUS, donde se señala primeramente el nombre del satélite (2A o 2B), el instrumento de operación (Instrumento Multiespectral), el nivel de procesado del producto (L1C) y el momento temporal UTC (año, mes y día).

Las imágenes están fechadas desde enero de 2018 hasta diciembre de 2020, específicamente van desde el 15 de enero de 2018 hasta el 5 de diciembre de 2020 y se distribuyen a lo largo de las cuatro estaciones del año: verano, otoño, invierno, y primavera. La cobertura de nubes varía significativamente, desde tan baja como 0.3248% hasta tan alta como 29.4151% en zonas distantes de la laguna, captadas mayormente en invierno y primavera.

Las imágenes con baja cobertura de nubes (por debajo del 5-15%) se consideran de alta calidad para los fines de este análisis, ya que las nubes a menudo obstaculizan la vista de la superficie terrestre, sin embargo, se usaron algunas imágenes de mayor nubosidad debido a que la plataforma COPÉRNICUS ya no ofrecía mayor cantidad de imágenes tomadas en esas fechas y zona.

Autores como Quezada (2020), utilizan imágenes satelitales disponibles seleccionando incluso porcentajes menores a 50% o imágenes en la cual muestren ausencia de nubes en las estaciones evaluadas respecto a su objeto de estudio.

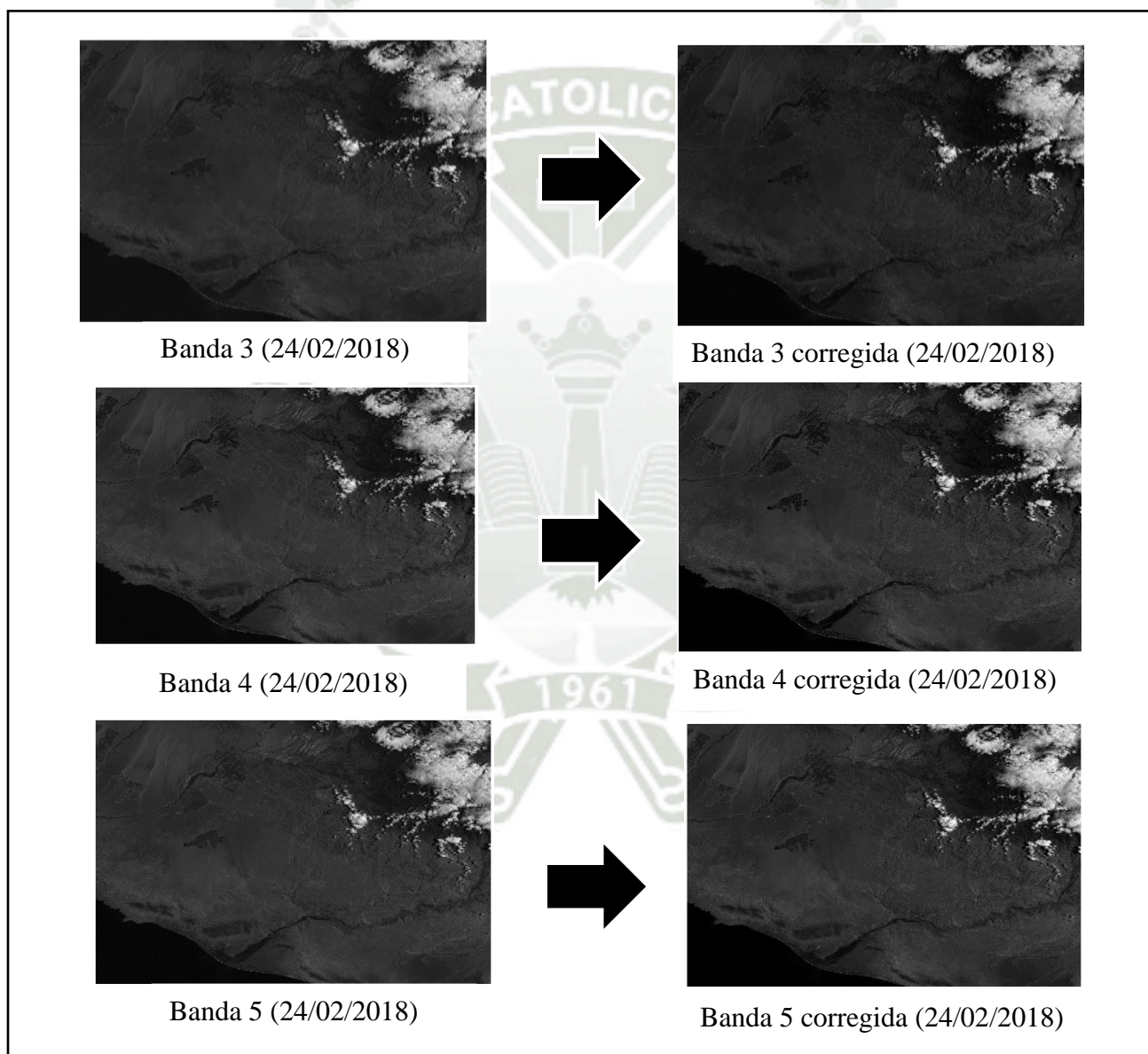
Las imágenes Sentinel no siempre son utilizadas para teledetección de cuerpos de agua con diversos fines, sino también que se utilizan muy a menudo imágenes Landsat, así lo demuestran las investigaciones de Yadav et al (2019), Shi et al (2022), que las utilizaron con

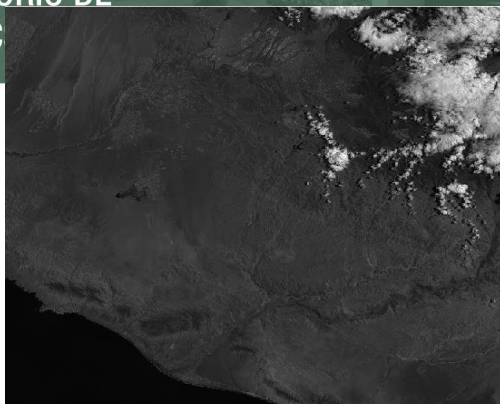
el propósito de estimación de Clorofila para un lago, litoral costero y de monitoreo de eutrofización de lagos medianos y pequeños respectivamente.

4.2.2. Corrección atmosférica y remuestreo de bandas satelitales

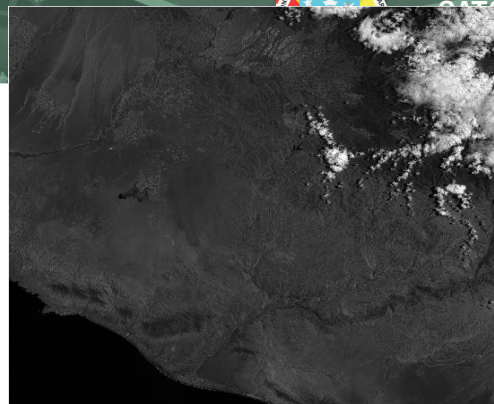
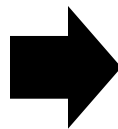
Se muestra en la Figura 27 el procesamiento de la corrección y remuestreo de bandas 3, 4, 5, 6, 8 y 8A para la fecha del 24/02/2018.

Figura 27. Corrección y remuestreo de bandas satelitales

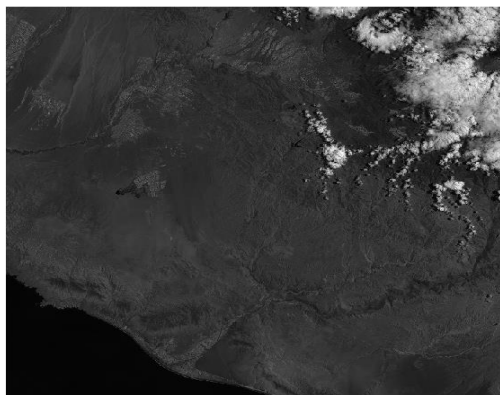




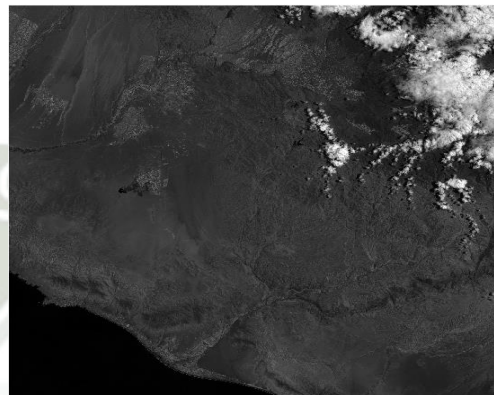
Banda 6 (24/02/2018)



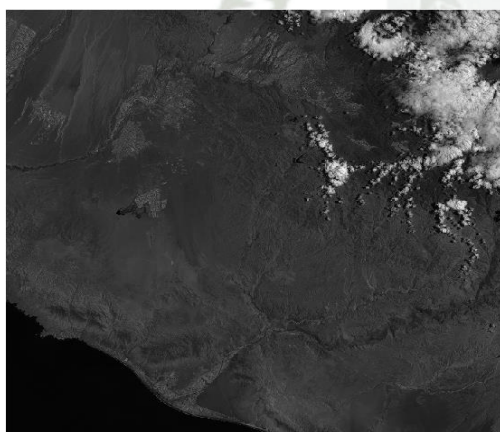
Banda 6 corregida (24/02/2018)



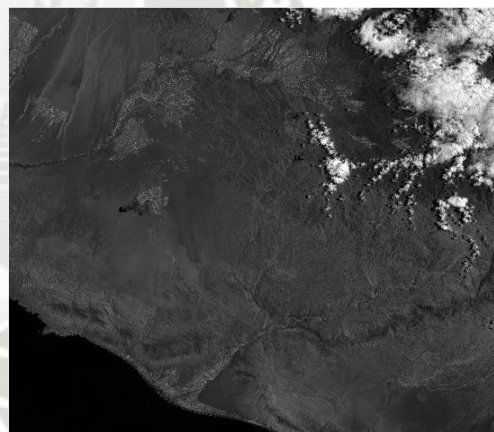
Banda 8 (24/02/2018)



Banda 8 corregida (24/02/2018)



Banda 8A (24/02/2018)



Banda 8A corregida (24/02/2018)

Las bandas 5, 6 y 8A fueron remuestreadas de 20 metros a 10 metros en el proceso, puesto que las otras ya vienen por defecto en 10 metros y es debido a la reducida escala de las imágenes satelitales que no se logra distinguir visualmente el cambio de resolución y valor de reflectancia en los píxeles de las imágenes.




Así también Bellido (2019) en su tesis sobre el comportamiento de clorofila “a” en la represa aguada Blanca, utiliza el método de corrección “Extracción de píxeles oscuros”, de igual






manera hace remuestreo de las mismas bandas utilizando QGIS, y Karimi et al (2022), lo utilizó para estimar concentración de clorofila “a” en lago poco profundo de agua dulce.





4.2.3. Separación tierra-agua mediante máscara NDWI

Se obtuvieron las máscaras de NDWI para las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera de los años 2018, 2019 y 2020; las cuáles se muestran en la Tabla 11 junto con su fecha de imagen utilizada, área en hectáreas de la máscara y número de píxeles que conforman la máscara ráster.

Tabla 11. Máscaras NDWI generadas

Máscara NDWI	Estación y Fecha	Área (ha)	N° píxeles
	Verano (15/01/2018)	30.7500	3081
	Otoño (20/04/2018)	30.5503	3061
	Invierno (09/07/2018)	31.5184	3158

	Primavera (01/11/2018)	29.3527	2941
	Verano (20/01/2019)	28.8038	2886
	Otoño (09/06/2019)	29.6222	2968
	Invierno (24/06/2019)	29.7020	2976
	Primavera (12/10/2019)	28.1351	2819

	Verano (30/01/2020)	29.5523	2961
	Otoño (24/04/2020)	29.7619	2968
	Invierno (13/07/2020)	31.3288	3139
	Primavera (11/10/2020)	30.5803	3064

A lo largo del período analizado, el área de NDWI fluctuó entre aproximadamente 28 y 31 hectáreas, mientras que el número de píxeles fluctuó entre los 2819 y 3158, lo que sugiere que la cantidad de agua en la región varía ligeramente de acuerdo a la estación y año, pero no hay cambios drásticos en la presencia de agua.

Las áreas y número de píxeles de estas máscaras tienden a ser más bajas en las estaciones de primavera y verano, lo que indicaría una menor cantidad de agua en comparación con el otoño e invierno.

Carpio K. (2019) en su tesis “Caracterización de las formaciones de Junco y su relación de los espejos lagunares del Santuario Nacional de Lagunas de Mejía” calcula el índice de NDWI con el objetivo de advertir y delimitar entornos húmedos en la laguna Iberia, puesto que este índice es capaz de detectar profundidades similares a través de las copas de vegetación, por lo cual ayudaría a la real delimitación de la laguna Iberia.

4.2.4. Cálculo de índices MCI y MPH

Se hicieron los cálculos de índices MCI y MPH en las diferentes estaciones de los años 2018 – 2020, obteniendo los siguientes resultados plasmados en mapas estacionales que se muestran en el ANEXO N°3. Estos mapas de índices de clorofila sirven como indicadores de concentración de clorofila adimensional por lo que para las escalas de estos mapas sólo se tomaron valores positivos a partir del 0.

En otras investigaciones se calcularon también los índices MCI y MPH, los cuales fueron traducidos en forma de mapas de concentración de estos índices en épocas secas y húmedas, mostrando concordancia con los posteriores mapas de concentración de clorofila (Alikas et al., 2010; Peppas et al., 2020).

4.2.5. Correlación de índices MCI y MPH

La Tabla 12 muestra valores de correlación de Pearson entre el Índice de Clorofila Máximo (MCI) y el índice de Altura Máxima de Pico (MPH) de las diferentes años y estaciones del periodo de estudio. En el ANEXO N°4 se encuentran las gráficas de dispersión que respaldan estos datos.

Tabla 12. Coeficiente de correlación r de Pearson por año y estación para los índices MCI y MPH

	Anual	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
2018	0.8162	0.9603	0.9510	0.9169	0.4246
2019	0.8646	0.9403	0.8972	0.7900	0.9598
2020	0.5914	0.9045	0.9393	0.4920	0.8994

La correlación MCI-MPH muestra variaciones anuales. En 2018, es de 0.8162, en 2019 aumenta a 0.8646, y en 2020 disminuye a 0.5914. La correlación también varía según la estación del año. Por ejemplo, en verano, la correlación es alta en todos los años, mientras que en primavera es notablemente baja en 2018 (0.4246) y en invierno es baja en 2020 (0.4920).

Cada año muestra un patrón ligeramente diferente en la correlación MCI-MPH dado que las condiciones ambientales y las características específicas de cada año pueden influir en la relación entre estas dos métricas. Podemos decir además que la correlación es más alta en las estaciones de verano y otoño en comparación con invierno y primavera.

Según Peppia M. (2020) existe una correlación positiva entre ambos índices, obteniendo en su investigación el coeficiente más bajo de 0.82 en 2018, sugiriendo una tendencia distinta al no observarse una disminución consistente a lo largo de los años. Al igual que en la presente tesis, se encontró que las correlaciones más altas ocurren en verano y otoño.

4.3. Determinación de los niveles de clorofila “a” in situ y por teledetección

4.3.1. Recolección y análisis de muestras de agua de la laguna Iberia

La Tabla 13 muestra el resumen de resultados obtenidos para las fechas de muestreo. Los resultados originales se encuentran en el ANEXO N°1.1 y ANEXO N°1.2.

Tabla 13. Resultados de análisis de clorofila en laboratorio

Código de Punto	Coordenadas UTM		Clorofila (mg/L)	
	Este	Norte	Fecha - 28/09/2022	Fecha - 15/03/2023
D01	195618.1	8101855.1	0.022	<0.005
D02	195139.5	8102217.3	0.021	0.006
D03	194928.3	8102491.1	0.022	0.010
C04	195261.4	8101972.9	0.019	0.008
C05	194870.5	8102397.9	0.020	0.007
P06	194514.3	8102485	0.019	0.009
P07	195054.4	8101969.9	0.020	0.009
P08	195383.3	8101728.6	0.021	0.005

En la Tabla 13 podemos observar mayores niveles de clorofila en la primera fecha (época seca) de muestreo, con valores que promedian los 0.020 mg/L, en comparación con la segunda fecha (época húmeda), con valores que promedian los 0.007 mg/L.

En la primera fecha de muestreo (28/09/2022) el valor más bajo se obtuvo en el punto P06 con valor de 0.019 mg/L, mientras que los valores más altos se obtuvieron en la zona de puntos próximos a los drenes afluentes, D01 y D03, con un valor máximo de 0.022 mg/L.

En la segunda fecha de muestreo (15/03/2023) se obtuvieron valores mucho más bajos en general, con valor menor al límite de cuantificación del método utilizado en el punto D01 (<0.005 mg/L) y con valor máximo de 0.010 mg/L en el punto D03, próximo a los drenes afluentes.

Los resultados indican que para la fecha 28/09/2022, los niveles de clorofila están en el rango de 19 – 22 ($\mu\text{g/L}$), lo que se interpreta como una categoría eutrófica según la OCDE. Y para la fecha 15/03/2023 los niveles de clorofila se encuentran en el rango 5 – 10 ($\mu\text{g/L}$) y eso corresponde a un nivel mesotrófico y eutrófico.

La investigación de Zúñiga (2020) quien realizó muestreo superficial y de sedimento en 5 puntos de la laguna, encontró que para el período de Junio 2018 – Junio 2019, los niveles de fósforo total y transparencia de agua determinaron que el estado trófico de la laguna era de tipo mesoeutrófico, hipereutrófico, ya que los valores de fósforo total, para las fechas 24/4/2019, 25/5/2019, 25/6/2019 fueron de 0.021 mg/L, 0.101 mg/L, 0.01 mg/L, lo que en la escala trófica de la OCDE se interpreta como mesotrófico, hipereutrófico y mesotrófico, respectivamente.

Así mismo, Zúñiga (2020) también evaluó clorofila usando una sonda para las fechas 24/4/2019, 25/5/2019, 25/6/2019, y los resultados fueron de 17.90 $\mu\text{g/L}$, 16.40 $\mu\text{g/L}$, 11.65 $\mu\text{g/L}$, lo que en la escala trófica de la OCDE se interpretan como nivel eutrófico al igual que la mayoría de nuestro rango de concentraciones.

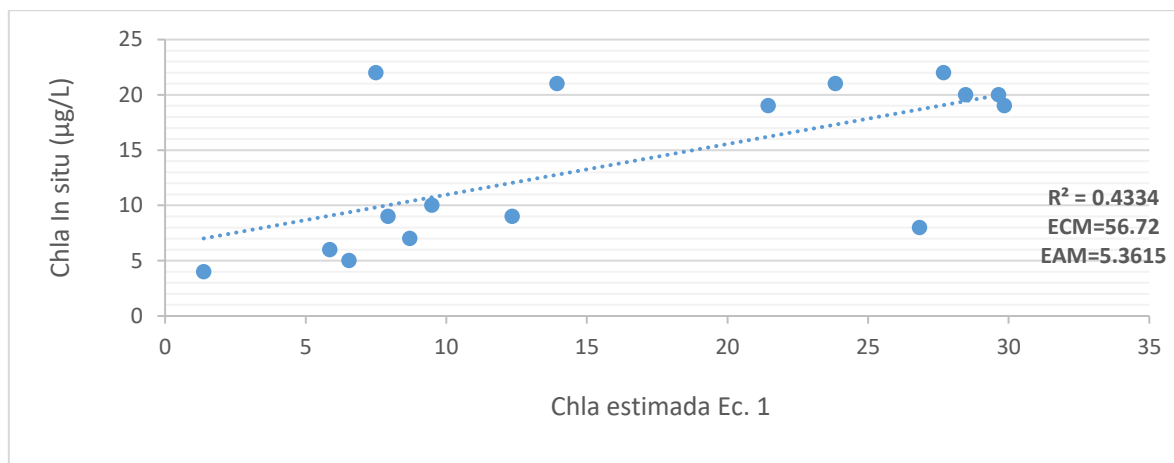
4.3.2. Determinación de niveles de Clorofila “a” por teledetección

Se obtuvieron resultados de dos maneras distintas, mediante la aplicación de ecuaciones empíricas y mediante la obtención de una ecuación de regresión propia.

4.3.2.1. Ecuaciones empíricas

Las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 fueron validadas comparándose la concentración de clorofila obtenida por teledetección con los valores de clorofila obtenidos *in situ*, dando como resultados las siguientes gráficas de dispersión que muestran los estadísticos de coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (ECM) y error absoluto medio (EAM).

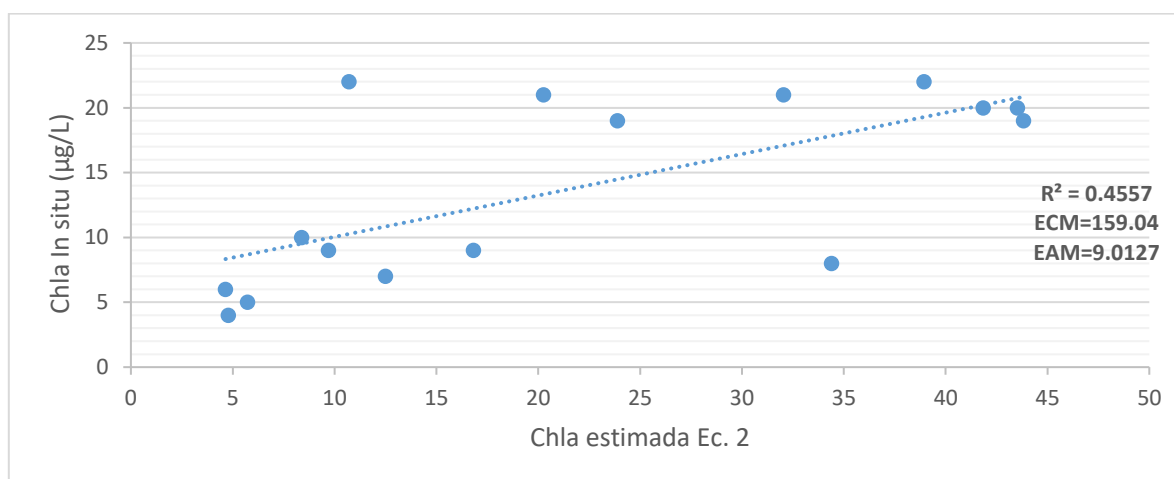
Figura 28. Gráfica de dispersión de Concentración de clorofila estimada por la Ecuación 1 vs Concentración de clorofila *in situ*



La Figura 28 muestra la gráfica de dispersión de la concentración de clorofila obtenida por la Ecuación 1 vs la concentración obtenida *in situ*, en ésta se observó un R^2 moderadamente bajo de 0.4334 que indica que el modelo de la Ecuación 1 no es tan eficaz en la predicción de concentración de clorofila. El error cuadrático medio (ECM) obtenido fue de 56.72 y el error absoluto medio (EAM) de 5.3615 $\mu\text{g/L}$, lo que indica que las predicciones de la Ecuación 1, en promedio, difieren en buena medida de los valores reales.

Así también Mas Monsonis (2017) utilizó esta misma Ecuación 1 obteniendo un R^2 de 0.6073 y ECM de 11 $\mu\text{g/L}$ en su investigación aplicada sobre una laguna colindante con el mar mediterráneo, siendo un mejor ajuste que el obtenido para nuestro cuerpo de agua, sin embargo, sus resultados continuaron difiriendo de los esperados.

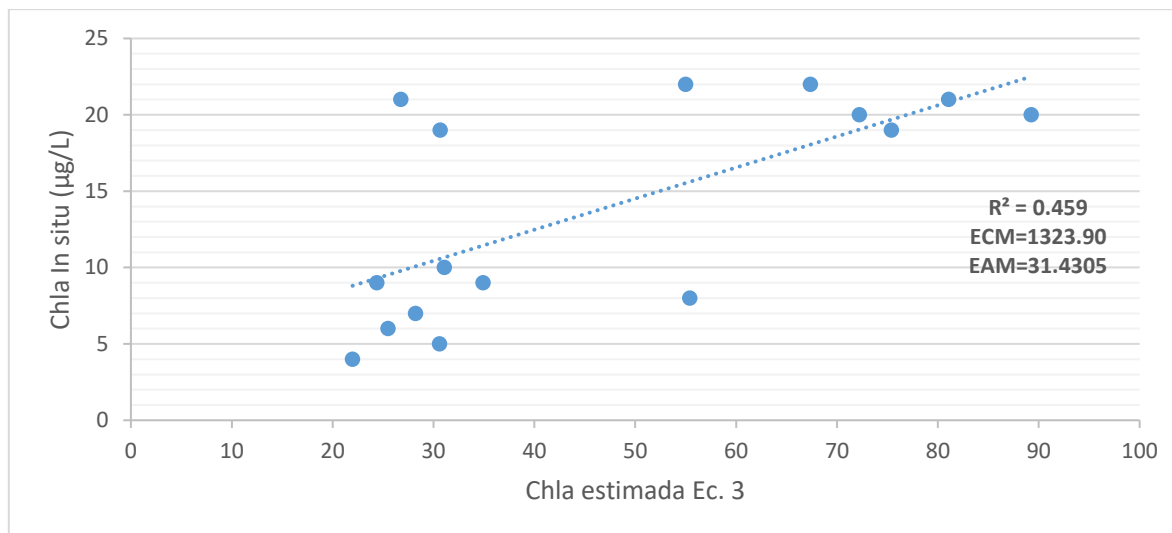
Figura 29. Gráfica de dispersión de Concentración de clorofila estimada por la Ecuación 2 vs Concentración de clorofila in situ



La gráfica en la Figura 29 revela una correlación entre la concentración de clorofila determinada mediante la Ecuación 2 y la medición directa in situ. Se tiene un coeficiente de determinación (R^2) de 0.4557, lo que sugiere un ajuste no muy fuerte, un error cuadrático medio (ECM) de 159.04 y un error absoluto medio (EAM) de 9.0127 µg/L, señalando que las estimaciones tienden a desviarse de las mediciones reales.

De igual forma, Mollae (2018) usó la Ecuación 2 obteniendo un R^2 de 0.92 y un ECM de 6 µg/L en su investigación aplicada sobre un lago poco profundo procesando imágenes Sentinel 2, mostrando un buen ajuste con la concentración de clorofila *in situ* obtenida en sus estaciones de muestreo.

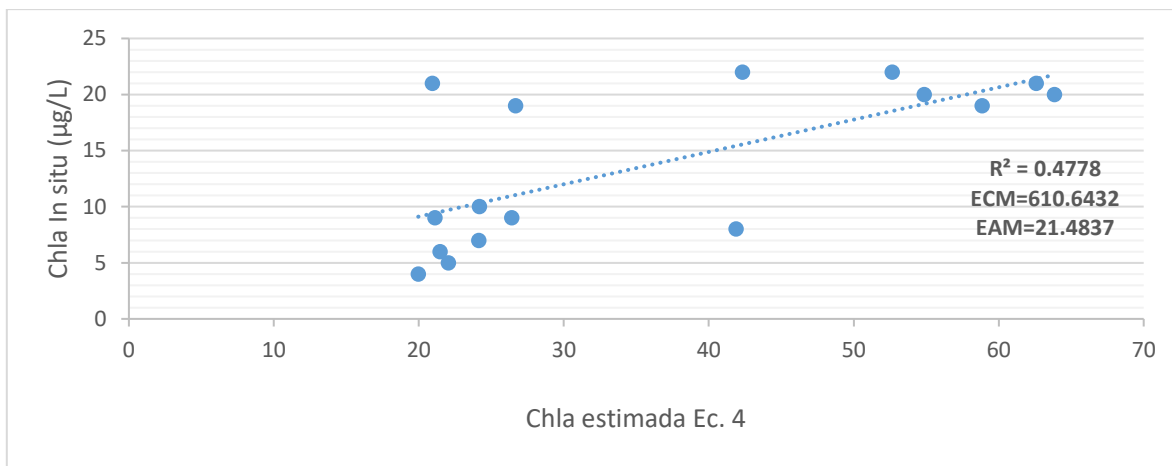
Figura 30. Gráfica de dispersión de Concentración de clorofila estimada por la Ecuación 3 vs Concentración de clorofila in situ



En la Figura 30 se presenta una comparación entre la concentración de clorofila derivada de la Ecuación 3 y las mediciones in situ. Con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.459, el modelo no resulta ser muy eficiente en sus predicciones. Además, con un error cuadrático medio (ECM) de 1323.90 y un error absoluto medio (EAM) de 31.4305 $\mu\text{g/L}$, está claro que las estimaciones proporcionadas por la Ecuación 3 tienden a ser diferentes a las mediciones reales.

A comparación de la investigación de Peppia (2020) que aplicó la Ecuación 3 para el cálculo de la concentración de clorofila “a” en lagos eutróficos usando imágenes satelitales de nivel 1C, donde obtuvo un R^2 de 0.70 y ECM de 8 $\mu\text{g/L}$, siendo un mejor ajuste que el obtenido para nuestro cuerpo de agua, pues nuestro R^2 de la Ecuación 3 carece de precisión en la medición de concentración de clorofila.

Figura 31. Gráfica de dispersión de Concentración de clorofila estimada por la Ecuación 4 vs Concentración de clorofila in situ



La Figura 31 ilustra cómo se relaciona la concentración de clorofila predicha por la Ecuación 4 con las observaciones in situ. El coeficiente de determinación (R^2) de 0.4778 sugiere que la Ecuación 4 no es totalmente precisa, esto se refuerza con un error cuadrático medio (ECM) de 610.6432 y un error absoluto medio (EAM) de 21.4837 $\mu\text{g/L}$, destacando que las estimaciones de la ecuación no coinciden perfectamente con las mediciones reales.

Grendaité (2018) aplicó la misma Ecuación 4 sobre lagunas eutróficas y oligo-mesotróficas obteniendo un R^2 de 0.77 y ECM de 7 $\mu\text{g/L}$, mostrando un ajuste robusto en la relación de concentración de clorofila e índice MPH.

Tabla 14. Resumen de estadísticos de validación de las ecuaciones empíricas

Ecuaciones	R^2	ECM	EAM
Ecuación 1	0.4334	56.72	5.3615
Ecuación 2	0.4557	159.04	9.0127
Ecuación 3	0.459	1323.90	31.4305
Ecuación 4	0.4778	610.6432	21.4837

Las ecuaciones en la Tabla 14 predicen la concentración de clorofila basándose en diferentes modelos. Si bien la Ecuación 4 tiene el coeficiente R^2 más alto, indicando el mejor ajuste entre las predicciones y las mediciones reales, aún carece de una alta precisión, al igual que

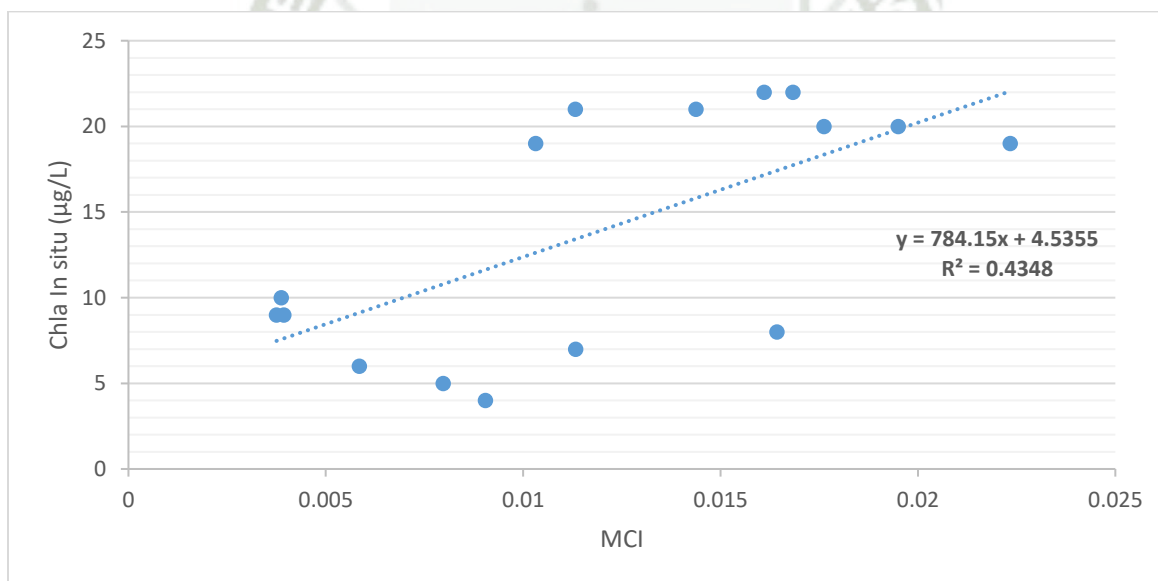
las demás ecuaciones. La Ecuación 3, por otro lado, tiene los valores de ECM y EAM más altos, lo que la hace la menos precisa de las cuatro.

Se seleccionaron las Ecuaciones 2 y 4, representativas de la relación con los índices MCI y MPH, por tener los mayores valores de R^2 en comparación, con las que se estimaron los valores de clorofila que posteriormente fueron representados en mapas de concentración de clorofila (ANEXO N°5). Estos mapas han sido agrupados para una misma fecha representando las 2 ecuaciones en mención.

4.3.2.2. Ecuación de regresión propia

Se elaboraron los gráficos de dispersión que relacionan los valores de los índices MCI y MPH con el valor de concentración de clorofila obtenido *in situ* en los muestreos del 28/09/2022 y 15/03/2023, a continuación, se muestran las gráficas correspondientes:

Figura 32. Gráfica de dispersión de índice MCI vs Concentración de clorofila *in situ*



En la Figura 32 se observa que la ecuación positiva de correlación índice MCI con la concentración de clorofila *in situ* no es muy buena, con un R^2 de 0.4348 que indica que aproximadamente el 43.48% de la variabilidad en la concentración de clorofila se puede explicar por la variabilidad en el MCI, implicando que, aunque exista alguna relación, todavía

hay una cantidad significativa de variabilidad en la concentración de clorofila que no se puede explicar mediante el valor del índice MCI.

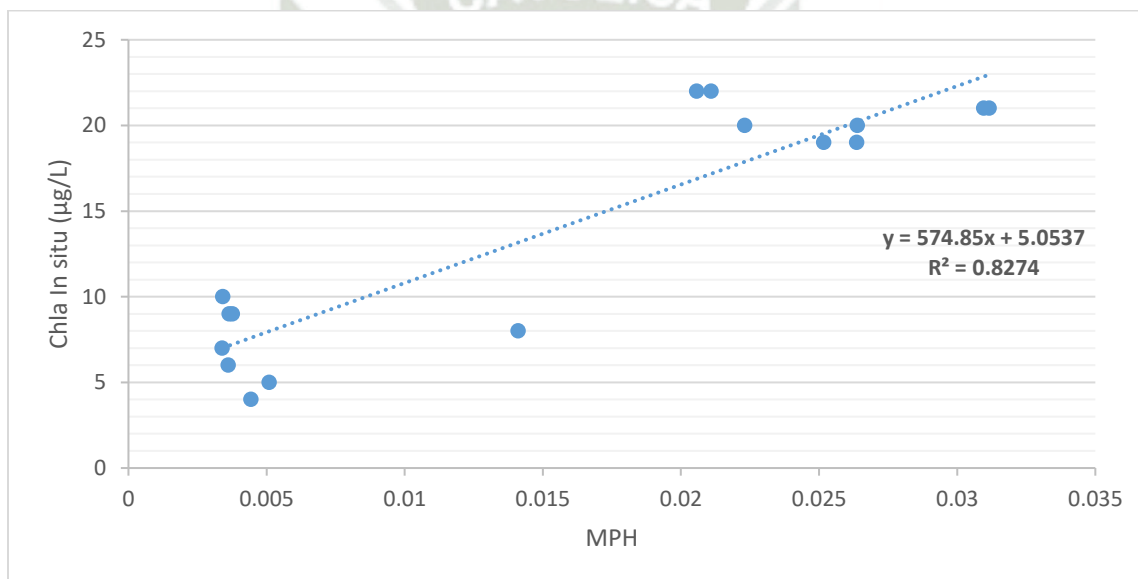
La Ecuación 6 explica la concentración de clorofila en la laguna Iberia Sur de acuerdo al índice MCI:

Ecuación 6. Ecuación Propia MCI

$$Chla (\mu g/L) = 784.15x + 4.5355$$

Donde x es el valor del índice MCI.

Figura 33. Gráfica de dispersión de índice MPH vs Concentración de clorofila in situ



En la Figura 33 se observa que en la ecuación existe una correlación fuerte y positiva del índice MPH con la concentración de clorofila *in situ* con un R^2 de 0.8274 lo que significa que aproximadamente el 82.74% de la variabilidad en la concentración de clorofila puede explicarse mediante la variabilidad en el MPH.

La Ecuación 7 explica la concentración de clorofila en la laguna Iberia Sur de acuerdo al índice MPH:

Ecuación 7. Ecuación Propia MPH

$$Chla (\mu g/L) = 574.85x + 5.0537$$

Donde x es el valor del índice MPH.

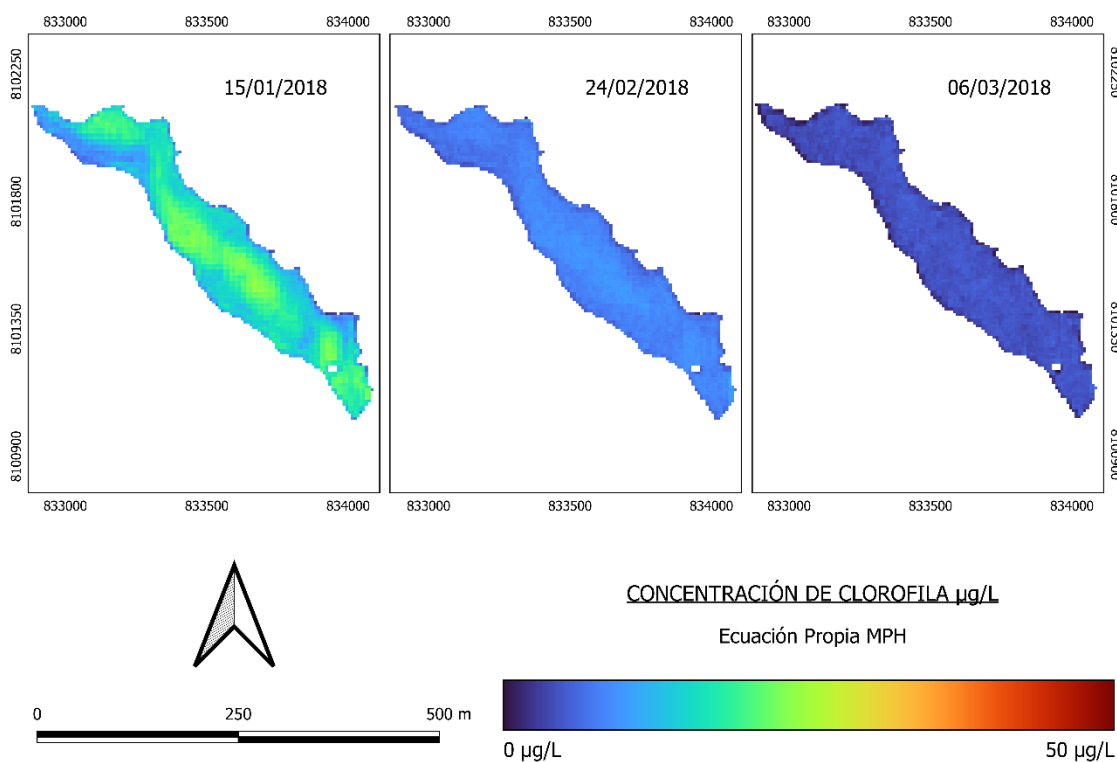
Tabla 15. Coeficiente de determinación (R^2) de calibración de Ecuaciones Propias

Ecuaciones Propias	R^2
Ecuación Propia MCI	0.4348
Ecuación Propia MPH	0.8274

La Tabla 15 muestra que la Ecuación Propia MPH (Ecuación 7) es mucho más eficaz en la explicación de la concentración de clorofila en comparación con la Ecuación Propia MCI (Ecuación 6), por lo que el índice MPH es un mejor predictor para la concentración de clorofila que MCI.

Con la Ecuación 7 de mayor R^2 que relaciona el índice MPH con la concentración de clorofila se elaboraron los siguientes mapas agrupados por estaciones anuales:

Figura 34. Concentración de Clorofila para verano 2018 – Ecuación Propia MPH

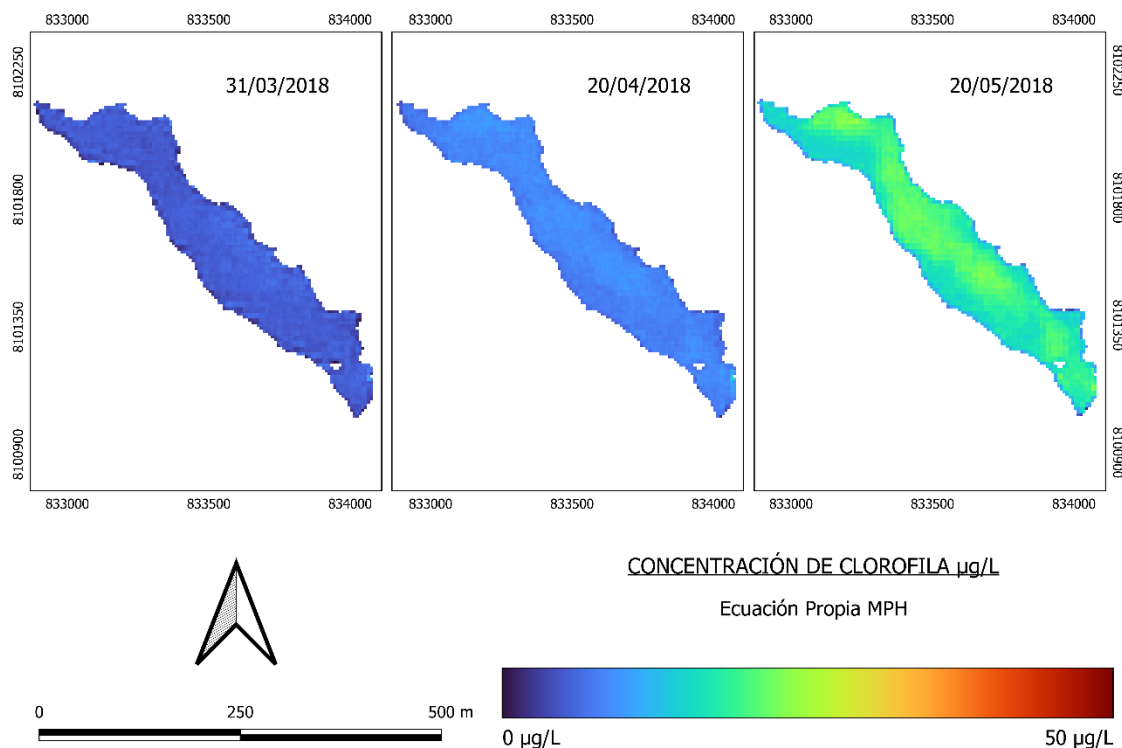


En la Figura 34 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de verano 2018. El mapa de fecha 15/01/2018 muestra las concentraciones más altas de la estación con un rango de 1 a 25 $\mu\text{g/L}$. A primera vista se aprecian coloraciones amarillo-verdosas en la zona media, norte y sur de la laguna que corresponde a un estado eutrófico según la clasificación trófica de la OCDE. Por el contrario, el mapa de fecha 24/02/2018 muestra concentraciones bajas con un rango de 0 a 12 $\mu\text{g/L}$, con coloraciones de tonalidad celeste que representan un estado mesotrófico y eutrófico, mientras que el mapa de fecha 06/03/2018 muestra concentraciones más bajas aún con un rango de 0 a 7 $\mu\text{g/L}$ y coloraciones de tonalidad azul que representan un estado mesotrófico predominantemente.

Se puede apreciar que principalmente en la temporada de verano de 2018 se obtienen valores importantes de concentración de clorofila en el mes de enero en la zona céntrica de la laguna y en algunas zonas periféricas, sin embargo, esto se reduce a fines de febrero e inicios de marzo. Este cambio puede deberse a factores ambientales y/o antrópicos externos.

Las diferencias en la distribución espacial de la eutrofización en 2018 y 2019 mencionadas en la investigación de Liu H, et al. (2021) también sugiere la influencia de factores externos en la calidad del agua.

Figura 35. Concentración de Clorofila para otoño 2018 – Ecuación Propia MPH

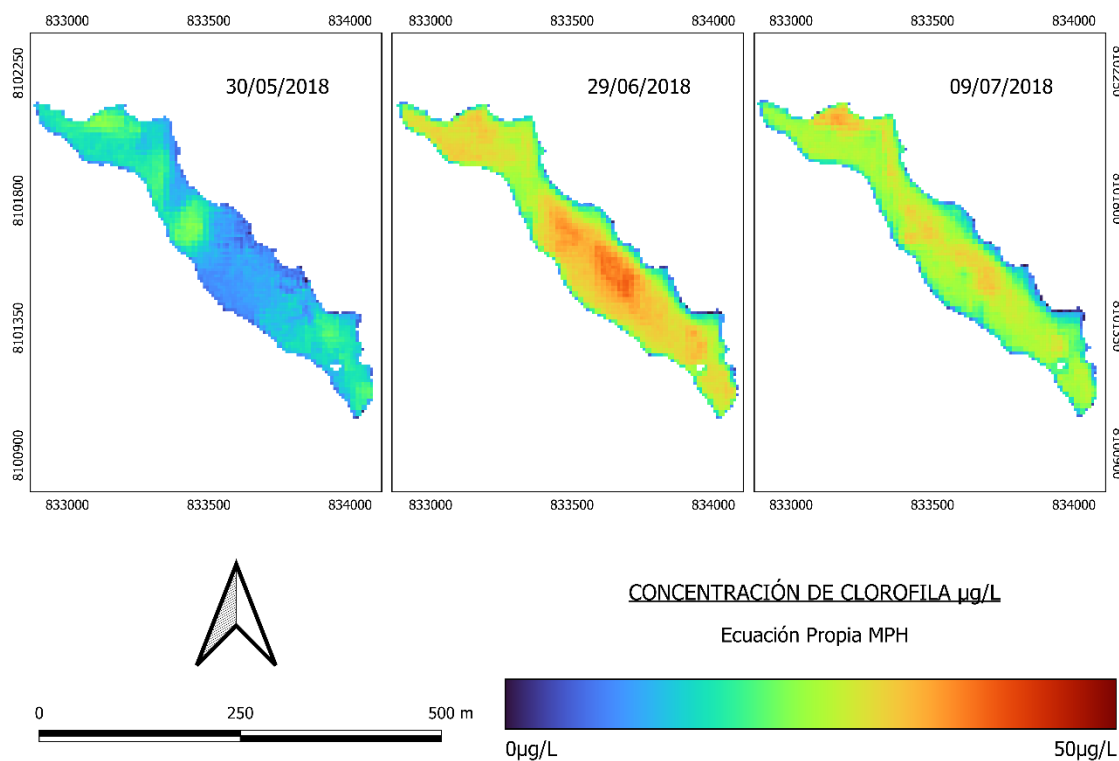


En la Figura 35 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de otoño 2018. El mapa de fecha 31/03/2018 muestra concentraciones bajas con un rango de 0 a 11 $\mu\text{g/L}$, con coloraciones de tonalidad azul que representan predominantemente un estado mesotrófico, mientras que el mapa de fecha 20/04/2018 muestra concentraciones bajas también, de 2 a 16 $\mu\text{g/L}$ y coloraciones de tonalidad celeste que representan un estado mayormente eutrófico en zonas medias y mesotrófico principalmente en bordes. El mapa de fecha 20/05/2018 muestra las concentraciones más altas con un rango de 1 a 25 $\mu\text{g/L}$, donde a primera vista se aprecian coloraciones amarillo-verdosas en la zona media, norte y sur de la laguna que corresponde a un estado eutrófico según la clasificación trófica de la OCDE. De marzo a mayo se observa un nivel bajo-moderado de concentración de clorofila, en el mes de mayo principalmente aumenta, en esta temporada de otoño existe una subida según la interpretación de los mapas mostrados.

El estudio de Yadav et al. (2019) sugiere que la calidad del agua puede verse influenciada por factores como la escorrentía del río y las actividades de uso de la tierra. Es posible que

la laguna Iberia. esté experimentando una mayor afluencia de nutrientes en el mes de Mayo, lo que lleva a un aumento en las concentraciones de clorofila.

Figura 36. Concentración de Clorofila para invierno 2018 – Ecuación Propia MPH

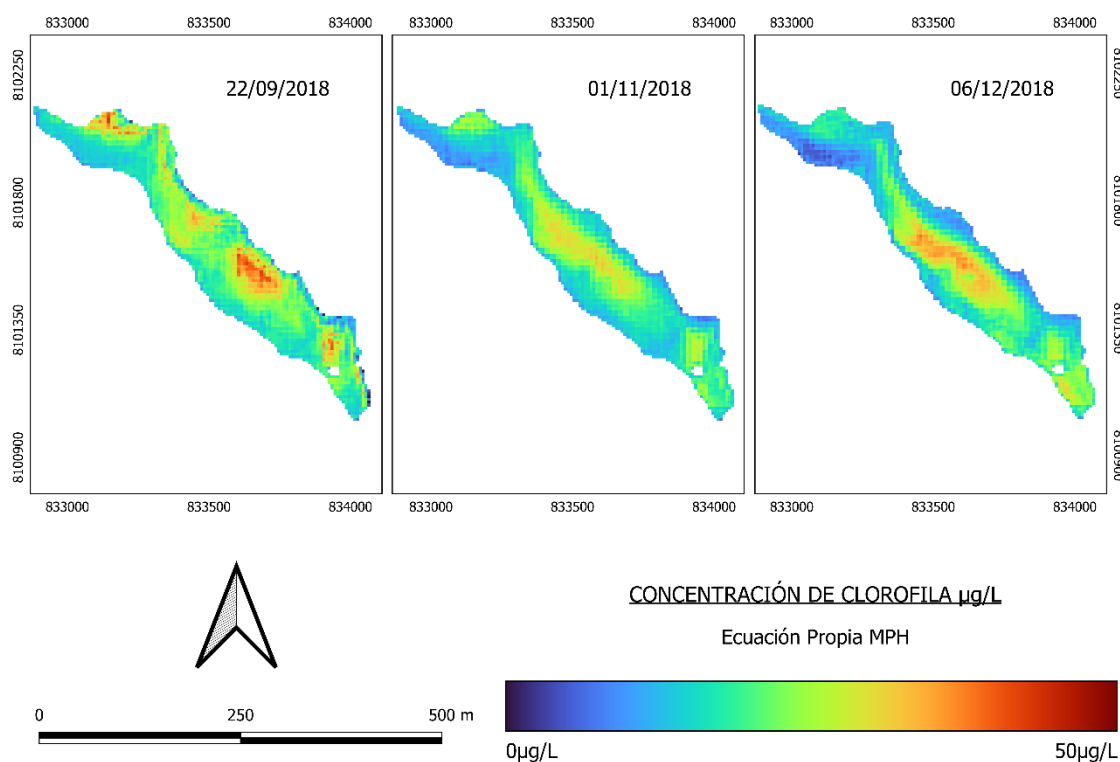


En la Figura 36 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de invierno 2018. El mapa de fecha 30/05/2018 muestra las concentraciones más bajas de la estación con un rango de 0 a 24 µg/L, con coloraciones de tonalidad celeste y amarillo-verdosas que representan predominantemente un estado eutrófico, mientras que el mapa de fecha 29/06/2018 muestra concentraciones altas con un rango de 0 a 40 µg/L y coloraciones de tonalidad verdosa y rojiza que representan un predominio de estado hipereutrófico. El mapa de fecha 09/07/2018 muestra las concentraciones más altas de la estación con un rango de 0 a 36 µg/L, se observan también coloraciones de tonalidad verdosa y rojiza correspondiendo a un estado hipereutrófico en zonas centrales de la laguna y bordes eutróficos más anchos con respecto a la fecha anterior.

De mayo a julio se observa un nivel bajo-moderado de concentración de clorofila en el mes de mayo, en esta temporada de invierno existe una subida en los meses de junio y julio según la interpretación de los mapas mostrados.

En esta temporada de invierno, se muestran concentraciones de clorofila para fechas específicas durante el invierno. Por otro lado, el estudio Li, Y (2022) menciona que las concentraciones de clorofila eran altas durante el otoño y bajas durante el invierno, lo que es diferente para estos casos, siendo moderados y altos en la temporada de invierno.

Figura 37. Concentración de Clorofila para primavera 2018 – Ecuación Propia MPH



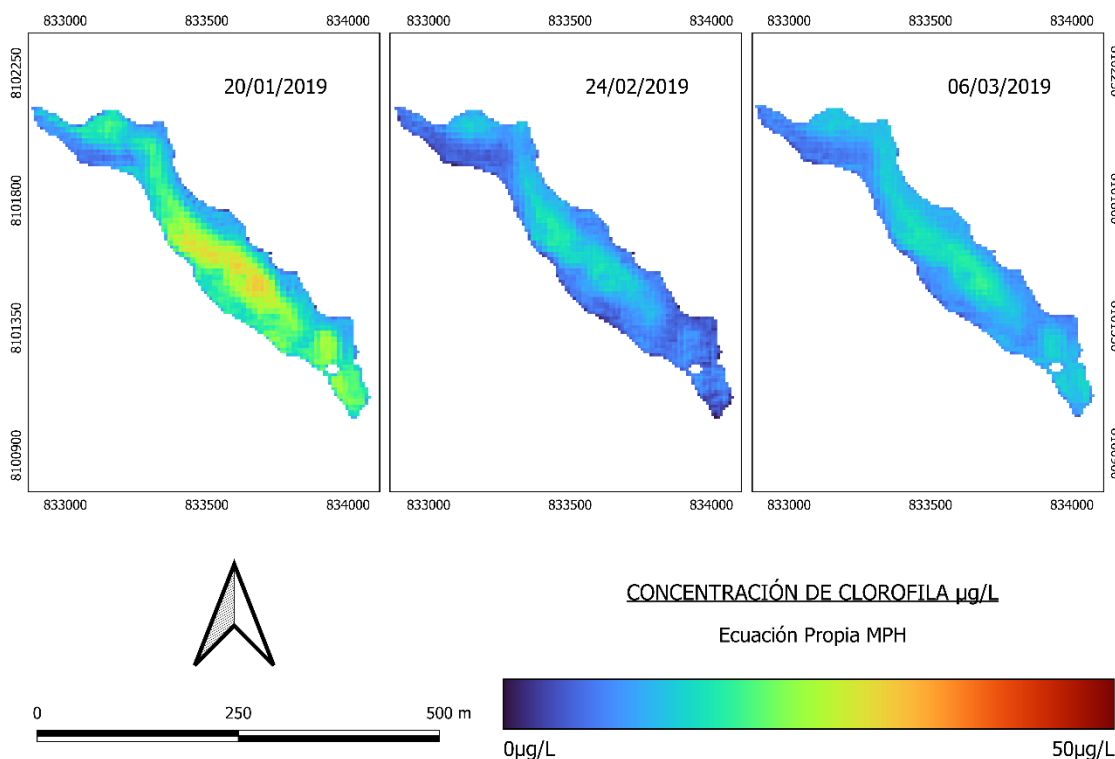
En la Figura 37 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de primavera 2018. El mapa de fecha 22/09/2018 muestra las concentraciones más altas de la estación con un rango de 0 a 43 µg/L, con coloraciones de tonalidad celeste que representan un estado eutrófico y rojizas que representan un estado hipereutrófico. El mapa de fecha 01/11/2018 muestra concentraciones con un rango de 4 a 34 µg/L con coloraciones de tonalidad celeste, verdosa y rojiza que representan un predominio de estado eutrófico con zonas hipertróficas en el centro de la laguna. El mapa de fecha 06/12/2018 muestra las

concentraciones más altas con un rango de 3 a 38 $\mu\text{g/L}$, se observan colores variados de tonalidades azul, celeste, amarillo-verdoso y rojizo correspondiendo a un estado mesotrófico al noroeste, hipereutrófico en el centro y sur, y eutrófico en el resto de la laguna.

En la primavera, se observan valores relativamente más altos. En muchas regiones, la primavera coincide con el inicio o aumento de las actividades agrícolas, incluida la aplicación de fertilizantes. Según la investigación de Zúñiga (2021), hubo un mayor flujo de nutrientes durante dichos meses.

En el estudio de Li S. (2022) se encontró que los lagos poseían una mayor cobertura eutrófica en la temporada de otoño en comparación con la primavera, por ejemplo, el 80% de toda la laguna era eutrófica para la primavera del 2020 y el 94% era eutrófica para otoño de 2020.

Figura 38. Concentración de Clorofila para verano 2019 – Ecuación Propia MPH

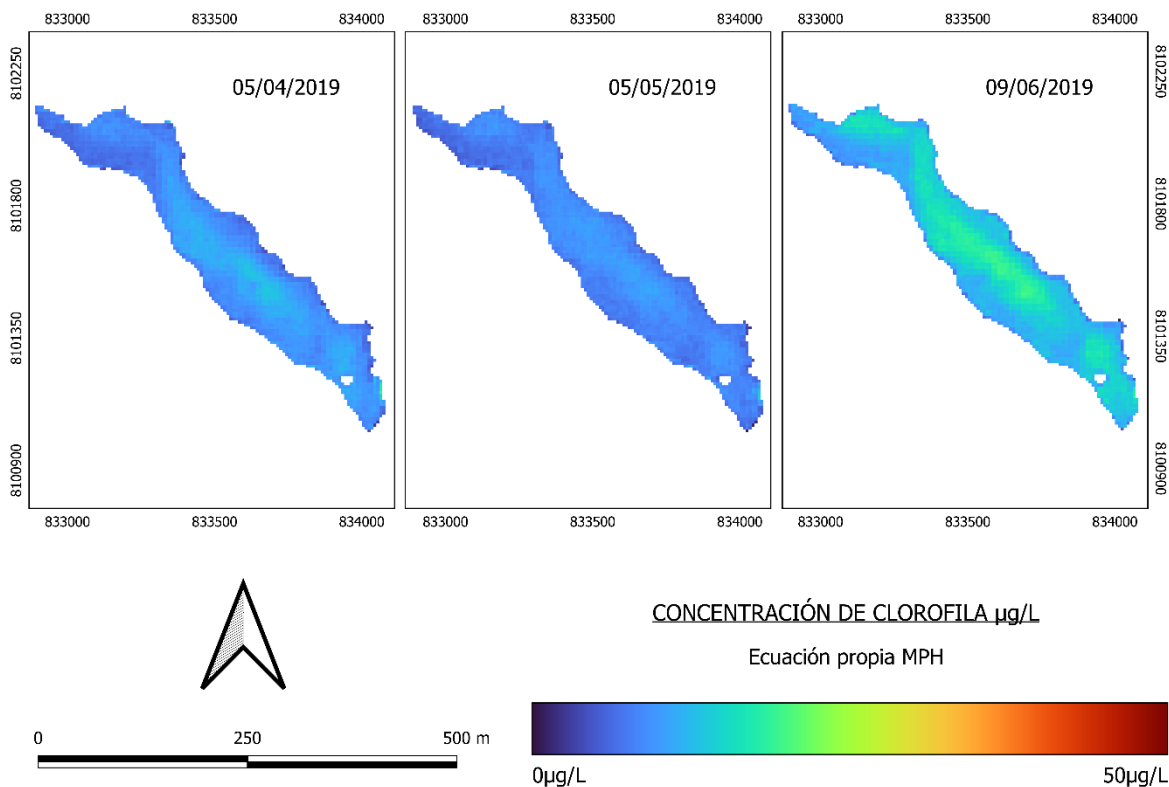


En la Figura 38 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de verano 2019. El mapa de fecha 20/01/2019 muestra las concentraciones más altas de la estación con un rango de 2 a 33 $\mu\text{g/L}$. A primera vista se aprecian coloraciones amarillo-

verdosas y rojizas en la zona central que corresponden a un estado hipereutrófico, coloración azul en la zona noroeste correspondiendo a un estado mesotrófico y el resto de la laguna pertenece a un estado eutrófico según la clasificación trófica de la OCDE. El mapa de fecha 24/02/2019 muestra concentraciones bajas con un rango de 0 a 18 $\mu\text{g/L}$, con coloraciones de tonalidad azul y celeste que representan un estado mesotrófico en la zona noroeste y sur, mientras que en la zona media y norte hallamos un estado eutrófico. El mapa de fecha 06/03/2019 muestra concentraciones más bajas aún con un rango de 3 a 20 $\mu\text{g/L}$ y coloraciones de tonalidad azul en la zona noroeste que representan un estado mesotrófico y celestes en el resto de la laguna que representa un estado eutrófico.

Se puede apreciar que principalmente en la temporada de verano de 2019 obtenemos valores importantes de eutrofización en la zona céntrica de la laguna, Sin embargo, esto se reduce no tan significativamente como en el año 2018 a fines de febrero e inicios de marzo. En la simulación de la investigación de Xu et al. (2023) revelaron la velocidad de corriente es un factor importante obteniéndose altas concentraciones de Clorofila en verano y bajas en invierno.

Figura 39. Concentración de Clorofila para otoño 2019 – Ecuación Propia MPH

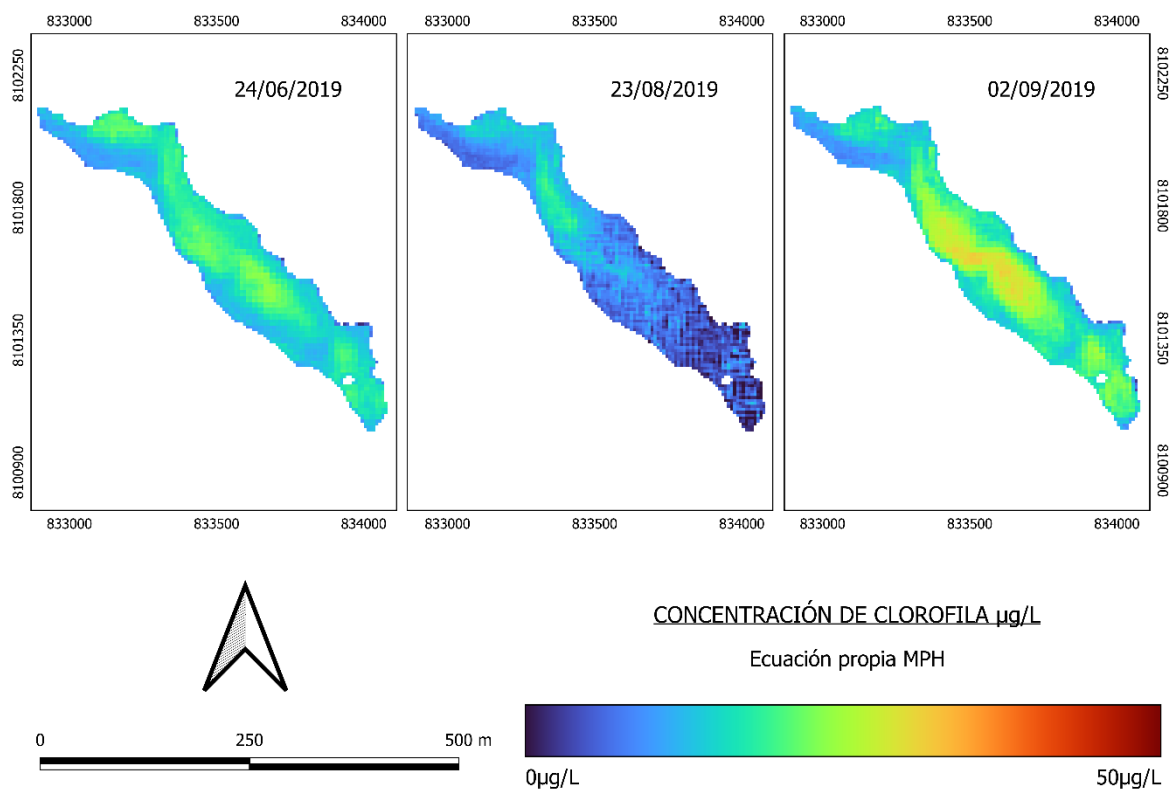


En la Figura 39 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de otoño 2019. El mapa de fecha 05/04/2019 muestra coloraciones de tonalidad celeste que representan un estado mesotrófico con concentraciones que van desde 3 a 20 $\mu\text{g/L}$ asimismo el mapa de fecha 05/05/2019 demuestra concentraciones similares al anterior cálculo con una concentración de 1 a 15 $\mu\text{g/L}$ y con la misma tonalidad; muy por el contrario, el mapa de fecha 09/06/2019 muestra concentraciones más elevadas que las dos anteriores, ya que estas presentan concentraciones con un rango de 1 a 20 $\mu\text{g/L}$ por lo que corresponde a un estado eutrófico según la clasificación trófica de la OCDE.

De abril a junio se observa un nivel bajo – moderado de concentración de clorofila, en el mes de junio principalmente aumenta, en esta temporada de otoño existe una subida según la interpretación de los mapas mostrados.

En los meses de mayo y junio la laguna Iberia muestra un menor flujo de fosfato según la investigación de Zúñiga K (2021).

Figura 40. Concentración de Clorofila para invierno 2019 – Ecuación Propia MPH



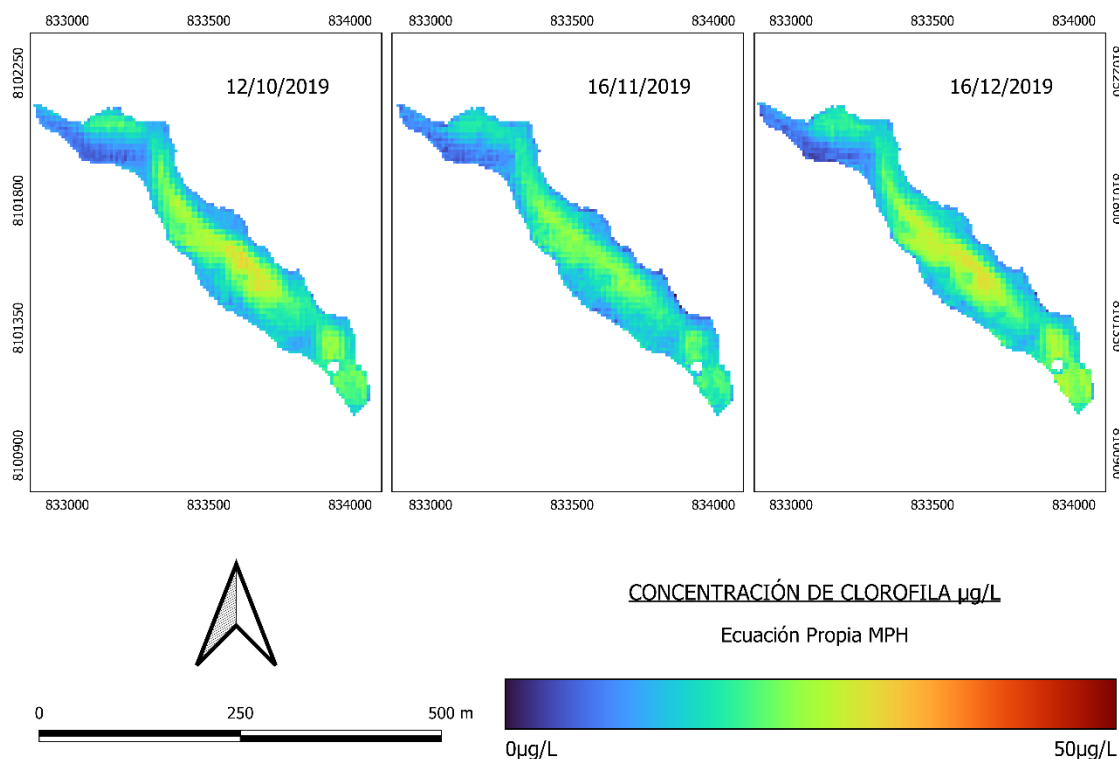
En la Figura 40 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de invierno 2019. El mapa de fecha 24/06/2019 muestra concentraciones eutróficas en casi la totalidad de la laguna con valores de 1 a 24 $\mu\text{g/L}$ por otro lado notamos que el mapa de fecha 23/08/2019 presenta coloraciones amarillas en la zona media norte y azules en la zona sur con un rango de concentración de 0 a 20 $\mu\text{g/L}$. Finalmente el mapa de fecha 02/09/2019 muestra concentraciones más altas en la zona media con un rango de 25 a 32 $\mu\text{g/L}$ las cuales pertenecerían a un estado hipereutrófico según la clasificación trófica de la OCDE y a sus alrededores una clasificación mesotrófica y eutrófica con valores de 3 a 25 $\mu\text{g/L}$.

Se muestra una tendencia de aumento de niveles de clorofila esta temporada de invierno, como se aprecia en los mapas mostrados, los niveles eutróficos son moderados, sin embargo,

en agosto, se aprecia una coloración que no corresponde a niveles bajos ya que es influencia de nubosidad.

El estudio de Alikas et al. (2010) menciona que las concentraciones de clorofila eran altas durante el otoño y bajas durante el invierno, lo que es diferente para estos casos, siendo moderados y altos en la temporada de invierno.

Figura 41. Concentración de Clorofila para primavera 2019 – Ecuación Propia MPH

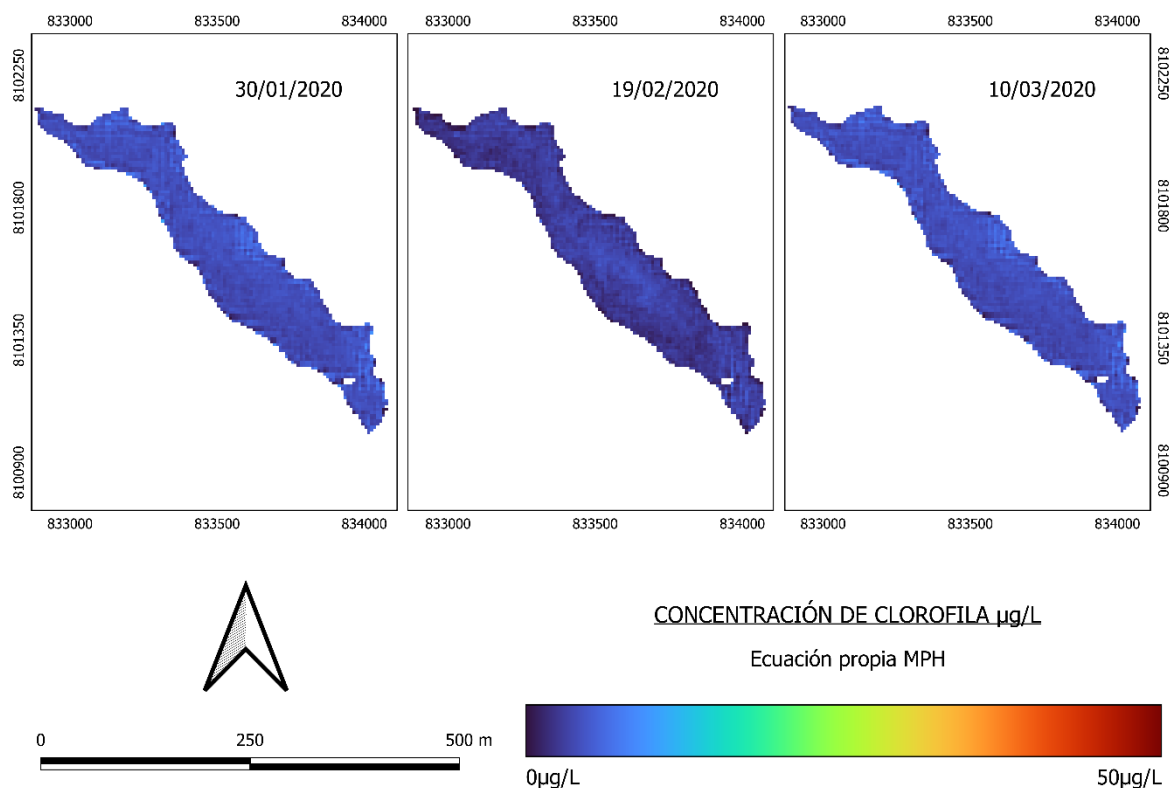


En la Figura 41 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de primavera 2019. El mapa de fecha 12/10/2018 muestra las concentraciones más altas de la estación con un rango de 4 a 32 µg/L, con coloraciones de tonalidad azul en la zona noroeste que representan un estado mesotrófico, amarillo-verdosa en el centro de la laguna que representa un estado hipereutrófico y primordialmente celeste que representa un estado eutrófico. El mapa de fecha 16/11/2019 muestra concentraciones con un rango de 0 a 26 µg/L con coloraciones de tonalidad azul y celeste con amarillo-verdoso que representan un predominio de estado eutrófico en toda la laguna con zonas mesotróficas en la zona noroeste la laguna. El mapa de fecha 16/12/2019 muestra concentraciones con un rango de 2

a 31 $\mu\text{g/L}$, se observan colores variados de tonalidades azul, celeste, amarillo-verdoso y rojizo correspondiendo a un estado mesotrófico al noroeste, hipereutrófico en el centro y sur, y eutrófico en el resto de la laguna.

En la primavera de 2019 se muestra una tendencia regular, se observan valores relativamente más altos, existiendo variabilidad de estados tróficos respecto a la distribución espacial en la laguna. En muchas regiones, la primavera coincide con el inicio o aumento de las actividades agrícolas, incluida la aplicación de fertilizantes (Russi et al., 2010).

Figura 42. Concentración de Clorofila para verano 2020 – Ecuación Propia MPH



En la Figura 42 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de verano 2020. El mapa de fecha 30/01/2020 muestra concentraciones eutróficas con un rango de 8 a 18 $\mu\text{g/L}$ y en sus alrededores concentraciones mesotróficas con valores de 4 a 8 $\mu\text{g/L}$ es por ello el cambio de color en tonalidades azules; por el contrario, el mapa de fecha 19/02/2020 muestra concentraciones más bajas con un rango que va de 0 a 7 $\mu\text{g/L}$

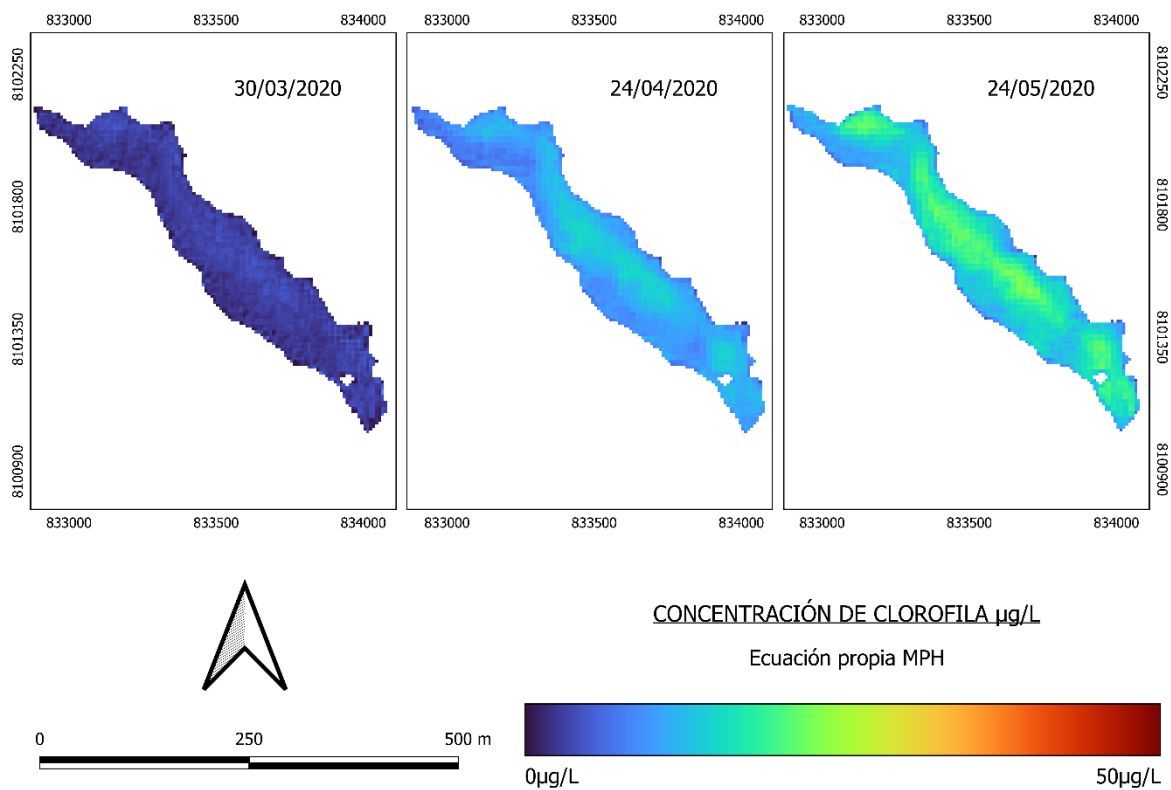
obteniendo una clasificación oligotrófica y mesotrófica según la OCDE. Por último, el mapa de fecha 10/03/2020 muestra concentraciones de 0 a 11 $\mu\text{g/L}$, siendo una clasificación mesotrófica prácticamente en la totalidad de la laguna.

Se puede apreciar que principalmente en la temporada de verano de 2020 obtenemos valores bajos de eutrofización en gran parte de la laguna, viéndose reducidos radicalmente a mediados de febrero.

Según Ventura et al. (2022) existe una tendencia de aumento de clorofila debido al aumento de niveles de radiación solar y flujo de aportes, puesto que la estación de verano es una época húmeda en la costa sur peruana, sería de modo inverso en este caso, en este verano de 2020, al incrementarse los niveles de agua en la Laguna ocurre un efecto conjunto de dilución, lo que significa que los niveles de concentración de clorofila bajan.

Por lo tanto, en los años 2018, 2019 y 2020, se mantiene una tendencia de disminución de clorofila hasta inicios de otoño, con niveles eutróficos hasta oligotróficos.

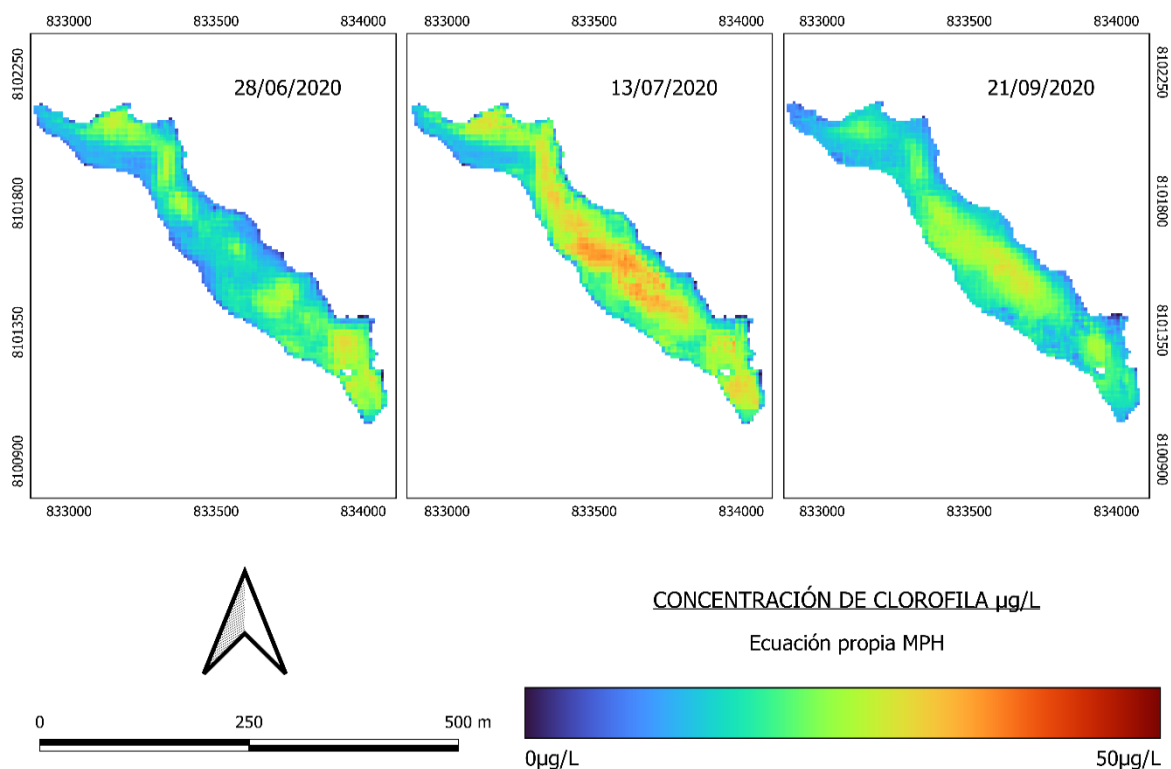
Figura 43. Concentración de Clorofila para otoño 2020 – Ecuación Propia MPH



En la Figura 43 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de otoño 2020. El mapa de fecha 30/03/2020 muestra bajas concentraciones de clorofila con rangos que van desde el 0 al 8.5 $\mu\text{g/L}$ representando estados oligotróficos y mesotróficos; el mapa de fecha 24/04/2020 muestra concentraciones mucho más elevadas, con un rango de 1.5 a 16 $\mu\text{g/L}$, con respecto al anterior mapa, dando valores promedio de 11 $\mu\text{g/L}$ la cual representa un estado eutrófico, de manera semejante a este último resultado, el mapa de fecha 24/05/2020 muestra concentraciones en un rango que va desde 1 a 24 $\mu\text{g/L}$ y promedio de 15 $\mu\text{g/L}$, lo cual corresponde a un estado eutrófico.

Según Ruiz-Ruiz et al. (2017) la entrada de aguas residuales agrícolas se produce en pulsos, con picos a finales de otoño e invierno y condiciones mesotróficas ocurren durante verano y otoño. Por lo tanto, en los años 2018, 2019 y 2020, se mantiene una tendencia de incremento de clorofila, con niveles oligotróficos hasta eutróficos.

Figura 44. Concentración de Clorofila para invierno 2020 – Ecuación Propia MPH

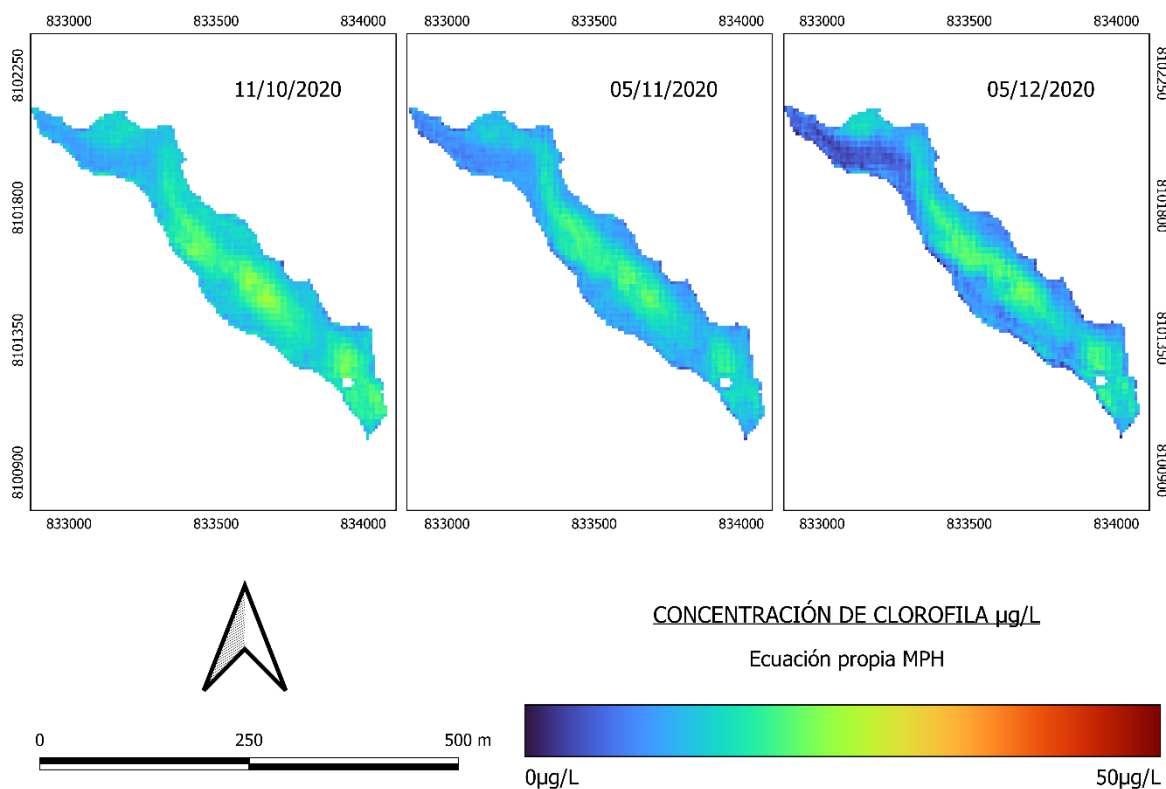


En la Figura 44 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de invierno 2020. El mapa de fecha 28/06/2020 muestra un rango de 0 a 31 $\mu\text{g/L}$ con concentraciones de condiciones eutróficas en la zona media y norte de la laguna con valores de 20 a 25 $\mu\text{g/L}$, mientras que en la zona sur observamos valores promedios de 27 $\mu\text{g/L}$. El mapa de fecha 13/07/2020 muestra concentraciones más altas de la estación con un rango de 0 a 37 $\mu\text{g/L}$ representando un estado hipereutrófico en la zona media de la laguna y en los alrededores condiciones eutróficas. Por último, el mapa de fecha 21/09/2020 muestra un rango de concentraciones similares al de la primera fecha con valores promedio de 18 $\mu\text{g/L}$ en los alrededores de la laguna mientras que en la zona media hay concentraciones de 25 a 30 $\mu\text{g/L}$ representando un estado hipereutrófico.

Según (Ventura et al., 2022) es importante la renovación del agua, ya que cuando la entrada de agua no es suficiente para una renovación completa, puede actuar de forma negativa aportando nutrientes.

Por lo tanto, en los años 2018, 2019 y 2020, se mantiene una tendencia regular de nivel eutrófico a hipereutrófico durante los 3 años.

Figura 45. Concentración de Clorofila para primavera 2020 – Ecuación Propia MPH



En la Figura 45 se observan los mapas de concentración de clorofila correspondientes a la estación de primavera 2020. En el mapa de fecha 11/10/2020 con un rango de 4 a 26 µg/L se aprecian coloraciones amarillo- verdosas en la zona media, norte y sur de la laguna que corresponde a un estado eutrófico según la clasificación trófica de la OCDE debido a que se encuentran entre valores 12 a 17 µg/L. Asimismo, el mapa de fecha 05/11/2020 muestra concentraciones similares al anterior mapa con un rango de 3 a 23 µg/L y una concentración promedio que va entre los rangos de 10 a 15 µg/L lo cual representan un estado eutrófico predominantemente. Por último, el mapa de fecha 05/12/2020 muestra un rango de concentraciones de 0 a 23 µg/L, notamos un ligero cambio de coloración en la zona colindante al oeste con valor promedio de 6 µg/L, los mayores valores oscilan entre los rangos de 10 a 15 µg/L obteniendo valores eutróficos en la zona media y sur.

Durante los años 2018, 2019, 2020 en primavera se muestra una tendencia regular, pero para este año 2020 se observa que esos valores han decrecido, así también se muestran valores un

poco más bajos que en los anteriores años para todas las estaciones, según Li. S et al (2022) las restricciones impuestas por la pandemia Sars Cov2 (Covid19), minimizaron el aporte de nutrientes a los cuerpos de agua, por ejemplo, en su investigación se observó una ligera mejora en la eutrofización de los lagos tras el cese de las actividades antropogénicas.

Tabla 16. Resumen de rangos y clasificación OCDE de concentraciones de clorofila

Estación	Fecha	Rango (µg/L)		Promedio (µg/L)	Desviación estándar (µg/L)	Clasificación OCDE
		Min	Max			
Verano	15/01/2018	1.25	24.96	15.92	4.07	Eutrófico
Verano	24/02/2018	0.02	11.57	7.90	1.24	Mesotrófico
Verano	06/03/2018	-1.84	6.59	4.21	0.98	Mesotrófico
Otoño	31/03/2018	-0.99	10.65	5.09	0.94	Mesotrófico
Otoño	20/04/2018	1.54	15.55	8.22	0.99	Eutrófico
Otoño	20/05/2018	1.02	24.63	17.79	3.08	Eutrófico
Invierno	30/05/2018	-0.82	24.23	13.95	4.13	Eutrófico
Invierno	29/06/2018	-2.88	39.82	27.73	6.54	Hipereutrófico
Invierno	09/07/2018	-0.65	35.66	23.81	5.76	Eutrófico
Primavera	22/09/2018	-0.88	43.15	21.14	6.39	Eutrófico
Primavera	01/11/2018	3.75	34.48	18.70	2.53	Eutrófico
Primavera	06/12/2018	2.69	38.49	18.50	7.10	Eutrófico
Verano	20/01/2019	1.81	32.92	17.65	6.07	Eutrófico
Verano	24/02/2019	-1.02	18.36	9.65	3.52	Eutrófico
Verano	06/03/2019	2.97	19.75	11.77	2.90	Eutrófico
Otoño	05/04/2019	2.90	20.15	9.21	1.77	Eutrófico
Otoño	05/05/2019	0.64	14.63	8.34	1.28	Eutrófico
Otoño	09/06/2019	0.88	19.98	13.54	2.68	Eutrófico
Invierno	24/06/2019	1.47	24.25	16.06	3.51	Eutrófico
Invierno	23/08/2019	-7.16	20.36	8.74	4.30	Eutrófico
Invierno	02/09/2019	2.36	31.85	18.51	5.52	Eutrófico
Primavera	12/10/2019	4.03	31.77	16.82	5.60	Eutrófico

Primavera	16/11/2019	-0.98	25.94	15.41	4.60	Eutrófico
Primavera	16/12/2019	2.17	30.66	17.31	5.93	Eutrófico
Verano	30/01/2020	3.50	17.61	10.40	2.73	Eutrófico
Verano	19/02/2020	-2.29	6.72	2.76	0.88	Mesotrófico
Verano	10/03/2020	-1.59	10.74	4.17	0.95	Mesotrófico
Otoño	30/03/2020	-3.70	8.49	2.86	0.99	Mesotrófico
Otoño	24/04/2020	1.52	15.98	11.39	0.96	Eutrófico
Otoño	24/05/2020	1.27	23.85	15.31	3.53	Eutrófico
Invierno	28/06/2020	-5.11	30.60	22.96	6.59	Eutrófico
Invierno	13/07/2020	-4.35	37.36	23.69	6.78	Eutrófico
Invierno	21/09/2020	-3.0	30.62	17.71	5.15	Eutrófico
Primavera	11/10/2020	4.11	25.89	15.44	3.21	Eutrófico
Primavera	05/11/2020	2.79	22.58	13.17	3.38	Eutrófico
Primavera	05/12/2020	-1.33	23.39	12.31	4.50	Eutrófico

La Tabla 16 presenta un resumen detallado de las concentraciones de clorofila en diferentes estaciones durante los años 2018, 2019 y 2020. Organizada por año y estación (verano, otoño, invierno y primavera), la tabla muestra los rangos de concentración de clorofila (en $\mu\text{g/L}$) para cada mes dentro de estas estaciones. Los datos revelan variaciones significativas en las concentraciones de clorofila a lo largo del tiempo, reflejando posiblemente los cambios estacionales y las respuestas ecológicas del ambiente acuático estudiado. La tabla es crucial para entender las dinámicas temporales de la clorofila en el ecosistema acuático, proporcionando una visión clara de las tendencias estacionales y anuales.

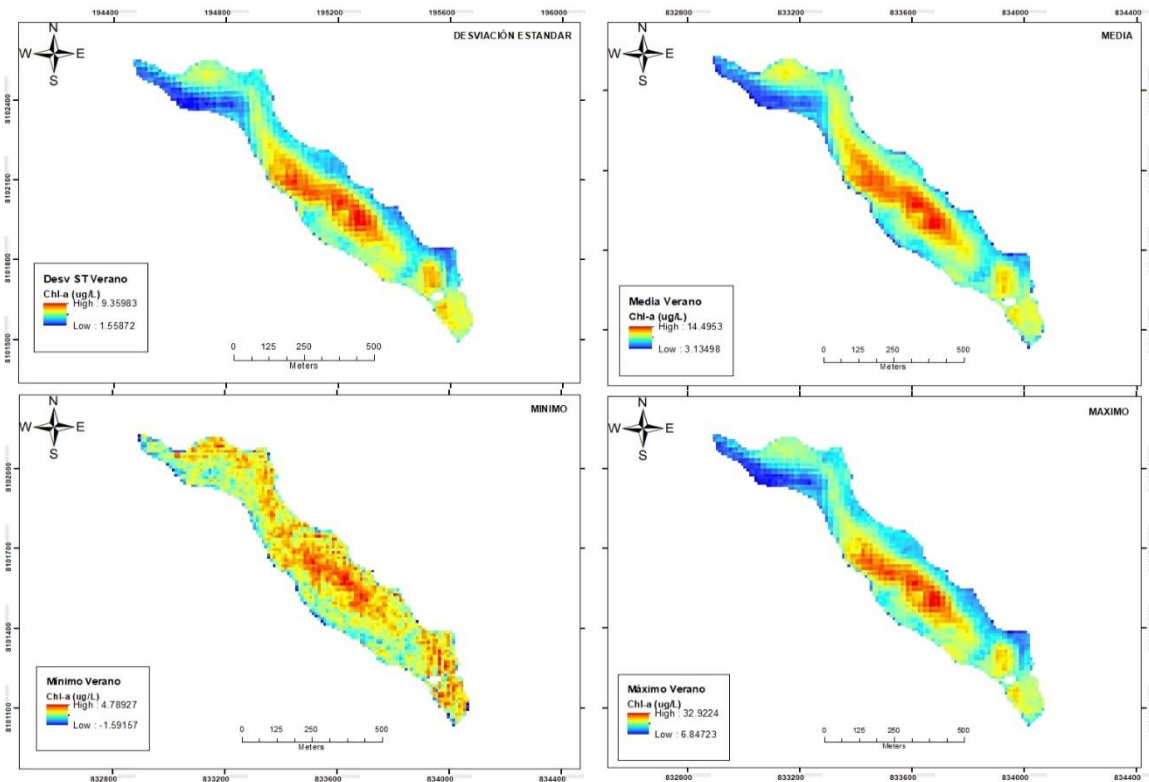
4.4. Análisis de la variación espacio-temporal de la distribución de clorofila “a” en el cuerpo de agua en el periodo 2018-2020

4.4.1. Cálculo de la desviación estándar, media, mínimo y máximo de la concentración de clorofila

Se elaboraron las Figuras 46, 47, 48 y 49 que representan los mapas de desviación estándar, media, mínimos, máximos de la concentración de clorofila de las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera. Asimismo, se elaboró la Figura 50 que muestra estos mismos

estadísticos para la concentración de clorofila del total de estos 3 años. En el ANEXO N°6 se muestran los mapas correspondientes para cada año individualmente (2018, 2019 y 2020).

Figura 46. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila de la estación de verano

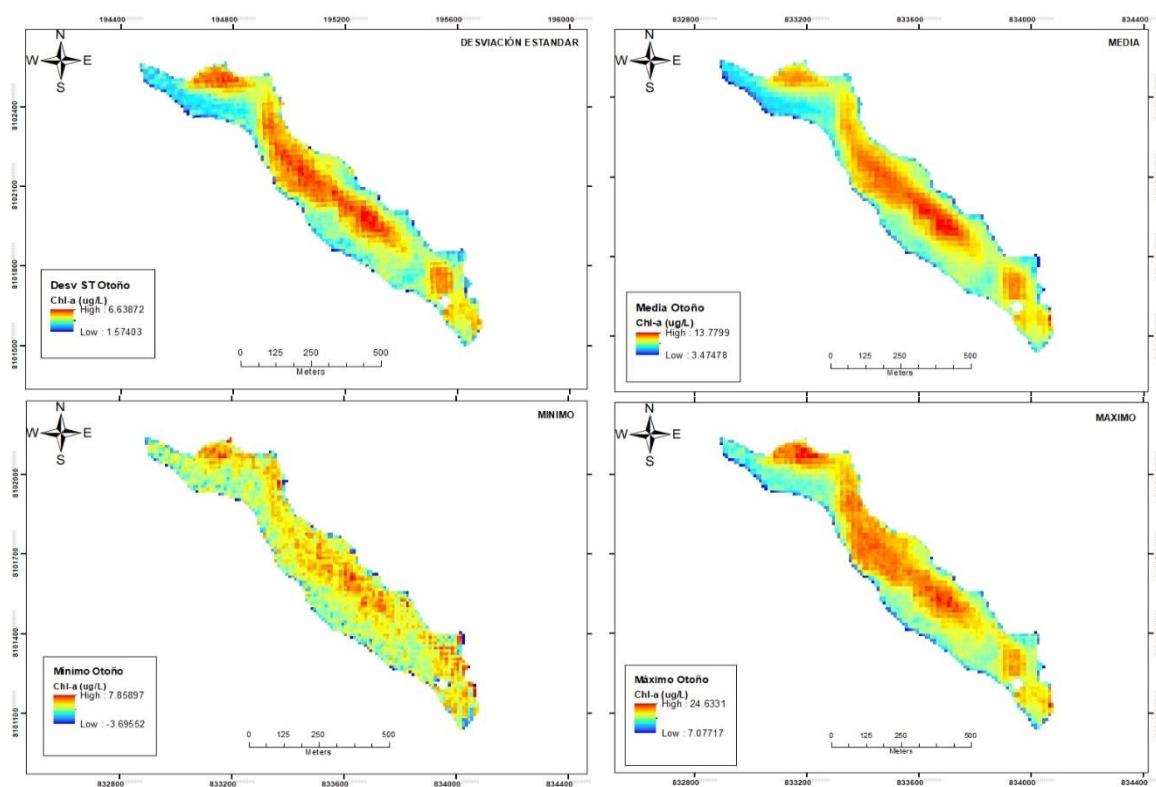


En la Figura 46 se observan los valores de desviación estándar, media, mínimos y máximos de concentración de clorofila por píxel para la estación de verano del periodo de estudio.

Los valores mínimos se encuentran en las zonas adyacentes a las orillas suroeste en orientación al mar, con rangos que van desde -1.59 hasta 4.79 $\mu\text{g/L}$, pudiendo deberse los valores negativos a una menor profundidad en esta zona en comparación con el resto de la laguna y/o estar ocupadas con vegetación acuática propia de la zona. Los valores máximos se observan en la zona central de la laguna con rangos que van desde 6.85 hasta 32.92 $\mu\text{g/L}$. Los valores medios de concentración, según la clasificación trófica de la OCDE, muestran que la laguna Iberia en la estación de verano posee un estado mesotrófico y eutrófico, con rangos que varían desde 3.13 hasta 14.5 $\mu\text{g/L}$. La desviación estándar indica que la mayor

tasa de cambios y distribución de clorofila se produjo en la zona central de la laguna con rangos desde 1.56 hasta 9.36 $\mu\text{g/L}$, lo que concuerda con el mapa de concentración de clorofila media.

Figura 47. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila de la estación de otoño

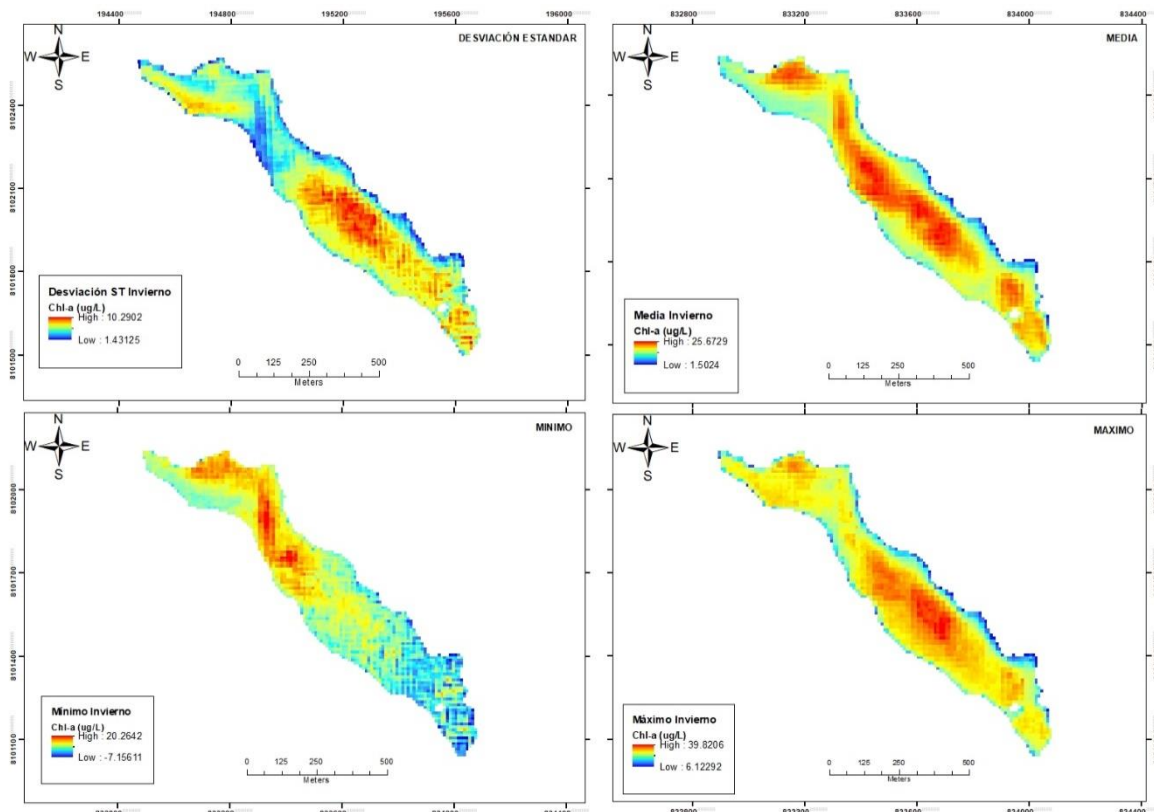


En la Figura 47 se observan los valores de desviación estándar, media, mínimos y máximos de concentración de clorofila por píxel para la estación de otoño del periodo de estudio.

Los valores mínimos se encuentran en las zonas adyacentes a todas las orillas, con rangos que van desde -3.70 hasta 7.86 $\mu\text{g/L}$, pudiendo deberse los valores negativos a una menor profundidad en las orillas en comparación con el resto de la laguna y/o estar ocupadas con vegetación acuática propia de la zona. Los valores máximos se observan desde la zona central hasta la zona norte de la laguna con rangos que van desde 7.08 hasta 24.63 $\mu\text{g/L}$. Los valores medios de concentración, según la clasificación trófica de la OCDE, muestran que la laguna Iberia en la estación de otoño posee un estado mesotrófico y eutrófico, con rangos que varían

desde 3.47 hasta 13.78 $\mu\text{g/L}$. La desviación estándar indica que la mayor tasa de cambios y distribución de clorofila se produjo en la zona central y norte de la laguna con rangos desde 1.57 hasta 6.64 $\mu\text{g/L}$, lo que concuerda con el mapa de concentración de clorofila media.

Figura 48. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila de la estación de invierno

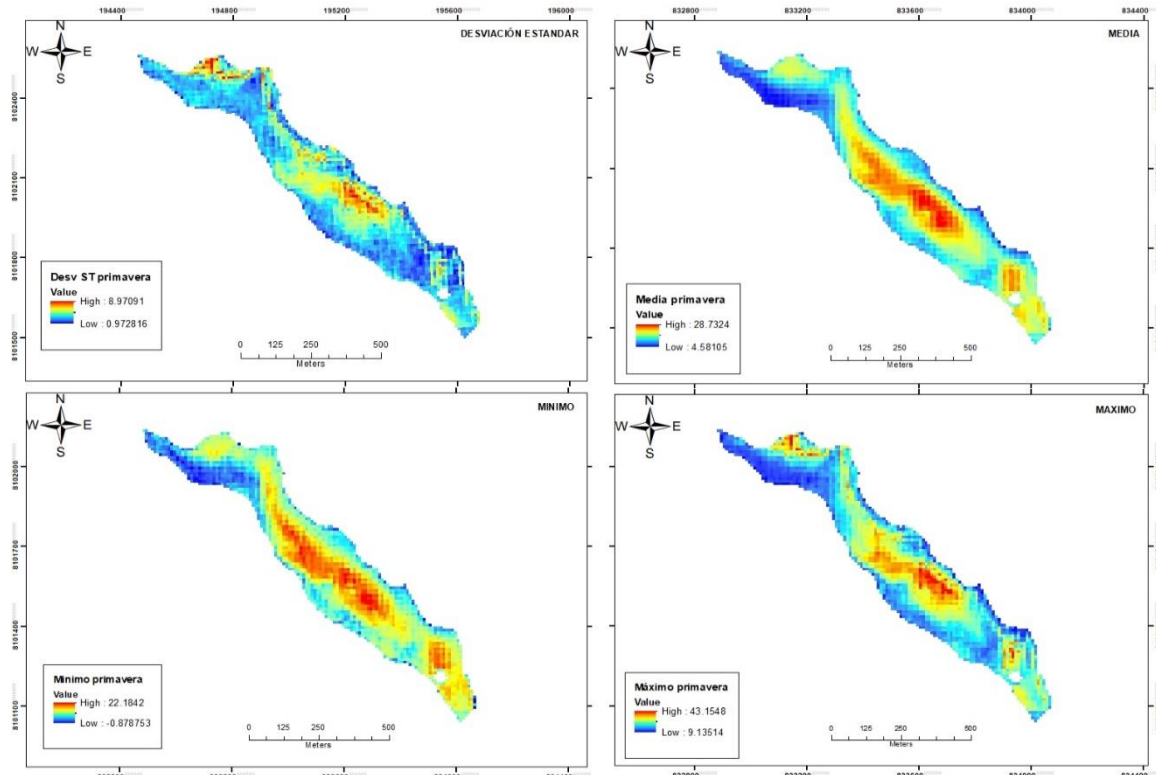


En la Figura 48 se observan los valores de desviación estándar, media, mínimos y máximos de concentración de clorofila por píxel para la estación de invierno del periodo de estudio.

Los valores mínimos se encuentran en las zonas adyacentes a todas las orillas, en la zona noroeste de la laguna y zona sur, con rangos que van desde -7.16 hasta 20.26 $\mu\text{g/L}$, pudiendo deberse los valores negativos de la zona sur a nubosidad presente sobre la laguna. Los valores máximos se observan en toda la laguna, sobre todo en la zona central, con rangos que van desde 6.12 hasta 39.82 $\mu\text{g/L}$. Los valores medios de concentración varían desde 1.50 hasta 25.67 $\mu\text{g/L}$, según la clasificación trófica de la OCDE se muestran que la laguna Iberia en la estación de invierno posee un estado primordialmente eutrófico en gran parte de la laguna.

La desviación estándar indica que la mayor tasa de cambios y distribución de clorofila se produjo en la zona central y hacia el sur de la laguna, existen rangos desde 1.43 hasta 10.29 $\mu\text{g/L}$, esto es debido a la diferencia de valores generados por la nubosidad en algunas fechas de esta estación.

Figura 49. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila de la estación de primavera

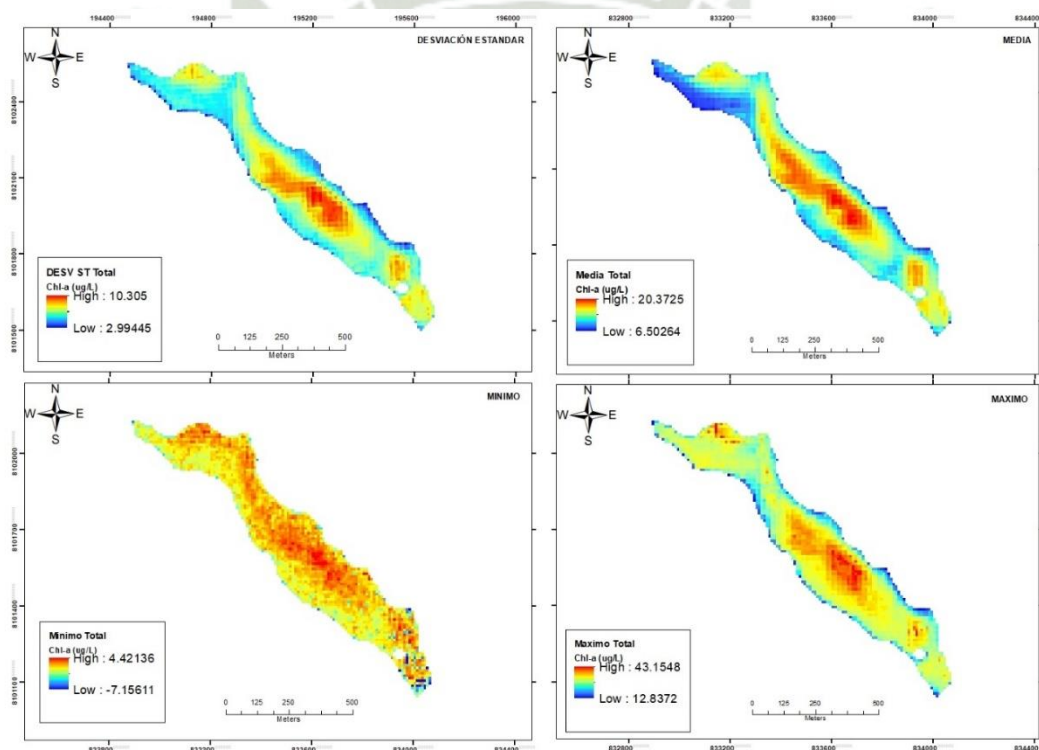


En la Figura 49 se observan los valores de desviación estándar, media, mínimos y máximos de concentración de clorofila por píxel para la estación de primavera del periodo de estudio.

Al igual que en invierno, los valores mínimos se encuentran en las zonas adyacentes a las orillas y al noroeste de la laguna, con rangos que van desde -0.88 hasta 22.18 $\mu\text{g/L}$, pudiendo deberse los valores bajos de 3.50 $\mu\text{g/L}$ en el noroeste a una menor profundidad en esta zona en comparación con el resto de la laguna. Los valores máximos se observan en la zona central y norte de la laguna, con rangos que van desde 9.14 hasta 43.15 $\mu\text{g/L}$, siendo esta estación la que posee los valores más altos. Los valores medios de concentración, con rangos que varían

desde 4.58 hasta 28.73 $\mu\text{g/L}$, muestran que la laguna Iberia en la estación de primavera posee un estado primordialmente eutrófico en toda la laguna e hipereutrófico solo en la zona central, según la clasificación trófica de la OCDE. La desviación estándar muestra rangos desde 0.97 hasta 8.97 $\mu\text{g/L}$, produciéndose la mayor tasa de cambios y distribución de clorofila en la zona central y norte de la laguna. Para esta estación se muestra principalmente tasas de cambio de clorofila uniformes en gran parte del lago con promedio de distribución de concentración de clorofila de 3.36 $\mu\text{g/L}$, siendo la tasa de cambios más baja de las 4 estaciones.

Figura 50. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila por píxel para el total del periodo de estudio



En la Figura 50 se observan los valores de desviación estándar, media, mínimos y máximos de concentración de clorofila por píxel para el total del periodo de estudio.

Los valores mínimos se encuentran en zonas adyacentes a las orillas y al sureste de la laguna, con rangos que van desde -7.15 hasta 4.42 $\mu\text{g/L}$, siendo 2.45 $\mu\text{g/L}$ el promedio mínimo, pudiendo deberse los valores negativos a una menor profundidad en las orillas en

comparación con el resto de la laguna y/o estar ocupadas con vegetación acuática propia de la zona. Los valores máximos se observan en la zona central y noroeste de la laguna con rangos que van desde 12.84 hasta 43.15 $\mu\text{g/L}$, siendo 30.18 $\mu\text{g/L}$ el promedio máximo. Los valores medios de concentración, según la clasificación trófica de la OCDE, muestran que la laguna Iberia posee un estado primordialmente eutrófico, con rangos que varían desde 6.50 hasta 20.37 $\mu\text{g/L}$, siendo 14.02 $\mu\text{g/L}$ el valor medio de concentración de clorofila en el periodo de estudio. La desviación estándar indica que la mayor tasa de cambios y distribución de clorofila se produjo en la zona central de la laguna con rangos desde 2.99 hasta 10.30 $\mu\text{g/L}$, lo que concuerda con el mapa de concentración de clorofila media, siendo 6.72 $\mu\text{g/L}$ el promedio de desviación estándar del periodo de estudio.

Según el estudio de Peppia (2020), el valor medio anual de los 3 años de clorofila es de 80 $\mu\text{g/L}$, con un valor máximo de 258 $\mu\text{g/L}$ (junio) y un valor mínimo de 0 $\mu\text{g/L}$ (abril) para el período 2016-2018, muestra un valor medio y máximo mucho mayor al obtenido en la laguna Iberia Sur. Los valores mínimos se encontraron en las orillas y los valores máximos en el centro del lago Okeechobee, Florida, de acuerdo a la investigación de Pahlevan et al. (2020).

Tabla 17. Resumen de estadísticos (Desviación estándar, media, mínimo y máximo) por estaciones

Estación	Desviación Estándar ($\mu\text{g/L}$)	Media ($\mu\text{g/L}$)	Mínimo ($\mu\text{g/L}$)	Máximo ($\mu\text{g/L}$)
Verano	1.56 - 9.36	3.13 - 14.5	-1.59 - 4.79	6.85 - 32.92
Otoño	1.57 - 6.64	3.47 - 13.78	-3.70 - 7.86	7.08 - 24.63
Invierno	1.43 - 10.29	1.50 - 25.67	-7.16 - 20.26	6.12 - 39.82
Primavera	0.97 - 8.97	4.58 - 28.73	-0.88 - 22.18	9.14 - 43.15

La Tabla 17 resume las variaciones en las concentraciones de clorofila "a" observadas en diferentes estaciones, indicando la desviación estándar, los valores medios, mínimos y máximos. Estos datos reflejan la diversidad y la variabilidad en la distribución de clorofila a lo largo del año y pueden proporcionar información valiosa sobre los procesos ecológicos y ambientales en el cuerpo de agua.

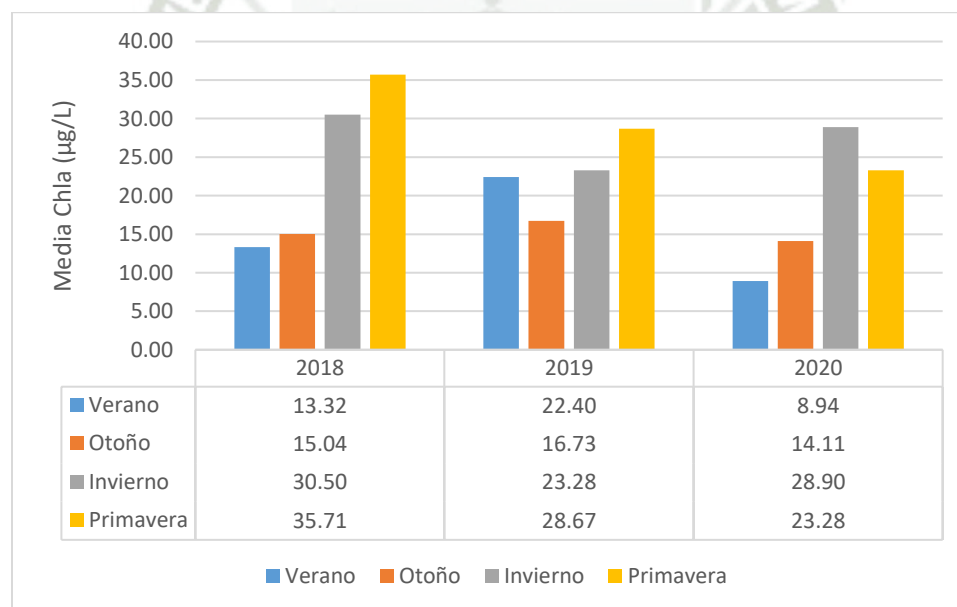
Tabla 18. Resumen de estadísticos (Desviación estándar, media, mínimo y máximo) anuales y para el periodo de estudio

Periodo	Desviación Estándar (µg/L)	Media (µg/L)	Mínimo (µg/L)	Máximo (µg/L)
2018	2.87 – 12.97	5.26 – 21.74	-0.99 – 5.94	11.00 – 43.15
2019	1.36 – 8.03	5.81 – 21.59	-7.15 – 11	8.28 – 32.92
2020	2.03 – 9.81	3.57 – 18.19	-5.10 – 5.89	8.79 – 37.36
2018 - 2020	2.99 – 10.31	6.50 – 20.37	-7.16 – 4.42	12.84 – 43.15

La Tabla 18 resume las variaciones en las concentraciones de clorofila "a" observadas anualmente y en periodo de estudio (2018 – 2020), indicando la desviación estándar, los valores medios, mínimos y máximos. En el Anexo N°6 se encuentran los mapas estadísticos anuales respectivos.

También se elaboró la Figura 51 que muestra un gráfico de barras con los valores medios de concentración de clorofila para las estaciones de cada año.

Figura 51. Gráfico de concentración de clorofila media estacional - anual



Cada año muestra variaciones estacionales en la media de clorofila. El año 2018 existe una tendencia general de aumento de clorofila de 13.32 µg/L, 15.04 µg/L, 30.50 µg/L y 35.71 µg/L, para las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente. En el año 2019 se muestra la misma tendencia creciente, pero con valores de verano mucho mayores en comparación al año anterior, 22.40 µg/L, 16.73 µg/L, 23.28 µg/L y 28.67 µg/L, para las 4

estaciones, respectivamente. El año 2020 muestra valores mucho menores en comparación a los años anteriores, pero continúa la tendencia creciente, con valores de 8.94 $\mu\text{g/L}$, 14.11 $\mu\text{g/L}$, 28.90 $\mu\text{g/L}$ y 23.28 $\mu\text{g/L}$.

La clorofila alcanza las concentraciones más altas durante la primavera de 2018 y 2019, lo que sugiere condiciones óptimas para la proliferación de algas o fitoplancton en esa estación. Esto es consistente con el entendimiento biológico de que la primavera a menudo trae un aumento en la productividad biológica debido a temperaturas más cálidas y mayor disponibilidad de luz solar. El invierno de 2018 también muestra altas concentraciones, lo cual es interesante ya que usualmente se esperarían niveles más bajos debido a la menor luz solar y posibles temperaturas más bajas.

Entre 2018 y 2019, se observa un aumento en la concentración de clorofila en el verano y una disminución en la primavera. Esto podría indicar un cambio en las condiciones ambientales o ecológicas de la laguna que favorece la producción de clorofila en el verano.

En 2020, todas las estaciones muestran una disminución en la concentración de clorofila en comparación con los años anteriores. Esto podría deberse a una serie de factores ambientales, como cambios en la calidad del agua, intervenciones de manejo de la laguna, o eventos climáticos anómalos que han afectado la productividad primaria de la laguna.

Según el artículo de Li Y., et al (2022) en el reservorio Pingzhai la concentración de clorofila evidenció variaciones estacionales, mayores en verano - otoño que en invierno - primavera, caso contrario a nuestro cuerpo en estudio. Además, los valores de clorofila "a" se incrementaron gradualmente de primavera a otoño, mientras que es la laguna Iberia Sur este incremento suele ocurrir de otoño a primavera más notoriamente.

4.4.2. Identificación y frecuencia de valores de clorofila extremos altos

Se elaboró la Tabla 19 que muestra las 36 fechas de evaluación de concentración de clorofila obtenida mediante las imágenes satelitales descargadas, los valores atípicos extremos altos de cada una de estas fechas y cuáles de estas fechas muestran píxeles atípicos.

Tabla 19. Identificación de fechas con valores de clorofila extremos altos

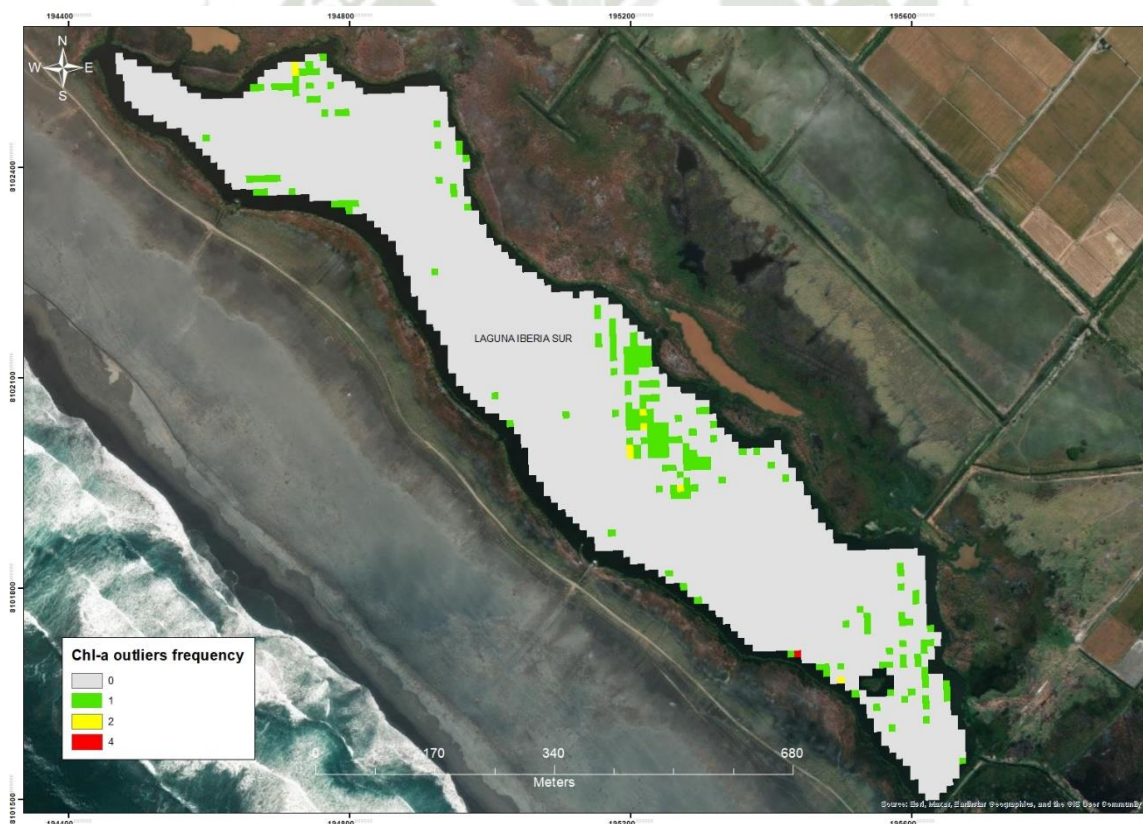
Fecha	Valores atípicos extremos altos	Primer cuartil (Q1)	Tercer cuartil (Q3)	¿Existen pixeles atípicos?
15/1/2018	27.427	13.343	18.977	No
24/2/2018	10.934	7.284	8.744	Si
6/3/2018	6.077	3.950	4.801	Si
31/3/2018	6.985	4.743	5.640	Si
20/4/2018	10.503	7.744	8.848	Si
20/5/2018	26.772	15.907	20.253	No
30/5/2018	26.892	10.653	17.149	No
29/6/2018	41.700	25.116	31.750	No
9/7/2018	35.412	21.816	27.254	Si
22/9/2018	36.521	16.574	24.553	Si
1/11/2018	33.974	13.941	21.954	Si
6/12/2018	39.102	12.918	23.391	No
20/1/2019	35.348	12.814	21.828	No
24/2/2019	20.310	6.974	12.308	No
6/3/2019	20.017	9.584	13.757	No
5/4/2019	14.269	7.974	10.492	Si
5/5/2019	11.935	7.537	9.296	Si
9/6/2019	21.161	11.676	15.470	No
24/6/2019	27.116	13.320	18.839	No
23/8/2019	20.862	5.858	11.860	No
2/9/2019	33.474	14.562	22.127	No
12/10/2019	33.739	12.469	20.977	No
16/11/2019	29.220	12.032	18.908	No
16/12/2019	35.147	13.159	21.954	No
30/1/2020	18.545	8.399	12.458	No
19/2/2020	4.933	2.260	3.329	Si
10/3/2020	5.927	3.686	4.582	Si
30/3/2020	5.088	2.386	3.467	Si
24/4/2020	17.131	9.285	12.423	No
24/5/2020	25.932	12.826	18.068	No
28/6/2020	32.997	12.849	20.908	No
13/7/2020	43.115	17.792	27.921	No
21/9/2020	32.417	13.964	21.345	No
11/10/2020	24.334	13.182	17.643	Si
5/11/2020	22.719	10.676	15.493	No
5/12/2020	25.242	9.032	15.516	No

Los valores atípicos extremos altos varían significativamente a lo largo del tiempo, con picos en fechas como el 29/6/2018 (41.700) y el 13/7/2020 (43.115) y mínimos en fechas como el 19/2/2020 (4.933), 10/3/2020 (5.927) y 30/3/2020 (5.088).

Estos píxeles atípicos suelen aparecer mayormente en las estaciones de otoño (5 fechas) y verano (4 fechas) y en menor cantidad en las estaciones de primavera (3 fechas) e invierno (1 fecha).

Posteriormente en la Figura 52 se identifica la ubicación de los píxeles atípicos extremos altos y se muestra la distribución espacial de estos píxeles mediante la medición de su frecuencia.

Figura 52. Mapa de identificación y frecuencia de píxeles atípicos extremos altos



En la Figura 52 los cuadrados verdes, amarillos y rojos representan las ubicaciones donde se han observado valores atípicos de clorofila-a. Los cuadrados verdes indican una frecuencia

de 1, amarillos una frecuencia de 2, y rojos una frecuencia de 4, según la leyenda. Los cuadrados grises representan áreas sin valores atípicos (frecuencia 0).

Existe una mayor concentración de valores atípicos en ciertas áreas de la laguna, particularmente en algunas regiones centrales donde la frecuencia es mayor (indicado por los cuadrados amarillos y rojos). Asimismo, las áreas con mayor frecuencia de valores atípicos podrían ser zonas de interés ecológico, posiblemente indicando floraciones de algas o eutrofización, donde los nutrientes son más abundantes o las condiciones son propicias para un crecimiento excepcional del fitoplancton.

Peppa (2020) identificó las zonas con altas concentraciones mediante la identificación de píxeles atípicos con el mismo método de cuartiles, evidenciando que la mayor parte de la laguna no poseía valores extremos altos. En su investigación, la mayor frecuencia de valores atípicos se observó cerca de las orillas, debido al efecto de adyacencia en el que el fondo del lago o vegetación acuática temporal afecta la reflectancia de los píxeles; al igual que en la presente tesis, donde el cuerpo de agua se encuentra sujeto a alteraciones de nivel de agua. Además, no se descarta que algunos valores atípicos puedan deberse a ruidos de banda ocasionados por gases atmosféricos o nubosidad.

En la laguna Iberia, las variaciones estacionales en la concentración de clorofila, con aumentos significativos durante el invierno y primavera, reflejan cómo el cambio climático acarrea variaciones hidrológicas y meteorológicas donde influyen directamente en la productividad biológica. Los valores más altos en primavera son consistentes con el aumento de la temperatura e incluso la evaporación de sus aguas dan como resultado un aumento de concentración de clorofila. Mientras que los valores de clorofila en verano indican que la temperatura y disponibilidad de luz solar no sería el principal factor a tener en cuenta en el proceso de eutrofización sobre la laguna Iberia.

Nazari-Sharabian et al. (2018) señalan que el cambio climático amplifica la eutrofización al aumentar las temperaturas y alterar los patrones de precipitación y radiación solar. Estos cambios meteorológicos intensifican la carga de nutrientes en los cuerpos de agua, promoviendo el crecimiento de algas y deteriorando la calidad del agua. Además, la combinación de factores climáticos internos y externos, como la mayor evaporación y el

aumento de la temperatura global, contribuye significativamente al proceso de eutrofización. Asimismo, Xia et al. (2016) menciona que la eutrofización del agua se ha convertido en un problema ambiental global serio, exacerbado por el cambio climático que altera las condiciones hidrológicas y meteorológicas.

La convergencia de estos estudios subraya cómo el cambio climático está transformando los ecosistemas lacustres a través de la eutrofización, afectando tanto la calidad del agua como la biodiversidad. En la laguna Iberia, los patrones estacionales de clorofila y eutrofización reflejan dinámicas ecológicas que se observan a nivel global, sugiriendo que las intervenciones de manejo deben considerar los efectos a largo plazo del cambio climático para mitigar la eutrofización y proteger la salud de los ecosistemas acuáticos.

Por otra parte, el análisis de la laguna Iberia Sur muestra que la laguna se mantuvo en la categoría de mesotrófica-eutrófica, con concentraciones mínimas de clorofila en las orillas y máximas en la zona central. Esto indica una heterogeneidad en la distribución de nutrientes, donde las especies nativas y exóticas influyen en la estructura del ecosistema (Pulido et al., 2021). El Santuario Nacional Lagunas de Mejía presenta un claro desafío en términos de manejo de especies exóticas, como la grama dulce (*Paspalum vaginatum*) y el jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), la cuales han sido controladas para evitar su expansión en los espejos lagunares. Las especies nativas, como el junco (*Scirpus spp.*) y la totora (*Typha angustifolia*), juegan un papel crucial en el ecosistema, debido a que su proliferación excesiva puede dar indicios de procesos de eutrofización y fluctuaciones hídricas, que también afectan la biodiversidad y la salud del ecosistema.

Como consecuencia de la eutrofización, las microalgas y cianobacterias pueden formar densas floraciones, pudiendo definirse como una marcada coloración visible del agua causada (predominantemente) por estos organismos. Para Huisman et al. (2018) los géneros formadores de floraciones comunes incluyen *Aphanizomenon*, *Cyindrospermopsis*, *Dolichospermum*, *Microcystis*, *Nodularia*, *Planktothrix* y *Trichodesmium*; estas agrupaciones de cianobacterias y fitoplancton suelen generar graves problemas a los cuerpos de agua pudiendo aumentar la turbidez y sofocan la vegetación acuática sumergida.

Las floraciones de células senescentes producen el agotamiento de oxígeno por la degradación microbiana induciendo en una falta de oxígeno tanto parcial como total, provocando la muerte de una variedad de organismos acuáticos. Además, la ingesta de cianotoxinas generadas durante procesos eutróficos puede generar enfermedades a aves, mamíferos y humanos. Chiclla (2022) demuestra que existe una relación significativa fuerte entre la cantidad de clorofila y las floraciones algales de *M. aeruginosa*.

Finalmente, la recarga de las lagunas se ve influenciada por dos tipos de mecanismos hidrodinámicos: principalmente mediante el sistema de riego por inundación de la actividad agrícola aledaña del sector y en menor medida por el aporte lateral del río Tambo; mientras que su descarga se da por los canales y drenes que derivan al mar parte de estas aguas, y por los procesos de evaporación y evapotranspiración, característico de estos humedales costeros. (Farfán et al., 2018). Así entonces, los niveles de clorofila y eutrofización de la laguna Iberia Sur están sujetos a estas variaciones hidrodinámicas que afectan la retención hídrica por temporadas y que resulta ser uno de los factores más importantes que influyen en los niveles tróficos de la laguna durante todo el año, siendo un factor a tener en consideración para una posterior gestión de la calidad de agua de la laguna Iberia.



CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Primero, el diagnóstico ambiental de la zona de estudio (laguna Iberia Sur) dentro del Santuario Nacional Lagunas de Mejía, demostró que la dicha laguna es susceptible a procesos de eutrofización.

Segundo, cada año mostró un patrón ligeramente diferente en la correlación MCI-MPH dado que las condiciones ambientales y las características específicas de cada año pueden influir en la relación entre estas dos métricas. Podemos decir además que la correlación es más alta en las estaciones de verano y otoño en comparación con invierno y primavera.

Con estos resultados obtenidos, se determinó que ambos índices MCI y MPH son aptos para el cálculo de concentraciones de clorofila en la Laguna Iberia Sur.

Tercero, los niveles de clorofila obtenidos in-situ de la primera fecha (28/09/2022) se encontraron en el rango de 19 -22 $\mu\text{g/L}$, lo que se interpreta como una categoría eutrófica según la OCDE. Mientras que para la segunda fecha (15/03/2023) los niveles de clorofila se encuentran en el rango de 5 – 10 $\mu\text{g/L}$, correspondiendo a un nivel mesotrófico y eutrófico.

Las 4 ecuaciones empíricas sugirieron un ajuste no muy fuerte y carecen de precisión entre los niveles estimados de concentración de clorofila y las mediciones reales para la laguna Iberia Sur, con un R^2 máximo de 0.4778 correspondiente a la ecuación 4.

La ecuación propia obtenida demostró una correlación fuerte y positiva del índice MPH con la concentración de clorofila in situ, con un R^2 de 0.8274, siendo así la ecuación más eficaz para ser usada en la presente investigación en la elaboración de los mapas de concentración de clorofila en toda la laguna Iberia Sur.

Para el período de verano de los tres años, se mantiene la categoría de lago mesotrófico – eutrófico, sin embargo, hay zonas en la laguna en las que la concentración es menor, lo que se explica en las conclusiones del análisis de variación espacio temporal y distribución de la Clorofila. Para el período de otoño de los tres años, prácticamente se mantiene el nivel de valores de concentración de clorofila del verano, predominando igualmente en este caso las

categorías de mesotrófico – eutrófico. Para el período de invierno de los tres años, la tendencia es de aumento en los valores de concentración de clorofila, predominando en este caso las categorías de eutrófico e hipereutrófico. Para el período de primavera de los tres años, la tendencia de aumento se mantiene, así como en el período de invierno, sin embargo en el año 2020 no es así, con una categoría eutrófica predominante.

Cuarto, Para la estación de verano, las concentraciones mínimas se encontraron en zonas adyacentes en orillas suroestes, los valores máximos se encontraron en la zona central de la laguna, los valores medios muestran que la laguna posee un estado mesotrófico y eutrófico y la desviación estándar indica que la mayor tasa de cambio de la concentración de clorofila se encuentra en la zona central de la laguna.

Para la estación de otoño, los valores mínimos se encuentran en las zonas adyacentes en todas las orillas, los valores máximos se observan desde la zona central a la zona norte, los valores medios muestran que la laguna posee un estado mesotrófico y eutrófico, la mayor desviación estándar se produjo en la zona central y norte de la laguna.

Para la estación de invierno, los mínimos se encuentran en zonas adyacentes a las orillas, en la zona noroeste de la laguna y zona sur, pudiendo deberse a nubosidad en la zona sur, los valores máximos se observan sobre todo en la zona central, los valores medios de concentración indican que la laguna Ibería posee un estado primordialmente eutrófico, la mayor tasa de cambios se produjo en la zona central y hacia el sur, debido a la diferencia de valores ocasionados por la nubosidad.

Para la estación de primavera, los valores mínimos se encuentran adyacentes a las orillas y al noroeste de la laguna, pudiendo deberse a una mayor profundidad en la zona noroeste, los valores máximos se observan en la zona central y norte de la laguna, siendo esta estación la que posee los valores más altos, los valores medios de concentración indican un estado primordialmente eutrófico en toda la laguna e hipertrofico solo en la zona central, la mayor tasa de cambios se encuentra en la zona central y norte, Para esta estación se muestra principalmente tasas de cambio de clorofila uniformes en gran parte del lago con promedio de distribución de concentración de clorofila de 3.36 $\mu\text{g/L}$, siendo la tasa de cambios más baja de las 4 estaciones.

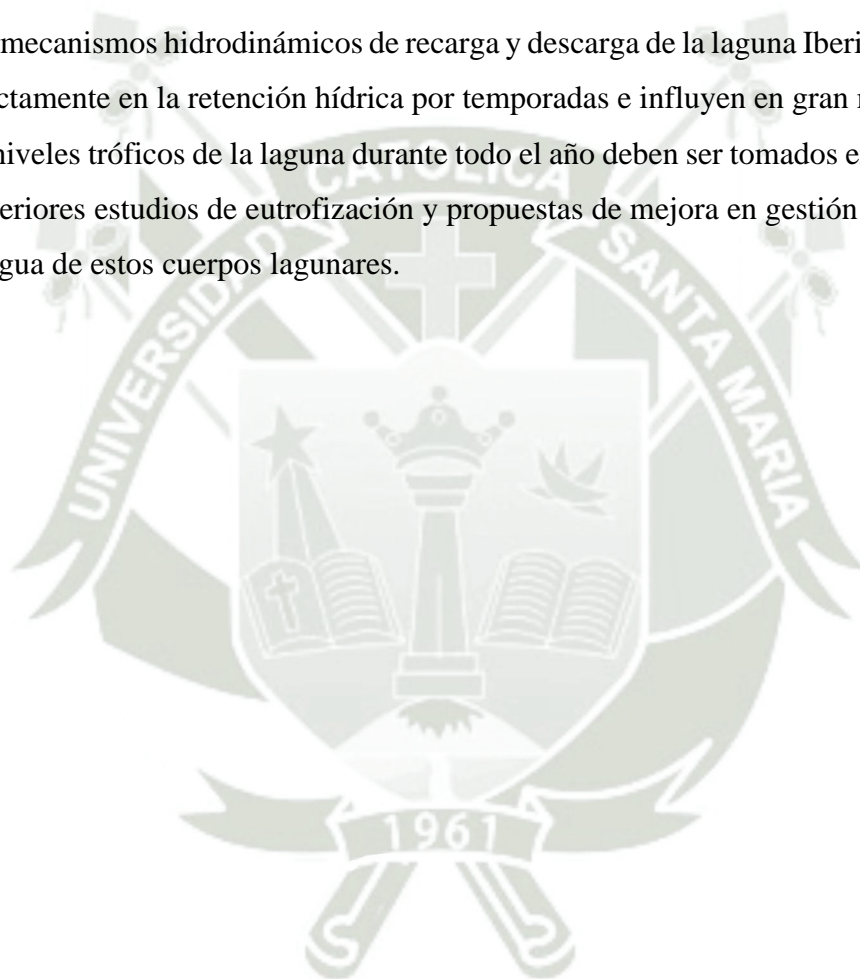
La clorofila alcanzó las concentraciones más altas durante la primavera de 2018 y 2019, lo que sugiere condiciones óptimas para la proliferación de algas o fitoplancton en esa estación. Esto es consistente con el entendimiento biológico de que la primavera a menudo trae un aumento en la productividad biológica debido a temperaturas más cálidas y mayor disponibilidad de luz solar.

Del 2018 al 2019, se observó un aumento en la concentración de clorofila en el verano y una disminución en la primavera, esto podría indicar un cambio en las condiciones ambientales o ecológicas de la laguna que favorece la producción de clorofila. En 2020, todas las estaciones mostraron una disminución en la concentración de clorofila en comparación con los años anteriores, pudiendo deberse a una serie de factores ambientales, como cambios en la calidad del agua, intervenciones de manejo de la laguna, o eventos climáticos anómalos que han afectado la productividad primaria de la laguna.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda que futuros estudios incluyan otros parámetros relacionados a la eutrofización en cuerpos de agua como lo son la transparencia, el fósforo total y el nitrógeno total, permitiendo determinar los niveles tróficos para corroborar los datos obtenidos en esta investigación y así tomar mejores decisiones en la gestión y manejo de calidad de agua de la laguna Iberia Sur.
- Se recomienda seleccionar para la descarga de imágenes satelitales aquellas fechas con nula nubosidad sobre el cuerpo de agua, ya que la presencia de nubes afecta la firma espectral, incluso sobre aquellas imágenes que han sido corregidas atmosféricamente.
- Sólo se tomaron en cuenta los índices de clorofila MCI y MPH, existiendo otros más en bibliografía, que podrían brindar resultados distintos en cuanto a la precisión sobre la concentración de clorofila en la laguna Iberia Sur.

- Se recomienda recolectar un número mucho mayor de muestras de agua para el análisis de concentración de clorofila “a” a lo largo del año y todas las estaciones, para así mejorar la calibración de esta o próximas ecuaciones. Además, así tener datos que permitan la validación de la ecuación.
- Los mecanismos hidrodinámicos de recarga y descarga de la laguna Iberia que afectan directamente en la retención hídrica por temporadas e influyen en gran manera sobre los niveles tróficos de la laguna durante todo el año deben ser tomados en cuenta para posteriores estudios de eutrofización y propuestas de mejora en gestión de la calidad de agua de estos cuerpos lagunares.





REFERENCIAS

Alikas, K., Kangro, K., & Reinart, A. (2010). Detecting cyanobacterial blooms in large North European lakes using the maximum chlorophyll index. *Oceanologia*. <https://doi.org/10.5697/oc.52-2.237>

Aranha, T. R. B. T., Martinez, J. M., Souza, E. P., Barros, M. U. G., & Martins, E. S. P. R. (2022). Remote analysis of the chlorophyll-a concentration using Sentinel-2 MSI images in a semiarid environment in northeastern Brazil. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w14030451>

Avila Guzmán, A. P. (2019). Análisis y clasificación de firmas espectrales utilizando técnicas de aprendizaje automático. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica [Tesis de Pregrado, INAOE]. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/1677/1/AvilaGAP>

Bakker, W., Grabmaier, K., Huurneman, G., Meer van der, F., Prakash, A., Tempfli, K., Gieske, A., Hecker, C., Janssen, L., Parodi, G., Reeves, C., Weir, M., Gorte, B., Horn, J., Kerle, N., Pohl, C., Ruitenbeek, F., & Woldai, T. (2004). Principles of remote sensing (3ra Edición). The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC).

Binding, C. E., Greenberg, T. A., & Bukata, R. P. (2013). The MERIS Maximum Chlorophyll Index: Its merits and limitations for inland water algal bloom monitoring. *Journal of Great Lakes Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2013.04.005>

Brivio, P. A., Giardino, C., & Zilioli, E. (2001). Validation of satellite data for quality assurance in lake monitoring applications. *Science of the Total Environment*. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00693-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00693-8)

Boluarte, R., & Ninaja, N. (2018). Centro de Difusión Ecológica en el Santuario Nacional Lagunas de Mejía. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8488>

Caballero, I., Roca, M., Santos-echeandía, J., Bernárdez, P., & Navarro, G. (2022). Use of the Sentinel-2 and Landsat-8 satellites for water quality monitoring: An early warning tool in the Mar Menor coastal lagoon. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs14122744>

Carpio, K. (2019). Caracterización de las formaciones de *Scirpus americanus* “junco” y su relación con la reducción de los espejos lagunares del Santuario Nacional Lagunas de Mejía, Arequipa -2017. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9753>

Carrasco, D. (2020). Nivel de eutrofización de la Laguna San Nicolás Cajamarca aplicando teledetección satelital en un periodo de 20 años. [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/23804>

Castillo Fernández, M., Gallardo Marticorena, M., & Chávez Quijada, M. (2011). Valle de Tambo-Islay: Territorio, agua y derechos locales en riesgo con la minería a tajo abierto. Global Greengrants Fund y la Red Muqui. https://muqui.org/wp-content/uploads/2019/11/Libro_Valle_de_Tambo-Islay

Cheneaux Diaz, A. A. (2015). Estado ecológico en dos lagunas del Santuario nacional de lagunas de Mejía, Arequipa, mediante macroinvertebrados cuáticos como bioindicadores de la calidad de agua (Febrero-Abril 2014) (Vol. 1). <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/426>

Chiclla Salazar, A. (2022). Floraciones algales de *Microcystis aeruginosa* y su relación con el nivel de eutrofización de las aguas del humedal Albuferas de Medio Mundo – Huaura. [Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. <http://hdl.handle.net/20.500.14067/6663>

Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial (3ra Edición). RIALP.

Dimberg, P. H., Bryhn, A. C., & Hytteborn, J. K. (2013). Probabilities of monthly median chlorophyll-a concentrations in subarctic, temperate and subtropical lakes. *Environmental Modelling and Software*. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.12.002>

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>

Duan, H., Zhang, Y., Zhang, B., Song, K., & Wang, Z. (2006). Assessment of chlorophyll-a concentration and trophic state for lake chagan using landsat TM and field spectral data. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9362-y>

EPA. (2018). Contaminación por nutrientes. <https://espanol.epa.gov/espanol/contaminacion-por-nutrientes>

Farfán, J., Tejada, O., García, F., & Fajardo, L. (2018). Origen hidrogeológico de las lagunas del Santuario Nacional Lagunas de Mejía - Arequipa (Perú), mediante caracterización hidroquímica y geofísica. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Publicación Especial N° 14*, 601-610.

Florida Lake Watch. (2015). Trophic State : A waterbody's ability to support plants, fish, and wildlife determine a waterbody's trophic state. Florida Lakewatch. <http://lakewatch.ifas.ufl.edu/>

Gonzales Campos, P. P., & Solano Soplin, R. P. (2019). Análisis del estado trófico mediante teledetección y datos "in situ" en la laguna de Paca, Jauja-Junín 2019 [Universidad César Vallejo]. <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/27098>

González, F. E., Ruiz, J. M., & Acosta, F. M. (2013). Tutorial de Teledetección espacial. *Telecan*, 192(4973), 860.

Grendaitė, D., Stonevičius, E., Karosienė, J., Savadova, K., & Kasperovičienė, J. (2018). Chlorophyll-a concentration retrieval in eutrophic lakes in Lithuania from Sentinel-2 data. *Geologija. Geografija*. <https://doi.org/10.6001/geol-geogr.v4i1.3720>

Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. (2017). A review of wetland remote sensing. *Sensors (Suiza)*. <https://doi.org/10.3390/s17040777>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. D. P. (2014). *Metodología de la investigación (6ta Edición)*. Mc Graw-Hill. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>

Huisman, J., Codd, G.A., Paerl, H.W. (2018). Cyanobacterial blooms. *Nat Rev Microbiol* 16, 471–483 <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0040-1>

INRENA. (2000). Plan maestro Santuario nacional Lagunas de Mejía. INRENA.

Jefatura del Santuario Nacional Lagunas de Mejía. (2001). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar.

Karimi, B., Hossein Hashemi, S., & Aghighi, H. (2022). Performance of Sentinel-2 and Landsat-8 satellites in estimating chlorophyll-a concentration in a shallow freshwater lake. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1968542/v1>

Le, C., Hu, C., Cannizzaro, J., English, D., Muller-Karger, F., & Lee, Z. (2013). Evaluation of chlorophyll-a remote sensing algorithms for an optically complex estuary. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.001>

Li, S., Chen, F., Song, K., Liu, G., Tao, H., Xu, S., Wang, X., Wang, Q., & Mu, G. (2022). Mapping the trophic state index of eastern lakes in China using an empirical model and Sentinel-2 imagery data. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127613>

Liu, H., He, B., Zhou, Y., Yang, X., Zhang, X., Xiao, F., Feng, Q., Liang, S., Zhou, X., & Fu, C. (2021). Eutrophication monitoring of lakes in Wuhan based on Sentinel-2 data. *GIScience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1940738>

Li, Y., Zhou, Z., Kong, J., Wen, C., Li, S., Zhang, Y., Xie, J., & Wang, C. (2022). Monitoring chlorophyll-a concentration in karst plateau lakes using Sentinel 2 imagery from a case study of Pingzhai Reservoir in Guizhou, China. *European Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/22797254.2022.2079565>

Loayza Basan, K., Castillejos Paniagua, K., & Mestas Valero, R. (2017). Estudio de la teledetección y caracterización fisicoquímica del humedal “El Cascajo”, Santa Rosa, Chancay- Lima, Perú. *Infinitum*. <http://revistas.unjfsc.edu.pe/index.php/INFINITUM/article/view/61/171>

López Martínez, M. L., & Madroñero Palacios, S. M. (2015). Estado trófico de un lago tropical de alta montaña: Caso Laguna de la Cocha. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. <https://doi.org/10.18359/rcin.1430>

Mas Monsonis, M. (2017). Uso de la teledetección y los SIG en la vigilancia de la calidad del agua: Aplicación al Mar Menor. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena]. <http://hdl.handle.net/10317/6353>

Mateu, A. (2016). Problems of eutrophication of surface waters in relation to agriculture. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica De Valencia]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/78548>

Matthews, M. W., Bernard, S., & Robertson, L. (2012). An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.032>

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

Mollae, S. (2018). Estimation of phytoplankton chlorophyll-a concentrations in the Western Basin of Lake Erie using Sentinel-2 and Sentinel-3 data. University of Waterloo. In *Canadian Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/07038992.2020.1823825>

Moreno, D., Quintero, J., & López, A. (2010). Método para identificar, diagnosticar y evaluar el grado de eutrofia. RBRH. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716072>

Moreta, J. C. (2008). La eutrofización de los lagos y sus consecuencias. Ibarra 2008. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Del Norte]. <http://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2377/2/ResumenEjecutivo>

Moses, W. J., Gitelson, A. A., Perk, R. L., Gurlin, D., Rundquist, D. C., Leavitt, B. C., Barrow, T. M., & Brakhage, P. (2012). Estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters using airborne hyperspectral data. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.068>

Mssanzya, S. M. (2010). Monitoring and predicting eutrophication of inland waters using remote sensing. [Tesis de maestría, international Institute for Geo-information Science and Earth Observation. <https://essay.utwente.nl/92292/>

Nazari-Sharabian, M., Ahmad, S., & Karakouzian, M. (2018). Climate Change and Eutrophication: A Short Review. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 8(6), 3668-3672.

Nebel, B., & Wright, R. (1999). *Ciencias ambientales (Ecología y desarrollo sostenible)*. Prentice-Hall Pearson. México. Ciencia y mar. <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-y-mar/articulo/nebel-b-y-r-wright-1999-ciencias-ambientales-ecologia-y-desarrollo-sostenible-prentice-hall-pearson-mexico-698-p>

Nieto, A., & Cárdenas, G. (2018). *Sistemas de información geográfica y teledetección: Aplicaciones en el análisis territorial*. ISBN 9788409037490. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=721667>

ONERN. (1974). *Inventario, evaluación y uso racional de los recursos naturales de la Costa: cuencas de los ríos Quilca y Tambo*. ONERN.

Pahlevan, N., Smith, B., Schalles, J., Binding, C., Cao, Z., Ma, R., Alikas, K., Kangro, K., Gurlin, D., Hà, N., Matsushita, B., Moses, W., Greb, S., Lehmann, M. K., Ondrusek, M., Oppelt, N., & Stumpf, R. (2020). Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111604>

Palmer, S. C. J., Hunter, P. D., Lankester, T., Hubbard, S., Spyrakos, E., N. Tyler, A., Présing, M., Horváth, H., Lamb, A., Balzter, H., & Tóth, V. R. (2015). Validation of Envisat MERIS algorithms for chlorophyll retrieval in a large, turbid and optically-complex shallow lake. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.024>

Peppas, M., Vasilakos, C., & Kavroudakis, D. (2020). Eutrophication monitoring for Lake Pamvotis, Greece, using sentinel-2 data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. <https://doi.org/10.3390/ijgi9030143>

Pirasteh, S., Mollae, S., Fatholahi, S. N., & Li, J. (2020). Estimation of phytoplankton chlorophyll-a concentrations in the Western Basin of Lake Erie using Sentinel-2 and Sentinel-3 data. *Canadian Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/07038992.2020.1823825>

Pulido, V., Málaga, E., Olivera, E., & Acevedo, J. (2021). Conservación de hábitats y aves en el Santuario Nacional Lagunas de Mejía, Arequipa, Perú. *Arnaldoa*, 28(1), 183-198.

Qiu, Y., Zhang, H. E., Tong, X., Zhang, Y., & Zhao, J. (2006). Monitoring the water quality of water resources reservation area in upper region of Huangpu River using remote sensing. En *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.279>

Quezada García, M. G. (2020). Uso de imágenes satelitales para determinar los parámetros de calidad del agua en los ríos Amazónicos Neshuya y Aguaytía-Perú. [Tesis de pregrado, Universidad Agraria La Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4550>

Ramos Aro, C. A. (2019). Valoración económica del servicio de secuestro y almacenamiento de carbono del Monte Ribereño del Santuario Nacional Lagunas de Mejía. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María] <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/10536>

Riva, V., & Fau, R. M. (2020). Plan Maestro del Santuario Nacional Lagunas de Mejía. SERNANP.

Rodriguez, M. (2019). Estudio de floraciones algales mediante indicadores de concentración de clorofila a y temperatura superficial en el embalse de Condorama utilizando técnicas de teledetección. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/12336/MDzutoma.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ruiz-Ruiz, T. M., Arreola-Lizárraga, J. A., Morquecho, L., Mendez-Rodríguez, L. C., Martínez-López, A., & Mendoza-Salgado, R. A. (2017). Detecting eutrophication symptoms in a subtropical semi-arid coastal lagoon by means of three different methods. *Wetlands*. <https://doi.org/10.1007/s13157-017-0944-y>

Russi, D., ten Brick, P., Farmer, A., Coates, D., Förster, J., & Davidson, N. (2012). The economics of ecosystems and biodiversity for water and wetlands. Final Consultation Draft.

Sánchez, M. (2020). Aplicación de la teledetección: Índices espectrales. [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Superior de Ávila]. <https://politecnicadeavila.usal.es/2020/02/03/maria-sanchez-aporicio-aplicacion-de-la-teledeteccion-indices-espectrales/>

Sebastián, M., Palomo, M., Rincón, J., Ormeño, S., & Vicent, J. (2011). Métodos de documentación, análisis y conservación no invasivos para el arte rupestre postpaleolítico: Radiometría de campo e imágenes multispectrales. *La Ciencia y El Arte*.

Secretaría de la Convención de Ramsar. (2018). Perspectiva mundial sobre los humedales: Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas. Gland (Suiza). Recuperado de https://www.ramsar.org/sites/default/files/flipbooks/ramsar_gwo_spanish_web.pdf

SERNANP. (2015). Plan Maestro del Santuario Nacional Lagunas de Mejía 2015-2019. SERNANP.

Shi, J., Shen, Q., Yao, Y., Li, J., Chen, F., Wang, R., Xu, W., Gao, Z., Wang, L., & Zhou, Y. (2022). Estimation of chlorophyll-a concentrations in small water bodies: Comparison of fused Gaofen-6 and Sentinel-2 sensors. *Remote Sensing* <https://doi.org/10.3390/rs14010229>

Soncco, R. H., & Alvarez, D. J. (2020). Estado del arte sobre los índices que determinan el nivel de eutrofización en lagunas altoandinas. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3326>

Soria-Perpinyá, X., Vicente, E., Urrego, P., Pereira-Sandoval, M., Tenjo, C., Ruíz-Verdú, A., Soria, J. M., Peña, R., & Moreno, J. (2021). Validation of water quality monitoring algorithms for Sentinel-2 and Sentinel-3 in Mediterranean inland waters with in situ reflectance data. *Water*, 13 (686). <https://doi.org/10.3390/w13050686>

Tong, Q., Zhang, B., & Zheng, L. (2004). Hyperspectral remote sensing technology and applications in China. European Space Agency (Special Publication).

Ventura, D. L. T., Martinez, J. M., de Attayde, J. L., Martins, E. S. P. R., Brandini, N., & Moreira, L. S. (2022). Long-term series of chlorophyll-a concentration in Brazilian semiarid lakes from MODIS imagery. *Water* (Switzerland), 14(3). <https://doi.org/10.3390/w14030400>

Whaley, D. L. (2005). The interquartile range: Theory and estimation. *Electronic Theses and Dissertations*. Paper 1030. <https://dc.etsu.edu/etd/1030>

Woolway, R. I., Sharma, S., & Smol, J. P. (2022). Lakes in Hot Water: The Impacts of a Changing Climate on Aquatic Ecosystems. *BioScience*, 72(11), 1050-1061.

Xia, R., Zhang, Y., Critto, A., Wu, J., Fan, J., Zheng, Z., & Zhang, Y. (2016). The Potential Impacts of Climate Change Factors on Freshwater Eutrophication: Implications for Research and Countermeasures of Water Management in China. *Sustainability*, 8(3), 229.

Xu, J., Pan, J., & Devlin, A. T. (2023). Variations in chlorophyll-a concentration in response to hydrodynamics in a flow-through lake: Remote sensing and modeling studies. *Ecological Indicators*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110128>

Xu, J., Pan, J., & Devlin, A. T. (2023). Variations in chlorophyll-a concentration in response to hydrodynamics in a flow-through lake: Remote sensing and modeling studies. *Ecological Indicators*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110128>

Yang, Z., Reiter, M., & Munyei, N. (2017). Estimation of chlorophyll-a concentrations in diverse water bodies using ratio-based NIR/Red indices. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 6, 52–58. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2017.04.004>

Zhang, Y., Ma, R., Duan, H., Loiselle, S., Zhang, M., & Xu, J. (2016). A novel MODIS algorithm to estimate chlorophyll a concentration in eutrophic turbid lakes. *Ecological Indicators*, 69, 138–151. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2016.04.020>

Zúñiga, K. G. (2020). Evaluación de nutrientes mediante flujos de amonio, nitrito, nitrato y fosfato a través de la interfase sedimento-agua en la laguna de Iberia del Santuario Nacional Lagunas de Mejía. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/701d09ed-0144-4345-8f16-33bcd335e15f>



ANEXOS

ANEXO N°1 – RESULTADOS DE LABORATORIO

ANEXO N°1.1 Resultados de laboratorio – Informe de ensayo de clorofila (28/09/2022)

ANEXO N°1.2 Resultados de laboratorio – Informe de ensayo de clorofila (15/03/2023)

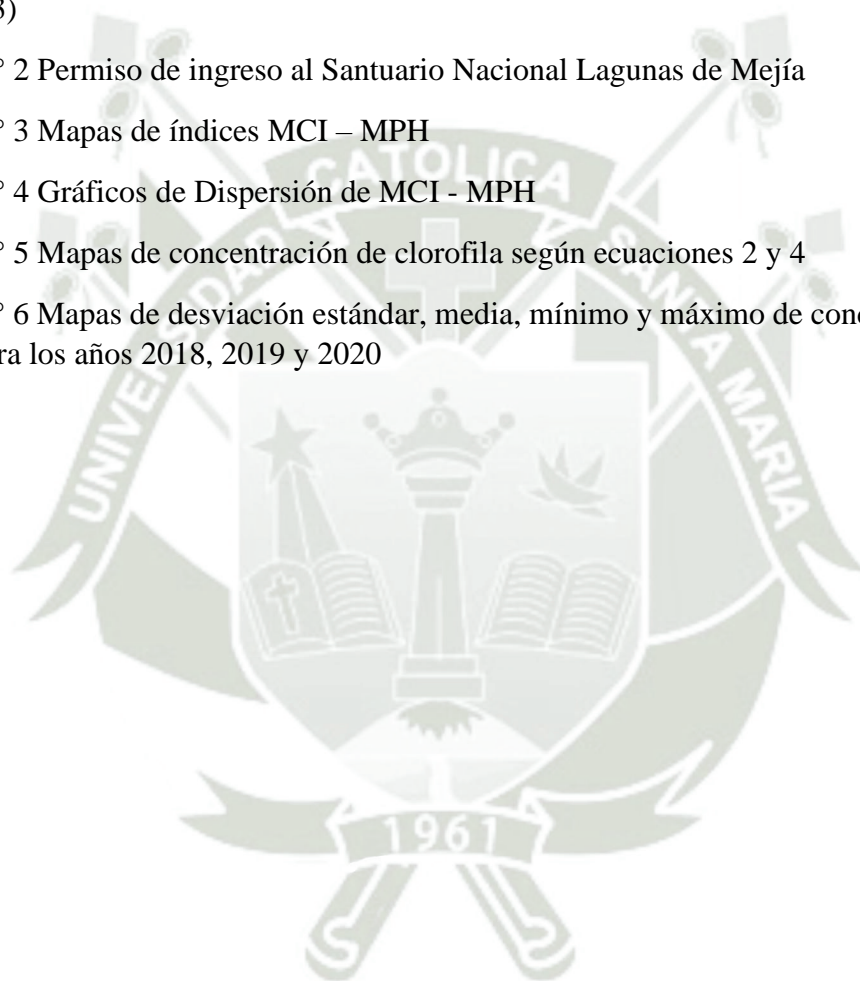
ANEXO N° 2 Permiso de ingreso al Santuario Nacional Lagunas de Mejía

ANEXO N° 3 Mapas de índices MCI – MPH

ANEXO N° 4 Gráficos de Dispersión de MCI - MPH

ANEXO N° 5 Mapas de concentración de clorofila según ecuaciones 2 y 4

ANEXO N° 6 Mapas de desviación estándar, media, mínimo y máximo de concentración de clorofila para los años 2018, 2019 y 2020



ANEXO N°1 – Resultados de laboratorio



ANEXO N°1.1 Resultados de laboratorio – Informe de ensayo de clorofila (28/09/2022)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-17086

N° Id.: 0000060783

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL : JESUS ZUÑIGA VILLANUEVA
2.-DIRECCIÓN : URB LA CANTUTA C-7, AREQUIPA, AREQUIPA
3.-PROYECTO : ESTIMACION DEL ESTADO TROFICO MEDIANTE TELEDETECCION SATELITAL EN EL SANTUARIO NACIONAL LAGUNAS DE MEJIA - AREQUIPA
4.-PROCEDENCIA : KM 32.4 DE LA ANTIGUA CARRETERA PANAMERICANA SUR, ENTRE MEJIA Y LA CURVA
5.-SOLICITANTE : JESUS ZUÑIGA VILLANUEVA
6.-ORDEN DE SERVICIO N° : OS-22-4734
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : P-OPE-1 MUESTREO
8.-MUESTREADO POR : ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L.
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2022-10-10

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO : Agua
2.-NÚMERO DE MUESTRAS : 8
2.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA : 2022-09-29
3.-PERÍODO DE ENSAYO : 2022-09-29 al 2022-10-10


Liz Y. Quipe Quispe
Jefe de Laboratorio
CIP N° 211662

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R. L. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia.

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chaleca 1877,
Bellavista, Calleo P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.1 de 4



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-17086

N° Id.: 000060783

III. MÉTODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Clorofila ☐	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 10200 H, 23 rd Ed. 2017	Plankton. Chlorophyll

SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

☐ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca 1877,
Bellavista, Callao P. (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G Lt 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág 2 de 4



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-17086

N° Id.: 000060783

IV. RESULTADOS

ITEM	1	2	3	4
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-22-52014	M-22-52015	M-22-52016	M-22-52017
CÓDIGO DEL CLIENTE:	P 06	D 03	C 05	P 07
COORDENADAS:	E:0194514.3	E:0194854.7	E:0194870.5	E:0195054.4
UTM WGS 84:	N:8102485.4	N:8102399.0	N:8102397.9	N:8101960.9
PRODUCTO:	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural
SUB PRODUCTO:	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	I-OPE-1.4 MUESTREO DE AGUAS SUPERFICIALES			
FECHA y HORA DE MUESTREO :	28-09-2022 11:10	28-09-2022 11:45	28-09-2022 12:02	28-09-2022 12:56
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Clorofila (*)	mg/L	0,002	0,005	0,019 0,022 0,020 0,020

Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<= Menor que el L.D.M.

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chaleco 1877,
Bellavista, Callao P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:

Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR
P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:

Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.3 de 4



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



INFORME DE ENSAYO N°: IE-22-17086

N° Id.: 000060763

ITEM	5	6	7	8
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-22-52018	M-22-52019	M-22-52020	M-22-52021
CÓDIGO DEL CLIENTE:	C 04	P 08	D 01	D 02
COORDENADAS:	E:0194901.2	E:0195532.5	E:0195690.5	E:0195840.5
UTM WGS 84:	N:8101976.01	N:8101600.6	N:8101564.6	N:8101471.4
PRODUCTO:	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural
SUB PRODUCTO:	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	I-OPE-1.4 MUESTREO DE AGUAS SUPERFICIALES			
FECHA y HORA DE MUESTREO :	28-09-2022 13:35	28-09-2022 15:00	28-09-2022 15:44	28-09-2022 16:11
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Clorofila (*)	mg/L	0,002	0,005	0,019 0,021 0,022 0,021

Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

"FIN DE DOCUMENTO"

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chaleca 1877,
Bellavista, Calleo P (+511)
7175810 / Anexo 112 Cel.:
940 598 572
www.Alab.com.pe

SEDE AREQUIPA:
Mz. E Lt.9 COOP SIDSUR

P (+073) 616843
Cel.: 932646642
www.Alab.com.pe

SEDE PIURA:
Calle Los Ébanos Mz G LT 17 Urb.
Miraflores II Etapa - Ref. Costado
del colegio San Ignacio de Loyola. P
(+073) 542335 Cel.: 919 475 133
www.Alab.com.pe

Pág.4 de 4

ANEXO N°1.2 Resultados de laboratorio – Informe de ensayo de clorofila (15/03/2023)



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-4020

N° Id.: 0000072208

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: Jesus Zuñiga Villanueva
2.-DIRECCIÓN	: NO INDICA
3.-PROYECTO	: ESTIMACION DEL ESTADO TIÓTICO MEDIANTE TELEDETECCION SATELITAL EN EL SANTUARIO NACIONAL LAGUNAS DE MEJIA - AREQUIPA
4.-PROCEDENCIA	: KM 32.4 DE LA ANTIGUA CARRETERA PANAMERICANA SUR, ENTRE MEJIA Y LA CURVA
5.-SOLICITANTE	: JESUS ZUÑIGA VILLANUEVA
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 0000001008-2023-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2023-03-23

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Agua Natural
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 8
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2023-03-16
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2023-03-16 al 2023-03-23



Liz Y. Quispe Quispe
Jefe de Laboratorio
CIP N° 211662



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R. L. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia.

📍 SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0756
Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

📍 SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0636
Cel.: 937 111 379 / 940 598 572

📍 SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 832 646 642 / 940 598 572

📍 SEDE PIURA
Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
Castilla - Piura
Telf.: (+073) 542 335
Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág. 1 de 4

www.alab.com.pe



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-4020

N° Id.: 000072208

III. MÉTODOS Y REFERENCIAS

TIPO DE ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	TÍTULO
Clorofila A ¹	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 10200 H, 23 rd Ed. 2017	Plankton. Chlorophyll

¹SMEWW¹ : Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

¹ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0756
Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

SEDE ZARUMILLA

Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0836
Cel.: 937 111 379 / 940 598 572

SEDE AREQUIPA

COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 932 646 642 / 940 598 572

SEDE PIURA

Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
Castilla - Piura
Telf.: (+073) 542 335
Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

Pág 2 de 4

www.alab.com.pe



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-4020

N° Id.: 0000072208

IV. RESULTADOS

ITEM	1	2	3	4
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-23-11862	M-23-11863	M-23-11864	M-23-11865
CÓDIGO DEL CLIENTE:	P06	D03	C05	P07
COORDENADAS:	E:0194514.3	E:0194928.3	E:0194870.5	E:0195054.4
UTM WGS 84:	N:8102485	N:8102491.1	N:8102397.9	N:8101969.9
PRODUCTO:	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural
SUB PRODUCTO:	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA			
FECHA y HORA DE MUESTREO :	15-03-2023 13:25	15-03-2023 14:04	15-03-2023 14:20	15-03-2023 15:03
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Clorofila A (*)	mg/L	0,002	0,005	0,009 0,010 0,007 0,009

Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<= Menor que el L.D.M.

Pág 3 de 4

SEDE PRINCIPAL

Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0756
Cel.: 977 516 675 / 940 598 572

SEDE ZARUMILLA

Prolongación Zarumilla Mz. D2 Lt. 3,
Bellavista - Callao
Telf.: (+01) 713 0838
Cel.: 937 111 379 / 940 598 572

SEDE AREQUIPA

COOP SIDSUR Mz E Lt. 9,
Arequipa
Telf.: (+054) 616 843
Cel.: 932 646 642 / 940 598 572

SEDE PIURA

Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17,
Castilla - Piura
Telf.: (+073) 542 335
Cel.: 919 475 133 / 940 598 572

www.alab.com.pe



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-4020

N° Id.: 000072208

ITEM	5	6	7	8
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-23-11866	M-23-11867	M-23-11868	M-23-11869
CÓDIGO DEL CLIENTE:	C04	D02	P08	D01
COORDENADAS:	E:0195261.4	E:0195139.5	E:0195383.3	E:0195618.1
UTM WGS 84:	N:8101972.9	N:8102217.3	N:8101728.6	N:8101855.1
PRODUCTO:	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural	Agua Natural
SUB PRODUCTO:	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)	Agua Superficial (Laguna/Lago)
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA			
FECHA y HORA DE MUESTREO :	15-03-2023 15:22	15-03-2023 14:45	15-03-2023 15:52	15-03-2023 16:14
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Clorofila A (*)	mg/L	0,002	0,005	0,008 0,006 0,005 <0,005

Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.
L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

<p>SEDE PRINCIPAL Av. Guardia Chalaca N° 1877, Bellavista - Callao Telf.: (+01) 713 0756 Cel.: 977 516 675 / 940 598 572</p>	<p>SEDE ZARUMILLA Prolongación Zaramilla Mz. D2 Lt. 3, Bellavista - Callao Telf.: (+01) 713 0636 Cel.: 937 111 379 / 940 598 572</p>	<p>SEDE AREQUIPA COOP SIDSUR Mz E Lt. 9, Arequipa Telf.: (+054) 616 843 Cel.: 932 646 642 / 940 598 572</p>	<p>SEDE PIURA Urb. Miraflores Mz. G Lt. 17, Castilla - Piura Telf.: (+073) 542 335 Cel.: 919 475 133 / 940 598 572</p>
---	---	--	---

www.alab.com.pe

ANEXO N°2 – Permiso de ingreso al Santuario Nacional Lagunas de Mejía





**Resolución del Jefe del Área Natural Protegida Santuario Nacional
Lagunas de Mejía N° 06-2022-SERNANP-JEF**

Islay, 26 de julio del 2022

VISTO:

El Informe N°044-2022-SERNANP-SNLM-LVD, de fecha 25 de julio del 2022, sobre el Expediente TUPA SNLM N° 367-2022; que comprende 013 folios; recepcionada el 20 de julio del 2022; emitido por el Sr. Jesús Francisco Zúñiga Villanueva, de nacionalidad peruana con DNI N° 72964971, donde solicita autorización para realizar investigación en el SNLM por el lapso de hasta 2 años, para realizar el estudio “Estimación del estado trófico mediante teledetección satelital en el Santuario Nacional Lagunas de Mejía – Arequipa, periodo 2018- 2020”, ello en el marco del Procedimiento Administrativo antes referido.

CONSIDERANDO:

Que, a través del numeral 2 de la Segunda Disposición Complementaria Final del Decreto Legislativo N° 1013, Ley de Creación, Organización y Funciones del Ministerio del Ambiente, se crea el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado – SERNANP, como un organismo público, técnico y especializado, adscrito al Ministerio del Ambiente, el mismo que se constituye en el ente rector del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado – SINANPE, y en su autoridad técnico - normativa;

Que, de conformidad con el artículo 29° de la Ley N° 26834, Ley de Áreas Naturales Protegidas, el Estado reconoce la importancia de las Áreas Naturales Protegidas para el desarrollo de la investigación científica básica y aplicada, la misma que solo será autorizada si su desarrollo no afecta los objetivos primarios de conservación del Área Natural Protegida en la cual ésta se lleve a cabo, y se respete la zonificación y condiciones establecidas en el Plan Maestro de esta última;

Que, en ese sentido, El Plan Director de las Áreas Naturales Protegidas, aprobado mediante Decreto Supremo N° 016-2009-MINAM, señala que la investigación científica es considerada como uno de los objetivos de creación de las Áreas Naturales Protegidas, y como una actividad inherente al SINANPE y su gestión, no contando dicha actividad



con restricción alguna en la medida que cumpla con la normatividad y no se contraponga con los objetivos de creación del Área Natural Protegida en cuestión, y sus instrumentos de planificación;

Que, el Decreto Supremo N° 002-2012-MINAM aprueba el Texto Único de Procedimientos Administrativos – TUPA del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas – SERNANP, modificado mediante Resolución Ministerial N° 152-2016-MINAM, Resolución Ministerial N° 315-2016-MINAM y Resolución Ministerial N° 035-2017-MINAM, cuyo Procedimiento Administrativo N° 04, regula la autorización para realizar investigación en Áreas Naturales protegidas del SINANP, por periodo de hasta dos (2) años;

Que, mediante Resolución Presidencial N° 287-2015-SERNANP, de fecha 23 de diciembre de 2015, se aprueba las “Disposiciones Complementarias al Reglamento de la Ley de Áreas Naturales Protegidas en materia de investigación”, la misma que establece las normas y lineamientos que regulan las investigaciones realizadas al interior de las Áreas Naturales Protegidas de administración nacional;

Que, a través de los documentos del visto, la Jefatura del Santuario Nacional Lagunas de Mejía concluye que la solicitud de autorización para realizar investigación en el SNLM; cuyo nombre del estudio es “Estimación del estado trófico mediante teledetección satelital en el Santuario Nacional Lagunas de Mejía – Arequipa, periodo 2018- 2020”, en el ámbito del ANP del mismo nombre, cumple con los requisitos estipulados en el Procedimiento Administrativo N° 04 del Texto Único de Procedimientos Administrativos del SERNANP, y por tanto recomienda continuar con el trámite correspondiente a efectos de otorgar la autorización de ingreso para realizar investigación en un ANP;

En uso de las atribuciones conferidas por el inciso *h*) del artículo 27° del Reglamento de Organización y Funciones del SERNANP, aprobado mediante Decreto Supremo N° 006-2008-MINAM.

SE RESUELVE:

Artículo 1°.- Otorgar la AUTORIZACIÓN DE INGRESO para realizar investigación en un ANP, a través del estudio “Estimación del estado trófico mediante teledetección satelital en el Santuario Nacional Lagunas de Mejía – Arequipa, periodo 2018- 2020”, al Sr. Jesús Francisco Zúñiga Villanueva; a fin de llevar a cabo la toma de muestras de agua de la laguna Ibería, en el ámbito del Santuario Nacional Lagunas de Mejía, el mismo que se enmarca en el Procedimiento N° 04 del Texto Único de Procedimientos Administrativos del SERNANP.



Artículo 2°.- Autorizar el ingreso al Área Natural Protegida, de las siguientes personas, integrantes del Equipo de Evaluación:

NOMBRES	APELLIDOS	DNI/PASAPORTE/CE	CARGO
Jesús Francisco	Zúñiga Villanueva	72964971	Responsable del Componente
Rodrigo Guillermo	López Poch	73426275	Responsable del Componente

De requerirse el remplazo de las personas antes referidas o la inclusión de nuevas personas al equipo de evaluación, el titular de la presente Autorización, deberá realizar la solicitud correspondiente ante la Jefatura del Área Natural Protegida. Así mismo el personal de laboratorio deberá ser debidamente acreditado antes de su ingreso al ANP.

Artículo 3°.- Los integrantes del equipo de evaluación son responsables de conocer y cumplir la normatividad de la materia, específicamente la Ley N° 26834, Ley de Áreas Naturales Protegidas, y su Reglamento, aprobado mediante Decreto Supremo N° 038-2001-AG, así como las disposiciones que emita la jefatura del Santuario Nacional Lagunas de Mejía.

Artículo 4°.- El Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado – SERNANP se abstiene de toda responsabilidad por los accidentes o daños que puedan sufrir los integrantes del equipo de evaluación durante el desarrollo del proyecto.

Artículo 5°.- La presente autorización no otorga derechos sobre los recursos genéticos o productos derivados de las muestras extraídas.

Artículo 6°.- En caso fortuito o de fuerza mayor, la Jefatura del Área Natural Protegida se encontrará facultada para adoptar las medidas que resulten pertinentes para hacer frente a la situación generada, las mismas que podrán implicar una modificación de los alcances de la Autorización de ingreso para realizar investigación otorgada a través de la presente Resolución.

Artículo 7°.- La Autorización de ingreso para realizar investigación otorgada a través de la presente Resolución, caducará automáticamente a su vencimiento, así como por el incumplimiento de las obligaciones que se deriven de su otorgamiento



y/o por cualquier daño generado al patrimonio del Área Natural Protegida, sin perjuicio de las responsabilidades administrativas, civiles o penales que pudieran originarse de acuerdo a la normativa.

Artículo 8.- Regístrese la presente Resolución en el archivo de autorizaciones del Santuario Nacional Lagunas de Mejía y publíquese en la página web del SERNANP (www.sernanp.gob.pe).

Regístrese y comuníquese,



Firmado digitalmente por:
HERNANI ALDUDE Lizbeth
Miriam FAU 20478053178 hard
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 26/07/2022 09:44:16-0500

Bлга. Lizbeth Hernani Aldude
Jefe
Santuario Nacional Lagunas de Mejía
Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas
SERNANP

ANEXO N°3 – Mapas de índices MCI – MPH

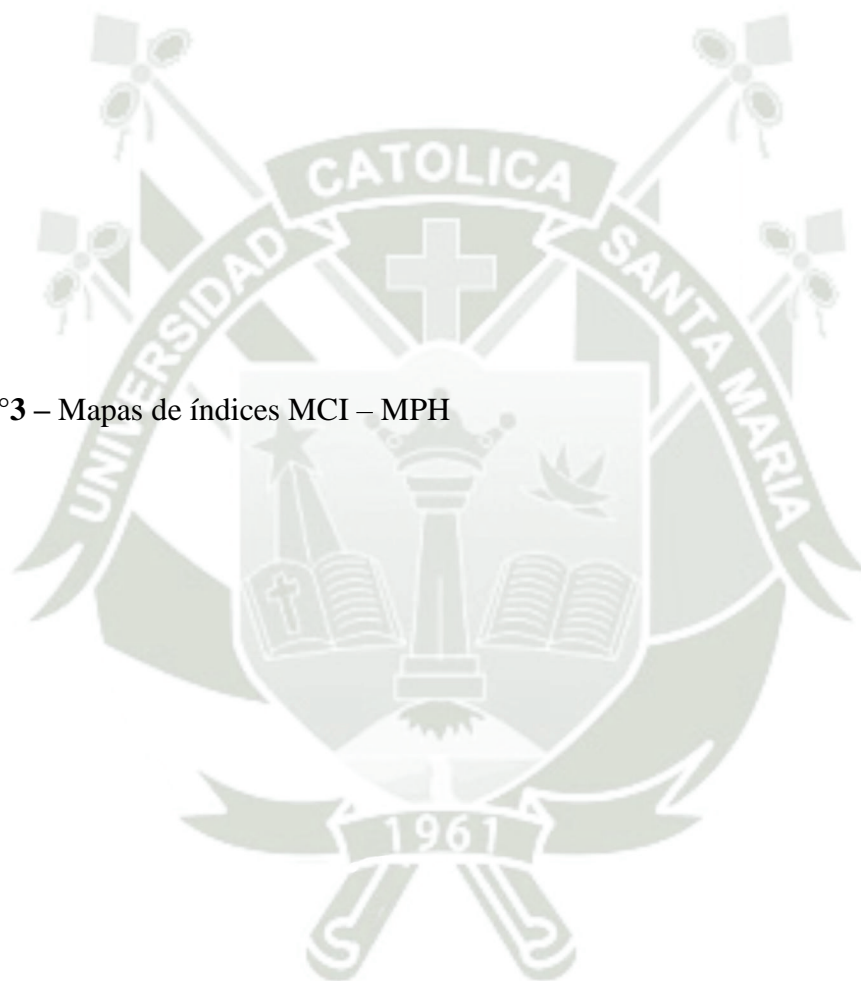


Figura. Mapas de índice MCI- Verano 2018

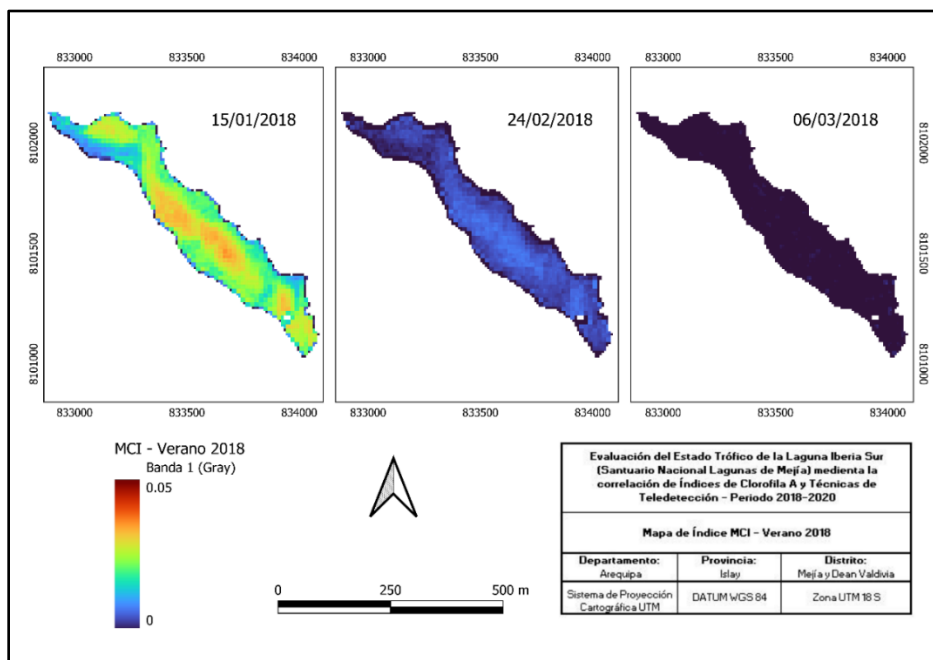


Figura. Mapas de índice MCI - Otoño 2018

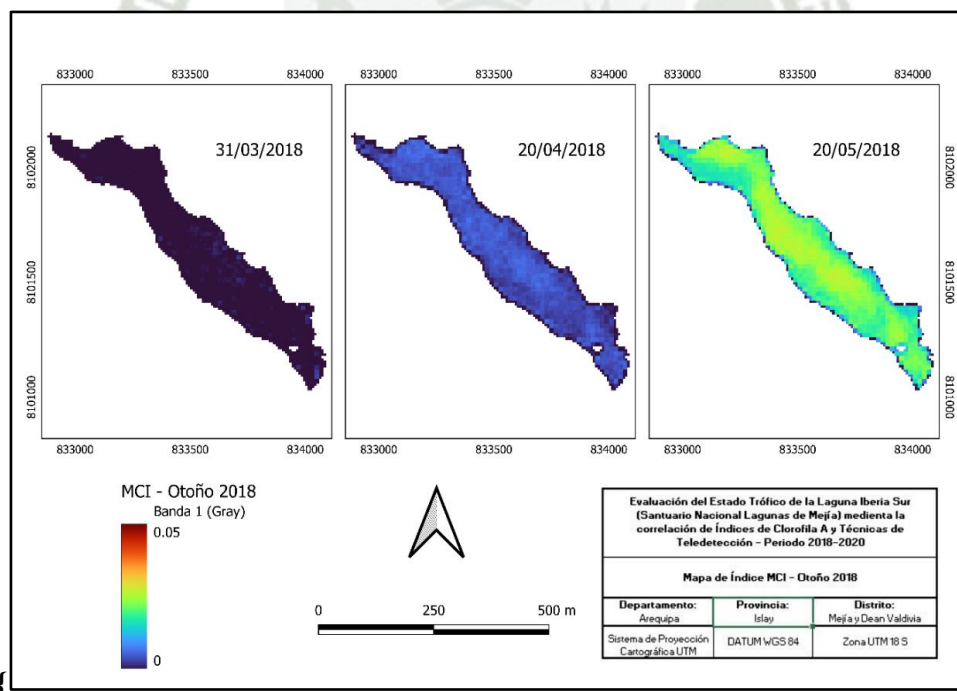


Figura. Mapas de índice MCI – Invierno 2018

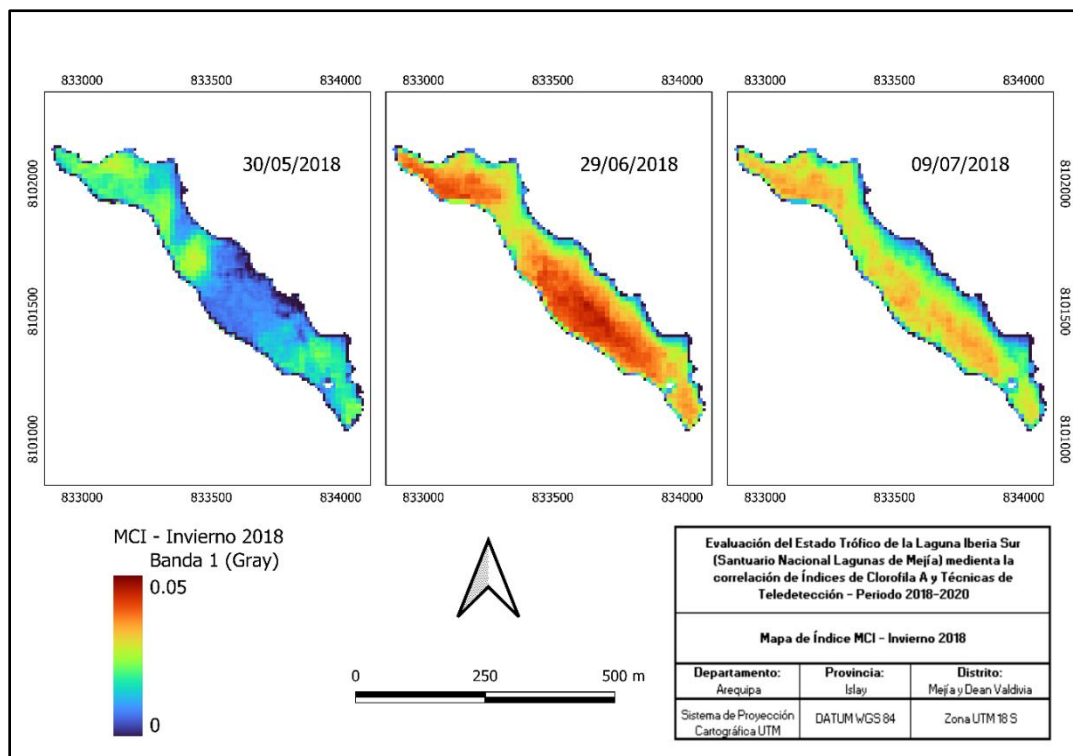
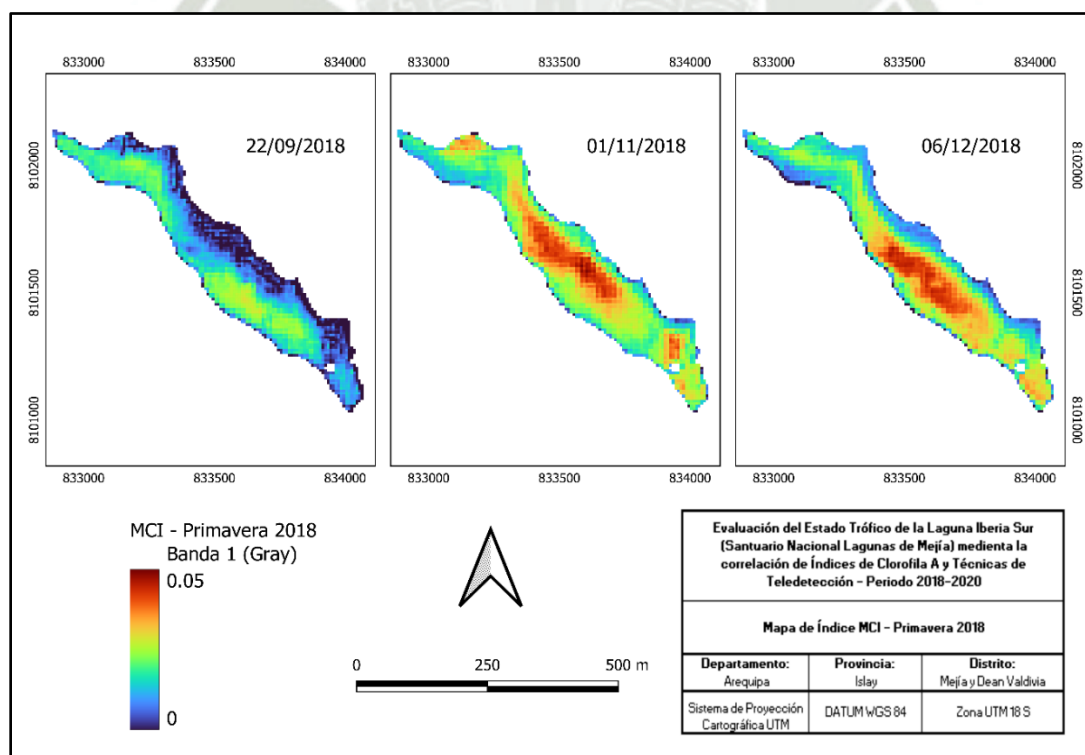


Figura. Mapas de índice MCI – Primavera 2018



En las Figuras se muestran los mapas de índices de MCI para las estaciones del año 2018, verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente. Se observa que los meses de febrero, marzo y abril poseen los valores más bajos con 0.0079, 0.0019 y 0.0081, mientras que los meses con mayor MCI fueron junio y diciembre, donde los rangos de valores de MCI alcanzaron máximos de 0.047.

Figura. Mapas de índice MCI – Verano 2019

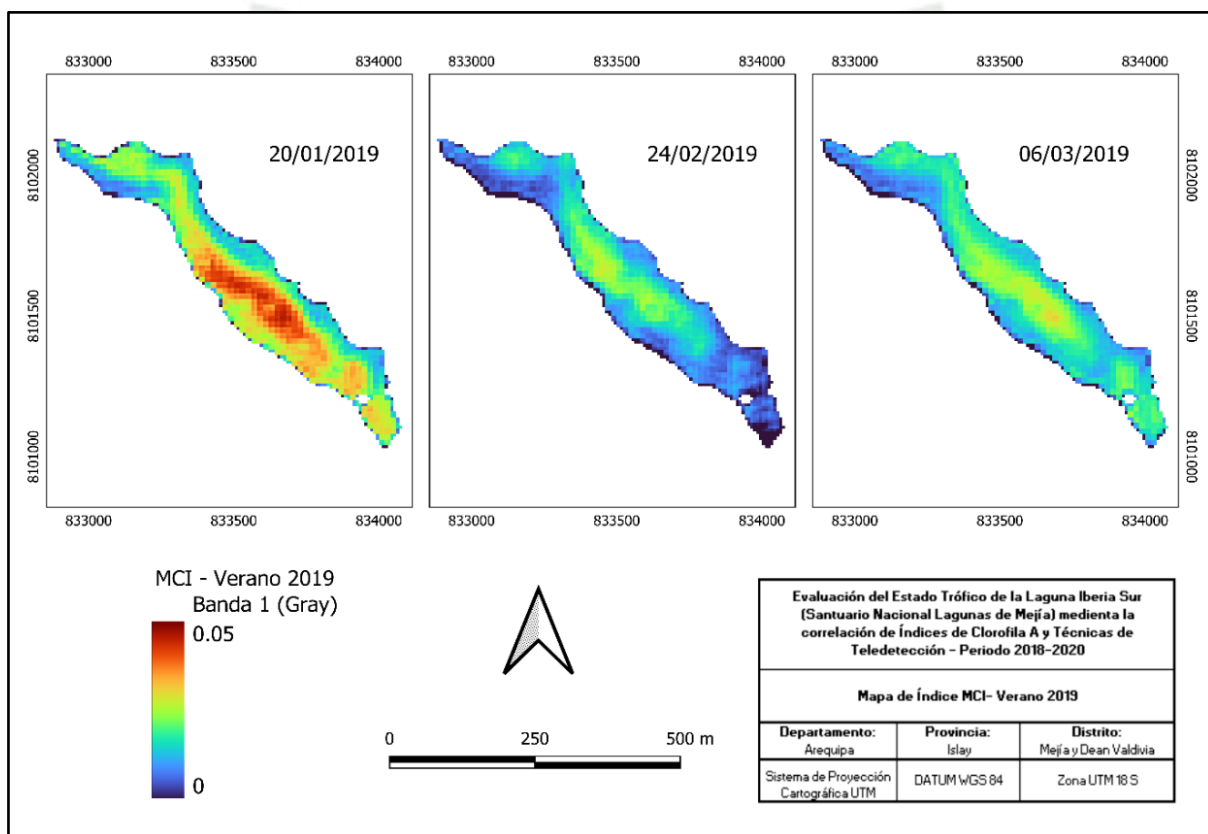


Figura. Mapas de índice MCI – Otoño 2019

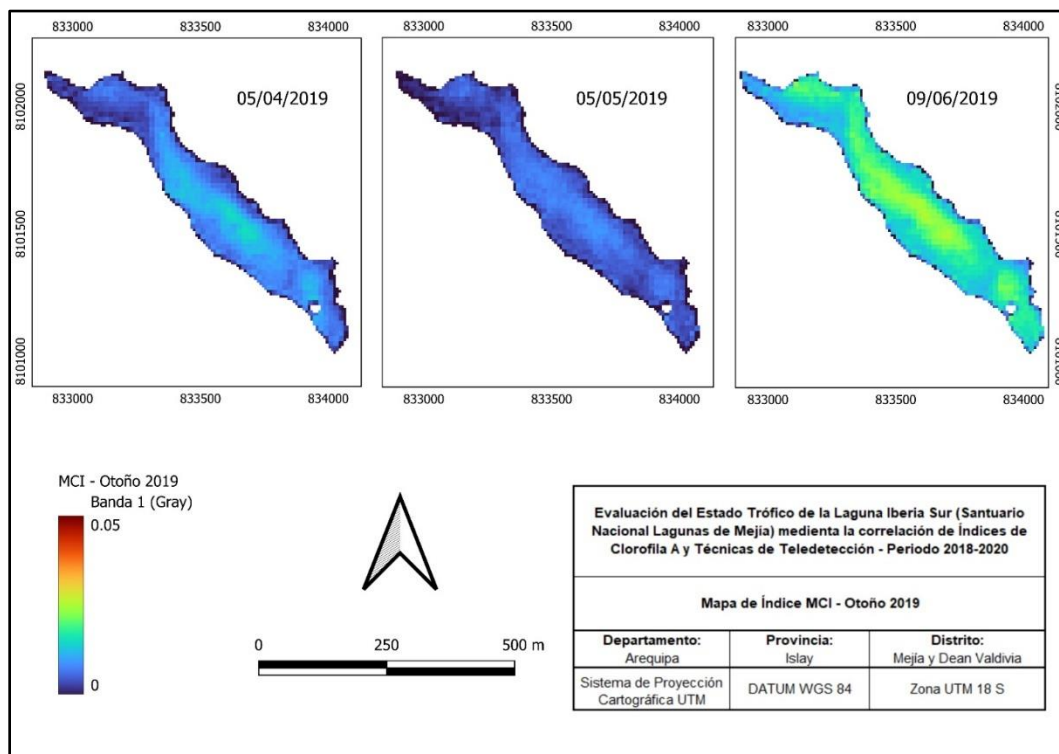


Figura. Mapas de índice MCI – Invierno 2019

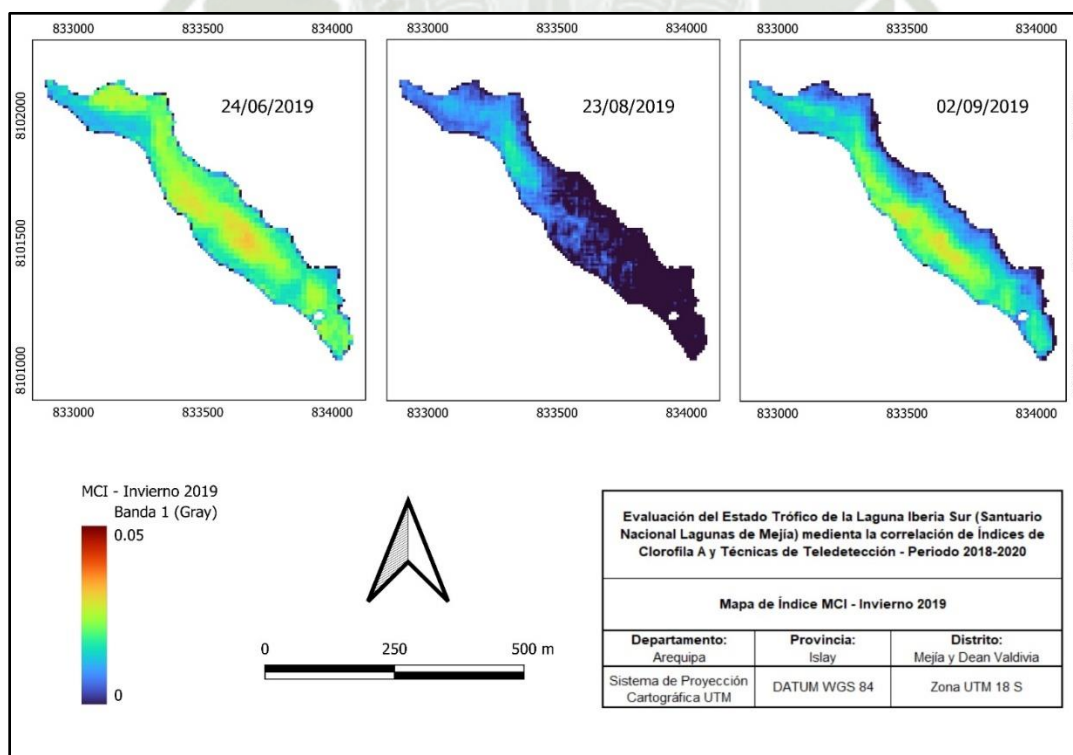
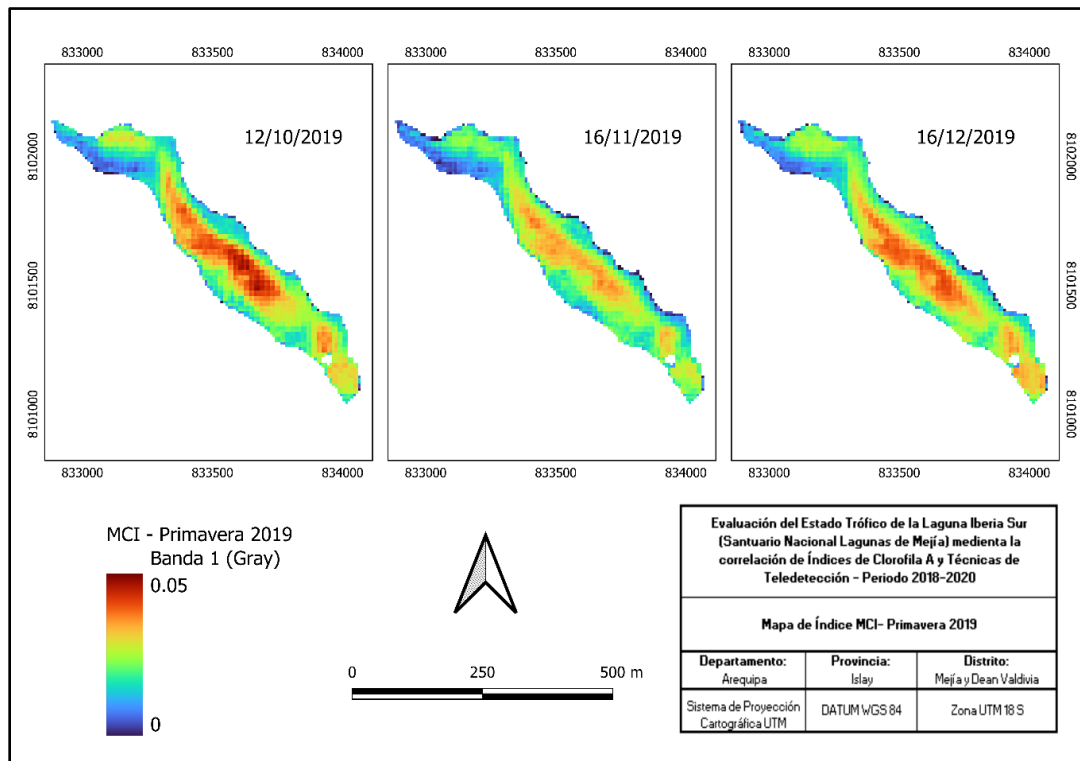


Figura. Mapas de índice MCI – Primavera 2019



En las Figuras se muestran los mapas de índices de MCI para las estaciones del año 2019, verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente. Se observa que los meses de abril, mayo y agosto poseen los rangos de valores más bajos con 0.016, 0.010 y 0.019, respectivamente; mientras que los meses con mayor MCI fueron octubre diciembre y enero, donde los rangos de valores de MCI alcanzaron máximos de 0.049, 0.042 y 0.046, respectivamente.

Figura. Mapas de índice MCI – Verano 2020

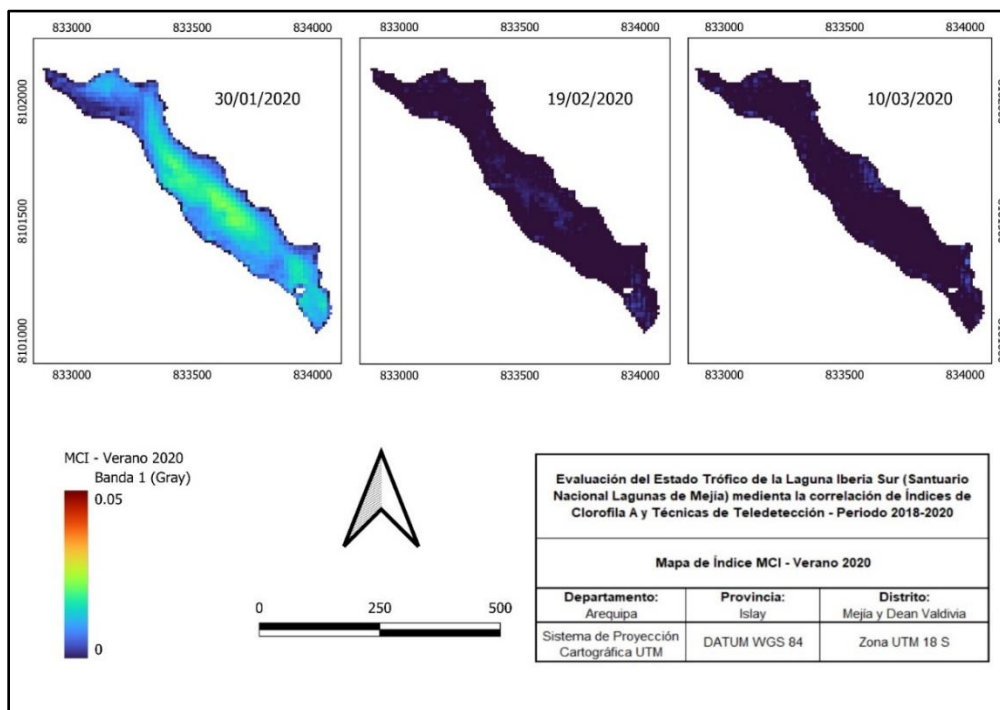


Figura. Mapas de índice MCI – Otoño 2020

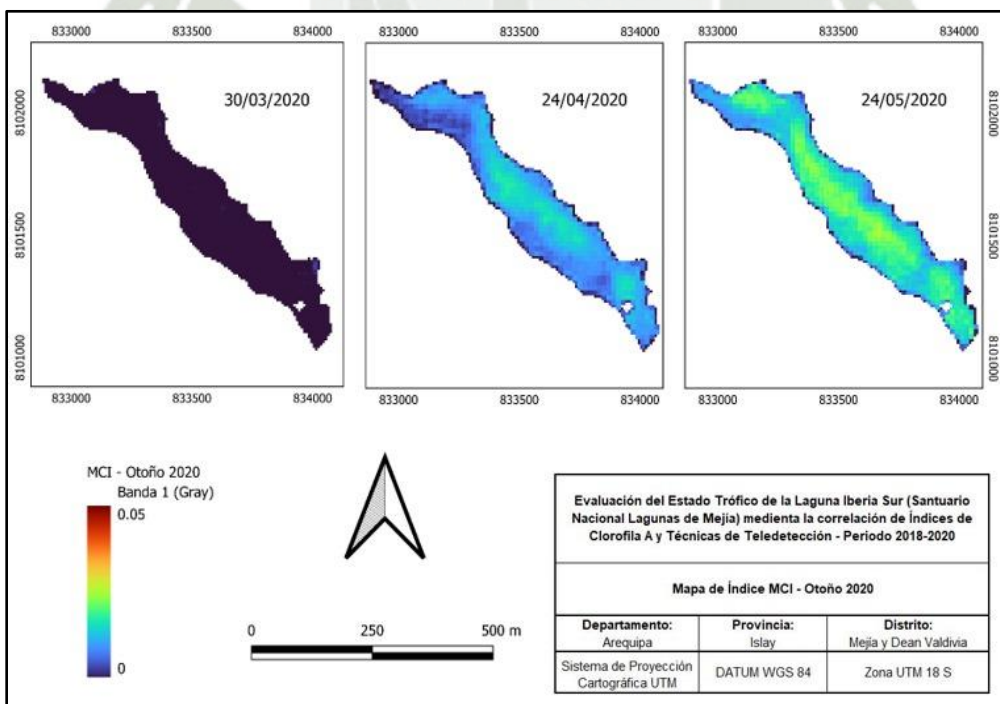


Figura. Mapas de índice MCI – Invierno 2020

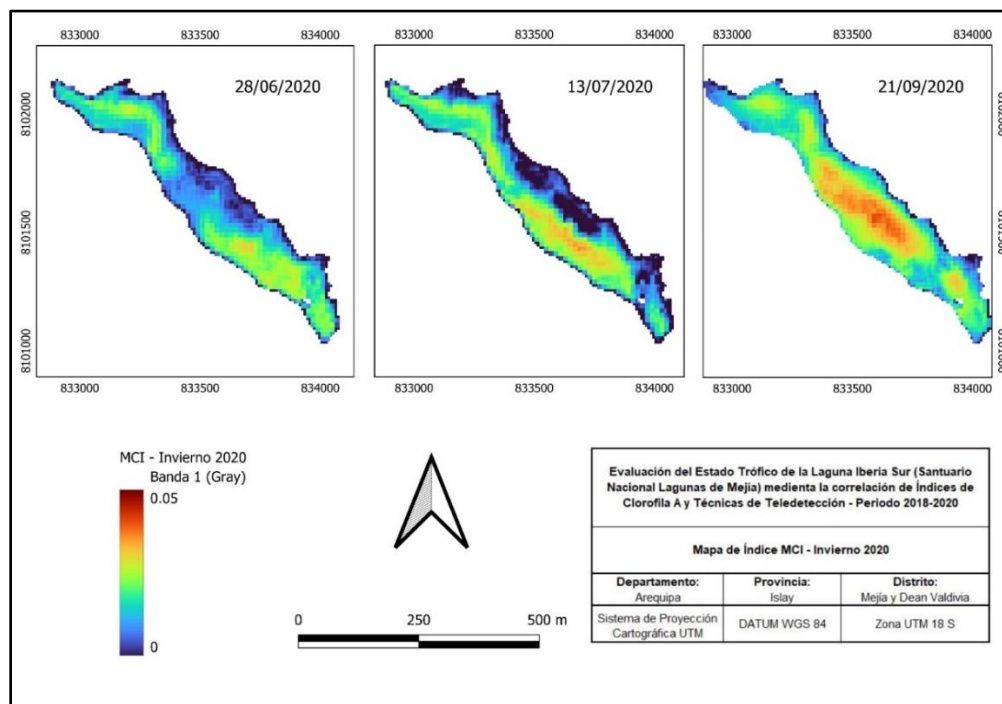
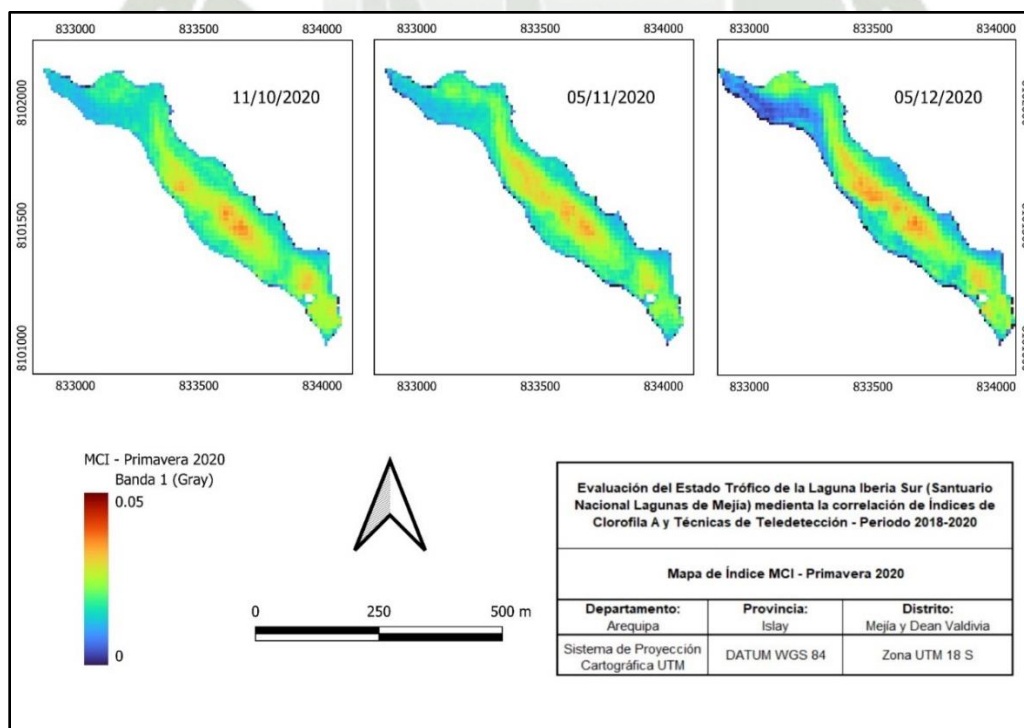


Figura. Mapas de índice MCI – Primavera 2020



En las Figuras se muestran los mapas de índices de MCI para las estaciones del año 2020, verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente. Se observa que los meses de febrero y marzo poseen los valores más bajos con 0.0044, 0.0077 y 0.0033, mientras que los meses con mayor MCI fueron septiembre y diciembre, donde los rangos de valores de MCI alcanzaron máximos de 0.042 y 0.038, respectivamente.

Figura. Mapas de índice MPH – Verano 2018

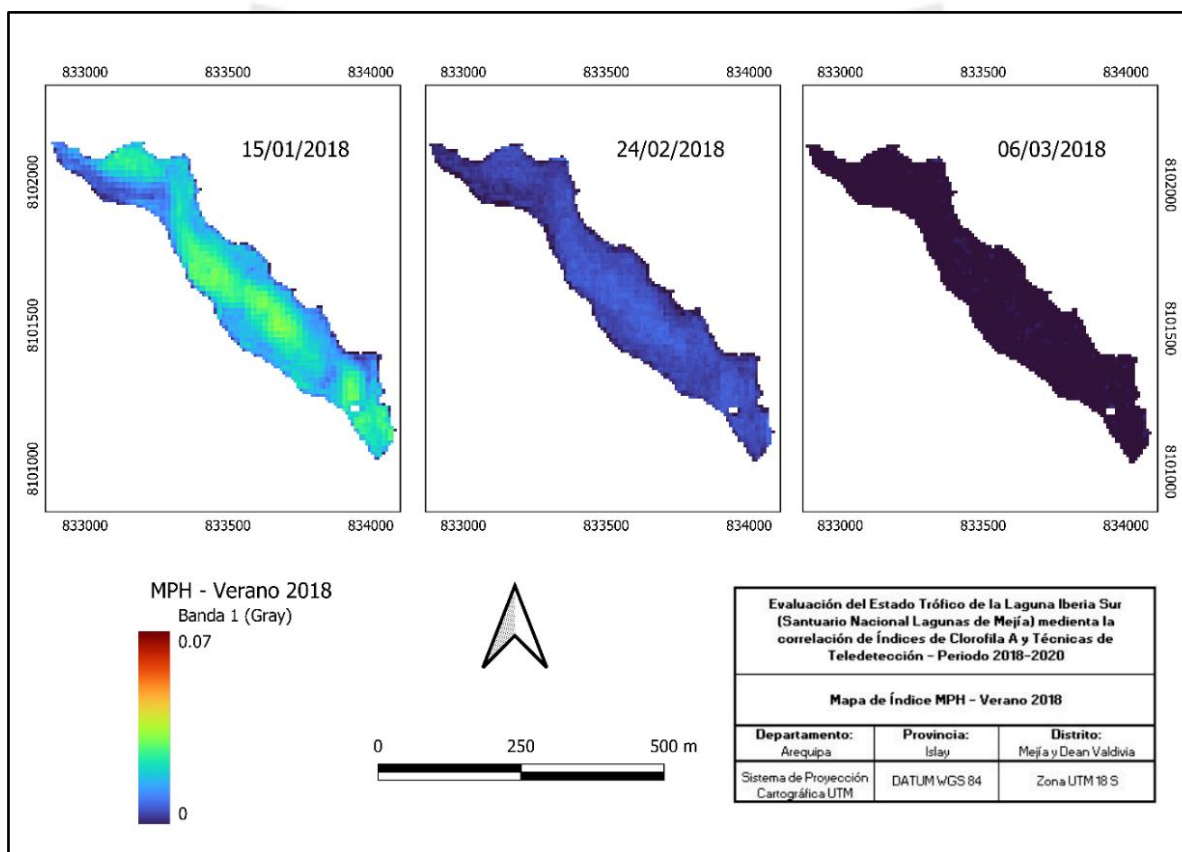


Figura. Mapas de índice MPH – Otoño 2018

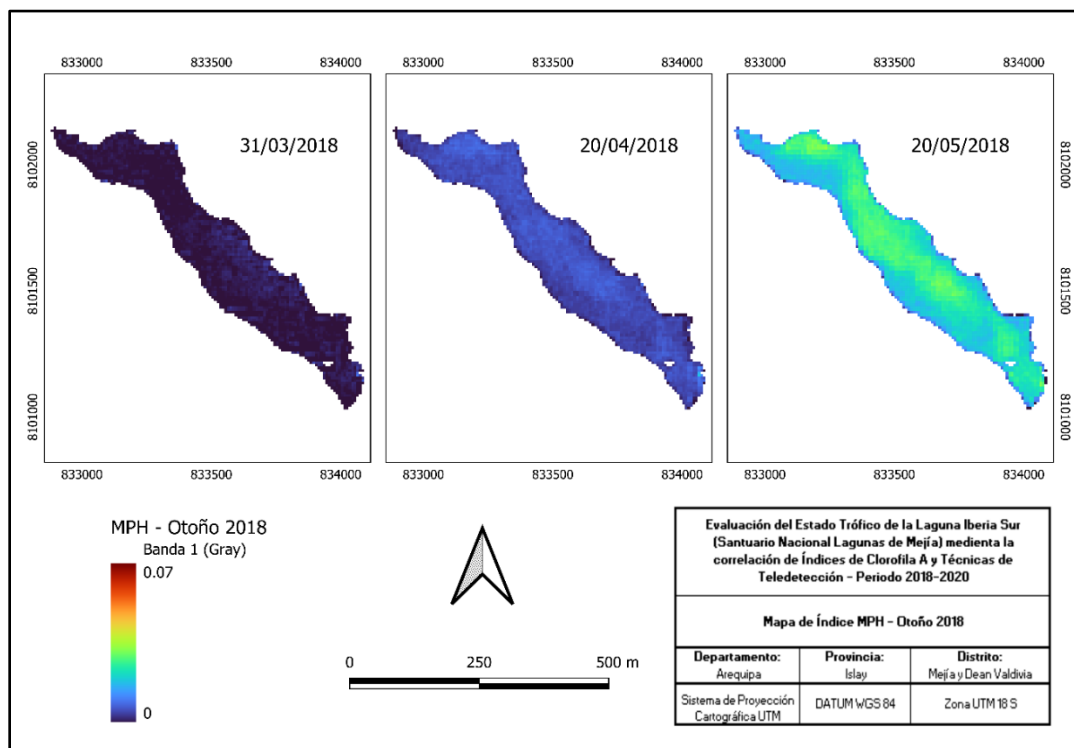


Figura. Mapas de índice MPH – Invierno 2018

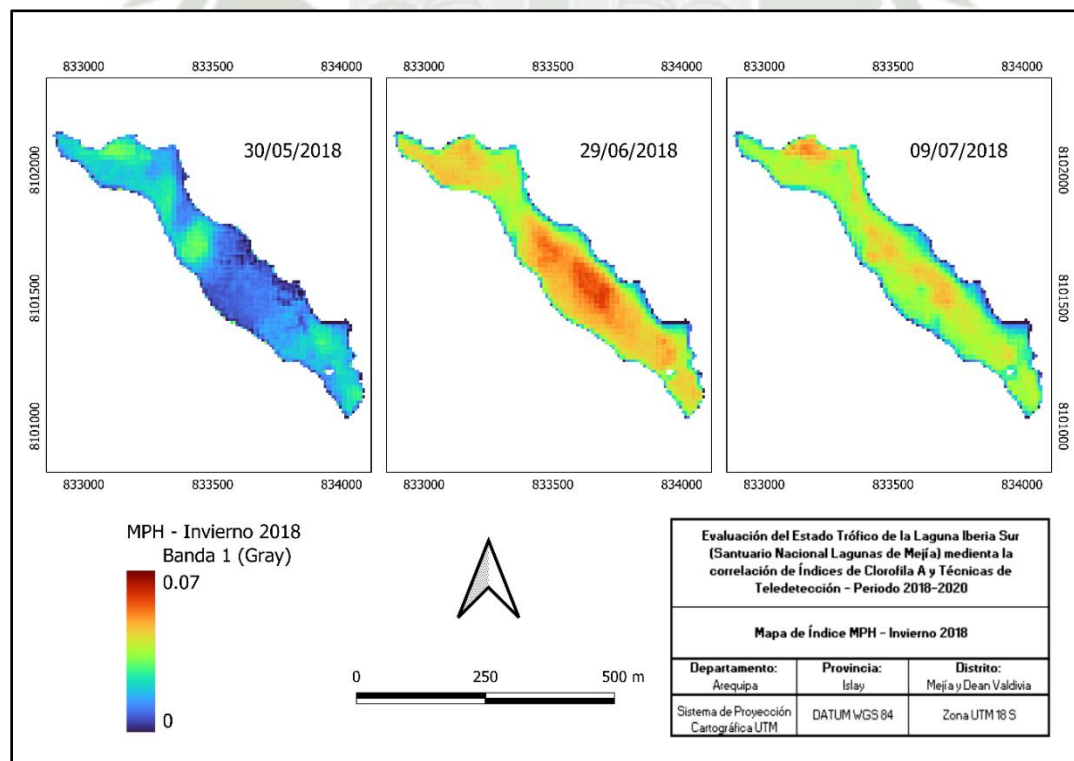
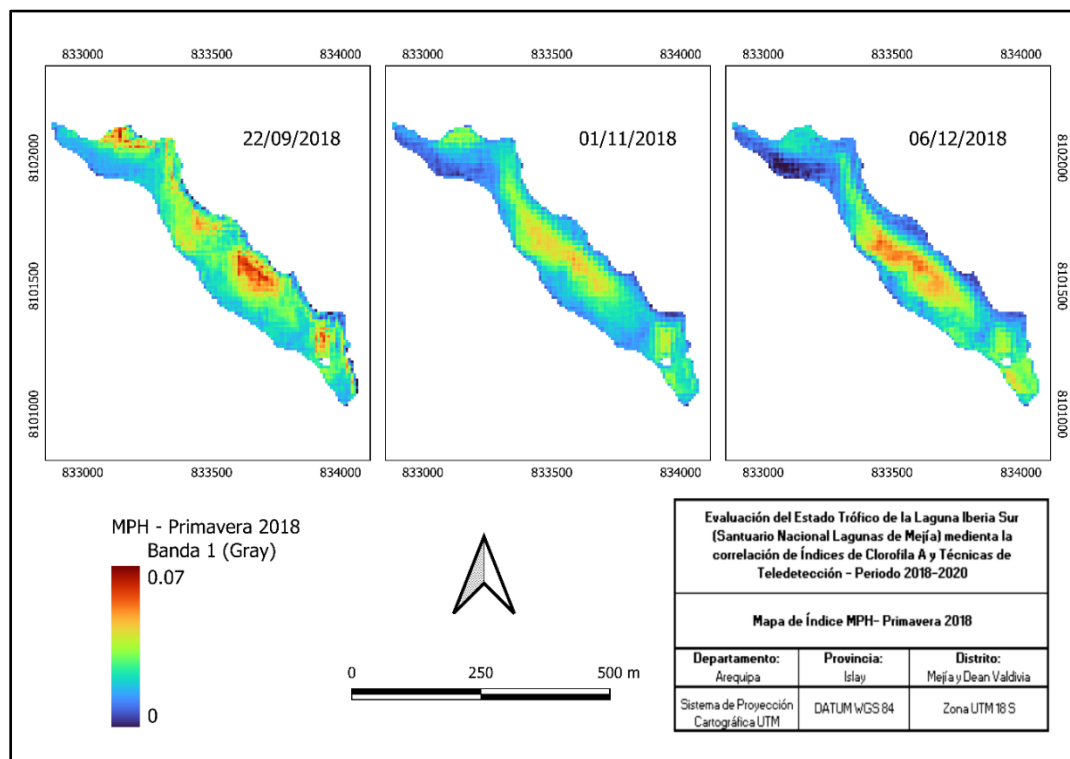


Figura. Mapas de índice MPH – Primavera 2018



En las Figuras 13, 14, 15 y 16 se muestran los mapas de índices de MPH para las estaciones del año 2018, verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente. Se observa que los meses de febrero, marzo y abril poseen los valores más bajos con 0.011, 0.003, 0.010 y 0.018, mientras que los meses con mayor MPH fueron junio y septiembre, donde los rangos de valores de MPH alcanzaron máximos de 0.060 y 0.066, respectivamente.

Figura. Mapas de índice MPH – Verano 2019

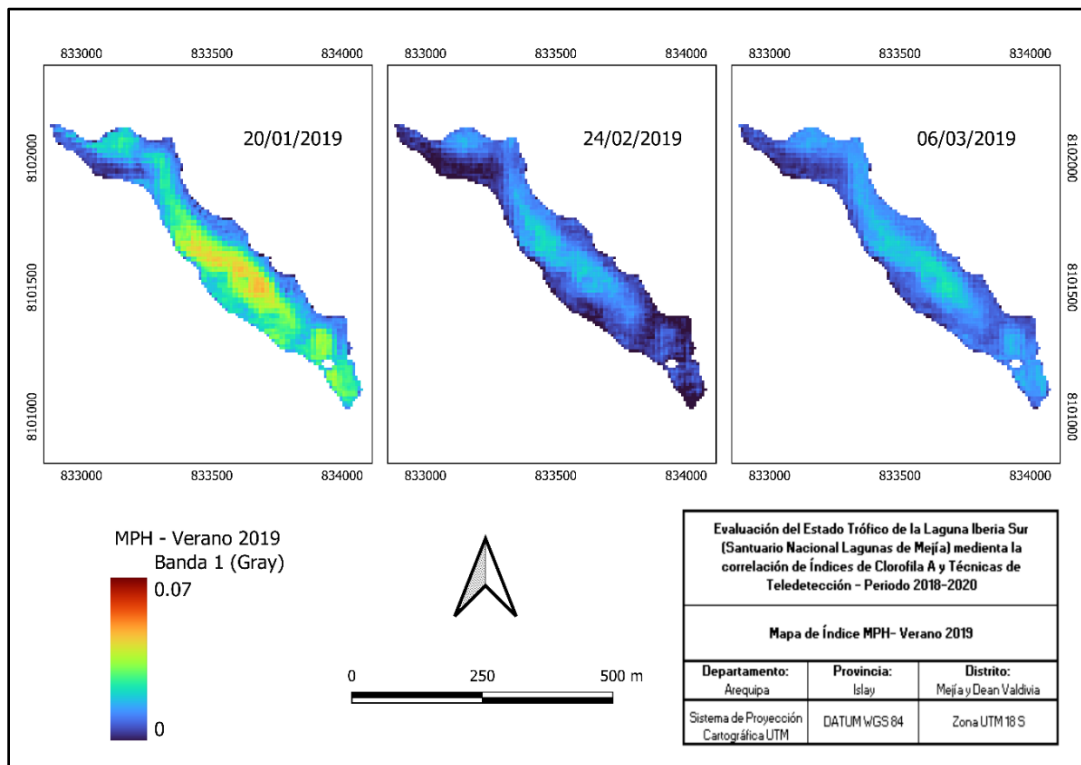


Figura. Mapas de índice MPH – Otoño 2019

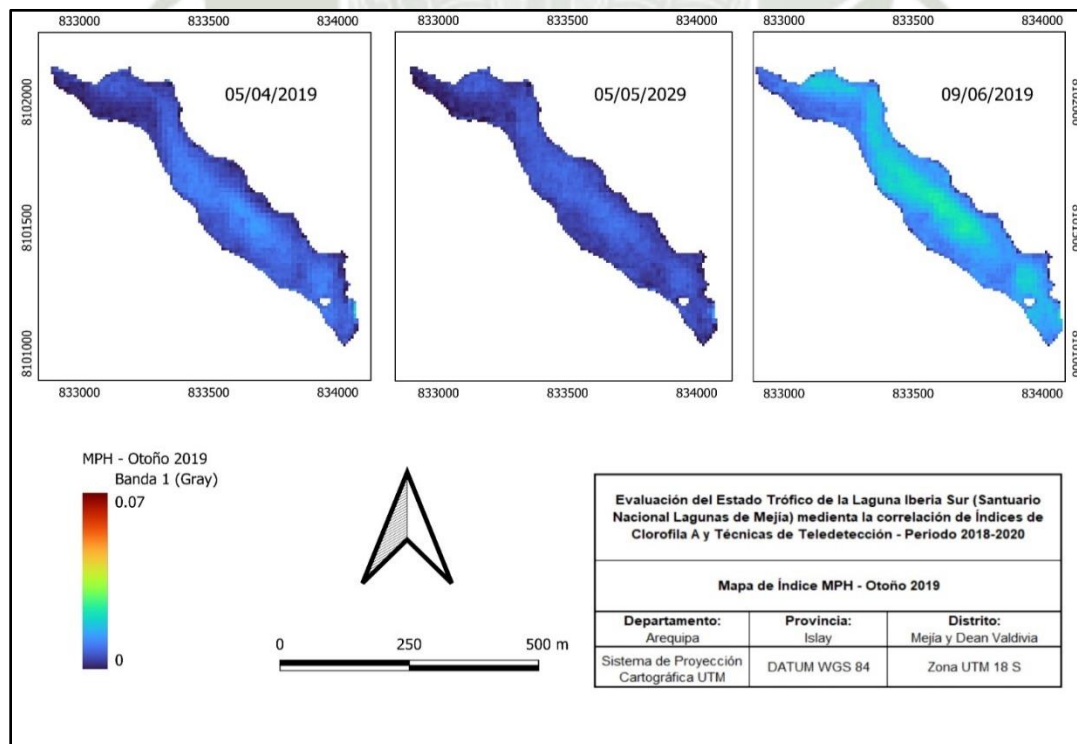


Figura. Mapas de índice MPH – Invierno 2019

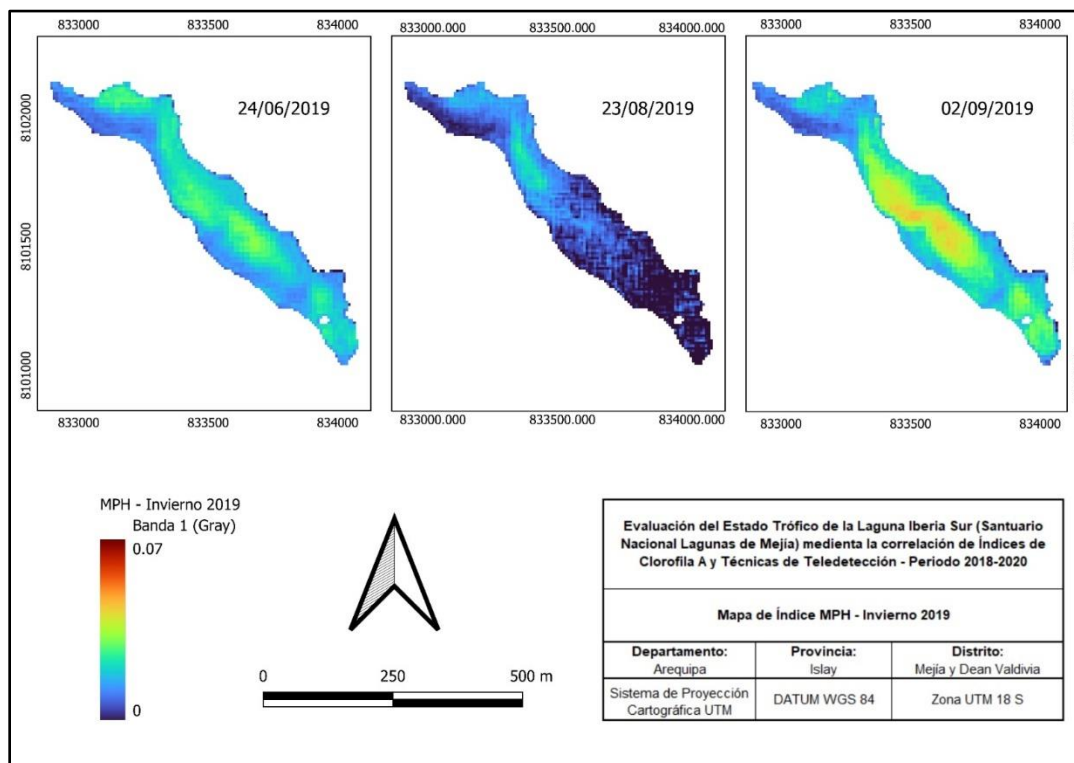
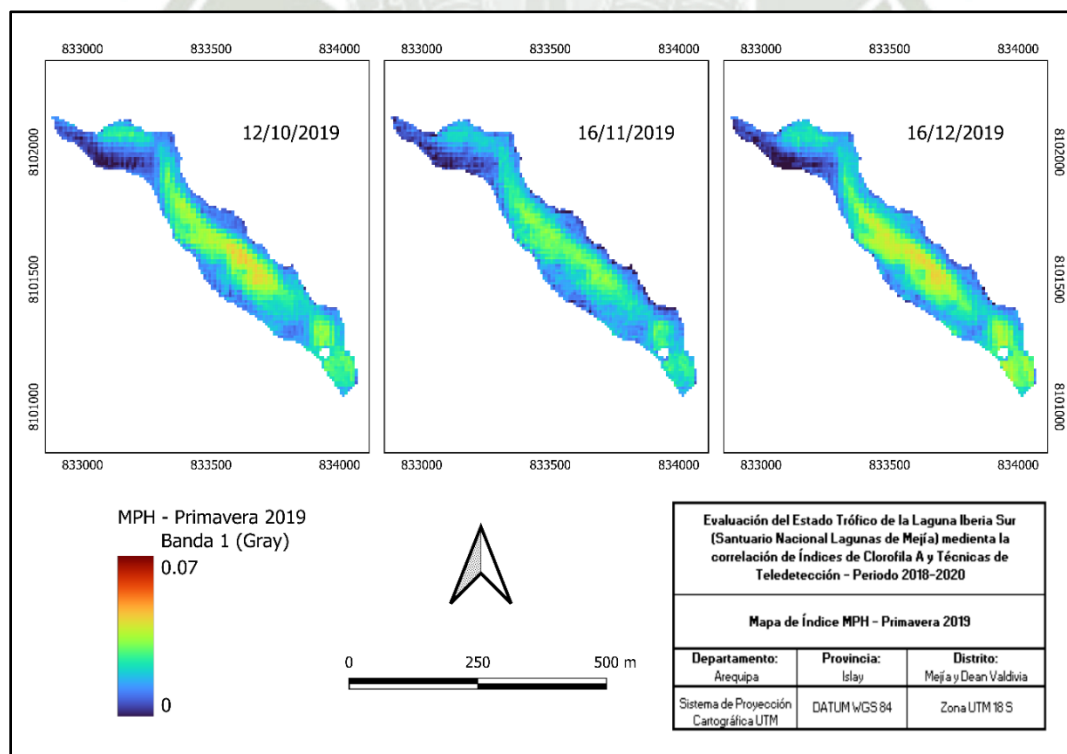


Figura. Mapas de índice MPH – Primavera 2019



En las Figuras 17 18 19 y 20 se muestran los mapas de índices de MPH para las estaciones del año 2019, verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente. Se observa que los meses de febrero, marzo, abril y mayo poseen los valores más bajos con 0.023, 0.025, 0.026 y 0.017, mientras que los meses con mayor MPH fueron enero, septiembre, octubre y diciembre, donde los rangos de valores de MPH alcanzaron máximos de 0.048, 0.047, 0.046 y 0.045, respectivamente.

Figura. Mapas de índice MPH – Verano 2020

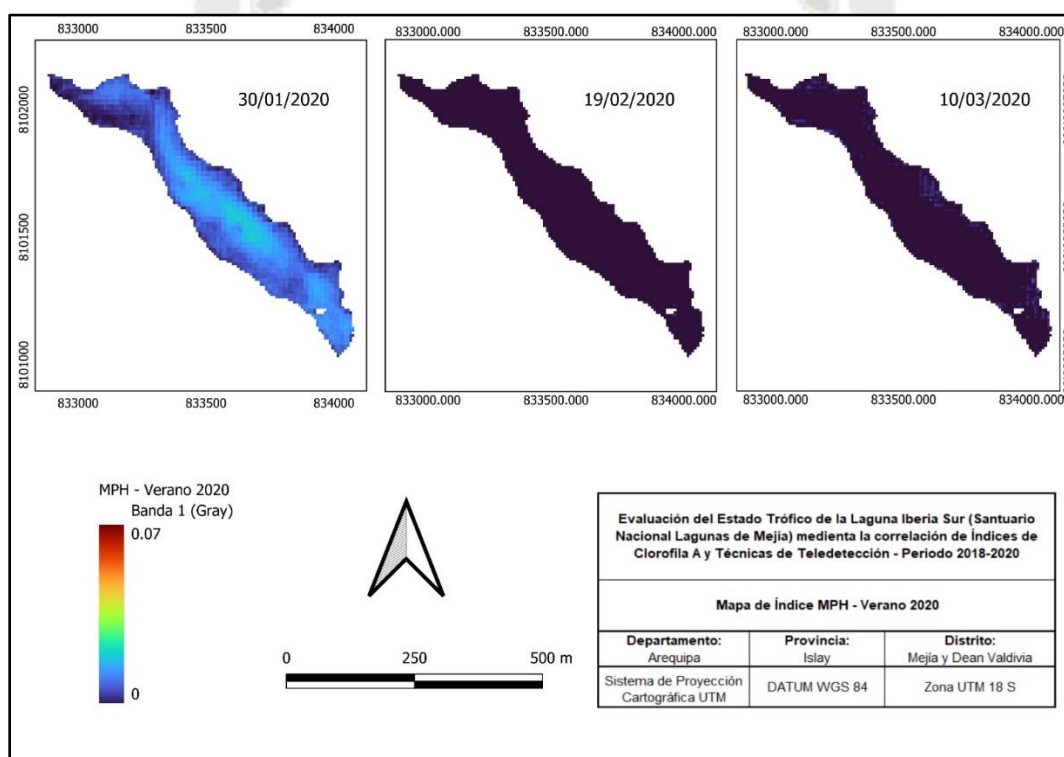


Figura. Mapas de índice MPH – Otoño 2020

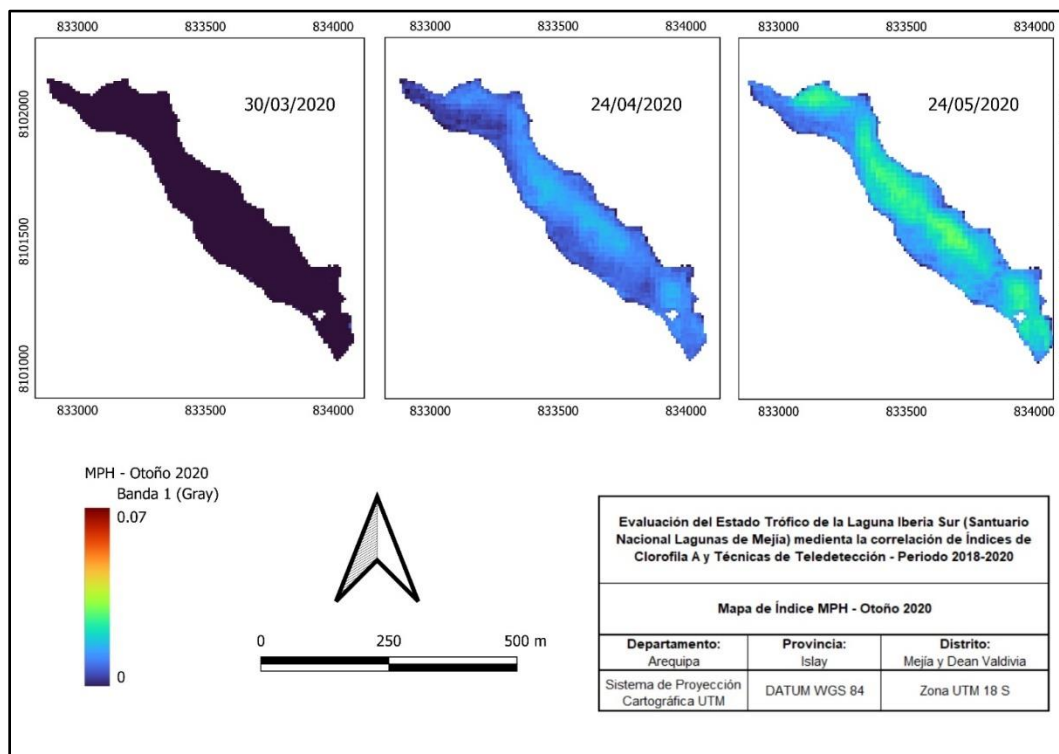


Figura. Mapas de índice MPH – Invierno 2020

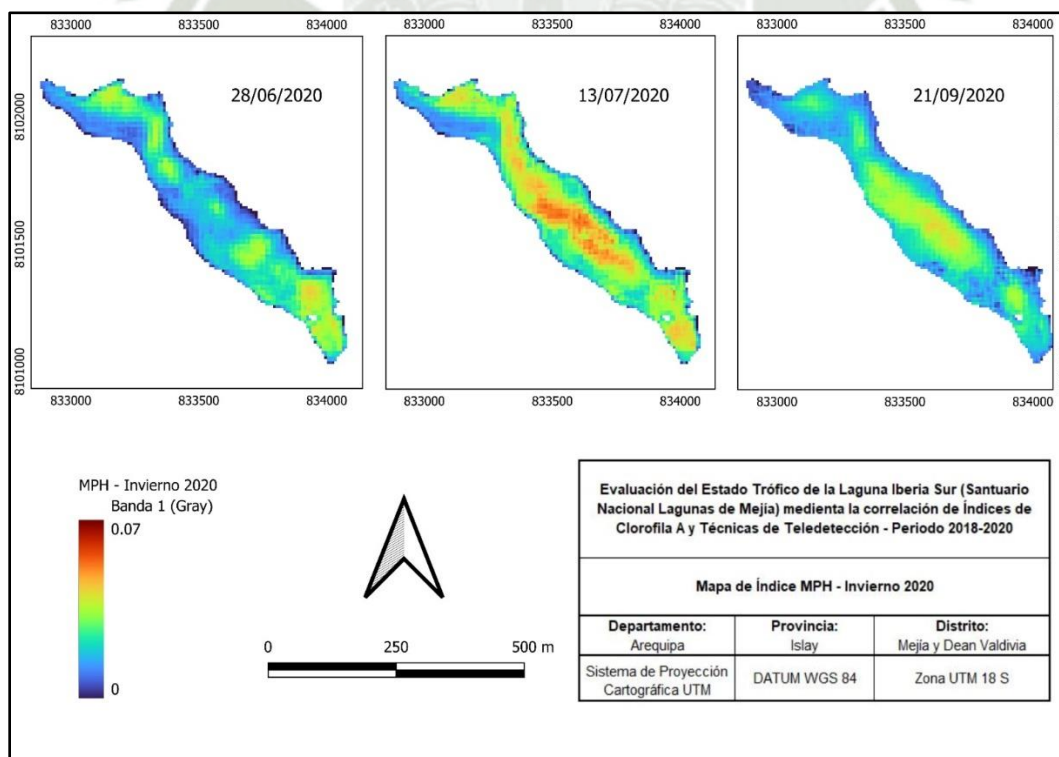
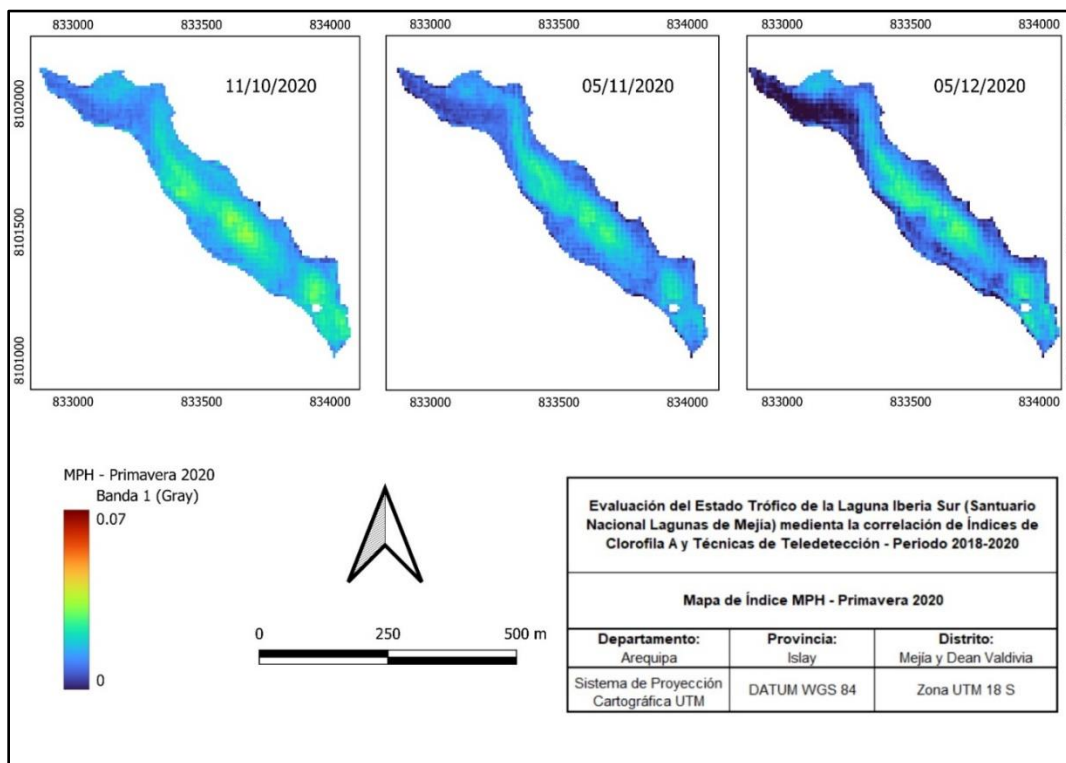


Figura. Mapas de índice MPH – Primavera 2020

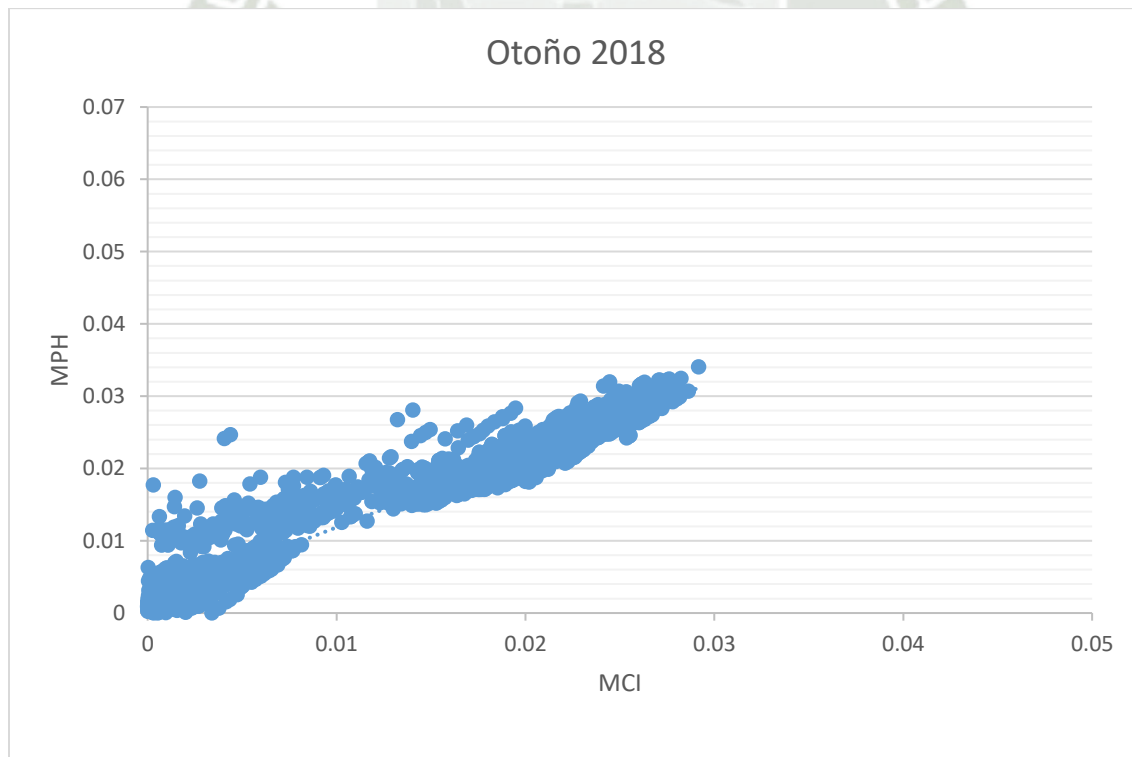
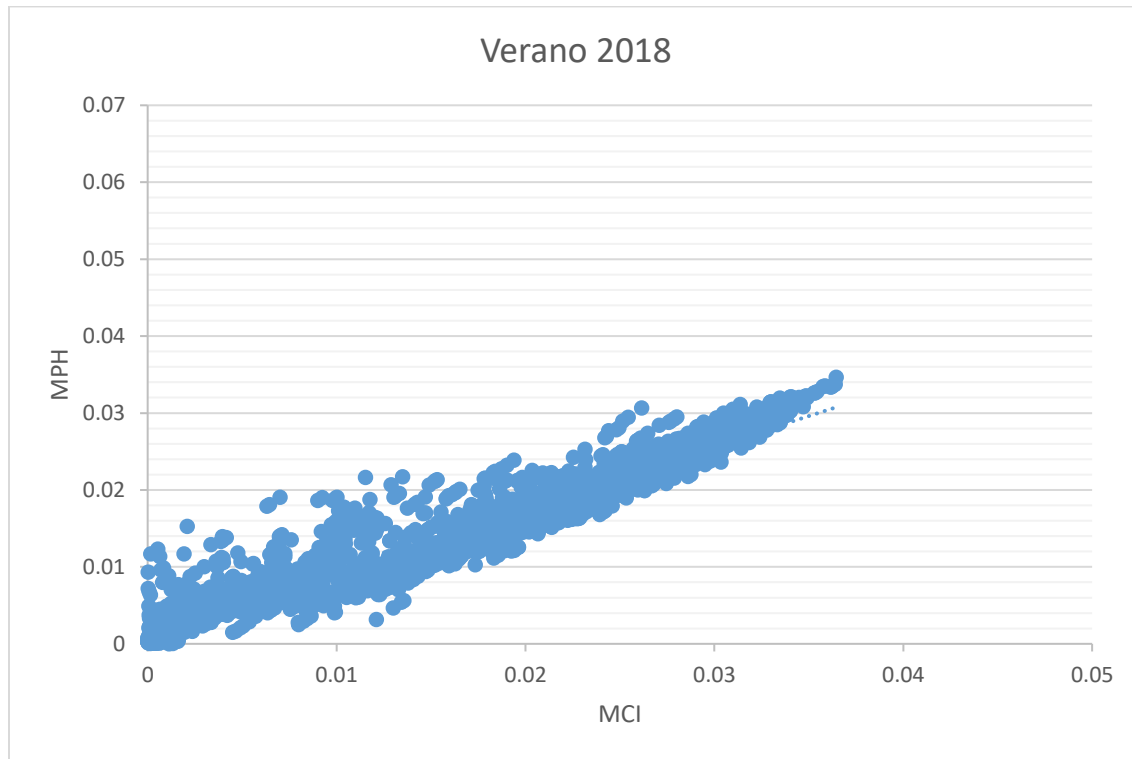


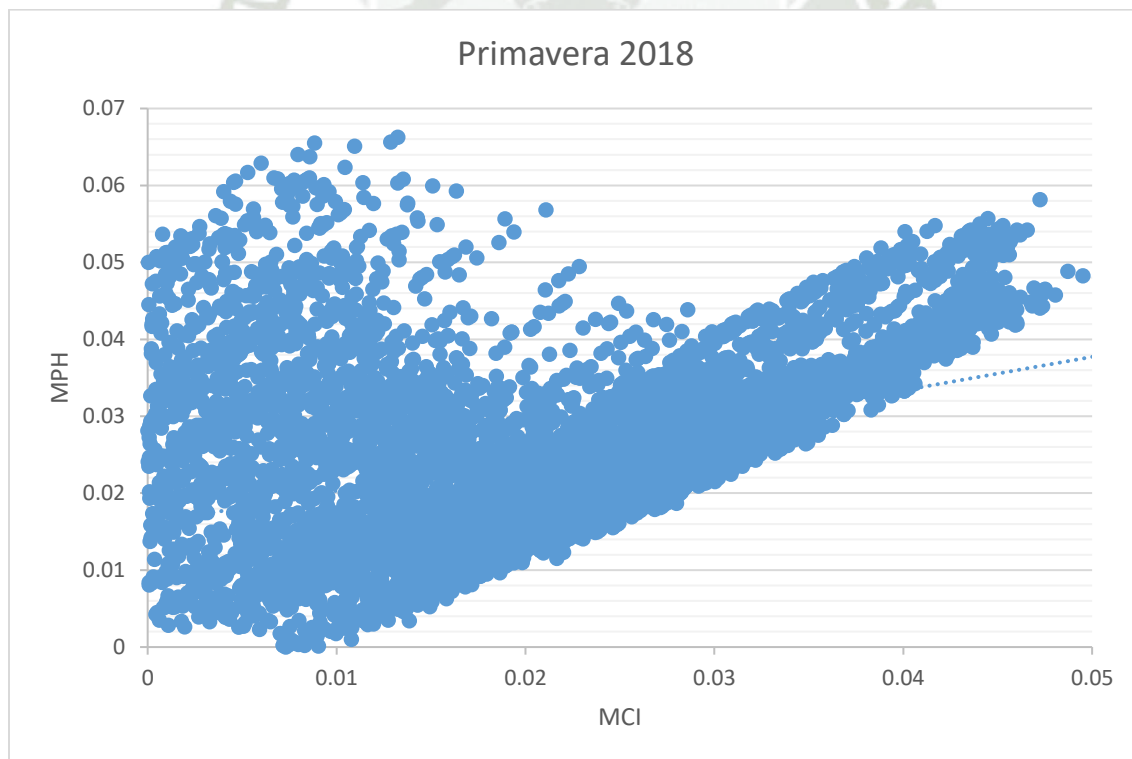
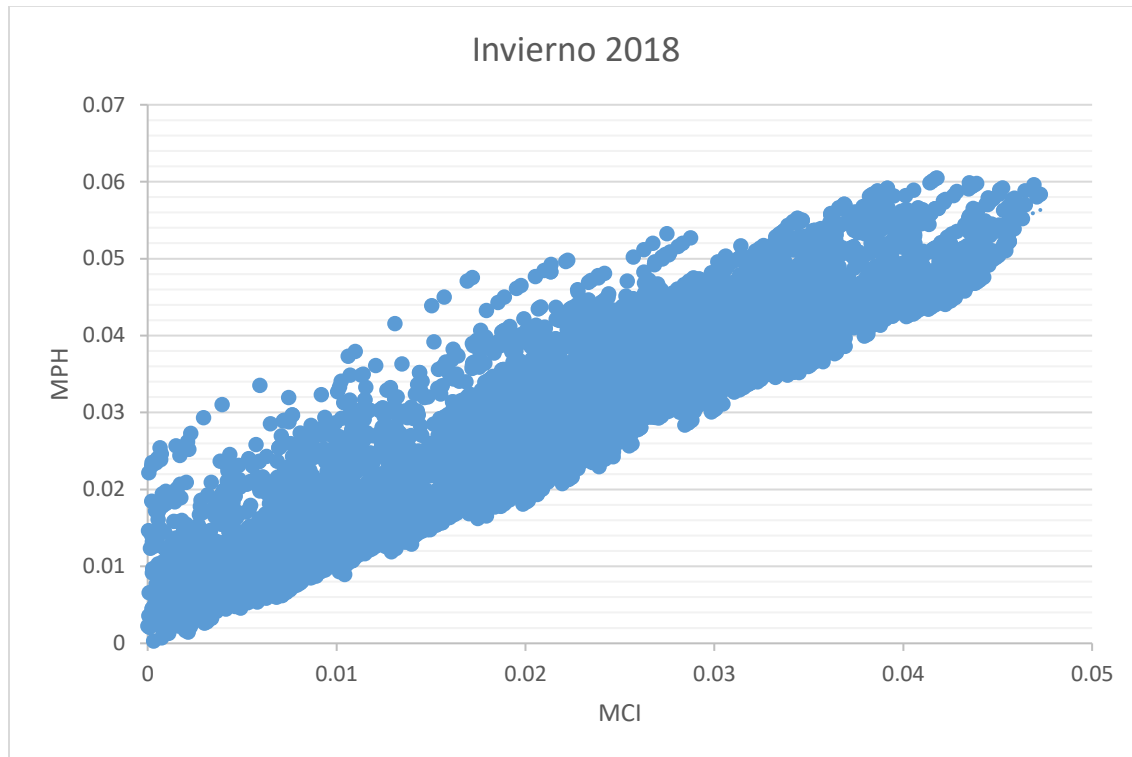
En las Figuras 21 22 23 y 24 se muestran los mapas de índices de MPH para las estaciones del año 2020, verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente. Se observa que los meses de febrero y marzo poseen los valores más bajos con 0.0029, 0.0099 y 0.0060, mientras que los meses con mayor MPH fueron junio, julio y septiembre, donde los rangos de valores de MCI alcanzaron máximos de 0.044 por igual.

ANEXO N°4 – Gráficos de dispersión de índices MCI – MPH

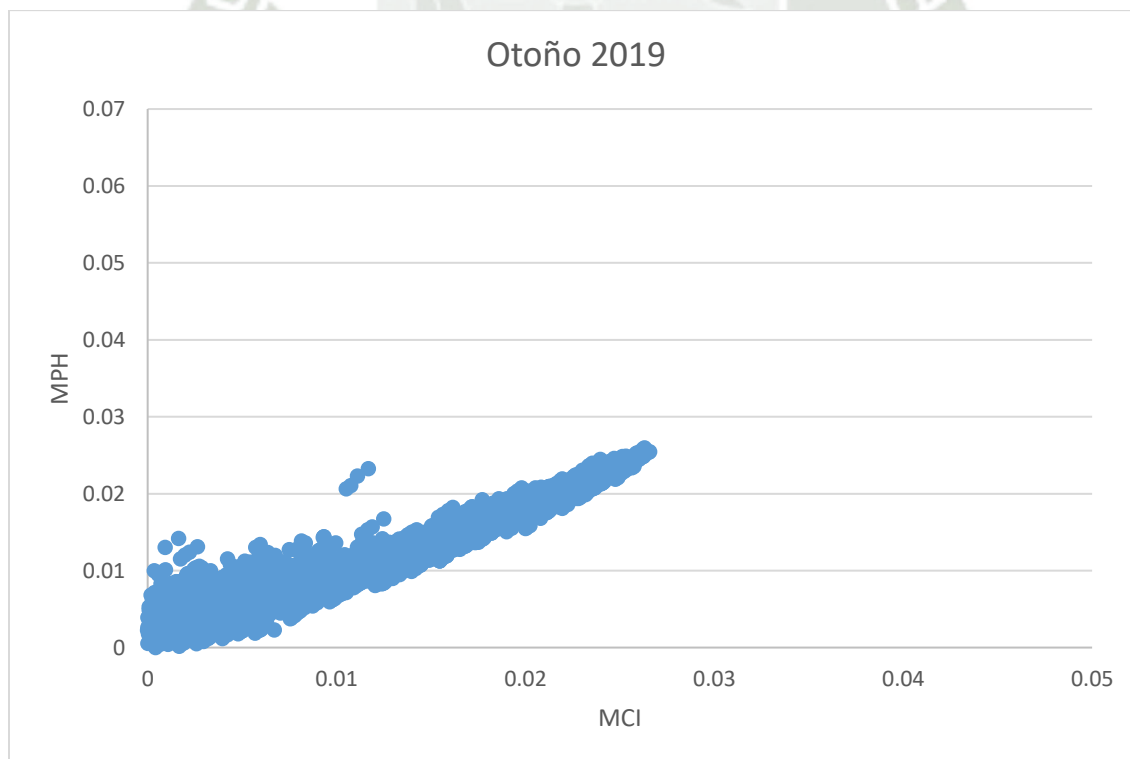
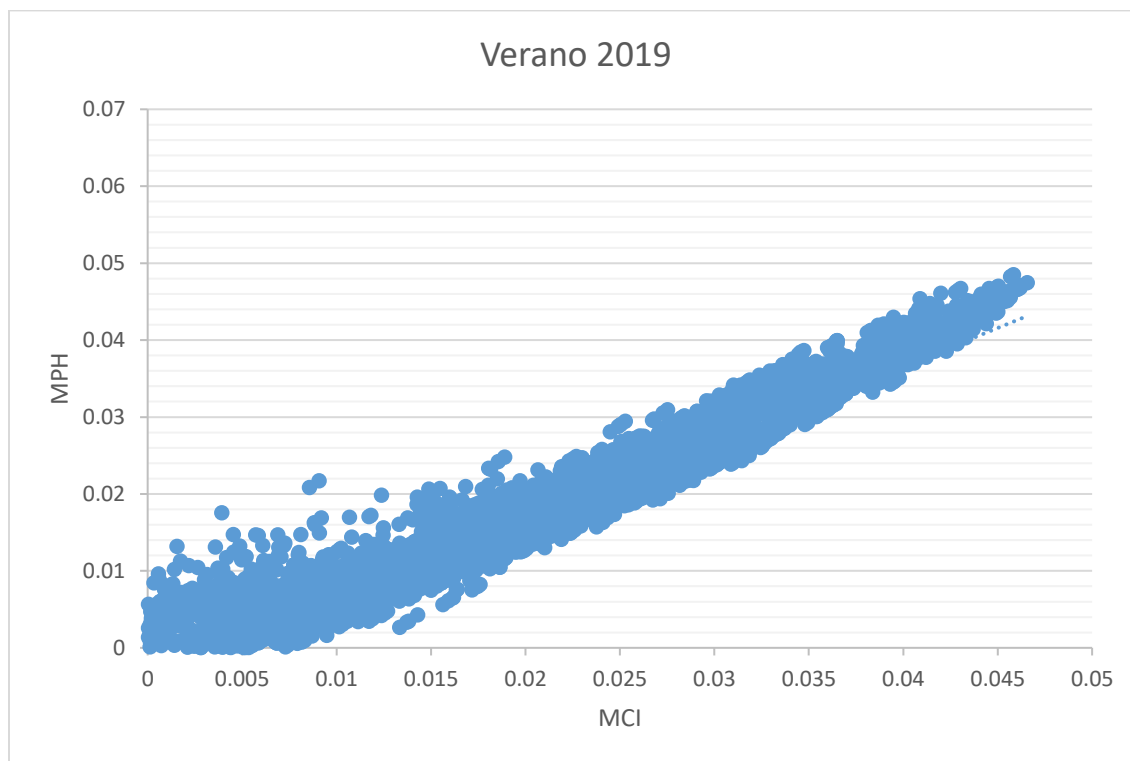


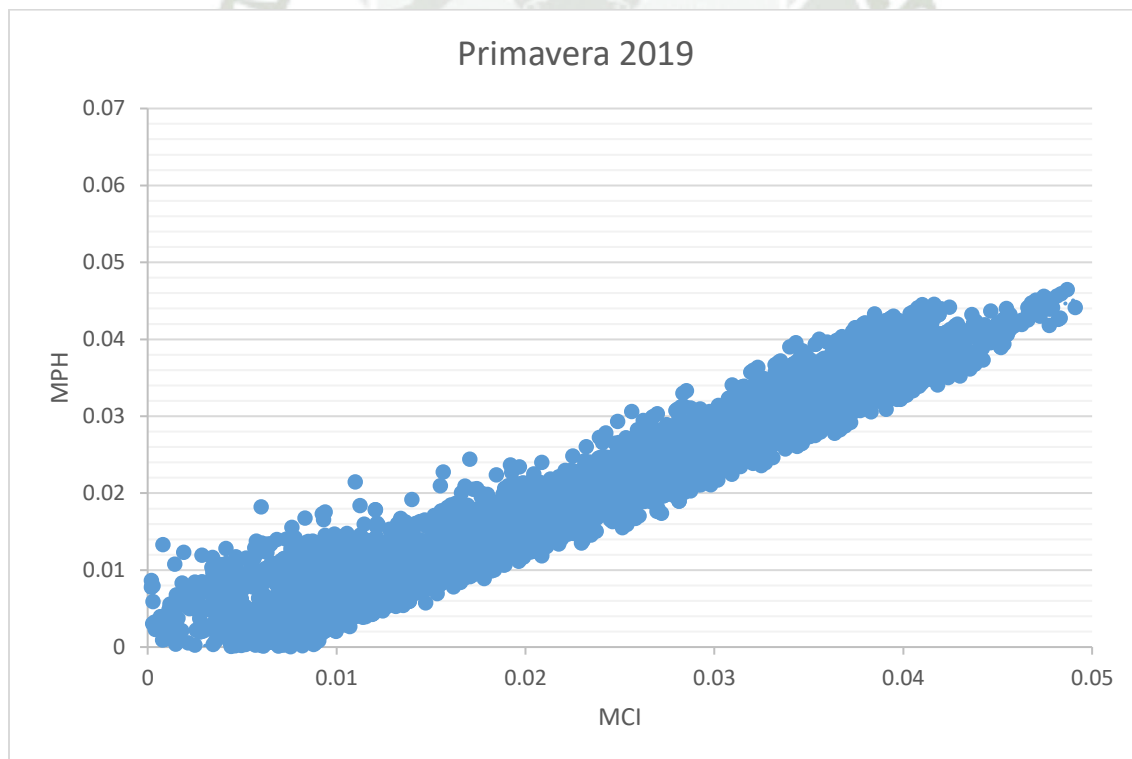
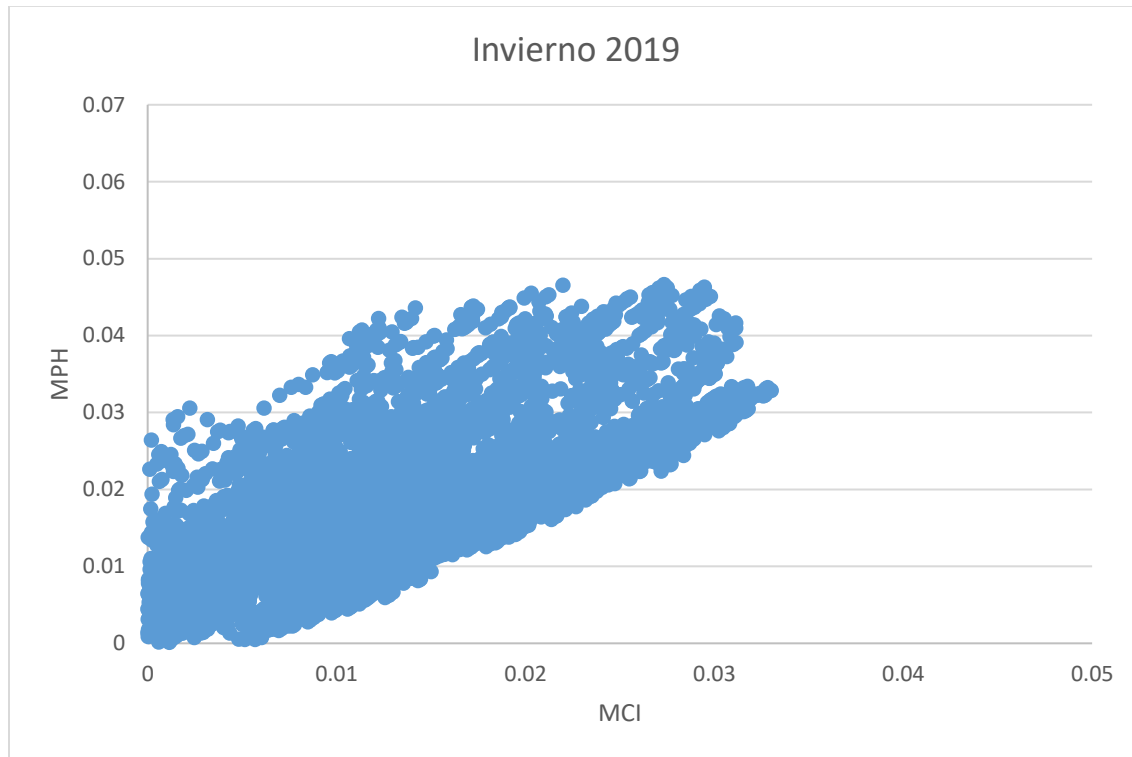
Gráficos de dispersión de MCI - MPH para el año 2018



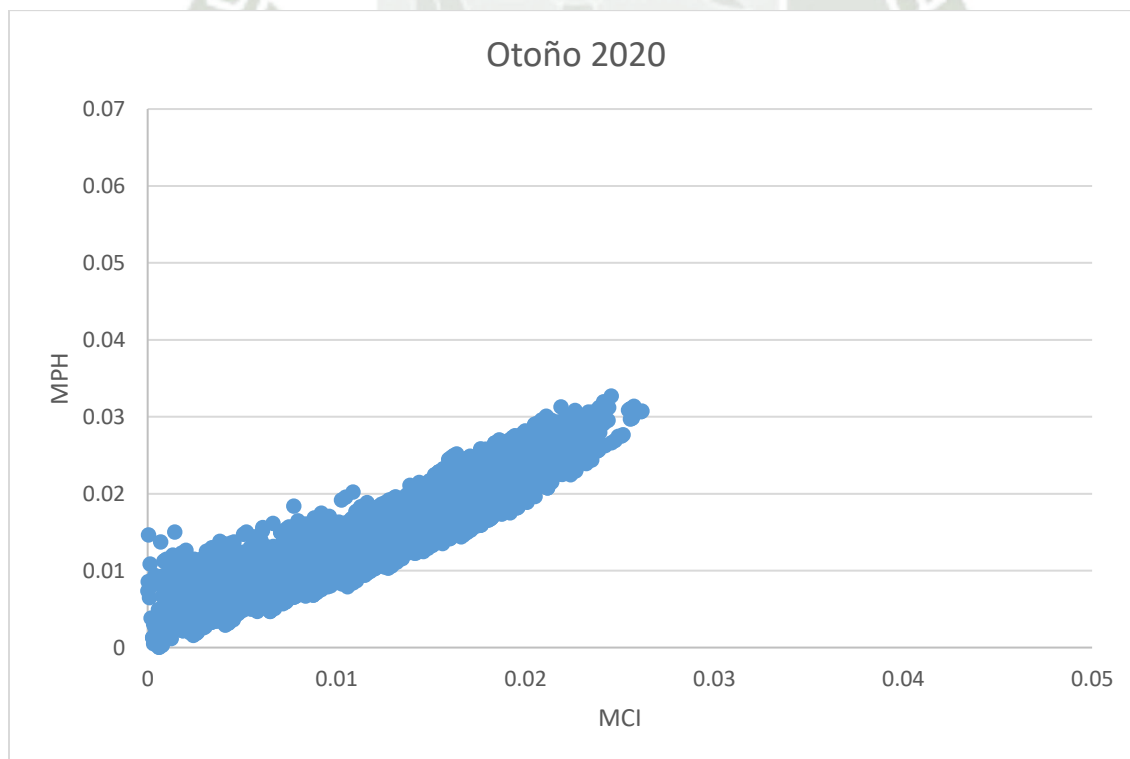
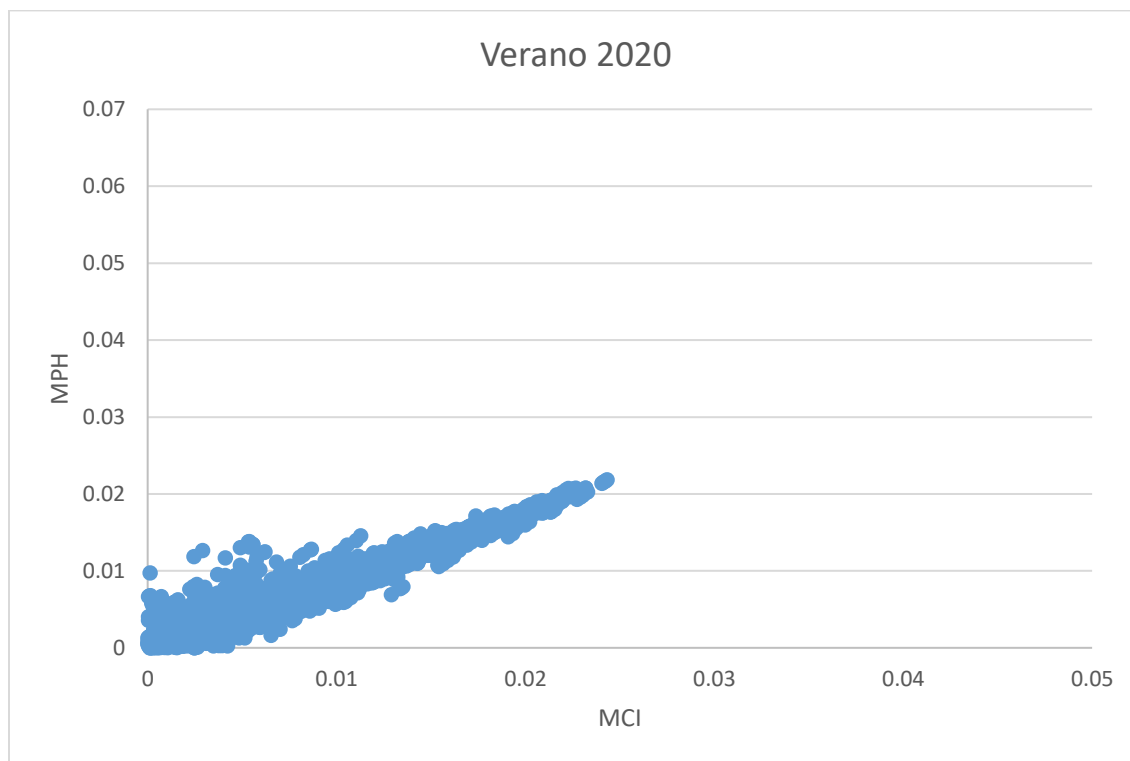


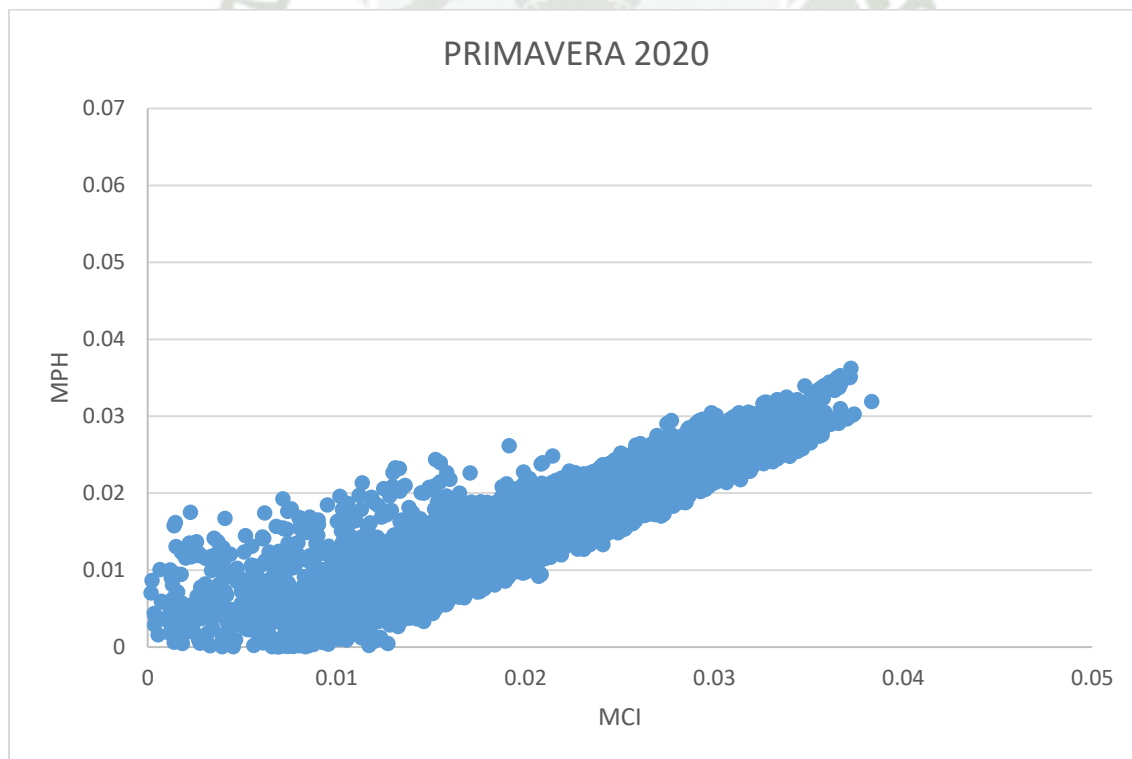
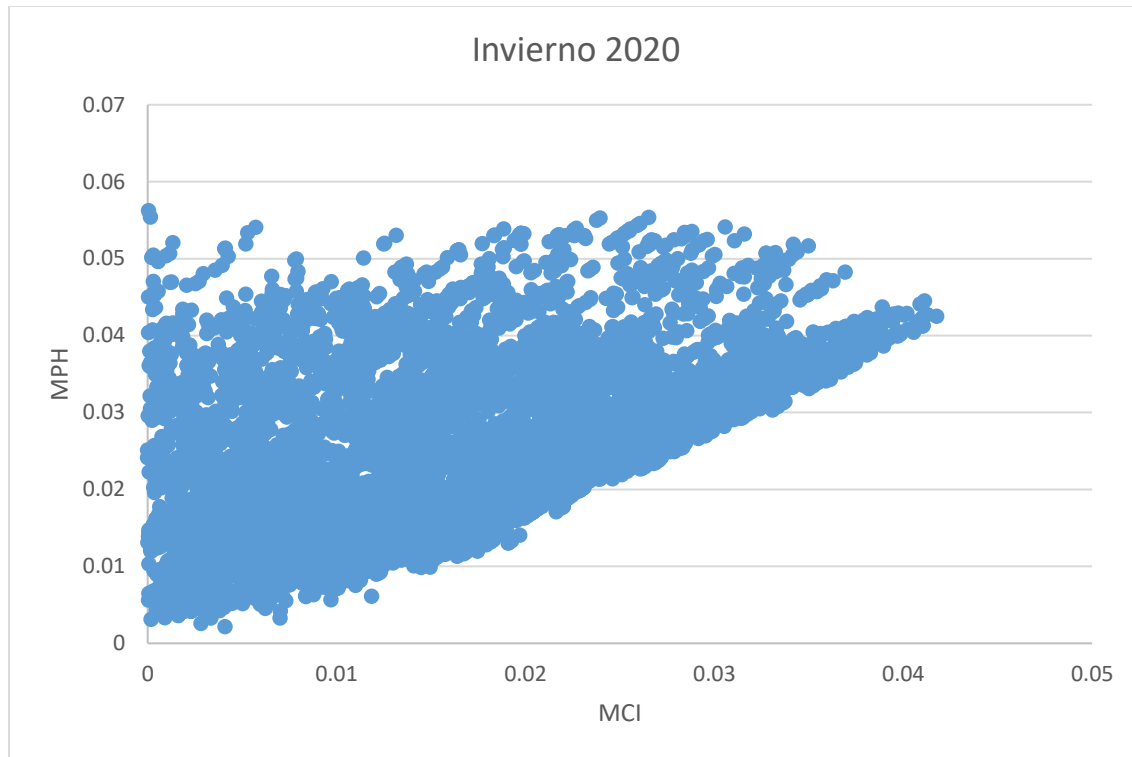
Gráficos de dispersión de MCI - MPH para el año 2019





Gráficos de dispersión de MCI - MPH para el año 2020





ANEXO N°5 – Mapas de concentración de Clorofila, según las ecuaciones 2 y 4.

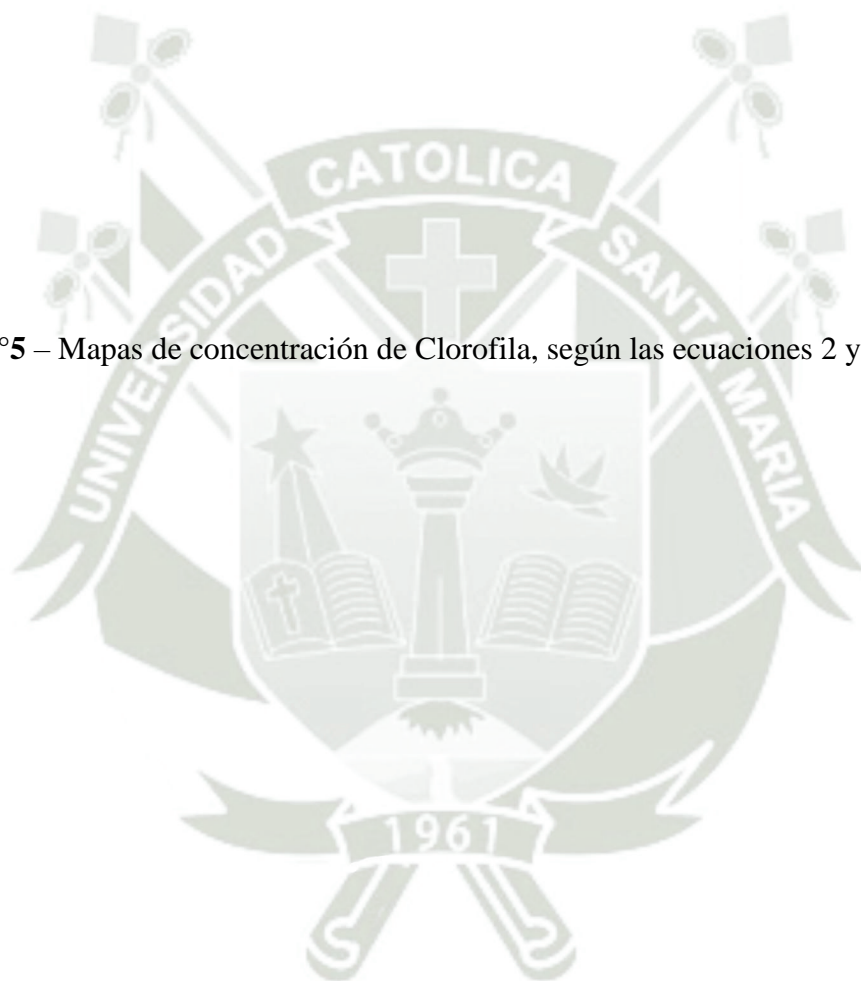


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para verano (15/01/2018)

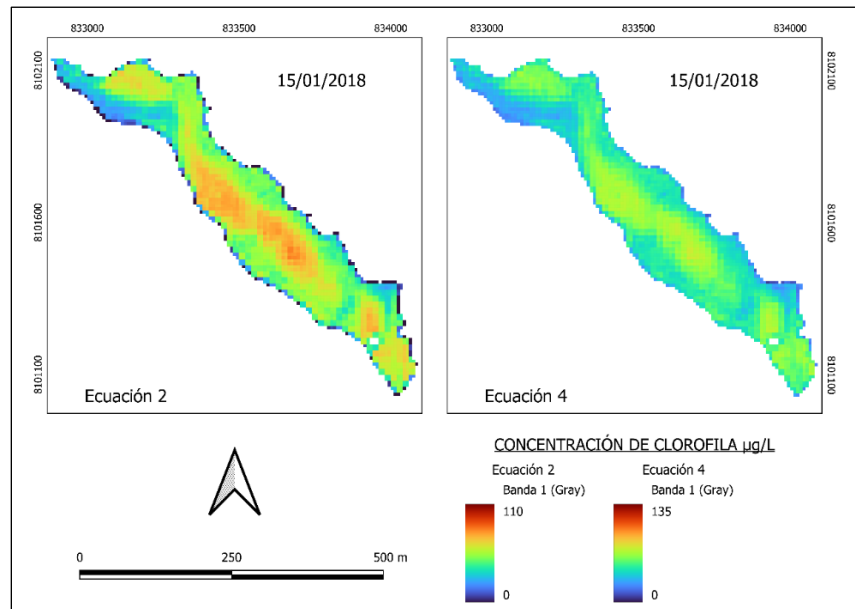


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para verano (24/02/2018)

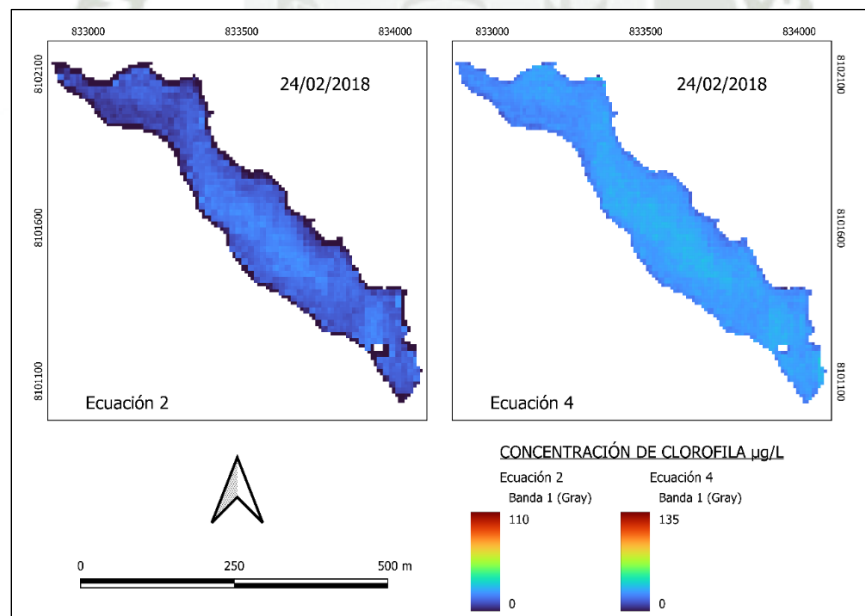


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para verano (06/03/2018)

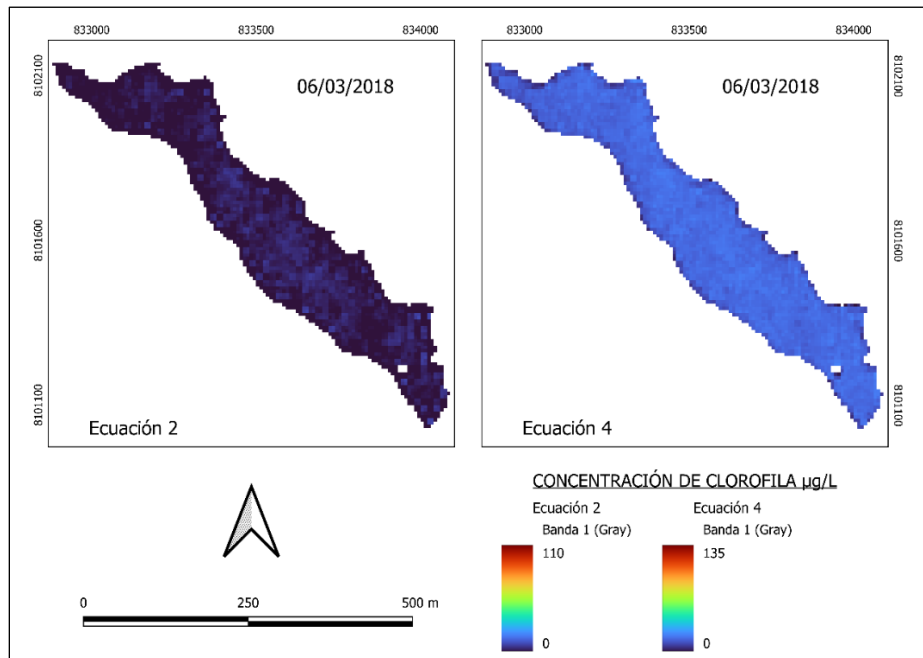


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para otoño (31/03/2018)

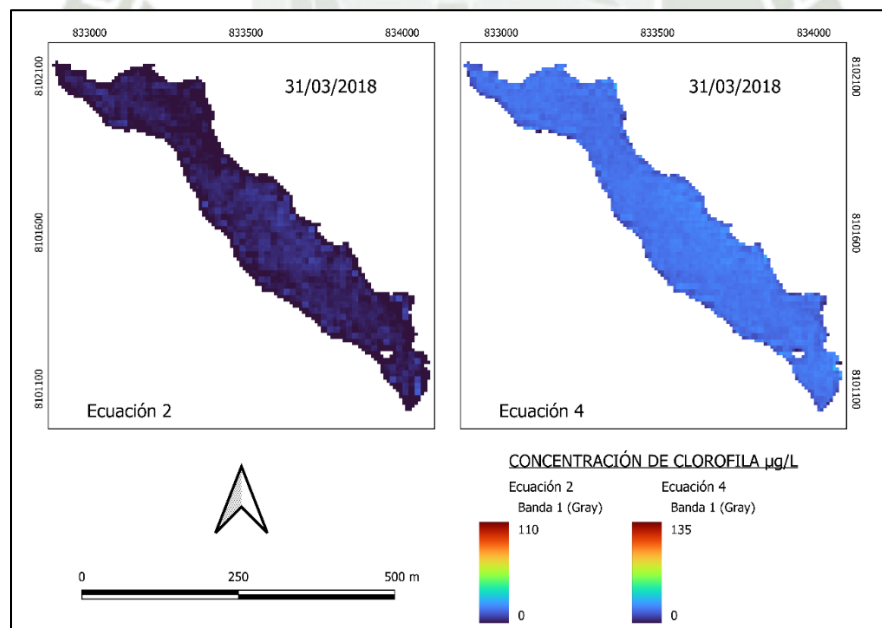


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para otoño (20/04/2018)

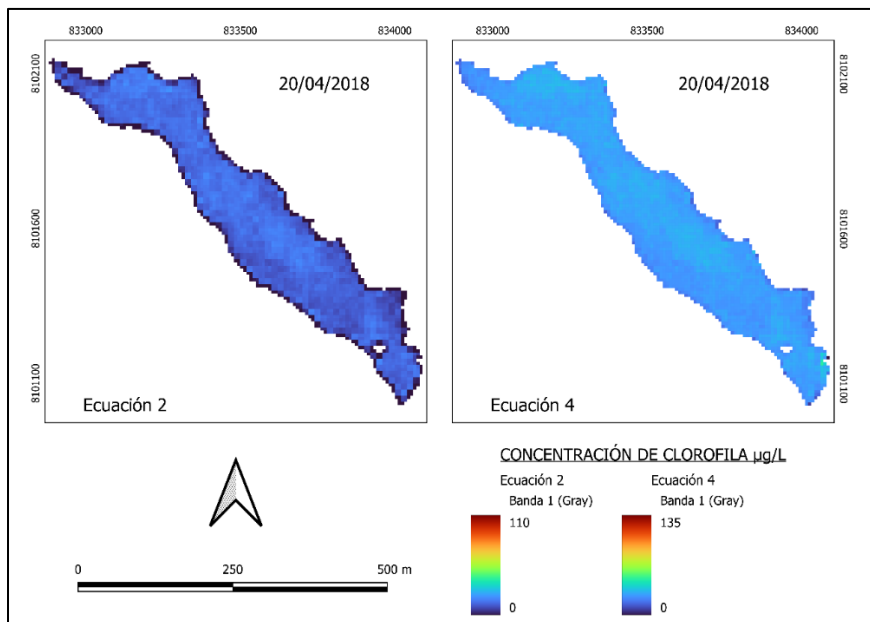


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para otoño (20/05/2018)

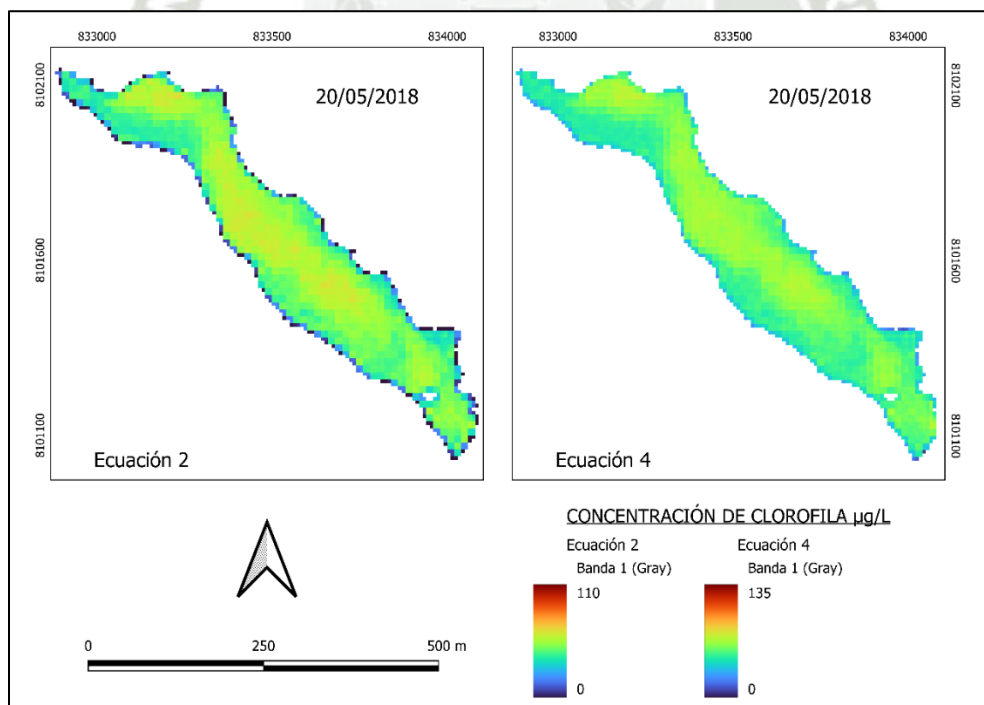


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para invierno (30/05/2018)

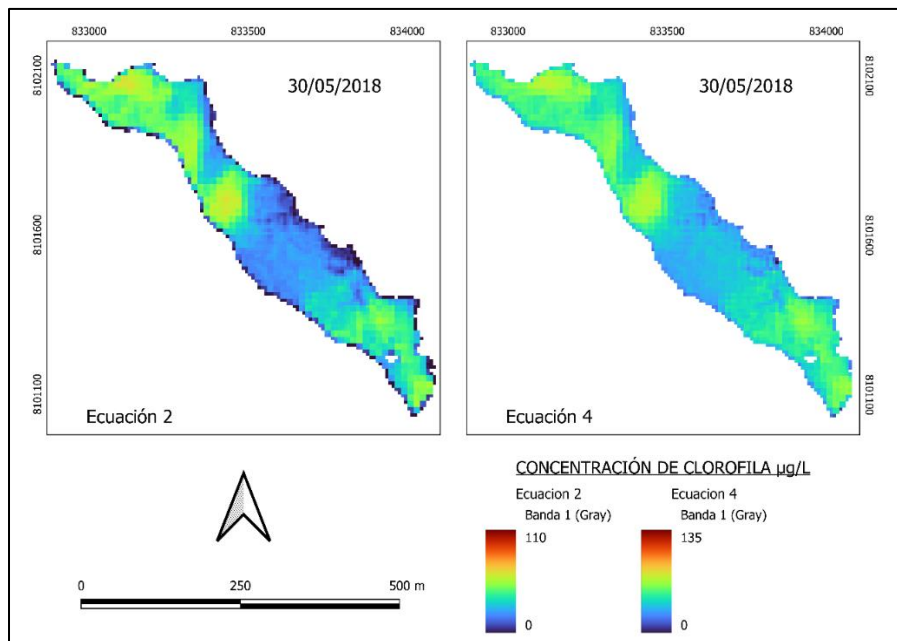


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para invierno (29/06/2018)

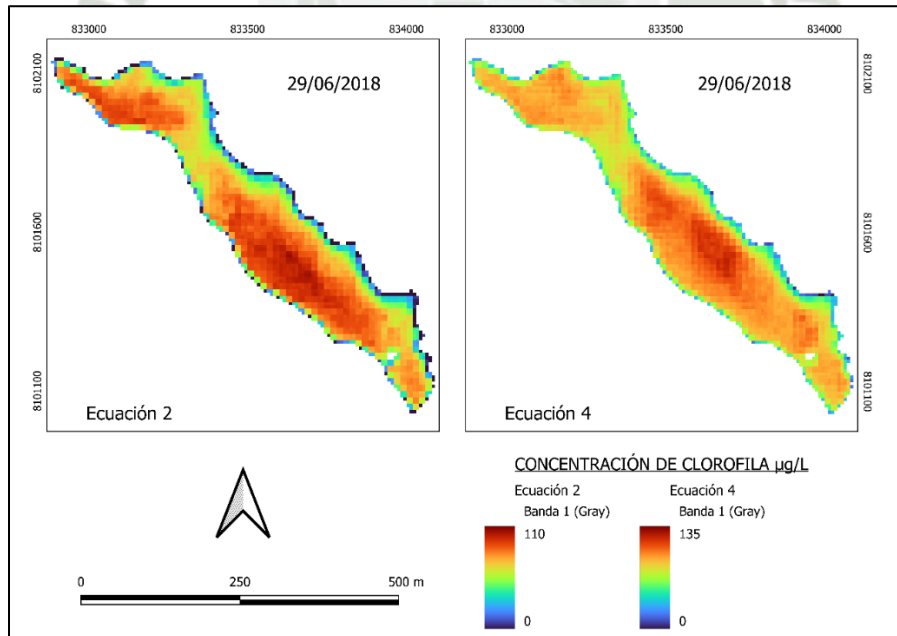


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para invierno (09/07/2018)

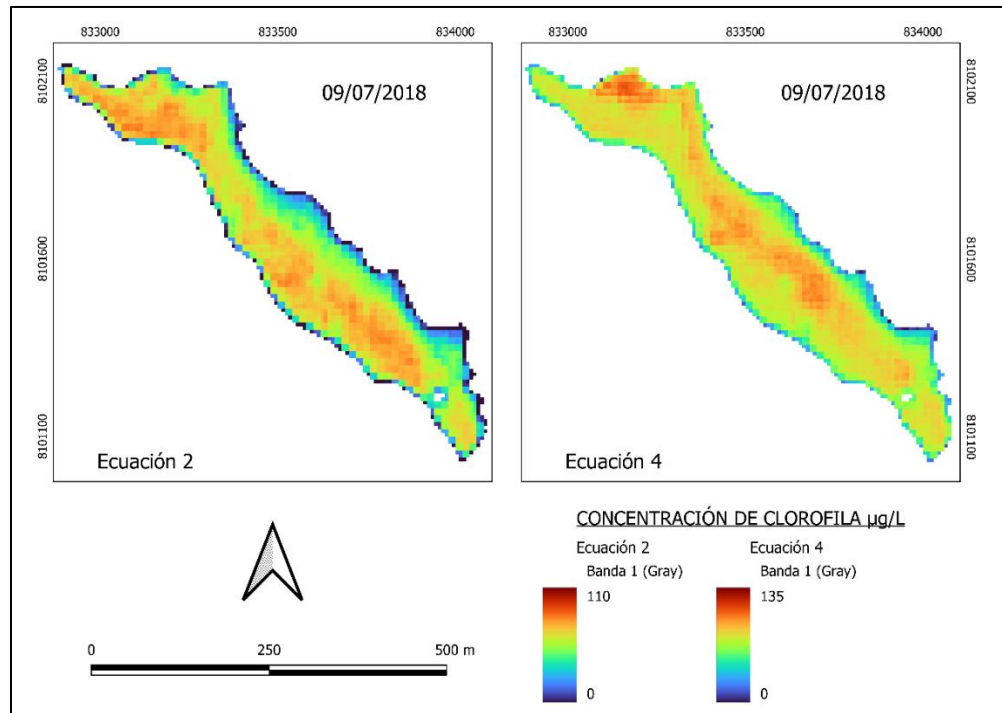


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para primavera (22/09/2018)

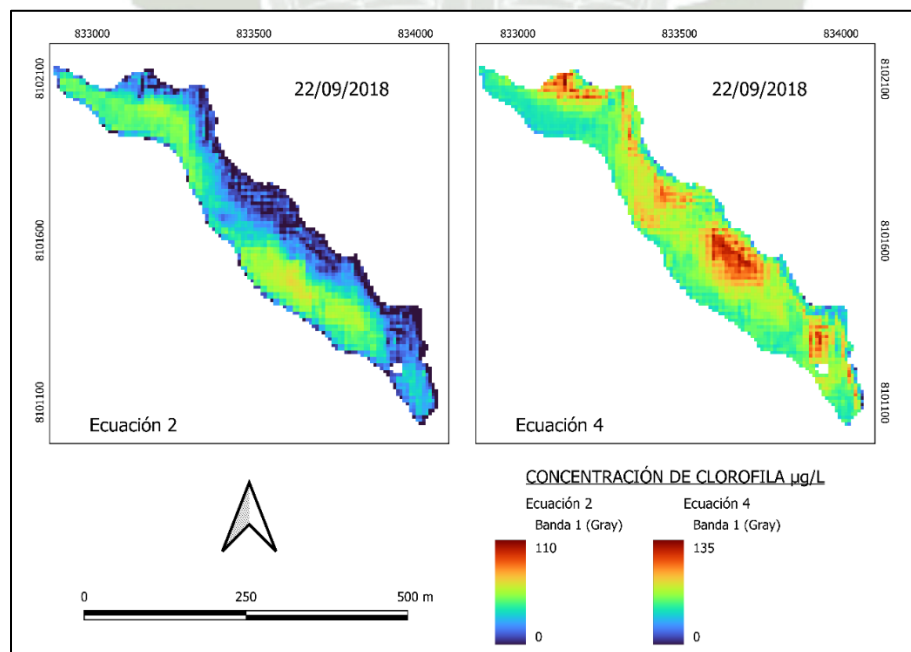


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para primavera (01/11/2018)

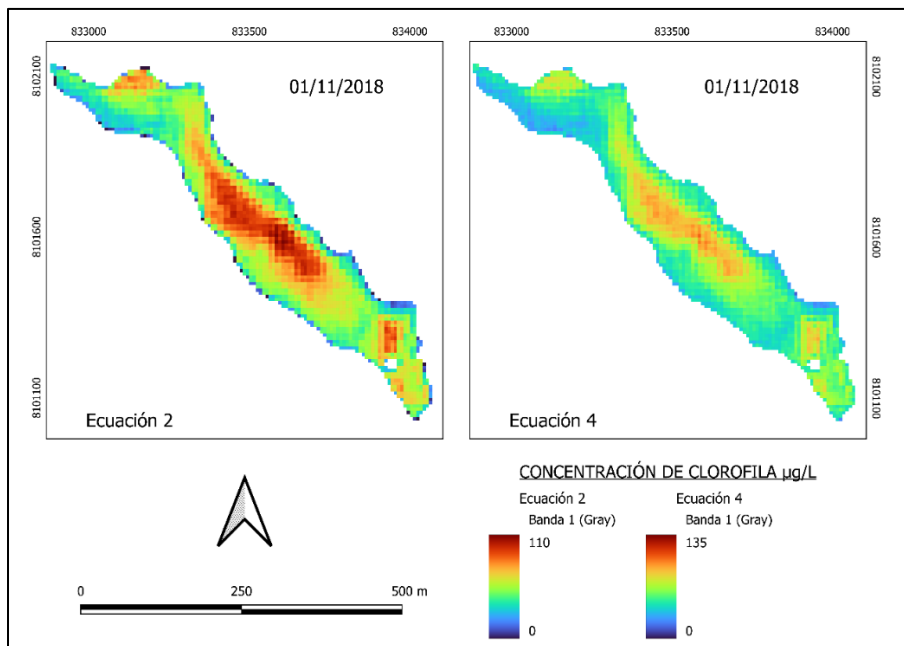


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para primavera (06/12/2018)

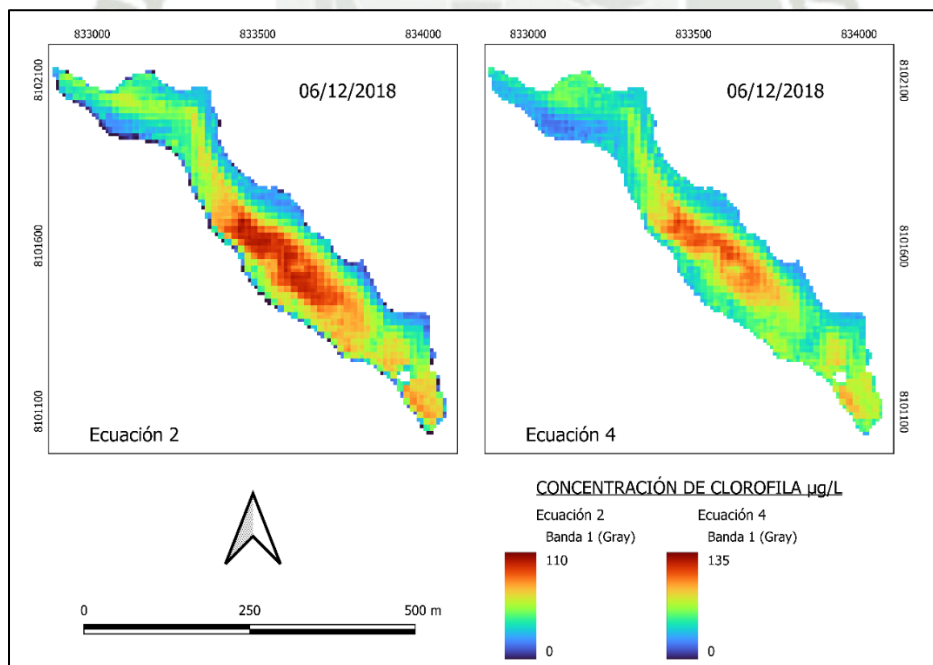


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para verano (20/01/2019)

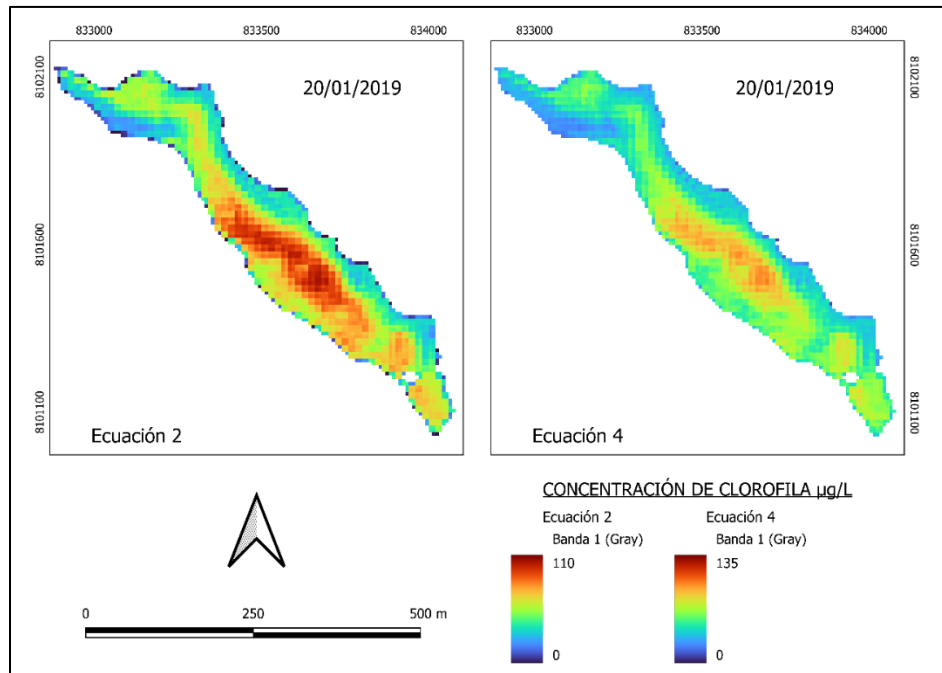


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para verano (24/02/2019)

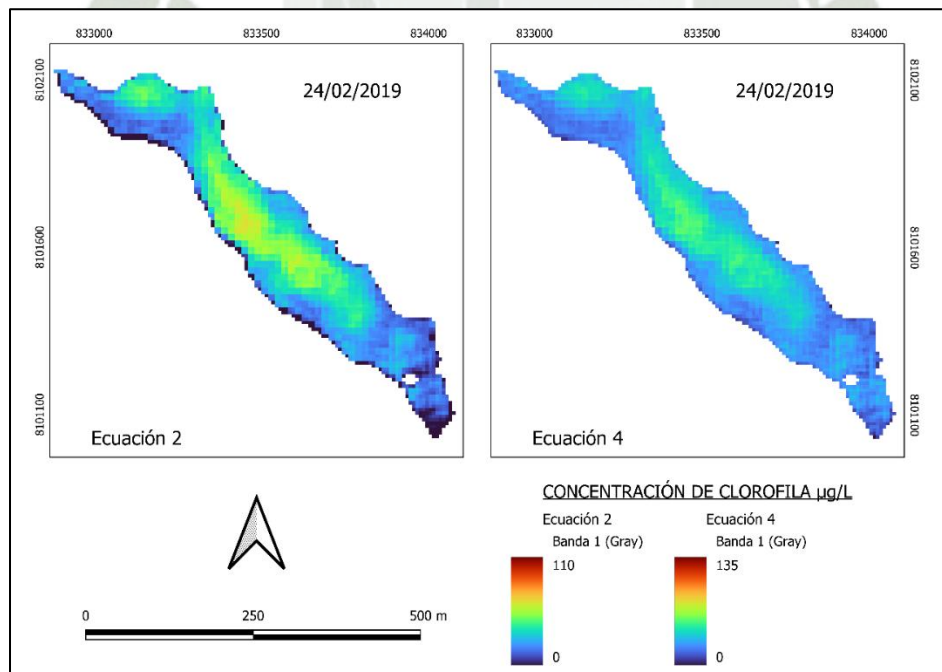


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para verano (06/03/2019)

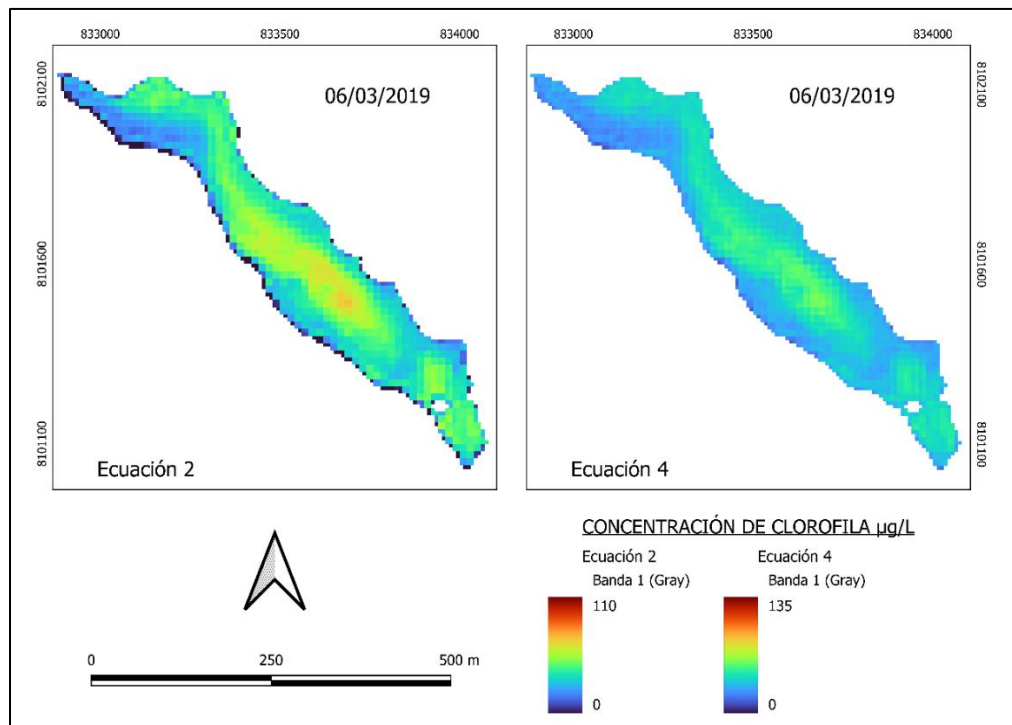


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para otoño (05/04/2019)

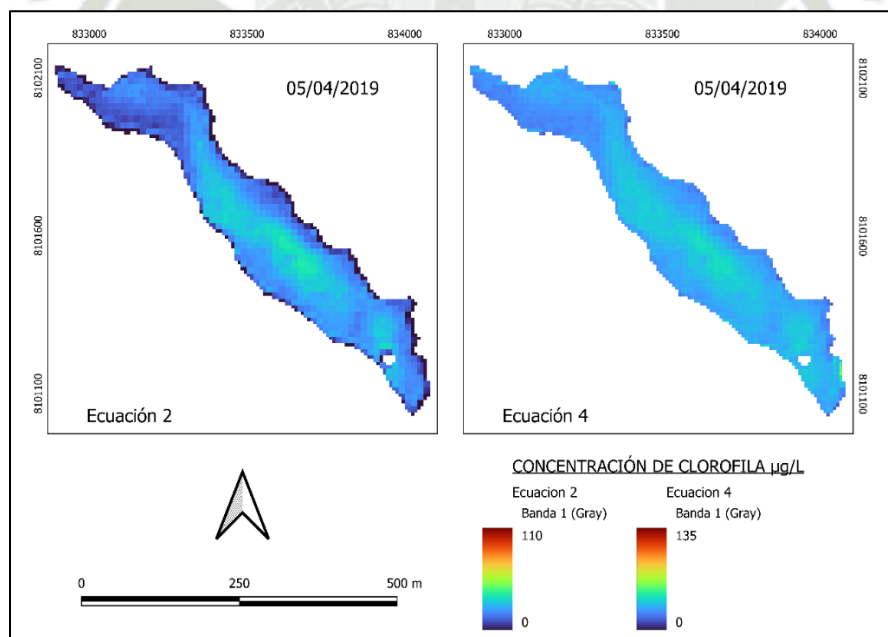


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para otoño (05/05/2019)

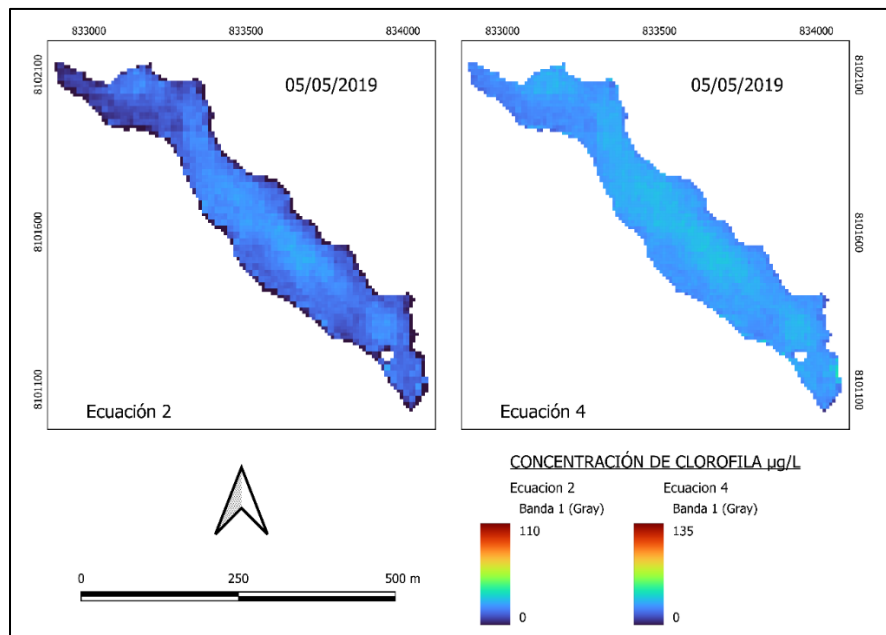


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para otoño (09/06/2019)

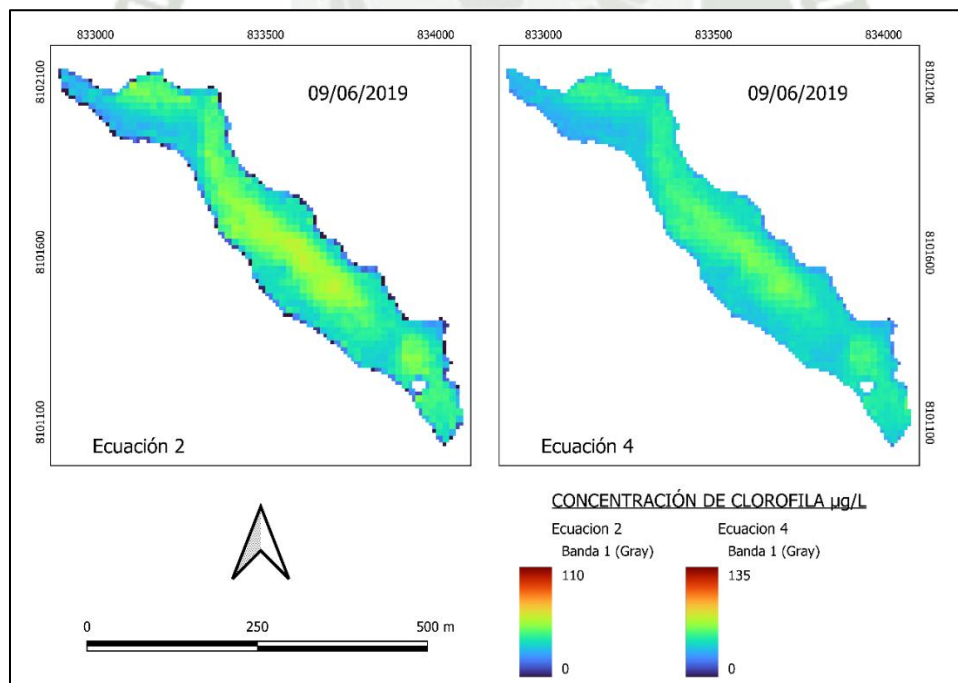


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para invierno (24/06/2019)

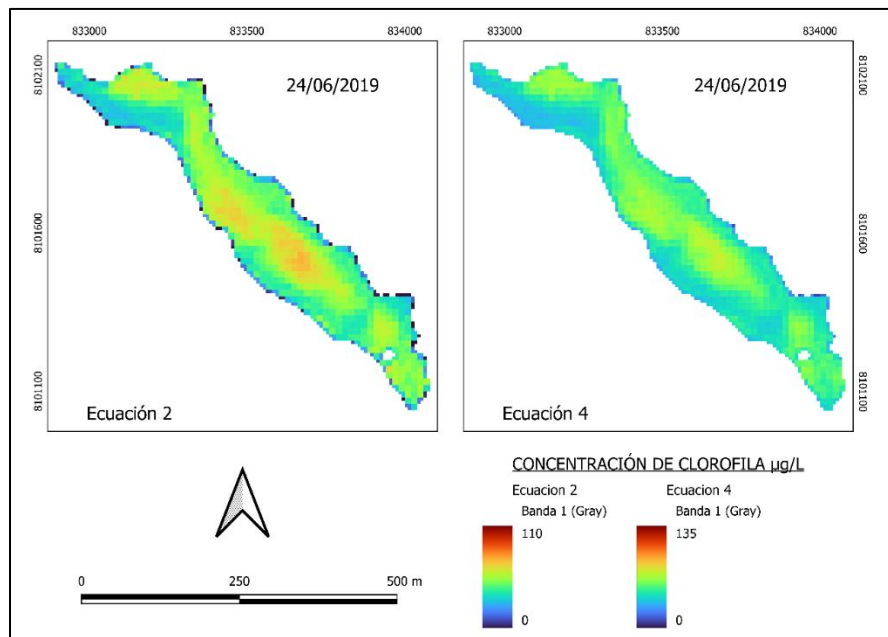


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para invierno (23/08/2019)

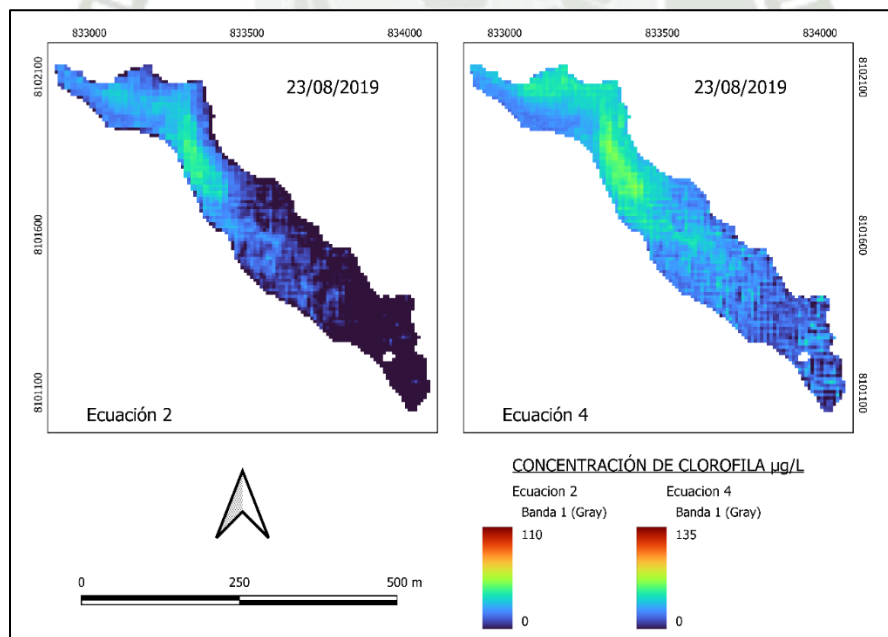


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para invierno (02/09/2019)

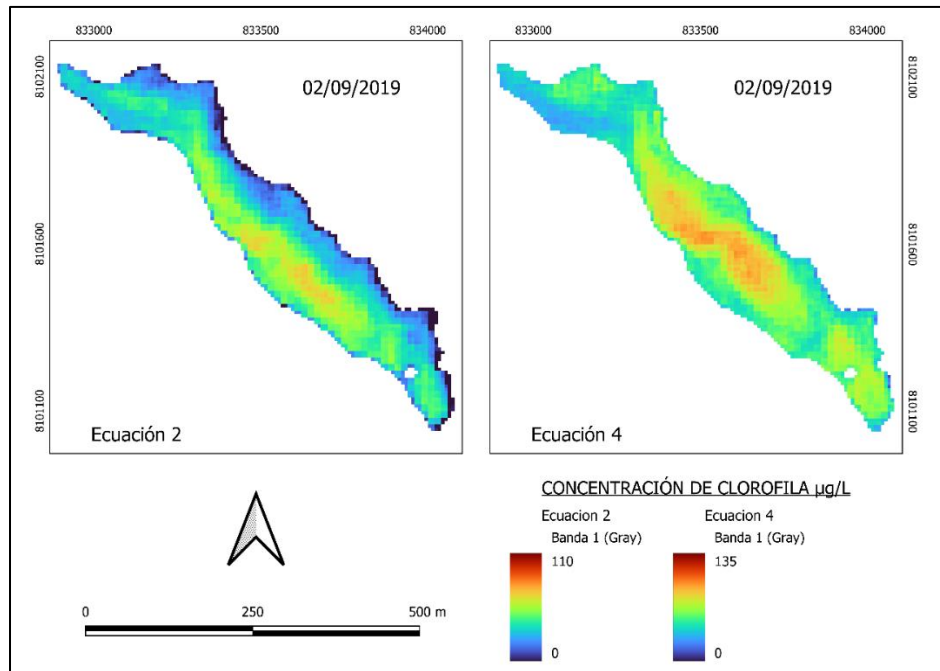


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para primavera (12/10/2019)

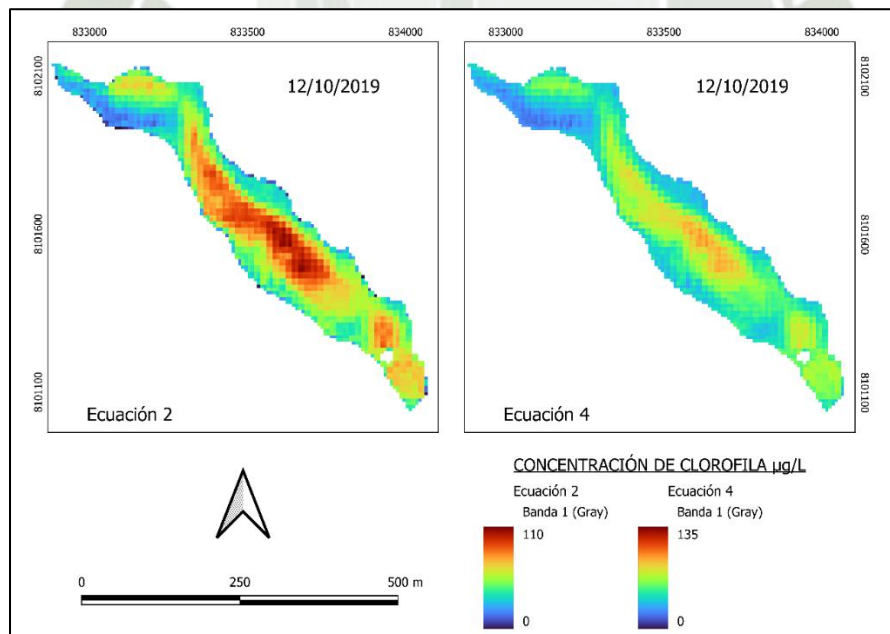


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para primavera (16/11/2019)

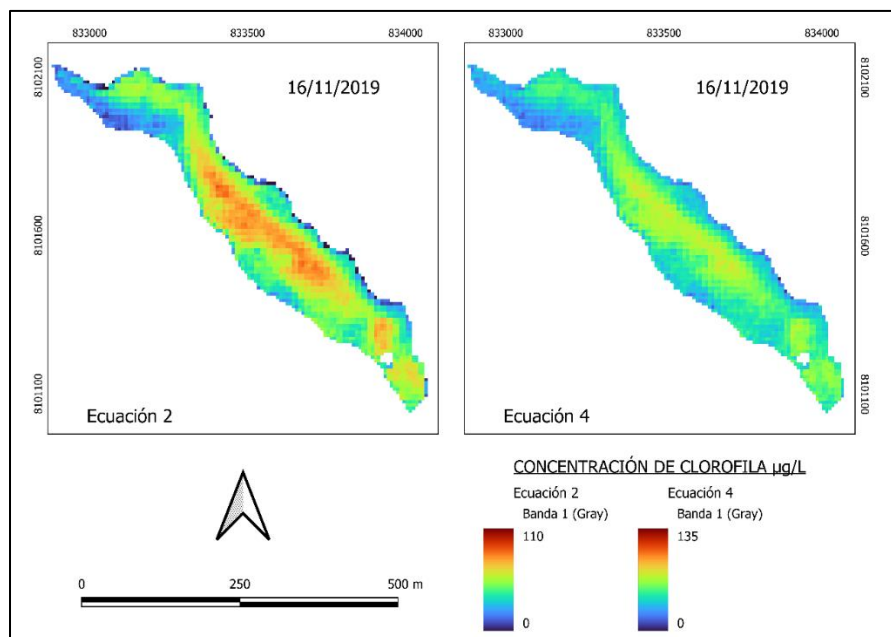


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para primavera (16/12/2019)

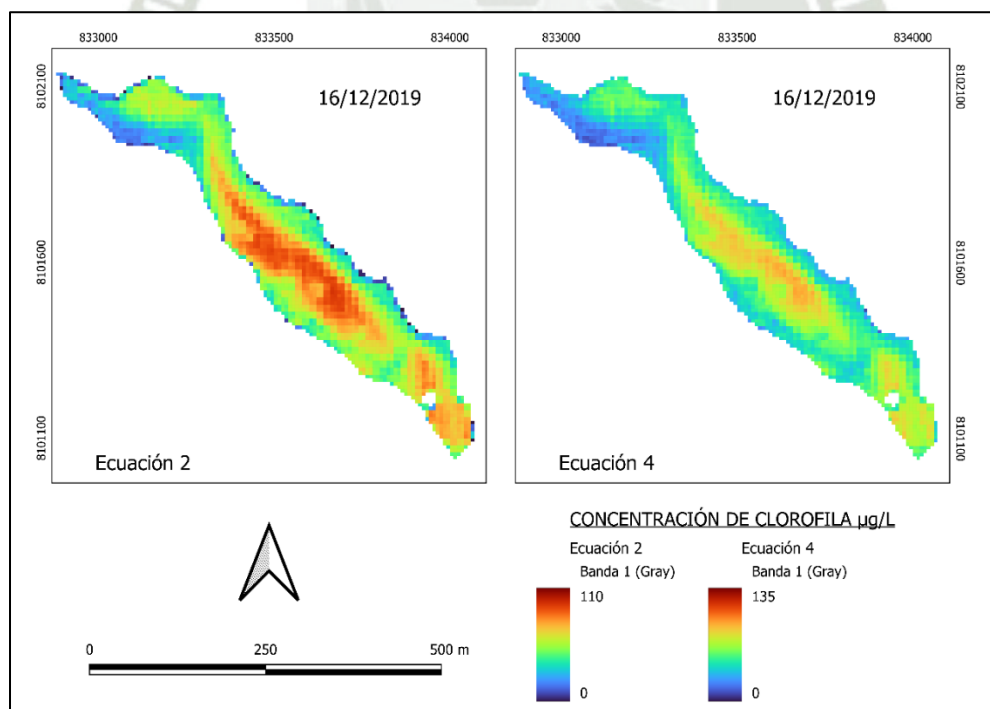


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para verano (30/01/2020)

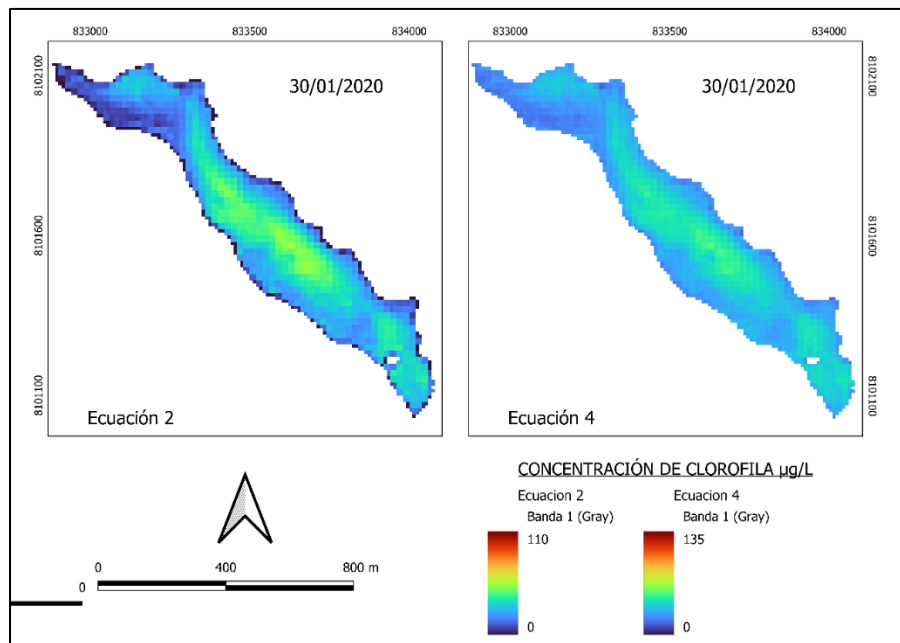


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para verano (19/02/2020)

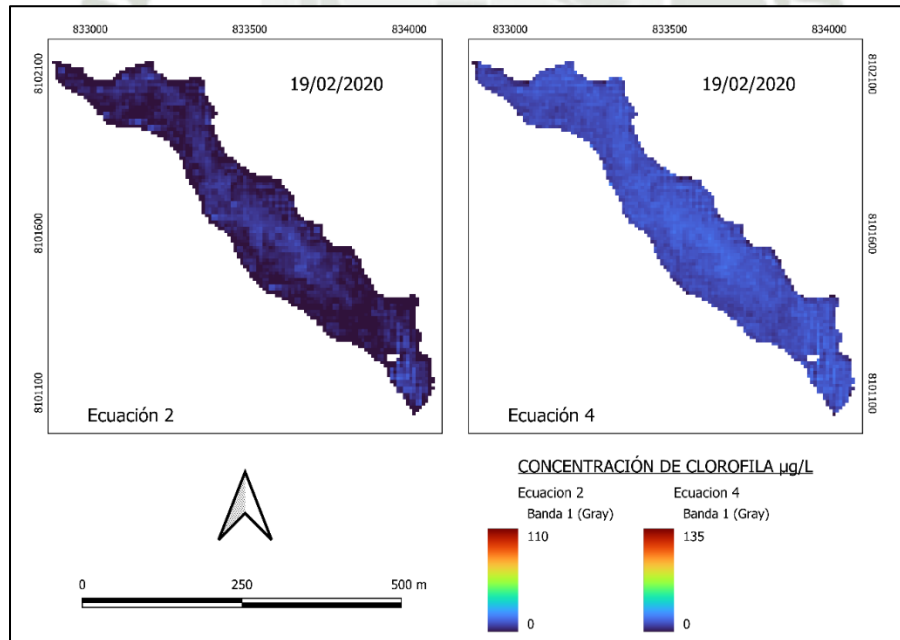


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para verano (10/03/2020)

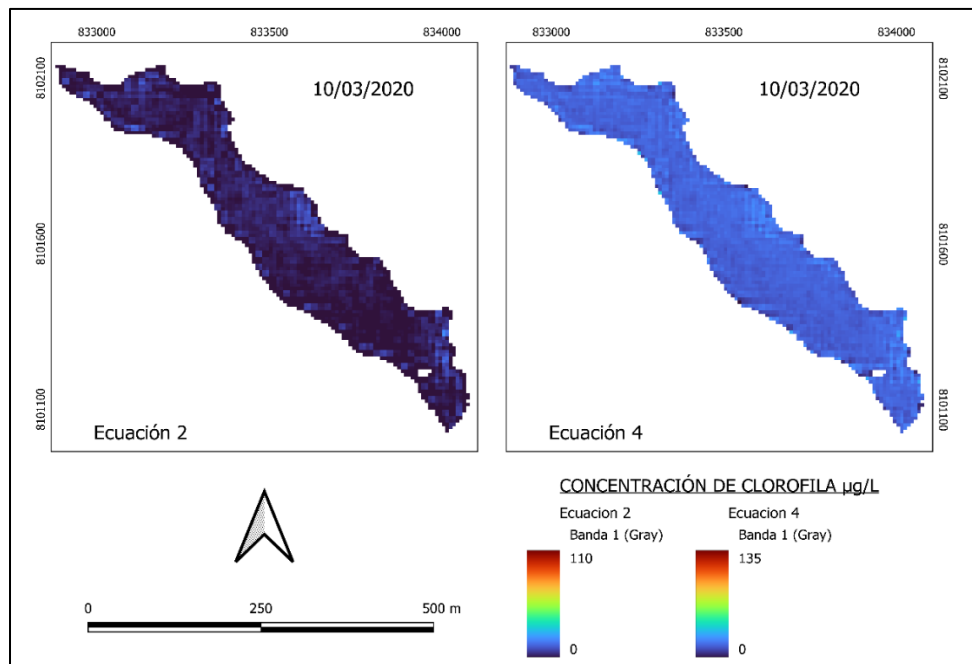


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para otoño (30/03/2020)

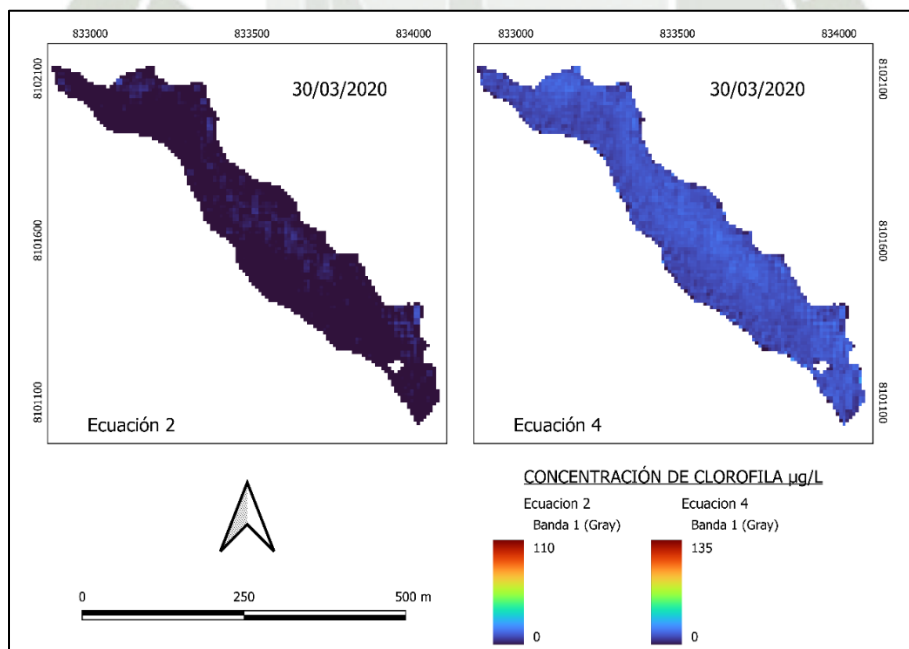


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para otoño (24/04/2020)

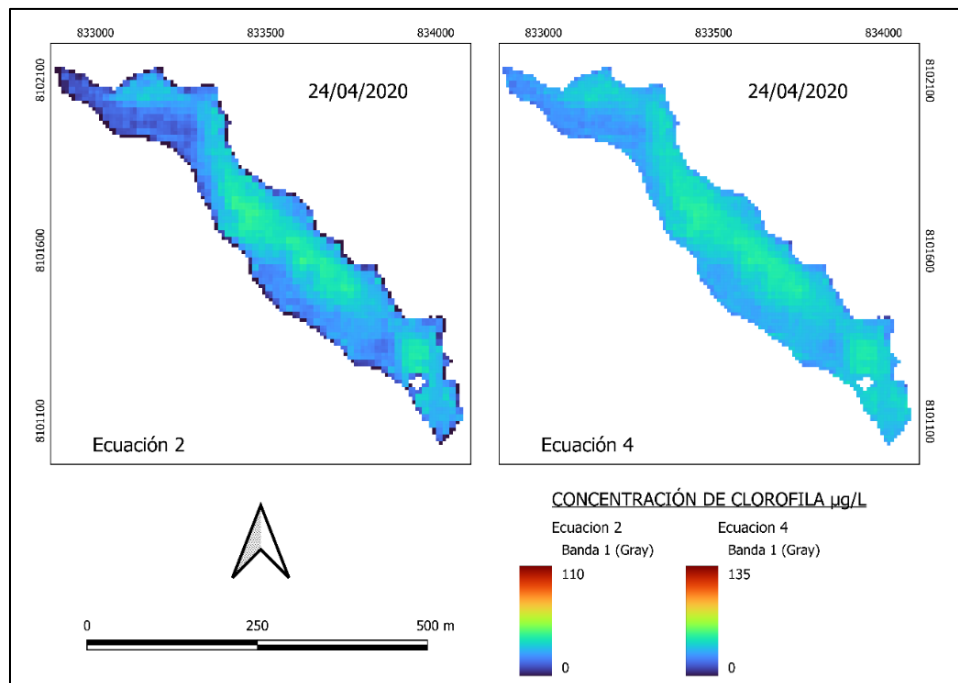


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para otoño (24/05/2020)

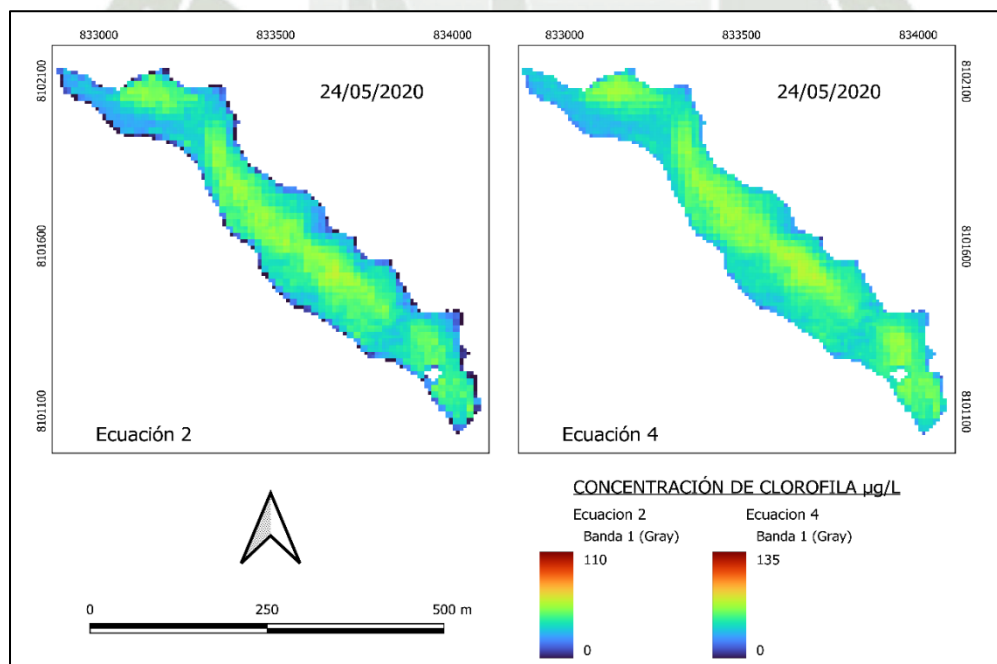


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para invierno (28/06/2020)

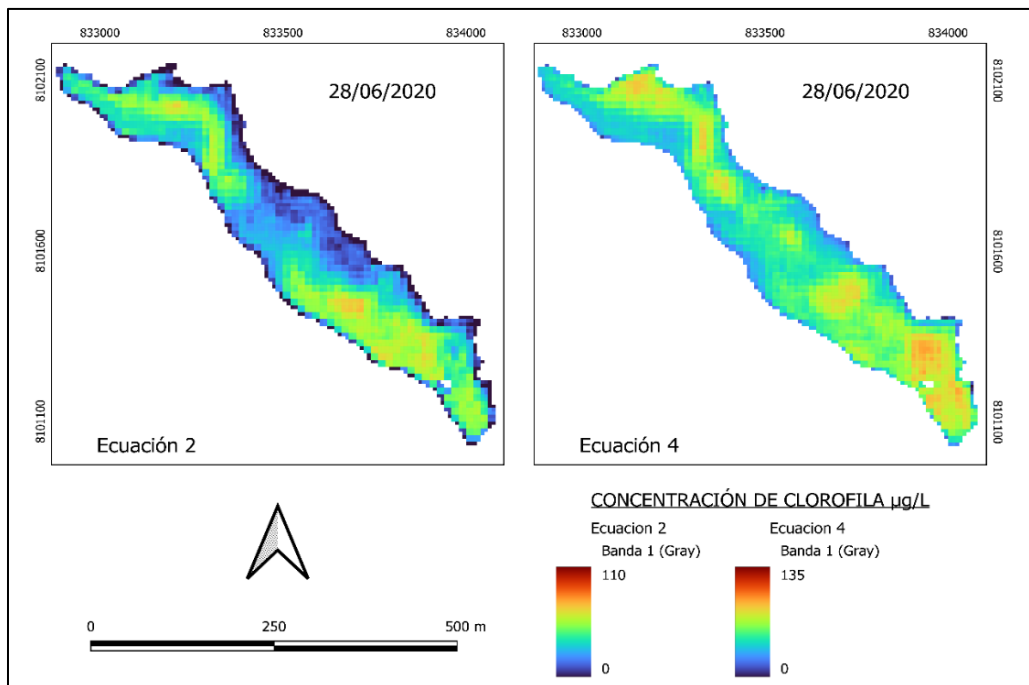


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para invierno (13/07/2020)

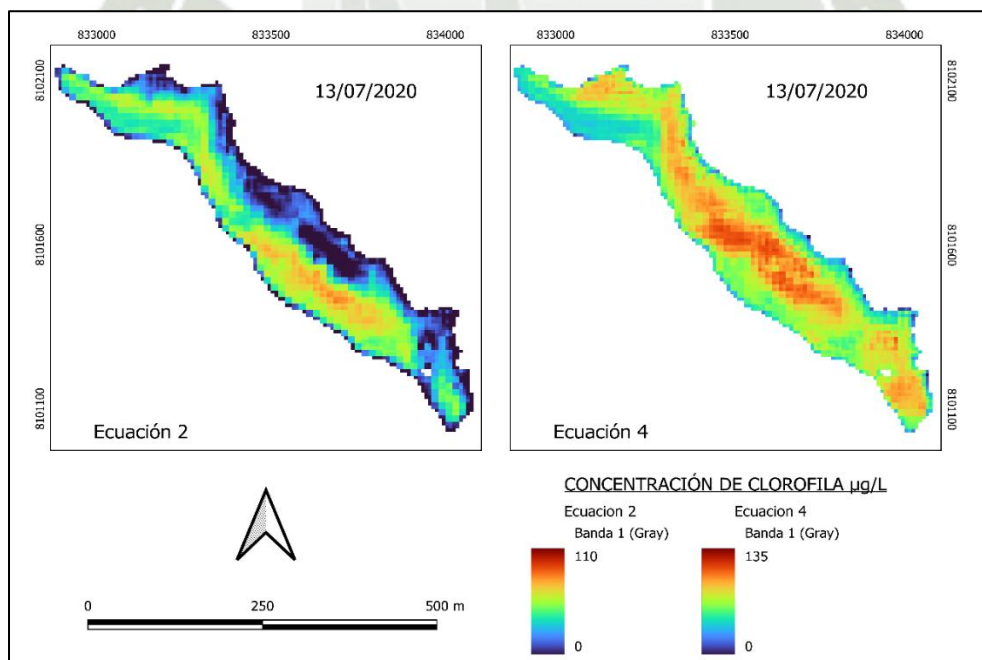


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para invierno (21/09/2020)

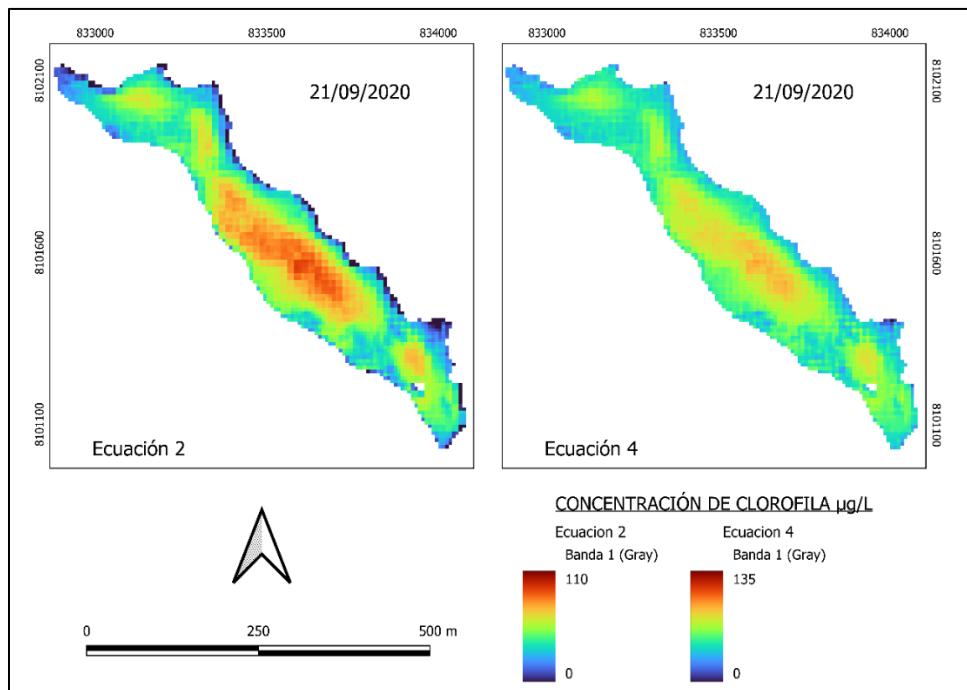


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para primavera (11/10/2020)

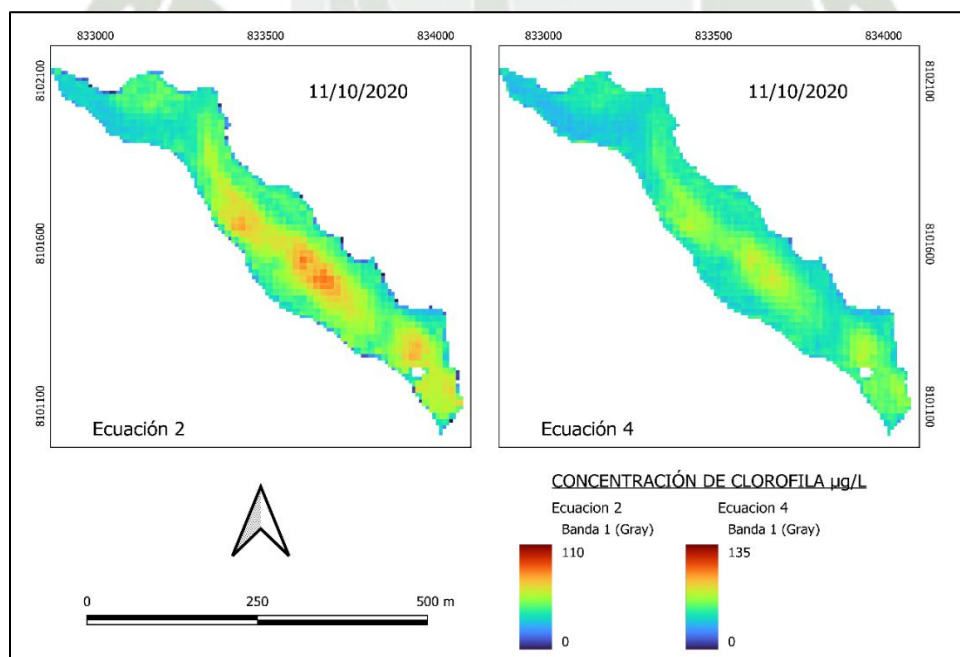


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para primavera (05/11/2020)

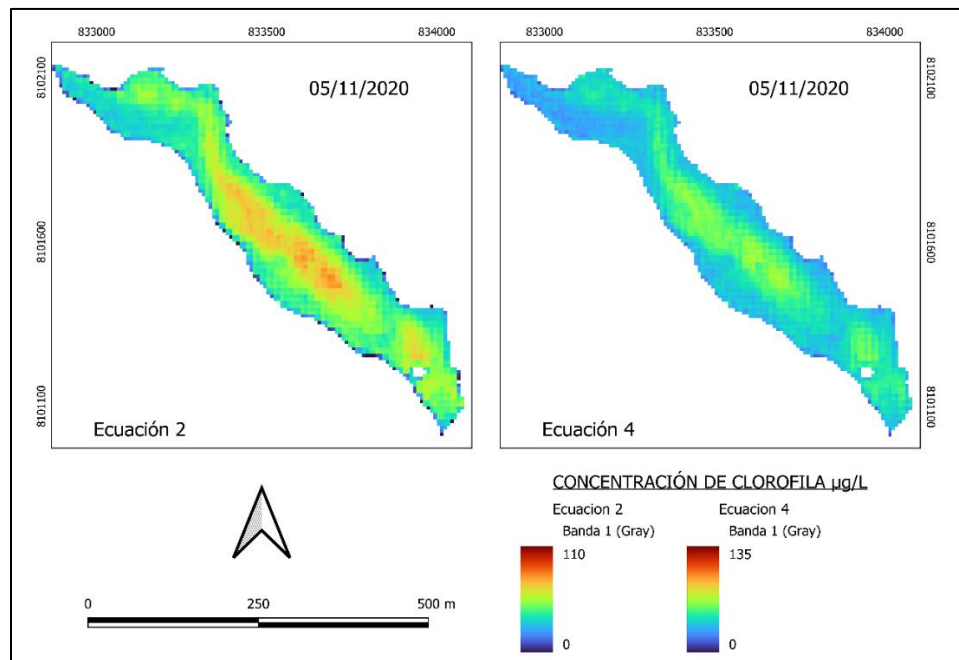
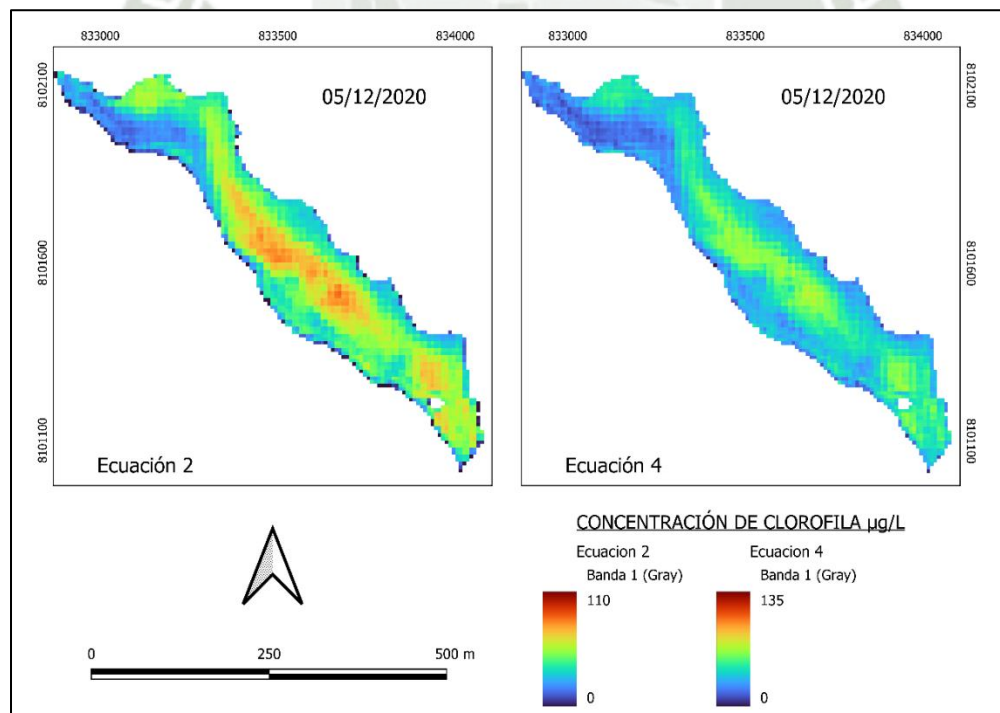


Figura. Concentración de Clorofila según ecuaciones 2 y 4 para primavera (05/12/2020)



ANEXO N°6 – Mapas de desviación estándar, media, mínimo y máximo de concentración de clorofila para los años 2018, 2019 y 2020.



Figura. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila por píxel para el año 2018

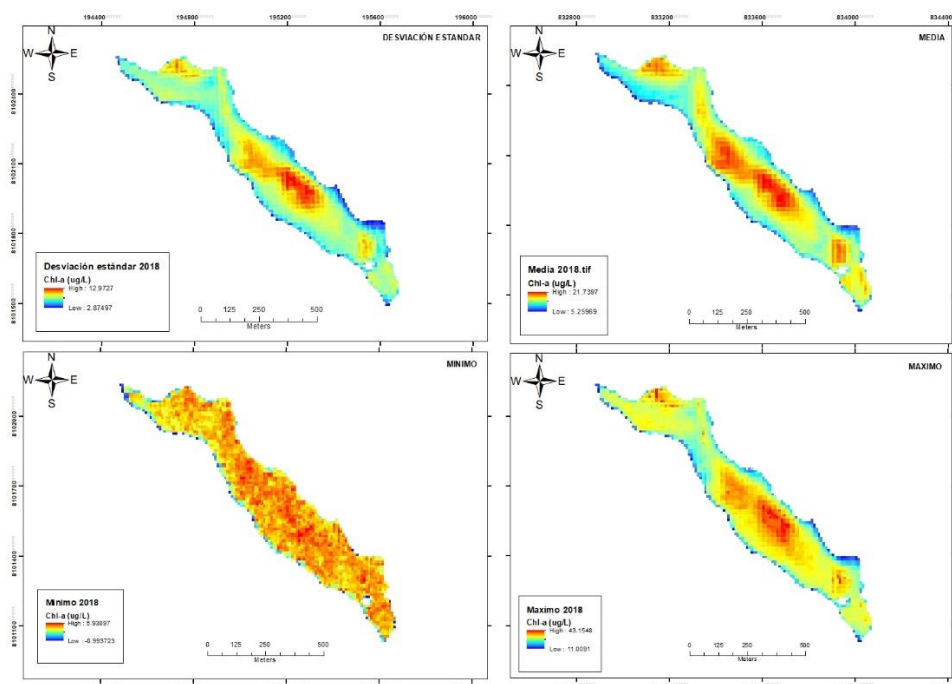


Figura. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila por píxel para el año 2019

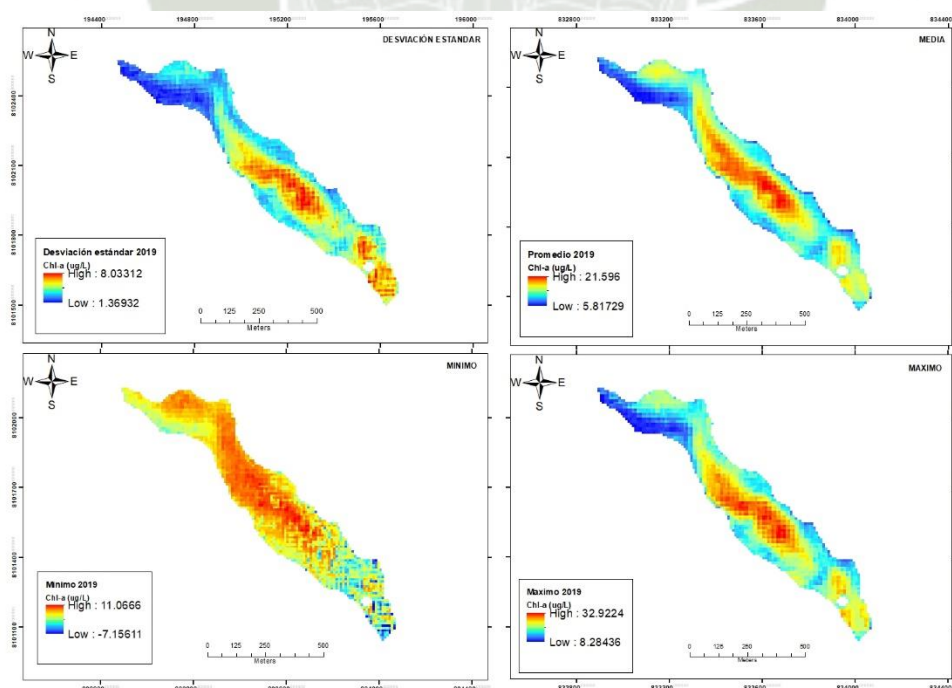


Figura. Desviación estándar, media, mínimo y máximo de las concentraciones de clorofila por píxel para el año 2020

