

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS  
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA**



**PROYECTO DE GRADO**

**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN PARA LA VALIDACIÓN Y  
CALIBRACIÓN DE INDICADORES DE EUTROFIZACIÓN EN EL SECTOR  
BOLIVIANO DEL LAGO MENOR DEL TITICACA.**

**INEZ ANA VILLCA CALLE**

**Proyecto de Grado, presentado para optar al  
título de Ingeniero Geógrafo.**

**TUTOR: Ing. RENÉ MENDOZA MAMANI**

**LA PAZ, BOLIVIA**

**2019**

## ***DEDICATORIA***

*A mis padres*

*Maximiliano Villca y Lidia Calle.*

*A mis hermanos*

*Betty, Vicky, Max, Galo, Esteban, Patty.*

*A mi compañero de vida*

*Edwin (mi niño).*

*Con amor a todos ellos.*

## ***AGRADECIMIENTOS***

Mi Dios, entiendo que si no fuese por tu misericordia, fidelidad y bondad, nada de esto hubiese sido posible. Solo Tú puedes dar fuerza al cansado, aliento al desalentado, y esperanza al que ya no ve salida. Solo Tú puedes abrir caminos donde no existe alguno.

Eres mi Dios de promesas.

A la Universidad Mayor de San Andrés, por su incansable lucha por formar profesionales de calidad, por la exigencia que brindan los excelentes docentes, con el propósito de ver un futuro mejor en nuestro país.

Al Instituto de Investigaciones Geográficas (IIGEO), por acogerme como parte del equipo de investigadores, ya que de esta manera pude lograr el objetivo de la realización de este proyecto.

Al Ing. René Mendoza Mamani, por su paciencia, tiempo y dedicación en la elaboración de este proyecto. Que aun sin conocerme apostó por mí, poniendo su confianza para ser mi guía con dirección a la meta trazada.

Un especial agradecimiento a M.Sc. Ing. Javier Nuñez Villalba, por permitirme formar parte de su equipo de investigadores. Por enseñarme que con trabajo y dedicación todo es posible y por su gran amistad.

Un especial agradecimiento al Dr. Xavier Lazzaro, por su ayuda incondicional, con los equipos, con los cuales se hizo posible la elaboración de este proyecto. Mismo que empezó como un sueño, pero gracias a usted y a su vasta experiencia pudo ser posible.

Al Ing. Erwin Galoppo, ayudarme a dar los primeros pasos en este camino, que no supe por dónde iniciar. Su tiempo y paciencia fueron quienes me alentaron a seguir y explorar una nueva área, la cual no imagine llegar en algún momento. Muchas gracias por compartir su conocimiento con mi persona. ¡Permítame llamarlo Incondicional!

A mi Papito Max por su gran paciencia y al mejor apoyo que pudiste darme, tu amor incondicional. Muchas gracias mi papito querido.

A mi compañero de vida Edwin, gracias por brindarme tu apoyo en esta etapa de mi vida, por tu paciencia, cuidados y detalles. Gracias por tomar mi mano y ayudarme seguir.

A los mejores hermanos, gracias por sus palabras sabias y alentadoras en todo este tiempo. Su ejemplo ha marcado mucho más en mi vida. ¡Muchas gracias, Vicky, Max, Galo, Esteban, Patty y Betty!

# ÍNDICE

CAPITULO I .....	2
1. GENERALIDADES .....	2
1.1. ANTECEDENTES .....	2
1.1.1. Eutrofización en el Lago Titicaca .....	3
1.1.2. Aplicación de técnicas de teledetección.....	6
1.1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	10
1.1.4. Formulación del problema.....	11
1.2. OBJETIVOS .....	12
1.2.1. Objetivo general .....	12
1.2.2. Objetivos específicos .....	12
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	12
1.4. ALCANCE GEOGRÁFICO .....	13
1.5. ESCALA DE TRABAJO.....	14
CAPITULO II .....	15
2. MARCO TEÓRICO .....	15
2.1. EUTROFIZACIÓN .....	15
2.1.1. Indicadores de eutrofización .....	15
2.1.2. Índices del estado trófico del agua.....	16
2.1.3. Fitoplancton.....	16
2.1.3.1. Algas.....	17
2.2. PRINCIPIOS Y FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN.....	19
2.2.1. Definición .....	19
2.2.2. Componentes de un sistema de teledetección.....	19
2.2.3. Sensores Remotos.....	21
2.2.3.1. Clasificación de sensores .....	21
2.2.4. Espectro electromagnético.....	22
2.2.5. Respuesta espectral.....	24
2.2.6. Características del agua en el espectro óptico.....	25
2.2.7. Características de la Clorofila en el espectro óptico .....	26
2.2.8. Imágenes de satélite .....	27

2.2.9. Niveles Digitales.....	27
2.2.10. Resoluciones de imágenes .....	28
2.2.11. Pre- procesamiento y corrección de imágenes de satélite .....	29
2.2.12. Imágenes Landsat 8.....	30
2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	32
2.3.1. Análisis de correlación .....	32
Análisis de regresión .....	34
CAPITULO III .....	36
3. MARCO METODOLÓGICO.....	36
3.1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN .....	37
3.1.1. Cuantitativo .....	37
3.1.2. Cualitativo .....	38
3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	39
3.2.1. Experimental .....	39
3.2.2. No experimental .....	39
3.3. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN .....	40
3.3.1. Técnicas de recolección de datos .....	40
3.3.1.1. Sonda FluoroProbe BBE.....	40
3.3.2. Técnicas de procesamiento de datos.....	41
3.3.2.1. Técnicas de teledetección.....	41
3.3.2.2. Calibración de datos con programas .....	42
3.4. FASES METODOLÓGICAS .....	42
3.4.1. Pre Campo .....	42
3.4.1.1. Recopilación de la información .....	42
3.4.1.2. Selección e identificación de puntos para la toma de datos.....	44
3.4.2. Campo.....	48
3.4.2.1 Expediciones y toma de datos.....	49
3.4.3. Post Campo .....	53
3.4.3.1. Descarga y pre-procesamiento de imágenes de satélite .....	53
CAPÍTULO IV .....	57
4. RESULTADOS .....	57
4.1. Calibración con algoritmo propuesto .....	57

4.2. Análisis estadístico de las variables .....	63
4.2.1. Redefinición de algoritmo.....	66
4.3. Validación.....	70
4.4. Cartografía de identificación de concentración de Clorofila-a .....	75
4.5. Cartografía de poblaciones afectadas por eutrofización.....	77
4.5.1. Análisis de cartografía, identificación y cuantificación.....	79
CAPITULO V .....	80
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
5.1. CONCLUSIONES.....	80
5.2. RECOMENDACIONES .....	82
BIBLIOGRAFÍA .....	84
GLOSARIO.....	87

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Valores límite para la clasificación trófica del agua de la OCDE .....	16
Tabla N° 2 Clasificación de algas.....	18
Tabla N° 3 Especificaciones de las imágenes Landsat 8. ....	31
Tabla N° 4 Distribución de las bandas OLI y TIRS.....	31
Tabla N° 5 Coordenadas de estaciones propuestas Dr. Lazzaro.....	46
Tabla N° 6 Coordenadas seleccionadas para toma de datos .....	47
Tabla N° 7 Coordenadas de puntos de toma de datos.....	49
Tabla N° 8 Coordenadas de puntos de toma de datos.....	50
Tabla N° 9 Coordenadas de puntos de toma de datos.....	51
Tabla N° 10 Coordenadas de puntos de toma de datos.....	52
Tabla N° 11 Cuadro resumen de puntos tomados en etapa de campo.....	53
Tabla N° 12 Datos de Clorofila-a satelital y de campo, expedición 01/04/18. ....	59
Tabla N° 13 Datos de Clorofila-a satelital y de campo, expedición 17/04/18. ....	60
Tabla N° 14 Datos de Clorofila-a satelital y de campo, expedición 03/05/18. ....	61
Tabla N° 15 Datos de Clorofila-a satelital y de campo, expedición 19/05/18. ....	62

Tabla N° 16 Valor de pixeles individuales, relaciones de banda y Clorofila-a superficial.....	64
Tabla N° 17 Categorización de estado trófico de un cuerpo de agua, indicador CI-a .....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Mapa de ubicación del área de estudio, Lago Menor del Titicaca.....	14
Figura N° 2 Etapas y elementos de un sistema de teledetección.....	19
Figura N° 3 Tipos de sensores.....	22
Figura N° 4 Espectro electromagnético.....	23
Figura N° 5 Respuesta espectral de diferentes superficies .....	25
Figura N° 6 Comportamiento espectral del agua.....	26
Figura N° 7 Comportamiento espectral de Clorofila-a.....	27
Figura N° 8 Flujograma de procedimientos .....	36
Figura N° 9 Sonda FluoroProbe BBE.....	40
Figura N° 10 Comportamiento de la Clorofila-a en el espectro visible.....	41
Figura N° 11 Mapa de curvas batimétricas del Lago Menor del Titicaca.....	44
Figura N° 12 Estaciones propuesta Dr. Lazzaro.....	45
Figura N° 13 Imagen satelital de temporada del Bloom de 2015 .....	47
Figura N° 14 (Izq.) y Figura N° 15(Der.) Equipos para toma de datos.....	49
Figura N° 16 (Izq.) y Figura N° 17(Der.) Toma de datos con sonda FluoroProbe BBE.....	50
Figura N° 18 (Izq.) y Figura N° 19 (Der.) Apunte de datos y sonda FluoroProbe BBE.....	51
Figura N° 20 (Izq.) y Figura N° 21 (Der.) Espectro radiómetro sub-acuático, toma de profundidad en el punto.....	52
Figura N° 22 Imagen satelital con valores en ND llevados reflectancia.....	56
Figura N° 23 Mapa de contenido de Clorofila-a satelital expedición 01/04/2018..	59
Figura N° 24 Mapa de contenido de Clorofila-a satelital expedición 17/04/2018..	60

Figura N° 25 Mapa de contenido de Clorofila-a satelital expedición 03/05/2018..	61
Figura N° 26 Mapa de contenido de Clorofila-a satelital expedición 03/05/2018..	62
Figura N° 27 Gráfica de correlación de Clorofila-a satelital y de campo.....	63
Figura N° 28 Relación B2 y Cl-a	Figura N° 29 Relación B3 y Cl-a
Figura N° 30 Relación de B3/B2 y Cl-a	Figura N° 31 Relación de B2/B3 y Cl-a
.....	66
Figura N° 32 Relación de B3/B2 (valores en reflectancia) y Clorofila-a máxima...	67
Figura N° 33 Relación de B3/B2 (valores en reflectancia) y Clorofila-a media.....	67
Figura N° 34 Relación de B3/B2 (valores en reflectancia) y Clorofila-a superficial.	
.....	68
Figura N° 35 Mapa de contenido de Clorofila-a, expedición 01/04/2018.....	71
Figura N° 36 Mapa de contenido de Clorofila-a, expedición 17/04/2018.....	72
Figura N° 37 Mapa de contenido de Clorofila-a, expedición 03/05/2018.....	73
Figura N° 38 Mapa de contenido de Clorofila-a, expedición 19/05/2018.....	74
Figura N° 39 Mapa de concentración de Clorofila-a.....	76
Figura N° 40 Mapa de poblaciones afectadas según estado trófico de cuerpo de agua. ....	78



## INTRODUCCIÓN

En los últimos años la situación ambiental del Lago Titicaca se ha estado agravando, en especial en el Lago Menor. Muchos han sido los factores que han contribuido a la precaria situación que está atravesando.

El primero de ellos y el más incidente, es el crecimiento de las áreas urbanas cercanas al Lago, estas ciudades que no cuentan con una planificación adecuada que vaya en torno a su crecimiento demográfico, aportan a la degradación ambiental que está atravesando.

En el entendido que el recurso agua es uno de los más afectados por situaciones de eutrofización.

Se ha elaborado el presente trabajo, que propone una nueva técnica de estudio para cuerpos de agua. Las técnicas de teledetección no son tan conocidas en nuestro medio, pues son pocas las personas que acuden a estas.

De modo que se ha seleccionado una serie de algoritmos, trabajados exclusivamente para la extraer datos de Clorofila-a (siendo esta variable un indicador de eutrofización), a partir de imágenes de satélite. Asimismo estos datos extraídos por técnicas de teledetección deberán ser comparados con datos de Clorofila-a, que han sido tomados insitu. Si estos datos no tienen relación alguna, se procederá a redefinir el algoritmo seleccionado. Es así que para la validar estos resultados se realizará mapas temáticos, con el nuevo algoritmo redefinido. La cartografía más significativa que se pretende generar es de identificación y cuantificación de poblaciones afectadas según el estado trófico de cuerpo de agua al cual están expuestas las poblaciones ribereñas.

# CAPITULO I

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES

En los últimos años se han registrado varios eventos de contaminación en el Lago Titicaca, siendo la parte más afectada el Lago Menor, la primera denuncia de afectación por contaminación en el Lago Menor se ha dado el año 2002, cuando los pobladores del sector de bahía Cohana denunciaron la aparición de lentejas de agua (*Lemna gibba*). Después en el 2003 la prensa verifico y difundió, recién esta problemática. (LIDEMA, 2012). El evento más preocupante, que marcó un hito en cuanto a contaminación se refiere, sucedió a principios del 2015, cuando, durante un evento extremo de una proliferación de micro algas del fitoplancton (comúnmente llamado “Bloom” en inglés), se evidenció una elevada mortalidad de peces y ranas a consecuencia de la reducción de oxígeno del agua, producto de la contaminación orgánica. Lazzaro 2016 (como cito en Molina, 2017). A partir de ello diversas instituciones han evaluado el nivel de contaminación por las descargas de desechos en la cuenca del río Katari, (siendo este el principal rio que desemboca en el Lago Menor, específicamente en el sector de bahía Cohana) así como de sus afluentes más importantes (ríos Seco y Pallina). Es así que se ha definido a este proceso de contaminación como eutrofización, que es básicamente en contenido excesivo de nutrientes en el cuerpo de agua.

De modo que entre los esfuerzos alcanzados con referencia al tema de eutrofización y las diferentes técnicas de teledetección que se han empleado en el estudio del Lago Titicaca; son escasos ya que este método no ha sido popular en nuestro medio debido al acceso de recursos e inexperiencia de estas técnicas. Por ello también se ha tomado como referentes bibliográficos otros trabajos similares,

que si bien no han sido empleados en el Lago Titicaca, pero llevan una metodología similar a la que se utilizará en el presente trabajo.

Es importante remarcar que sí, se ha encontrado basto material de antecedentes con relación a eutrofización en el Lago Titicaca con referencia a indicadores biológicos y fisicoquímicos en los que su metodología de estudio, es necesario una etapa de laboratorio, por lo que se ha tomado en cuenta algunos de estos estudios para obtener argumentos sólidos.

### **1.1.1. Eutrofización en el Lago Titicaca**

#### **ALGUNOS CRITERIOS BIOLÓGICOS SOBRE EL PROCESO DE EUTROFIZACIÓN A ORILLAS DE SEIS LOCALIDADES DEL LAGO TITICACA.**

El artículo científico hace referencia a la evaluación de las condiciones ambientales de 6 sitios a orillas del Lago Titicaca, donde se encontró diferentes grados de eutrofización. Para ello se emplearon 4 indicadores de evaluación rápida: macrófitas flotantes y sumergidas, fitoplancton y propiedades organolépticas, complementándolos con análisis de pH y micro-meso fauna. Se encontraron diferentes grados de afectación por el proceso eutrófico en parte debido a la influencia humana y la contaminación de los sitios de estudio. También se analizó la relevancia de cada indicador en este caso en particular. (Fontúrbel, 2003, p.75)

#### **INDICADORES FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DEL PROCESO DE EUTROFIZACIÓN DEL LAGO TITICACA (BOLIVIA).**

En este trabajo se evaluó el grado de avance del proceso de eutrofización del Lago Titicaca por medio de la evaluación de las macrófitas (pleuston y limnófitas), de la diversidad de fitoplancton, de parámetros fisicoquímicos (pH, turbidez, DBO5, nitrógeno total y fósforo soluble) y microbiológicos (coliformes fecales termotolerantes) en cuatro localidades del lago. Los resultados mostraron un avance diferencial en el desarrollo del proceso de eutrofización en cada sitio: se clasificó un sitio como aguas de calidad mínima, un sitio como calidad baja y dos

como calidad media. La conjunción de turbidez, DBO5, nitrógeno y fósforo se manifiesta como un buen indicador del grado de avance del proceso de eutrofización, mientras que la evaluación de macrófitas y fitoplancton proporcionan datos valiosos sobre la pérdida de biodiversidad. (Fontúrbel, 2005, p.135)

### **CONDICIONES TRÓFICAS DE LA BAHIA DE AYGACHI DEL LAGO TITICACA.**

El estudio evalúa los niveles de eutrofización que estaría alcanzando el Lago Titicaca en el sector de la Bahía de Aygachi, como resultado de las descargas contaminantes de aguas residuales domésticas e industriales que se vierten sobre los ríos Seco, Pallina y Catarí, éste último que desemboca sobre la Bahía. Varios métodos para evaluar las condiciones tróficas de la Bahía han sido aplicados y han permitido demostrar dos zonas características presentes, una de condiciones oligotróficas y la otra con características eutróficas. Se detectaron asimismo, las concentraciones de nitrógeno total y fósforo total que sirvieron para detectar las condiciones de eutrofización y el importante nivel de carga de estos elementos que se están transportando hasta el Lago Titicaca. Complementariamente datos de concentración de Oxígeno Disuelto, la Demanda Química de Oxígeno y Clorofila-a fueron determinados. (Vega y Paz, 2014, p.1)

### **EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA DIVERSIDAD DE FITOPLANCTON EN AGUAS EUTRÓFICAS DEL LAGO TITICACA (BOLIVIA) Y SU USO COMO INDICADOR DEL GRADO DE CONTAMINACIÓN.**

Este trabajo habla de la evaluación de la diversidad de fitoplancton en aguas eutróficas del Lago Titicaca, correspondientes a cuatro sitios donde se presentan procesos eutróficos localizados, debidos a las diferentes actividades productivas (ganadería, agricultura, cría de peces y turismo). También se comparó la equitatividad de la comunidad para cada caso. Los resultados mostraron un avance diferencial en el desarrollo del proceso de eutrofización, en función a la diversidad de cada sitio y a la predominancia de géneros clave. Los resultados

obtenidos proporcionan datos valiosos sobre la pérdida de biodiversidad. (Fontúrbel, Molina y Richart., 2005, p.1)

### **CONTAMINACIÓN DE LA BAHÍA DE COHANA, LAGO TITICACA (BOLIVIA): DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES PARA PROMOVER SU RECUPERACIÓN.**

El trabajo habla de un breve análisis sobre la problemática de contaminación de la cuenca del Río Katari y su repercusión sobre la Bahía de Cohana. A partir de la conformación de un equipo de investigadores entre el IE y el IRD, en base a previas experiencias de este equipo, se resumirán las diferentes estrategias de evaluación y mitigación ante las alteraciones antrópicas en el Lago Menor del Titicaca. (Molina, Lazzaro, Guédron y Achá, 2017, p.66)

### **CONTAMINACIÓN AMBIENTAL Y CULTURAL EN EL LAGO TITICACA: ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS.**

El objetivo central del trabajo realizado entre 2003 y 2006 en la parte boliviana del Lago Titicaca, fue conocer y describir la dinámica ambiental y social del proceso eutrófico, en base al estudio extensivo de cuatro estaciones experimentales, a fin de evaluar el estado actual y las perspectivas futuras del ecosistema. Sin embargo este texto incluye también la transversal social y cultural asociada a la problemática ambiental puesto que son dos variables macro íntimamente relacionadas cuya interacción es determinante para comprender el problema en su dimensión real. (Fontúrbel, 2008, p.16)

### **1.1.2. Aplicación de técnicas de teledetección**

#### **APLICACIÓN DE PERCEPCIÓN REMOTA PARA LA DETECCIÓN DE FLORECIMIENTOS DE ALGAS EN VALLE DE BRAVO – MÉXICO.**

Este trabajo se refiere a la aplicación de una nueva metodología de Percepción Remota en conjunto con la determinación de biomasa algal, como sistema de monitoreo para la detección de proliferaciones algales.

A partir de los estudios realizados sobre la calidad del agua en la presa de Valle de Bravo- México y los efectuados sobre Percepción Remota en la calidad del agua en este país y en el mundo, se propuso como parte de la metodología a seguir, iniciar con el procesamiento y análisis digital de imágenes del embalse, obtenidas del Satélite LandSat 7, manipuladas con el software IDRISI Selva para agrupar los diferentes datos de éstas, en clases espectrales y definir puntos de muestreo, apoyado del análisis digital multitemporal del embalse (análisis digital de cada mes, dos años antes al día a realizarse el muestreo) que indica como las agrupaciones de píxeles, no responde a determinada zona, sino que se localizan según la época del año en distinto lugar del embalse. (Oliveros, 2014, p.9)

#### **PROPIEDADES ÓPTICAS Y TÉRMICAS DEL LAGO TITICACA A PARTIR DE IMÁGENES LANDSAT-8 Y MODIS.**

El presente trabajo habla del estudio de sistemas lacustres mediante teledetección espacial, por lo que resalta que este tipo de trabajos ha estado limitado por la inexistencia de sensores que combinaran la resolución espacial, radiométrica y espectral necesaria para la detección de los componentes ópticamente activos de las masas de agua. Es así que aprovechando el reciente lanzamiento de Landsat 8, abre nuevas posibilidades en este campo, al contar con una resolución radiométrica muy superior a los anteriores satélites de la serie Landsat, así como nuevas bandas específicas para el estudio del agua y de la atmósfera.

Con el objeto de explotar las capacidades de Landsat 8 en estudios limnológicos, se decidió probar algoritmos recientemente desarrollados para la estimación de la

concentración de Clorofila-a y de temperatura superficial en un lago tropical singular, como es el Lago Titicaca. Este gran lago alto andino se escogió por su interés intrínseco y porque permitía comparar los resultados de los algoritmos de Landsat 8 con los de MODIS, que es un sensor principalmente diseñado para aplicaciones oceanográficas (o terrestres con un enfoque global) y cuyos algoritmos han sido profusamente validados. (Jiménez, Llinares, Ruiz, Tenjo, Delegido, Sobrino y Moreno, 2015, p.3860)

## **ESTUDIO MULTITEMPORAL MEDIANTE TELEDETECCIÓN DE LA EUTROFIZACIÓN DE LA BAHÍA DE COHANA.**

El trabajo trata de uno de los parámetros empleados para analizar la calidad del agua en los lagos siendo esta la concentración de Clorofila-a. Es así que nos dice que este valor puede estar afectado por condiciones intrínsecas (dinámica del lago) o por la contribución de factores externos (aporte de nutrientes de ríos tributarios). A partir del análisis de la concentración de la Clorofila es posible determinar la presencia de contaminación. El Lago Titicaca es un sistema lacustre caracterizado por sus condiciones geográficas (emplazamiento, altura, dimensión, clima, etc.) y está formado por dos sub-cuencas: el Lago Mayor y el Lago Menor compartido territorialmente por Perú y Bolivia. La parte boliviana del Lago Menor se localiza en el departamento de La Paz, siendo el municipio de El Alto la zona urbana más próxima a este y que en las últimas décadas ha presenciado un incremento poblacional. El Lago Menor se caracteriza principalmente por su escasa profundidad y por la abundante presencia de macrófitas. A partir de imágenes MODIS Aqua se realizó un análisis de la concentración de la Clorofila-a en seis puntos localizados en el Lago Mayor y 5 en el Lago Menor en el período 2003 a 2014 durante dos momentos del año (abril y octubre).

Se realizó un análisis del *bloom* de fitoplancton ocurrido en el año 2015 durante los meses de marzo y abril, determinando como fecha de inicio del evento el día 28 de marzo. Además se analizó la posible influencia de la reflectividad del fondo en los datos de clorofila y se concluyó que no existe aporte considerable de acuerdo a los niveles de Clorofila registrados. (Pereira, 2015, p.1)

## **DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CLOROFILA A EN BAHÍA COHANA A PARTIR DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN.**

El trabajo consistió en determinar la concentración de Clorofila-a en la región de Bahía Cohana a partir de la reflectancia captada en las imágenes satelitales, como alternativa a los métodos tradicionales de determinación de esta variable, usando técnicas de análisis de correlación. Los datos empleados correspondieron a una imagen satelital Landsat 8 adquirida en fecha 15 de octubre de 2014 y datos de concentración de Clorofila-a determinada en campo a partir de un espectrofluorímetro, colectados en la misma fecha. El análisis de correlación tuvo tres tipos de variables explicativas; pixeles individuales, vecindario de pixeles y band ratios. Como resultados se obtuvieron correlaciones altamente significativas a través del uso de band ratios que relacionaban las bandas 4 y 3 de la imagen satelital, con coeficientes de Pearson de 0.8239 y 0.8199 para la relación banda3/banda 4 y banda 4/banda 3 respectivamente, finalmente se validaron los algoritmos obtenidos a través de un análisis de chi cuadrado, el cual arrojó con un 5 % de incertidumbre, que ambos algoritmos se ajustaban al comportamiento de Clorofila-a insitu, eligiéndose la relación banda 3/ banda 4, como la más significativa y que fue empleada para la elaboración del mapa final de concentración de Clorofila-a para el área de estudio, donde se puede evidenciar el estado de eutrofización en el que se encuentra, ya que se evidenciaron valores medios y altos de este parámetro. (Sosa, 2014, p.i)

## **DETERMINACIÓN DE COMPONENTES ÓPTICAMENTE ACTIVOS EN AGUAS CONTINENTALES A PARTIR DE IMÁGENES LANDSAT 8.**

Este trabajo trata de la investigación de nuevas posibilidades que abre la misión Landsat-8 en los estudios calidad de las aguas, se generó, mediante el modelo de transferencia radiativa HydroLight, una extensa base de datos de reflectividades, simuladas a partir de un amplio rango de concentraciones de constituyentes ópticamente activos de los cuerpos de agua.



Con los datos simulados se calcularon índices de bandas espectrales de Landsat-8, a partir de los cuales se obtuvieron modelos de regresión para la estimación de la transparencia del agua y la concentración de Clorofila-a. Para mejorar la capacidad predictiva de los modelos se realizó una clasificación previa de los espectros basada en su forma espectral.

Los modelos fueron validados utilizando datos medidos en varios lagos de España, destacando que, incluso en aguas claras con baja concentración de Clorofila-a, fue posible estimar las variables consideradas con un error aceptable para la mayoría de las posibles aplicaciones de los mapas de calidad. La aplicación de estos modelos supone un avance en el estudio de la calidad de las aguas continentales, ya que la resolución espacial de Landsat 8 (<30 m) permite estudiar cuerpos de agua de poca superficie, con un tiempo de revisita mínimo de 16 días. (*Tenjo, Ruiz, Delegido, Peña y Moreno, 2014, p.37*)

## **HERRAMIENTA PARA EL ESTUDIO DEL ESTADO DE EUTROFIZACIÓN DE MASAS DE AGUA CONTINENTALES.**

Este trabajo fue realizado a base de un estudio reciente utilizando las diferentes bandas del sensor Thematic Mapper (TM), consigue relacionar la Clorofila a, y la transparencia con la reflectividad de la banda 2, así como, las partículas en suspensión con la banda 4. Siendo posible utilizar estos modelos para masas de agua con características desde el extremo hipertrófico a oligotrófico.

En este trabajo se utilizan datos de una nueva campaña experimental en el Parque de L'Albufera para validar estas relaciones. Se comparan, en 15 puntos de muestreo, los valores medidos con los resultados obtenidos para cada parámetro utilizando el modelo. Los resultados de este análisis muestran la necesidad de redefinir esos modelos para adaptarlos a las condiciones de eutrofización de la zona experimental.

Se obtienen nuevos modelos de Clorofila-a, seston y transparencia, mejor adaptados a las condiciones de eutrofia de la zona de estudio. Los resultados

sobre L'Albufera muestran un error de estimación inferior al 12% para los tres parámetros analizados.

Este trabajo supone un paso más hacia la obtención de modelos que nos den información sobre el estado de calidad de aguas continentales sin tener que realizar medidas in situ. (Doña, Caselles, Sánchez, Ferril, y Camacho, 2010, p.40)

### **1.1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Uno de los problemas más preocupantes en los últimos tiempos es el de la contaminación ambiental; siendo el recurso agua uno de los más afectados, tomando en cuenta que tan solo el 3% del total que existe en nuestro planeta, es agua dulce disponible (Pereira, 2015). El Lago Titicaca se encuentra dentro de este porcentaje, y está atravesando un serio problema con respecto a su estado trófico.

Los primeros indicios de esta problemática se detectó a fines de la década los 90's por la proliferación de la planta acuática conocida como lenteja de agua (*Lemna gibba*) (LIDEMA, 2012) y una composición atípica de algas microscópicas como un indicador del enriquecimiento por nitrógeno (Fontúrbel, 2006) en la parte del Lago Menor concretamente en el sector de bahía Cohana. Afectando así a los ecosistemas terrestres y acuáticos provocando la reducción de la biodiversidad y el deterioro de la calidad del agua. A comienzos de 2015, durante un evento extremo de una proliferación de micro algas del fitoplancton (comúnmente llamado "*bloom*" en inglés), se evidenció una elevada mortalidad de peces y ranas a consecuencia de la reducción de oxígeno del agua, producto de la contaminación orgánica (Molina *et al.* 2017). Actualmente debido a estos sucesos, la pesca ha desaparecido y la agricultura ha decaído por el deterioro de los suelos; esto ha provocado un rápido aumento de la ganadería, como alternativa de sobrevivencia. Sin embargo, la ganadería también está contribuyendo a la contaminación del Lago Menor y sus alrededores, amenazando con terminar los totorales. (LIDEMA, 2012)

Las principales causas que inciden en esta problemática, refieren principalmente a una contaminación antrópica; el río Katari que desemboca en bahía Cohana que forma parte del Lago Menor, conecta con dos principales ríos; Seco y Pallina, que atraviesan las áreas urbanas de El Alto y Viacha respectivamente. Las aguas residuales domésticas son vertidos en estos ríos, además de los desechos industriales y mineros. La ganadería y la agricultura también han contribuido en la afectación de este recurso, pues al verse desplazada la principal actividad productiva económica, gran parte de los pobladores han visto como opción la agricultura, de modo que usan fertilizantes que suelen infiltrar en suelo hasta ser arrastrados a las orillas del Lago. La ganadería por su parte, requiere de forraje para el alimento, al ver que esta no abastece, usan la totora como alimento del ganado, misma que ha ido desapareciendo. El turismo por su parte también es parte de los factores que inciden, por la mala o ausente planificación del mismo. Pues las casas de reposo u hoteles que están asentados en las orillas de las poblaciones ribereñas, no cuentan con un sistema de saneamiento, es decir que los desechos que generan los turistas van directamente al Lago Titicaca. Por otra parte se ha detectado que el vertido y quemado de los combustibles fósiles (principalmente de la lancha a motor) también afectan al cuerpo de agua. Smith & Smith (como citó en Fontúrbel, 2008) menciona que un solo litro de combustible disuelto en un millón de litros es suficiente para darle olor al agua y 8 litros en la misma cantidad de agua afectaría severamente la vida de los peces. Todos estos factores se centran en el problema del estado trófico del Lago Titicaca. Es importante resaltar que la eutrofización es básicamente el contenido excesivo de nutrientes en el cuerpo de agua, y este cuerpo de agua en especial el Lago Menor, es el más afectado por las causas mencionadas anteriormente.

#### **1.1.4. Formulación del problema**

- ¿Cuál es el estado trófico, actual del Lago Menor del Titicaca?
- ¿Cuál la importancia del uso de las técnicas de teledetección para el estudio de eutrofización en el Lago Menor del Titicaca?

- ¿De qué manera aportará este trabajo, a la identificación del grado de contaminación en el Lago Menor?

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Aplicar técnicas de teledetección para la calibración y validación de indicadores de eutrofización, en el sector boliviano del Lago Menor del Titicaca.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Seleccionar puntos de muestreo para la toma de datos en las expediciones.
- Calibrar los datos obtenidos del algoritmo propuesto con los datos que se tomó en campo.
- Validar el algoritmo redefinido, con los datos que se tomó en campo. Aplicándolo en una nueva cartografía.
- Identificar zonas con concentración de Clorofila-a.
- Identificar y cuantificar las poblaciones afectadas por eutrofización a partir de cartografía temática.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Muchos estudios han tratado de contribuir al estudio de esta problemática, con el propósito de aportar información, y esta a su vez pueda ser útil para concientizar a la población, sin embargo esta información en muchos casos se ha limitado en ser manejada en el área científica o técnica. No por que se la haya restringido para el público en general si no porque su interpretación no ha sido sencilla, por su forma de presentación, la cual puede ser muy técnica y complicada.

Gran parte de los estudios sobre contaminación y en específico de eutrofización, sugieren una suerte de procesos de laboratorio, siendo estos de alto costo y de tiempo extendido.

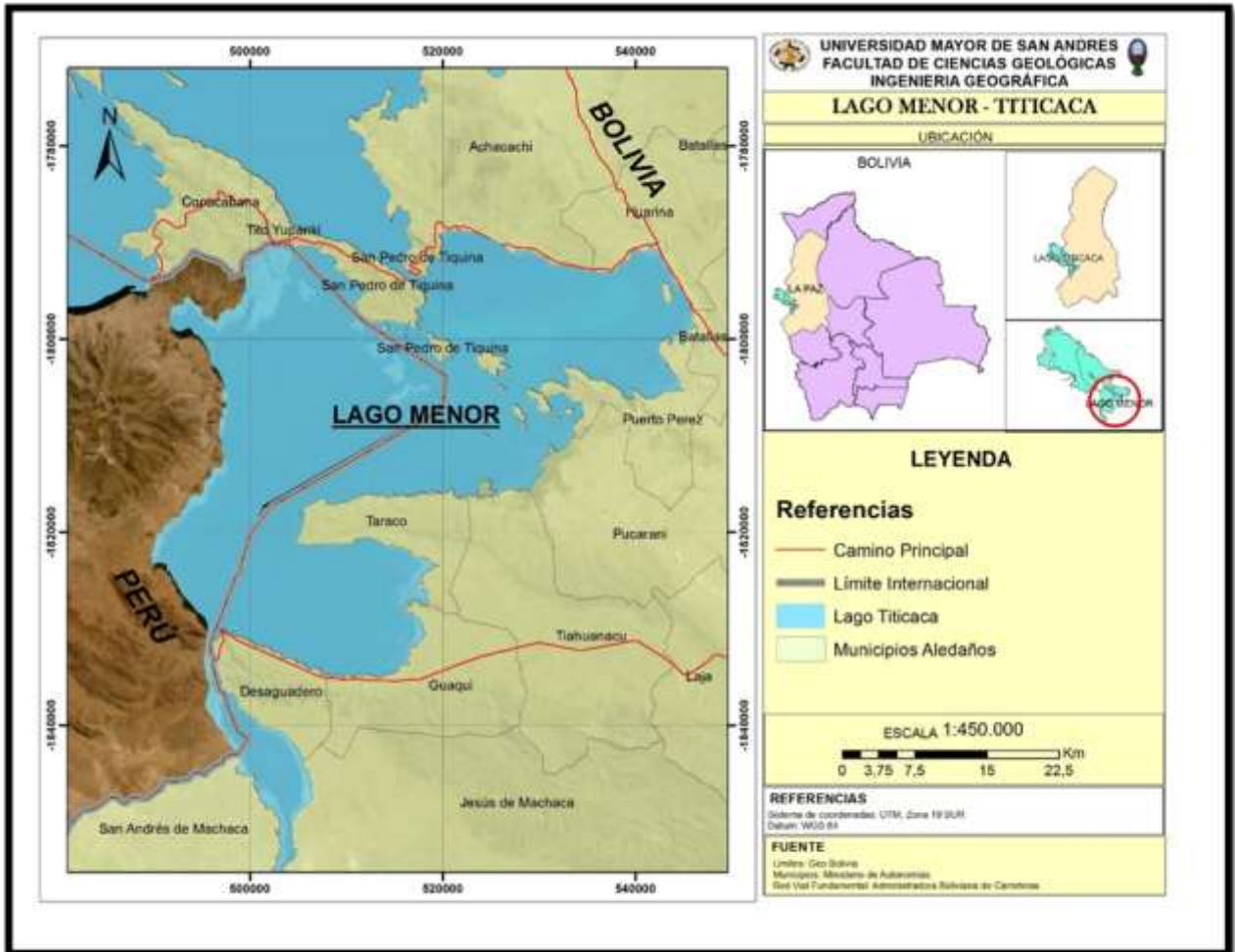
La aplicación de técnicas de teledetección sugiere suprimir la inversión económica de laboratorio y de tiempo (siendo este último, un factor que no tiene precio). Teniendo como herramienta en este caso en particular; imágenes de satélite Landsat 8 que pueden ser adquiridas de diferentes servidores en la red (USGS y INPE) y lo mejor, de manera gratuita. Esta metodología además de tener estas ventajas, ayuda a que los resultados obtenidos puedan ser expuestos de manera interactiva mediante mapas, mismos que puedan estar al alcance no solo para las personas responsables de la toma de decisiones, que debería ser el principal público interesado, sino también para el público en general, cambiando así una forma de presentación interactiva y practica a la vez.

#### **1.4. ALCANCE GEOGRÁFICO**

El presente trabajo tiene como área de estudio al Lago Titicaca, se ha trabajado específicamente en el área del Lago Menor (Fig. N°1).

En una descripción general está localizado en la meseta del collado, en los Andes Centrales; se encuentra entre los territorios de Bolivia y Perú y abarca una superficie de 8562 km<sup>2</sup>, con 15° 47' de latitud sur y 69° 22' de longitud oeste. Su profundidad máxima se estima en 283 m y su profundidad media sobre los 107 m. Está formado por dos cuerpos de agua separados por el estrecho de Tiquina. El más grande, Lago Mayor, está situado al norte con una superficie de 6450 km<sup>2</sup> y es el más profundo. El pequeño, Lago Menor, está situado al sur con una superficie de 2.112 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima de 45 m. Es el lago navegable más alto del mundo (altitud de 3812 m) y ocupa el lugar 19° del mundo por superficie. Bonansea (como cita en Jiménez, Llinares, Ruiz, Tenjo, Delegido, Sobrino, Moreno, 2015, p. 3861).

**Figura N° 1** Mapa de ubicación del área de estudio, Lago Menor del Titicaca.



*Fuente:* Elaboración propia.

## 1.5. ESCALA DE TRABAJO

El presente trabajo fue realizado con base en imágenes de satélite. Por su accesibilidad, resolución espacial y otras ventajas más, se ha seleccionado las imágenes Landsat 8; mismas que cuenta con una resolución espacial de 30 m. en cada pixel.

De acuerdo con la Asociación Cartográfica Internacional (como se citó en Chuvieco, 2002) la escala de trabajo límite más idónea para una imagen Landsat 8 TM, es de 1:100.000. En este entendido, es necesario hacer mención que los resultados serán presentados a esta escala de trabajo.

## **CAPITULO II**

### **2. MARCO TEÓRICO**

Es necesario para entrar en contexto, hacer referencia a los diferentes conceptos que se manejan en este trabajo. De modo que se pueda obtener una buena fundamentación científica y orientación técnica.

#### **2.1. EUTROFIZACIÓN**

En ecología el término eutrofización designa el enriquecimiento en nutrientes de un ecosistema. El uso más extendido se refiere específicamente al aporte más o menos masivo de nutrientes inorgánicos en un ecosistema acuático. Eutrofizado es aquel ecosistema o ambiente caracterizado por una abundancia anormalmente alta en nutrientes. (Olivos, 2010, p.4)

##### **2.1.1. Indicadores de eutrofización**

La entrada de materia orgánica y de nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno en la zona eufótica de los ecosistemas leníticos, es decir, la zona en la que la luz penetra lo suficiente para que dominen los procesos de fijación sobre los de consumo de carbono, altera temporalmente las condiciones de equilibrio de la masa de agua. Se produce un aumento de la turbidez y un cambio del color del agua hacia el verde debido al incremento de la producción primaria, es decir, la producción de las microalgas planctónicas. La fotosíntesis se activa con la proliferación del fitoplancton produciéndose una liberación de oxígeno tan intensa que las capas superficiales de la masa de agua quedan sobresaturadas y, en consecuencia parte de ese oxígeno es liberado a la atmósfera. (Doña, 2016, p.3)

Por lo que se cataloga como los principales indicadores de la eutrofización, a básicamente cuatro: El fósforo, el nitrógeno, la clorofila a- y la profundidad de Secchi. (Facultad de Tecnología UMSS, 2015).

### 2.1.2. Índices del estado trófico del agua

Desde el punto de vista trófico la calidad de las masas de agua se puede clasificar desde un estado oligotrófico (bajo nivel de nutrientes) a un estado hipertrófico (muy alto contenido de nutrientes). Se han desarrollado diferentes índices para poder realizar la ordenación de las masas de agua en función de su estado trófico, tales como el índice de Carlson en 1974 y en 1982 la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) estableció una clasificación de acuerdo a los valores que alcanzan la concentración de fósforo total, la concentración de Clorofila-a y la profundidad de visión del disco de Secchi (transparencia). (Doña, 2016, p.4)

**Tabla Nº 1** Valores límite para la clasificación trófica del agua de la OCDE

Categoría Trófica	TP mg/l	[Chl-a] media µg/l	[Chl-a] máxima µg	Secchi media	Secchi mínimo
Ultraoligotrófico	< 4,0	< 1,0	< 2,5	>12,0	> 6,0
Oligotrófico	< 10,0	< 2,5	< 8,0	>6,0	> 3,0
Mesotrófico	10 - 35	2,5 - 8	8 - 25	6 - 3	3 – 1,5
Eutrófico	35 - 100	8 - 25	25 - 75	3 – 1,5	1,5 – 0,7
Hipertrófico	>100	>25	>75	<1,5	<0,7

Fuente: Adaptación de Doña Monzó, 2016

### 2.1.3. Fitoplancton

El fitoplancton es el conjunto de microorganismos fotosintéticos que están en todas las aguas del planeta y son el inicio de la cadena alimenticia. Es el conjunto de algas y cianobacterias que habitan los sistemas acuáticos, contribuye a la producción primaria de dichos sistemas a través de la fotosíntesis. Se dividen de acuerdo a su tamaño en: Arrigo (como se cita en Oliveros, 2014)



- Picofitoplancton (0.2 – 2  $\mu\text{m}$ )
- Nanofitoplancton (2 – 20  $\mu\text{m}$ )
- Microfitoplancton (20 – 200  $\mu\text{m}$ )

### **2.1.3.1. Algas**

Constituyen un grupo diverso de organismos eucarióticos que llevan a cabo la fotosíntesis oxigénala, contienen Clorofila y por ello la mayoría son de color verde. Las algas muestran una considerable variación en cuanto a la estructura y química de sus paredes celulares. Algunas especies sobreviven en medios secos así como en hábitat ácidos, por debajo de pH 4-5. Las algas abundan en hábitats acuáticos tanto dulces como salados, también se encuentran en hábitats artificiales como peceras o piscinas. Su localización depende de la disponibilidad de nutrientes, de las longitudes de onda de la luz y de las superficies sobre las cuales crecen.

Las algas fotosintéticas se encuentran en toda la profundidad de la zona fótica (luminosa) de las grandes masas de agua. La Clorofila-a y los pigmentos accesorios que intervienen en la fotosíntesis son los que determinan los colores distintivos de las algas, para clasificarlas se utilizan criterios como la naturaleza de las clorofilas, los polímeros carbonados que utilizan como reserva, la estructura de la pared celular y el tipo de movilidad (Tabla N° 2). Algunas pueden presentar color marrón o rojo, debido a la presencia de xantofilas que enmascaran el color verde, por ejemplo las algas rojas que tienen en los cloroplastos ficobiliproteínas. (Oliveros, 2014, p. 18-19)

**Tabla N° 2** Clasificación de algas.

Grupo	Nombre	Morfología	Pigmento	Hábitat
<b>Chlorophyta</b>	Alga verde	Unicelular con ramificación	Clorofila a y b	Agua dulce y suelo
<b>Chrysophyta</b>	Diatomea	Unicelular	Clorofila a y c	Agua dulce, marina y
<b>Dinoflagellata</b>	Dinoflagelado	Unicelular con flagelado	Clorofila a y c	Marinas
<b>Phaeophyta</b>	Alga parda	Filamentosa con ramificación	Clorofila a y c, xantofilas	Marinas
<b>Rhodophyta</b>	Alga roja	Unicelular, filamentosa con ramificación	Clorofila a y d, ficocianina y ficoeritrina	Marinas

Nota: Hay cinco tipos principales de clorofila: a, b, c y d, más una molécula relacionada que se encuentra en procariontes llamada bacterioclorofila. En las plantas, la **clorofila a** y **clorofila b** son los principales pigmentos fotosintéticos.

Fuente: adaptación Oliveros, 2014

### a) Clorofila a

Es el pigmento que da color verde a los vegetales y los organismos autótrofos la utilizan para absorber la energía luminosa, siendo la más común la clorofila-a. La clorofila absorbe toda la luz roja, violeta y azul y refleja la verde. Debido a que los organismos fotótrofos poseen clorofila-a, su concentración proporciona un indicador de la biomasa fitoplanctónica. Medir la concentración de clorofila-a resulta mucho más sencillo que medir biomasa directamente, por lo que es un método muy utilizado para estimar la eutrofización de un sistema. (Oliveros, 2014, p.19)

## 2.2. PRINCIPIOS Y FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN

### 2.2.1. Definición

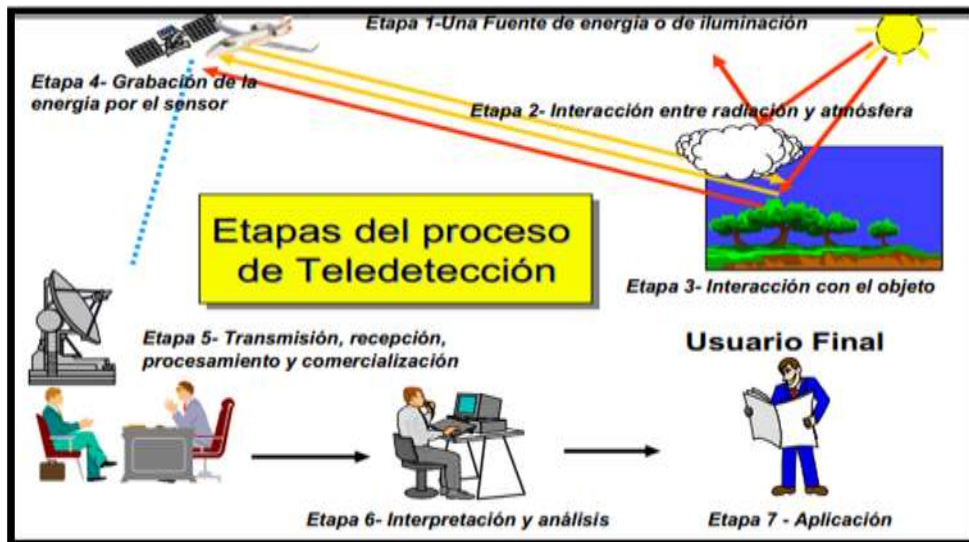
La teledetección o percepción remota puede definirse como la ciencia o arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto.

La teledetección es una técnica a través de la cual se obtiene información de un objeto sin tener contacto directo con él, esto es posible gracias a la relación sensor – cobertura, la cual en el caso de los barredores multiespectrales se expresa a través de una llamada radiación electromagnética. Esta relación se puede presentar en tres formas: emisión, reflexión y emisión- reflexión, el flujo de energía que se produce por alguna de estas formas va estar en función de la transmisión de energía térmica. (Comisión Nacional del Agua, 2005, p.8)

### 2.2.2. Componentes de un sistema de teledetección

Un sistema de teledetección está compuesto por los siguientes elementos:

**Figura Nº 2** Etapas y elementos de un sistema de teledetección.



Fuente: Copa, 2012

**Etapa 1.- Fuente de energía o iluminación.-** El principio de todo proceso de teledetección se encuentra necesariamente una fuente de energía para “iluminar” la superficie terrestre, que podrá ser el sol o una energía generada por el propio sensor, que se encuentra en una plataforma, ya sea un avión o satélite.

**Etapa 2- Interacción entre radiación y atmósfera.-** Durante el trayecto entre la fuente de energía y los objetos, la radiación interactúa con la atmósfera. Una segunda interacción ocurre durante el trayecto entre los objetos y el sensor.

**Etapa 3- Interacción con el objeto.-** Una vez llegada al objeto, la energía interactúa con la superficie del objeto y esta interacción depende de las características de la radiación y de la superficie.

**Etapa 4- Grabación de la energía por el sensor.-** Una vez que la energía es emitida por el objeto, esta debe ser captada a distancia (por un sensor que no está en contacto con el objeto) para ser grabada en el sistema del sensor/plataforma.

**Etapa 5- Transmisión, recepción, procesamiento.-** La energía grabada por el sensor es transmitida o entregada a una estación de recepción donde la información es traducida en imágenes (digitales o fotográficas), generalmente en relación directa con la comercialización.

**Etapa 6- Interpretación y análisis.-** Se requiere una interpretación visual y/o digital de la imagen procesada para extraer la información deseada sobre el objeto.

**Etapa 7- Aplicación.-** La última etapa del proceso consta en utilizar la información extraída de la imagen para conocer mejor el objeto de manera que permita la resolución de un problema en particular. (Copa, 2012, p.12)

### 2.2.3. Sensores Remotos

Los sensores remotos permiten capturar información de los objetos sin tener contacto directo con ellos, su uso en aplicaciones sobre recursos naturales tiene una larga historia, dado que proporcionan información confiable sobre superficies extensas con alta precisión y costos razonables. El uso de sensores remotos a jugado un papel importante en la construcción de mapas, planos, interpretación de recursos y sus superficies, planificación territorial y estudios urbanos.

#### 2.2.3.1. Clasificación de sensores

Existen dos tipos de sensores siendo estos (Fig. N°3):

- Sistema de percepción activo
- Sistema de percepción pasivo

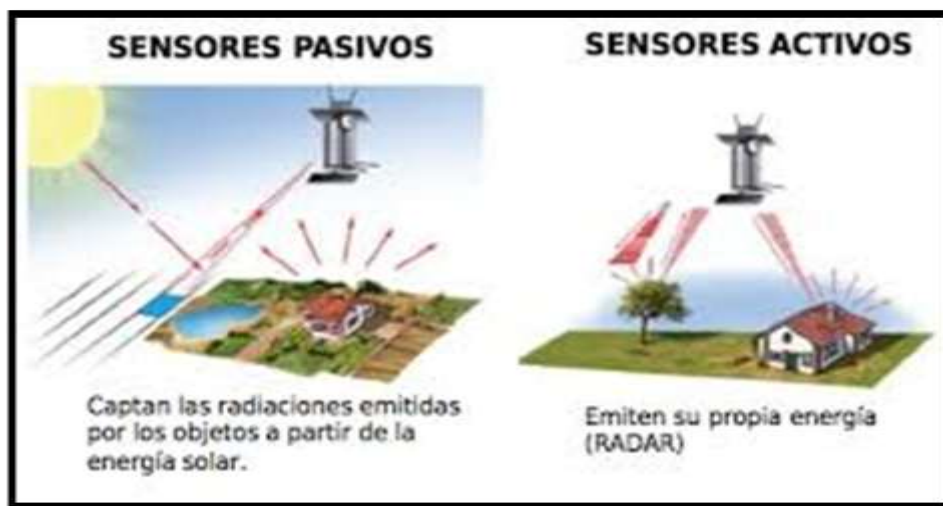
**Sistema de percepción activo:** los sistemas de percepción activo generan una señal, rebota en un objeto y miden las características de la señal reflejada. Un ejemplo de este tipo de percepción es el RADAR. Las ondas de radio son emitidas por un transmisor y son recogidas por un receptor después de haber sido reflejadas por un objeto. Las señales reflejadas pueden ser usadas por los sistemas radar para determinar la distancia y dirección de los objetos percibidos. También se pueden crear imágenes de los objetos. En este sistema no afecta la presencia de nubes.

Los sensores activos (por ejemplo, radar, sonar) son capaces de iluminar un objeto con su propia fuente de radiación. La iluminación va a inducir a un objeto a emitir radiación (fluorescencia) o causar que refleje la radiación producida por el sensor. Los sensores activos son utilizados frecuentemente cuando la radiación natural en una banda particular del espectro no es suficiente para iluminar adecuadamente al objetivo, esto es, la radiación natural está por debajo del umbral de la señal para ruido.

**Sistema de percepción pasivo:** Las imágenes creadas por los sistemas de percepción pasivo son de mayor valor en las aplicaciones de la percepción remota en la evaluación de los recursos naturales. Los sistemas pasivos simplemente reciben las señales emitidas naturalmente y reflejadas por los objetos percibidos. Estas señales, generadas por la radiación solar natural, pueden proveer una información muy rica sobre los objetos percibidos.

La resolución espectral de un sensor es su habilidad para diferenciar las longitudes de onda del espectro electromagnético. La resolución radiométrica es su habilidad para distinguir diferentes niveles de intensidad de la EMR en una banda espectral dada. (Comisión Nacional del Agua, 2005, p.15 - 16)

**Figura N° 3** Tipos de sensores.



Fuente: EcuRed, Sensor remoto

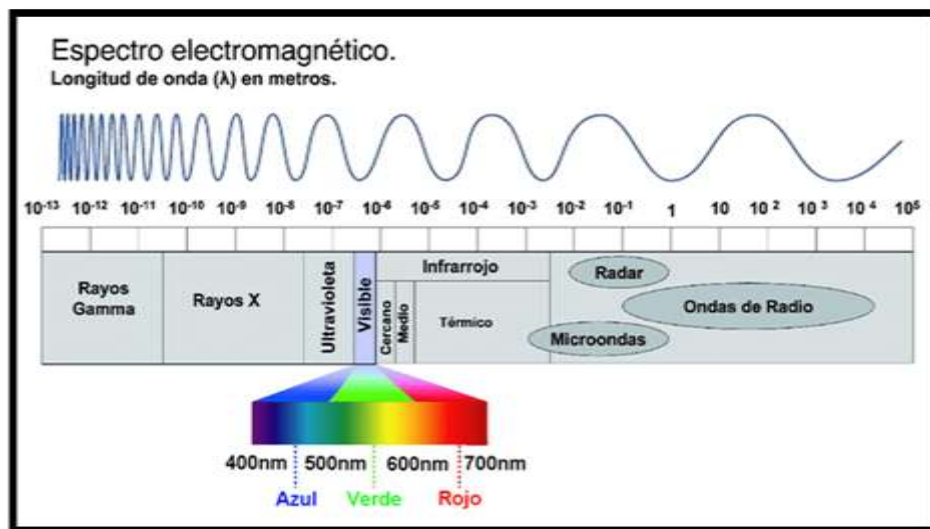
#### **2.2.4. Espectro electromagnético**

El flujo radiante detectado por los sensores remotos es descrito como una condición de una región o regiones del espectro electromagnético (Fig.N°4). El espectro electromagnético entero se extiende desde los rayos cósmicos a longitudes de onda corta y las radiofrecuencias bajas y longitudes de onda larga, aunque algunos sensores han realizado trabajos para longitudes de onda más cortas. Las longitudes de onda que generalmente son más usadas

están alrededor de 300 y 400 nanómetros. La región más empleada es la región del visible e infrarrojo cercano entre 400  $\mu\text{m}$  y 1  $\mu\text{m}$ . Las regiones de transmisión atmosférica y/o regiones infrarrojas son usadas por sistemas radiométricos que trabajan desde 3 nm hasta 15  $\mu\text{m}$  (infrarrojo termal). Las microondas y los sensores de radar operan en longitudes de onda de rango de 1 mm a 1m.

El espectro visible es aquel con el que estamos más familiarizados; es observado cuando la luz blanca es dispersada por la refracción en un arco iris. Todos los tipos de cobertura terrestre (tipos de roca, cuerpos de agua, tipos de vegetación, cascos urbanos etc.) absorben una parte de la radiación electromagnética, dándole una firma distinguible de otra a lo largo del espectro. Se puede analizar los datos de las imágenes provenientes de sensores remotos y crear hipótesis bastante precisas acerca de una cobertura gracias a su firma espectral. (Comisión Nacional del Agua, 2005, p.17)

**Figura N° 4** Espectro electromagnético.



Fuente: Copa, 2012

## Rangos del espectro electromagnético

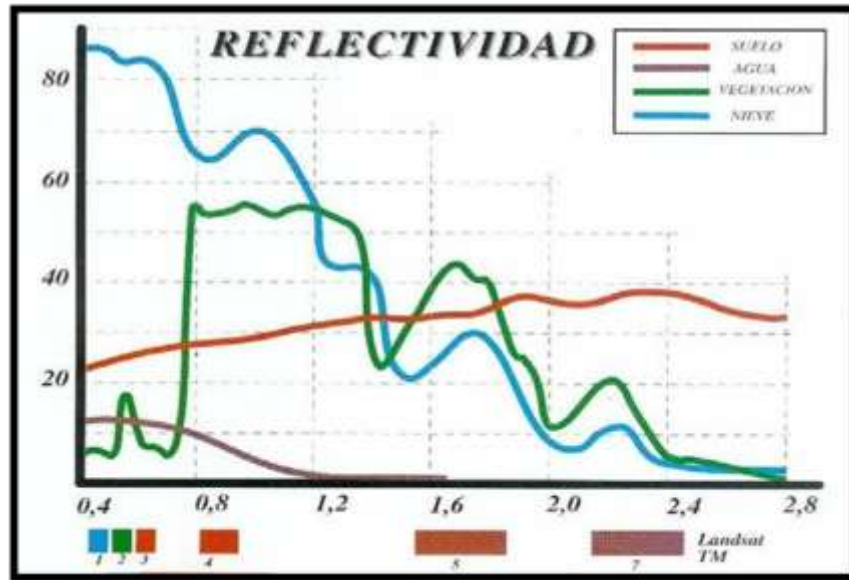
- Espectro Visible (0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ ). Es la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano. Suelen distinguirse tres longitudes de onda que generan el color azul (0.4-0.5  $\mu\text{m}$ ), verde (0.5-0.6  $\mu\text{m}$ ) y rojo (0.4-0.5  $\mu\text{m}$ ).
- Infrarrojo Cercano (0.7 a 1.3  $\mu\text{m}$ ). Es de especial importancia, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales.
- Infrarrojo Medio (1.3 a 8.0  $\mu\text{m}$ ). Se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- Infrarrojo Lejano o Térmico (8.0 a 14.0  $\mu\text{m}$ ). Incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
- Microondas (a partir de 1 nm). Energía bastante transparente a la cubierta nubosa. (Comisión Nacional del Agua, 2005, p.17)

### **2.2.5. Respuesta espectral**

Las diferentes coberturas de la superficie terrestre se comportan de forma distinta a la hora de reflejar la energía que les incide. Además, en un mismo cuerpo la distribución de la energía reflejada varía con las diferentes longitudes de onda (signatura o firma espectral), y presentará máximos y mínimos de reflectividad característicos de cada material (Fig. N°5). La medida de estas curvas desde satélite permite extraer gran cantidad de información sobre la cobertura de la superficie. (Doña, 2016, p.8)



**Figura Nº 5** Respuesta espectral de diferentes superficies



Fuente: Copa, 2012

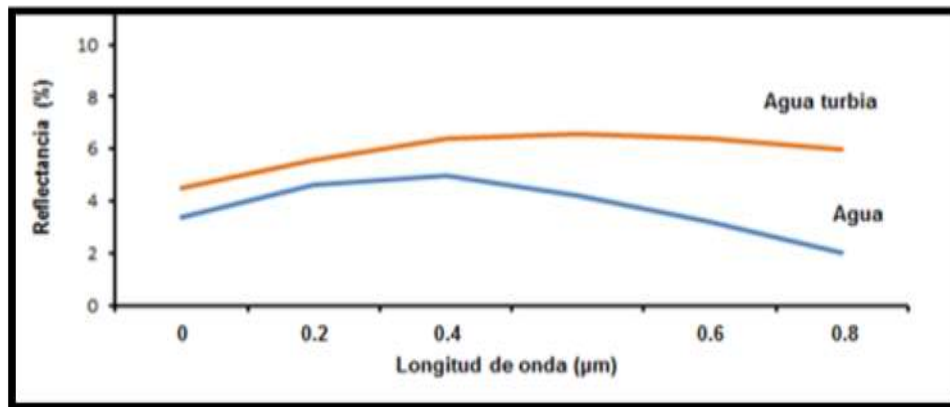
### 2.2.6. Características del agua en el espectro óptico

Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo su mayor absorptividad cuanto mayor sea su longitud de onda. La mayor reflectividad del agua clara se produce en azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano, donde es prácticamente nula. Lira (como se citó en Oliveros, 2014, p.30).

La región del espectro electromagnético que abarca la luz visible e infrarrojo se utiliza para detectar los indicadores antes mencionados.

La variabilidad del agua se detecta mejor en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), que se relacionan con la profundidad, el contenido de materiales suspendidos (Clorofila, arcilla y nutrientes) y rugosidad de superficie. (Fig.Nº6)

**Figura N° 6** Comportamiento espectral del agua.



Fuente: Oliveros, 2014.

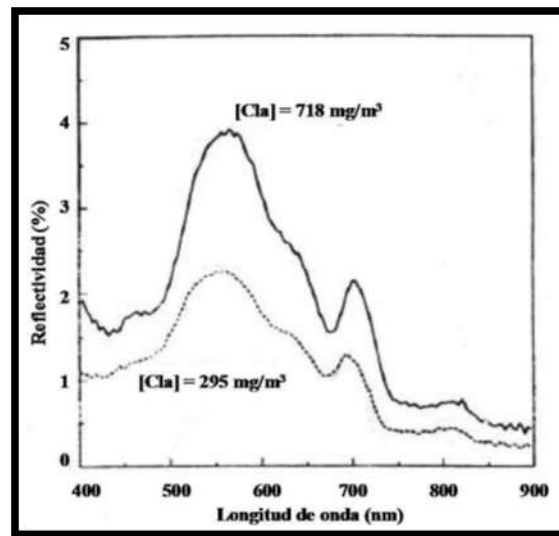
Las propiedades ópticas de las aguas naturales dependen de la concentración de sólidos suspendidos, fitoplancton y materia orgánica disuelta, parámetros altamente relacionados con la calidad del agua. La profundidad del agua influye directamente en el aporte de reflectividad derivado de los materiales de los fondos. En aguas poco profundas la reflectividad aumenta. En cuanto a la composición, diversos estudios han demostrado la posibilidad de emplear sensores especiales para cartografiar contenido de clorofila en el agua. Si el agua ofrece importantes concentraciones de clorofila, la reflectividad en el azul tiende a descender, aumentando en el verde. Meliá (como se citó en Oliveros, 2014, p. 30). Esto permite establecer una correlación, de signo negativo entre la reflectividad del agua en la banda azul y el contenido de clorofila, lo que facilita encontrar concentraciones de algas o el estudio de eutrofización de embalses.

### **2.2.7. Características de la Clorofila en el espectro óptico**

El espectro de la clorofila-a presenta dos picos de absorción en el intervalo espectral del visible, uno localizado entre 400-500 nm y el otro entre 600-700 nm, zonas correspondientes al azul y rojo del espectro. Además, presenta un máximo de reflectividad en el verde, motivo de su color.

Si se analiza el espectro de diferentes concentraciones de Clorofila-a en agua pura medida en un tanque de laboratorio (Fig.Nº7), se puede observar que la curva espectral presenta el máximo de reflectividad característico de la Clorofila-a en la zona del verde del espectro (550 nm) y un máximo relativo aproximadamente en 700 nm que podría corresponder a un mínimo de absorción de las algas en agua. Domínguez (como se citó en Doña, 2016, p. 9)

**Figura Nº 7** Comportamiento espectral de Clorofila-a.



Fuente: Doña, 2016

### 2.2.8. Imágenes de satélite

Las imágenes de satélite representan las formas de captura indirecta de la información espacial, almacenadas como matrices, cada elemento de imagen (llamado "píxel") tiene un valor proporcional a la reflectancia del suelo para el área de la imagen. Díaz (como se citó en Copa, 2012, p.23)

### 2.2.9. Niveles Digitales

Es la unidad visual más pequeña que se puede representar en una imagen de satélite. El sensor detecta la radiancia media de un objeto sobre la superficie equivalente al tamaño del píxel. Este valor se traduce a un valor numérico al que llamamos nivel digital, a partir del cual se realiza el tratamiento o procesamiento

digital de las imágenes. Cada píxel tiene un valor numérico entero o real, que corresponde al nivel digital (ND) percibido, el cual se traduce en un valor de gris en la pantalla o nivel visual. El arreglo de varios píxeles genera la imagen que se puede interpretar como una matriz con coordenadas fila, columna.

Por la naturaleza del proceso de adquisición de estas imágenes de satélite, los objetos geográficos están contenidos en la imagen y para individualizarlos, es necesario recurrir a técnicas de procesamiento. (Copa, 2012, p. 23)

### 2.2.10. Resoluciones de imágenes

La salida de radiación de la superficie terrestre (*emitida o reflejada*), es un fenómeno continuo en cuatro dimensiones (*espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia*). Un sensor debe muestrear en este continuo discretizándolo. El modo en cómo se llevara cabo define los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en Teledetección: (Copa, 2012, p. 23- 24)

- **Resolución espacial.** Tamaño que representa cada elemento de la imagen (píxel), es decir, el área espacial a que corresponde la información.
- **Resolución temporal.** Indica el intervalo de tiempo necesario entre cada imagen obtenida.
- **Resolución espectral.** Indica la anchura espectral y número de bandas para las cuales es sensible el sensor. Cada banda corresponde a un canal de información, de forma que, a mayor número de bandas más variables de caracterización.
- **Resolución radiométrica.** Es indicativa de la sensibilidad del sensor, es decir, su capacidad de diferenciar variaciones de intensidad de la señal captada. Se expresa mediante el número de bits necesarios para registrar

la información de cada píxel. Cuanto mayor sea la resolución radiométrica, la imagen captada contendrá un mayor nivel de detalle.

#### **2.2.11. Pre- procesamiento y corrección de imágenes de satélite**

El pre procesamiento de las imágenes, consiste en hacer las correcciones de las imágenes, con el fin de eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización o radiometría de los píxeles que la componen. Cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, presenta una serie de alteraciones radiométricas y geométricas debidas a muy variados factores, en el caso concreto de las imágenes espaciales, las deformaciones más frecuentes pueden agruparse en 4. Chuvieco (como se citó en Almeida, 2015, p.12)

- Distorsiones ordinarias por la plataforma
- Distorsiones provocadas por la rotación terrestre
- Distorsiones por el sensor
- Distorsiones provocadas por la atmosfera

Estas distorsiones, deben ser comprendidas para procesar los datos adecuadamente para posteriores análisis e interpretaciones. Consecuentemente la radiancia registrada por el sensor no es una representación exacta de la radiancia efectivamente reflejada por las coberturas. Esto significa que la imagen adquirida en formato numérico presenta una serie de anomalías con respecto a la escena real detectada. Estas anomalías están en la localización de los píxeles que componen la matriz de datos. Las operaciones de corrección pretenden minimizar estas alteraciones. Como producto se obtiene una imagen corregida que es lo más próximo posible, geométrica y radiométricamente, a la verdadera energía radiante y características espaciales del área de estudio. Gonzaga (como se citó en Almeida, 2015, p.12)

## **a) Correcciones**

### **Correcciones Radiométricas**

Este es un término muy genérico, que designa aquellas técnicas que modifican los ND originales, con objeto de acercarlos a los que habría presentes en la imagen caso de una recepción ideal. Dentro de este concepto se ha incluido el tratamiento de problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor, junto a la obtención de magnitudes físicas y corrección atmosférica de los datos. (Chuvieco, 2002. p. 259)

### **Correcciones geométricas**

Las correcciones geométricas de la imagen incluyen cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles que la forman. Por contraposición con las correcciones radiométricas, aquí no se pretende modificar los ND de los píxeles de la imagen, sino solo su posición, sus coordenadas. Gracias a tratarse de un formato digital, esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen. (Chuvieco, 2002. p. 292)

#### **2.2.12. Imágenes Landsat 8**

Las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. Una banda nueva (1) (azul-profundo) es útil para estudios costeros y aerosoles. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución (Tabla N°4). El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 183 kilómetros de este a oeste (106 km por 114 km). (Ariza, 2013, p.9)

**Tabla Nº 3** Especificaciones de las imágenes Landsat 8.

<b>Procesamiento:</b>	<b>Nivel 1 T-Corrección geométrica</b>
Tamaño de píxel:	Bandas OLI multiespectrales 1-7,9: 30-metros Banda OLI pancromática 8: 15-metros Bandas TIRS 10-11: tomadas en 100 metros, pero remuestreadas a 30 metros para que coincida con las bandas multiespectrales de OLI
Características de los datos:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato de datos GeoTIFF</li> <li>• Remuestreo por convolución cúbica (CC)</li> <li>• Norte arriba (MAP) de orientación</li> <li>• Proyección cartográfica: Universal Transversal Mercator (UTM) (estereográfica polar de la Antártida)</li> <li>• Datum al Sistema Geodésico Mundial (WGS) 84</li> <li>• 12 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para OLI</li> <li>• 41 metros de error circular, 90% de confianza exactitud global para TIRS</li> <li>• Los valores de píxel en 16 bits</li> </ul>
Entrega de datos:	Archivo comprimido .Tar.gz y de descarga a través de HTTP
Tamaño de archivo:	Aproximadamente 1 GB (comprimido), aproximadamente 2 GB (sin comprimir)

Fuente: USGS, 2013

**Tabla Nº 4** Distribución de las bandas OLI y TIRS.

<b>Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)  February 11, 2013</b>	<b>Bandas</b>	<b>longitud de onda (micrómetros)</b>	<b>Resolución (metros)</b>
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100	

Fuente: USGS, 2013

## **2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

### **2.3.1. Análisis de correlación**

El análisis de correlación emplea métodos para medir la significación del grado o intensidad de asociación entre dos o más variables. El concepto de correlación está estrechamente vinculado al concepto de regresión, pues, para que una ecuación de regresión sea razonable los puntos muestrales deben estar ceñidos a la ecuación de regresión; además el coeficiente de correlación debe ser: (Mendiburu, p. 9)

- Grande cuando el grado de asociación es alto (cerca de +1 o -1, y pequeño cuando es bajo, cerca de cero.
- Independiente de las unidades en que se miden las variable

#### **Coefficiente de correlación Lineal Simple ( r).**

Es un número que indica el grado o intensidad de asociación entre las variables X e Y. Su valor varía entre -1 y +1; esto es:

$$-1 \leq r \leq 1.$$

Si  $r = -1$ , la asociación es perfecta pero inversa; es decir, a valores altos de una variable le corresponde valores bajos a la otra variable, y viceversa.

Si  $r = +1$ , también la asociación es perfecta pero directa.

Si  $r = 0$ , no existe asociación entre las dos variables.

Luego puede verse que a medida que  $r$  se aproxime a -1 ó +1 la asociación es mayor, y cuando se aproxima a cero la asociación disminuye o desaparece.

#### **Coefficiente de determinación (R<sup>2</sup>)**

Mide el porcentaje de variación en la variable respuesta, explicada por la variable independiente.



De la descomposición de la suma de cuadrados total, se obtuvo:

$$SCT = SCR + SCE$$

SCR = Suma de cuadrados de la regresión.

SCE = Suma de cuadrados residual (error).

Dividiendo ambos miembros por la SCT, se tiene:

$$1 = SCR/SCT + SCE/SCT$$

De este resultado, se define el coeficiente de determinación como:

$$R^2 = 1 - SCE/SCT = SCR/SCT$$

$$R^2 = SC \text{ regresión} / SC \text{ total}$$

Como  $SCR \leq SCT$ , se deduce que  $0 \leq R^2 \leq 1$ .

### **Interpretación de $R^2$ :**

Se interpreta como una medida de ajuste de los datos observados y proporciona el porcentaje de la variación total explicada por la regresión. (Mendiburu, p. 9)

- $R^2$  es un valor positivo, expresado en porcentaje es menor de 100.

También, se puede obtener el  $R^2$  ajustado que es la relación entre cuadrados medios, así:

- $R^2 \text{ ajustado} = 1 - CME / CM \text{ Total}$ ;

Este valor podría ser negativo en algunos casos.

Lo que se espera que ambos  $R^2$ , resulten similares, para dar una confianza al coeficiente de determinación.

Para el ejemplo, resulta:

$$R^2 \text{ ajustado} = 1 - 70378 / (105526 / 9) = 0,39 \text{ y } R^2 = 1 - 56302,7 / 105525,86 = 0,46$$

## Análisis de regresión

El análisis de regresión consiste en emplear métodos que permitan determinar la mejor relación funcional entre dos o más variables concomitantes (o relacionadas).

El análisis de correlación estudia el grado de asociación de dos o más variables.

Una relación funcional matemáticamente hablando, está dada por:

$$Y = f(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m)$$

Donde:

- Y: Variable respuesta (o dependiente)
- $X_i$ : La  $i$ -ésima variable independiente ( $i=1, \dots, n$ )
- $\Theta_j$ : El  $j$ -ésimo parámetro en la función ( $j=1, \dots, m$ )
- F : La función

Para elegir una relación funcional particular como la representativa de la población bajo investigación, usualmente se procede:

- 1) Una consideración analítica del fenómeno que nos ocupa, y
- 2) Un examen de diagramas de dispersión.

Una vez decidido el tipo de función matemática que mejor se ajusta (o representa nuestro concepto de la relación exacta que existe entre las variables) se presenta el problema de elegir una expresión particular de esta familia de funciones; es decir, se ha postulado una cierta función como término del verdadero estado en la población y ahora es necesario estimar los parámetros de esta función (ajuste de curvas).

Como los valores de los parámetros no se pueden determinar sin errores por que los valores observados de la variable dependiente no concuerdan con los valores esperados, entonces la ecuación general replanteada, estadísticamente, sería:

$$Y = f(x_1, \dots, x_n; \theta_1, \dots, \theta_m) + \varepsilon$$

Donde  $\varepsilon$  representa el error cometido en el intento de observar la característica en estudio, en la cual muchos factores contribuyen al valor que asume  $\varepsilon$ .

### **a) Regresión lineal simple**

Cuando la relación funcional entre las variables dependiente (Y) e independiente (X) es una línea recta, se tiene una regresión lineal simple, dada por la ecuación

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

Donde:

- $\beta_0$ : El valor de la ordenada donde la línea de regresión se intersecta al eje Y.
- $\beta_1$ : El coeficiente de regresión poblacional (pendiente de la línea recta)
- $\varepsilon$ : El error.

Suposiciones de la regresión lineal

1. Los valores de la variable independiente X son "fijos".
2. La variable X se mide sin error (se desprecia el error de medición en X)
3. Existe una subpoblación de valores Y normalmente distribuido para cada valor de X.
4. Las variancias de las subpoblaciones de Y son todas iguales.
5. Todas las medias de las subpoblaciones de Y están sobre la misma recta.
6. Los valores de Y están normalmente distribuidos y son estadísticamente independientes.

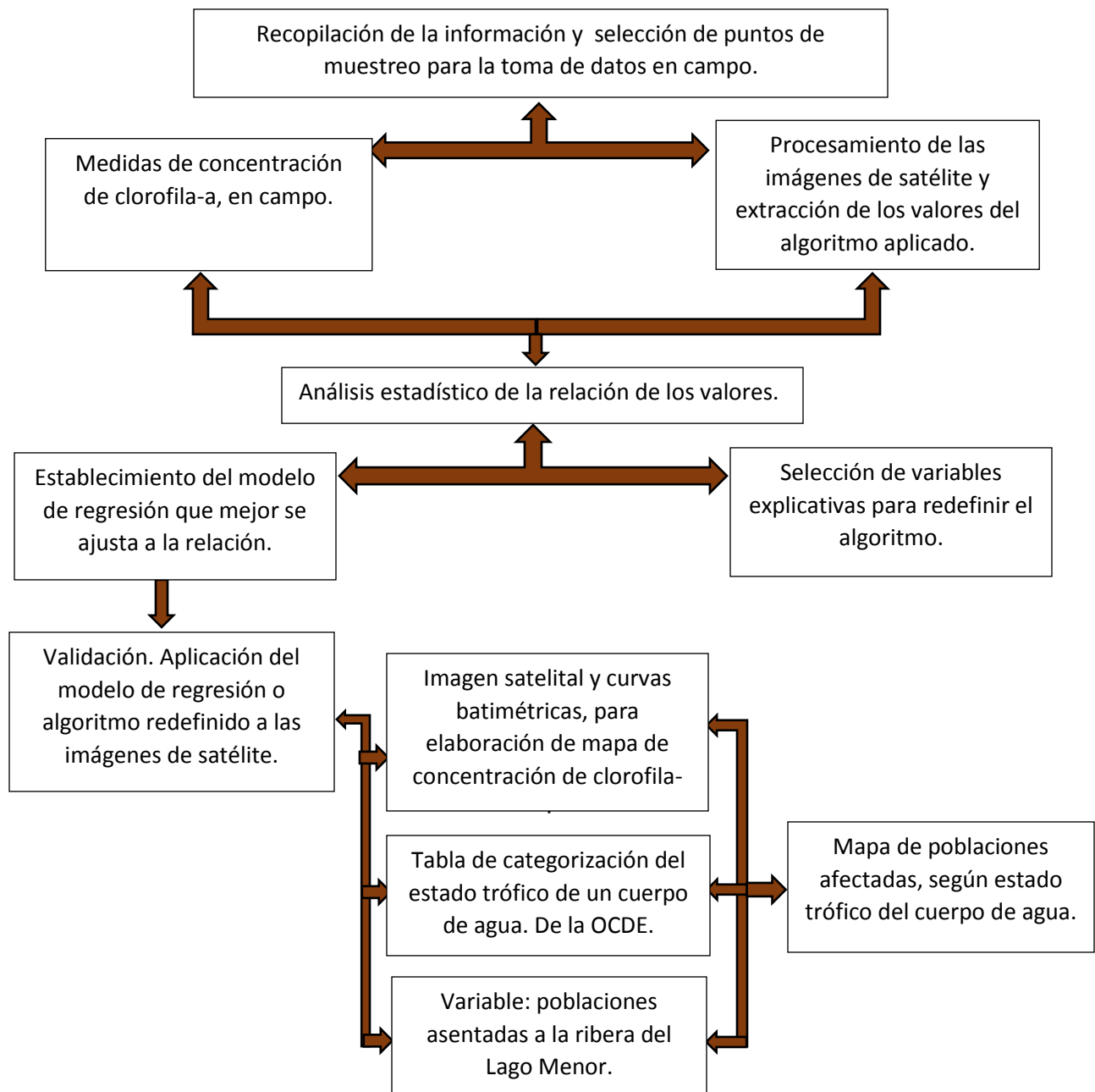
Los supuestos del 3 al 6 equivalen a decir que los errores son aleatorios, que se distribuyen normalmente con media cero y variancia  $\sigma^2$ . (Mendiburu, p. 2)

## CAPITULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo del proyecto muestra la organización del proceso de la investigación, particularmente en cuanto a la adquisición de los datos para su posterior análisis, con el fin de obtener resultados. Para ello se ha elaborado un flujograma de procedimientos (Fig.Nº8), que resume las actividades que se ha seguido.

**Figura Nº 8** Flujograma de procedimientos



### 3.1. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Para el presente proyecto se utilizó un enfoque de investigación mixto (cuantitativo y cualitativo), definido así por las características que presentan en su libro Hernández, Fernández y Baptista (2010):

Cuantitativo porque:

- Mide fenómenos
- Utiliza estadística
- Es probatorio
- Analiza la realidad objetiva
- Hace generalización de resultados
- Preciso
- Replica

Cualitativo porque:

- Explora los fenómenos en profundidad
- Se conduce básicamente en un ambiente natural
- Los significados se extraen de datos
- Es inductivo
- Recurrente
- Tiene riqueza interpretativa
- Contextualiza el fenómeno

#### 3.1.1. Cuantitativo

**Mide fenómenos:** está midiendo el contenido de clorofila-a en los puntos de muestreo, dentro del cuerpo del agua.

**Utiliza estadística:** para hacer la calibración y validación de los datos se ha recurrido a métodos estadísticos, usando un programa (SPSS) para la manipulación de los mismos.

**Es probatorio:** en el proceso se prueba diferentes maneras de procesar los datos de clorofila-a, para obtener mejores resultados.

**Analiza la realidad objetiva:** hace un análisis de la problemática eutrofización a partir de una realidad objetiva, porque toma un parámetro existente y medible para determinar el estado trófico del cuerpo de agua.

**Hace generalización de resultados:** es decir que aunque los datos tomados en campo fueron tomados en puntos precisos (georreferenciados anticipadamente) dentro del área de estudio y no fueron tomados en cantidad. El alcance de los resultados es a una escala mayor.

**Preciso:** dentro del proceso se adquieren resultados precisos y cuantificables del contenido de clorofila-a.

**Replica:** la metodología que se está aplicando puede ser replicada en otras áreas de estudio.

### **3.1.2. Cualitativo**

**Explora los fenómenos en profundidad:** para poder comprobar que el cuerpo de agua se encuentra eutrofizado, se trabaja con un indicador (clorofila-a) que es característico de eutrofización, y se adentra en su estudio comprobando su presencia usando diferentes técnicas.

**Se conduce básicamente un ambiente natural:** se designa como área de estudio al lago menor del Titicaca.

**Los significados se extraen de datos:** de acuerdo a los datos que se obtuvieron en campo se deduce cuan significativo será el trabajo.

**Es inductivo:** el proceso que se sigue es inductivo ya que a partir de la variable clorofila-a, se deduce si el cuerpo de agua se encuentra eutrofizado.

**Recurrente:** a partir de los datos obtenidos y una vez procesados se puede deducir que el comportamiento de la variable estudiada clorofila-a es recurrente.

**Contextualiza el fenómeno:** el fenómeno que se estudia es el de eutrofización y aunque este es un fenómeno de origen biológico, el trabajo contextualiza en el ámbito social.

**Riqueza interpretativa:** para contextualizar este estudio en el área social, se utiliza como herramienta interpretativa a los mapas temáticos.

### 3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación es del tipo múltiple (experimental y no experimental), por las siguientes características que también son basadas en Hernández (et al.).

Experimental porque:

- Manipula intencionalmente las variables
- Mide variables (dependientes)
- Hace control y validez

No experimental porque:

- Hace recolección de datos en un único momento
- Es exploratorio
- Descriptivo

#### 3.2.1. Experimental

**Manipula intencionalmente las variables:** se refiere a que se elige estudiar una variable en particular (Clorofila-a).

**Medición de variables (dependientes):** en el procesamiento de datos se cuenta con variables independiente (datos que ofrece la imagen satelital), y en torno a esta variable se hace la medición de clorofila-a tomados en campo.

**Hace control y validez:** controla el comportamiento de los datos extraídos de la imagen satelital y estos son validados con el trabajo campo.

#### 3.2.2. No experimental

**Hace recolección de datos en único momento:** para poder calibrar los datos recogidos en campo con los de la imagen de satelital, es necesario tomarlos el día de paso del satélite.

**Es exploratorio:** además que se realizó una vasta revisión bibliográfica para contextualizarse en el estudio también se visitó bastante el área de estudio.

**Descriptivo:** los resultados obtenidos ayudaran a la descripción del fenómeno.

### 3.3. TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

#### 3.3.1. Técnicas de recolección de datos

Para el presente trabajo se recopilaron datos mediante labor de campo a partir de:

##### 3.3.1.1. Sonda FluoroProbe BBE

Para la toma de datos de Clorofila-a se ha utilizado una sonda denominada FluoroProbe BBE (Fig. N°9) que realiza la medición de la concentración de Clorofila-a por fluorescencia in vivo en equivalencias (ug Cl-a/l), también realiza la medición de 4 clases taxonómicas de fitoplancton:

- Diatomeas y Dinoflagelados (sin distinción)
- Clorofitas (algas verdes)
- Criptofitas (pequeñas algas unicelulares)
- Cianobacterias (algas verde-azuladas)

Además determina la profundidad máxima. (Lazzaro, 2017).

**Figura N° 9** Sonda FluoroProbe BBE.



Fuente: Toma en trabajo de campo



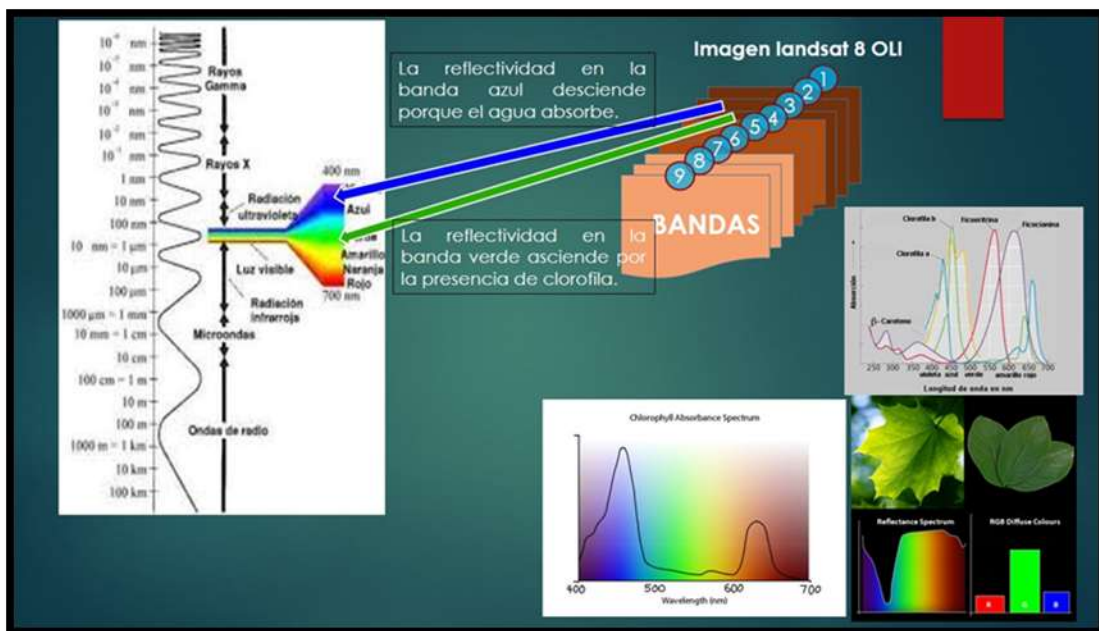
### 3.3.2. Técnicas de procesamiento de datos

El trabajo de gabinete que es tratamiento de datos, se realizó a partir de:

#### 3.3.2.1. Técnicas de teledetección

Para el presente trabajo se utilizó imágenes de satélite Landsat 8 OLI, su aplicación se fundamenta en la siguiente teoría: Cuando el agua ofrece importantes concentraciones de clorofila-a, la reflectividad en la banda azul del espectro visible tiende a descender, aumentando en el verde (Fig. N°10). Esto permite establecer una clara correlación, de signo negativo entre la reflectividad del agua en la banda azul y el contenido de Clorofila, lo que facilita localizar concentraciones de algas y de esta manera analizar ritmos de productividad neta de la superficie del cuerpo de agua. (Chuvieco, 2002, p.62)

Figura N° 10 Comportamiento de la Clorofila-a en el espectro visible.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2.2. Calibración de datos con programas

Los programas que se utilizaron para este trabajo fue:

- QGIS, ayudo con el pre-procesamiento y corrección de las imágenes de satélite. Sin embargo su mayor aporte fue con la aplicación de los modelos matemáticos de clorofila-a (propuesto y nuevo). En este programa también se realizó los mapas temáticos, que fueron los resultados finales del trabajo.
- ArcGis, su uso fue para la elaboración de mapas preliminares, que sirvieron como información para aportar al trabajo
- SPSS, su uso fue expresamente para realizar la calibración y validación de los datos de Clorofila-a.
- 

### 3.4. FASES METODOLÓGICAS

El proceso de trabajo se lo ha dividido en tres fases, que le dan formato, a la metodología. Estas fases son:

#### 3.4.1. Pre Campo

##### 3.4.1.1. Recopilación de la información

De acuerdo al tema planteado, se ha recopilado la información necesaria, para que pueda aportar al estudio del mismo:

#### a) Algoritmos propuestos

$$(\text{Chl. A}) = 4.46 (R560/R440) - 0.55$$

Fuente: (Tenjo C., 2014)

Como primera propuesta se tiene el algoritmo presentado por un estudio realizado en diferentes lagos de España. El objetivo de este estudio es la obtención de modelos para la estimación de Clorofila-a partir de reflectividades simuladas a las bandas de Landsat 8, utilizando el modelo de transferencia radiativa para agua HydroLight. Mobley (como citó en Tenjo et. al.). Dichas simulaciones se hicieron

teniendo en cuenta que las masas de agua continentales son bastante variables en su composición. Los métodos obtenidos fueron validados con datos reales de imágenes Landsat-8 y medidas in situ en diferentes lagos y embalses españoles.

$$(Clf.a) = [((1.06 \pm 0.14) * \ln (TM2)) + (1.80 \pm 0.22)] \text{ (mg/m}^3\text{)}$$

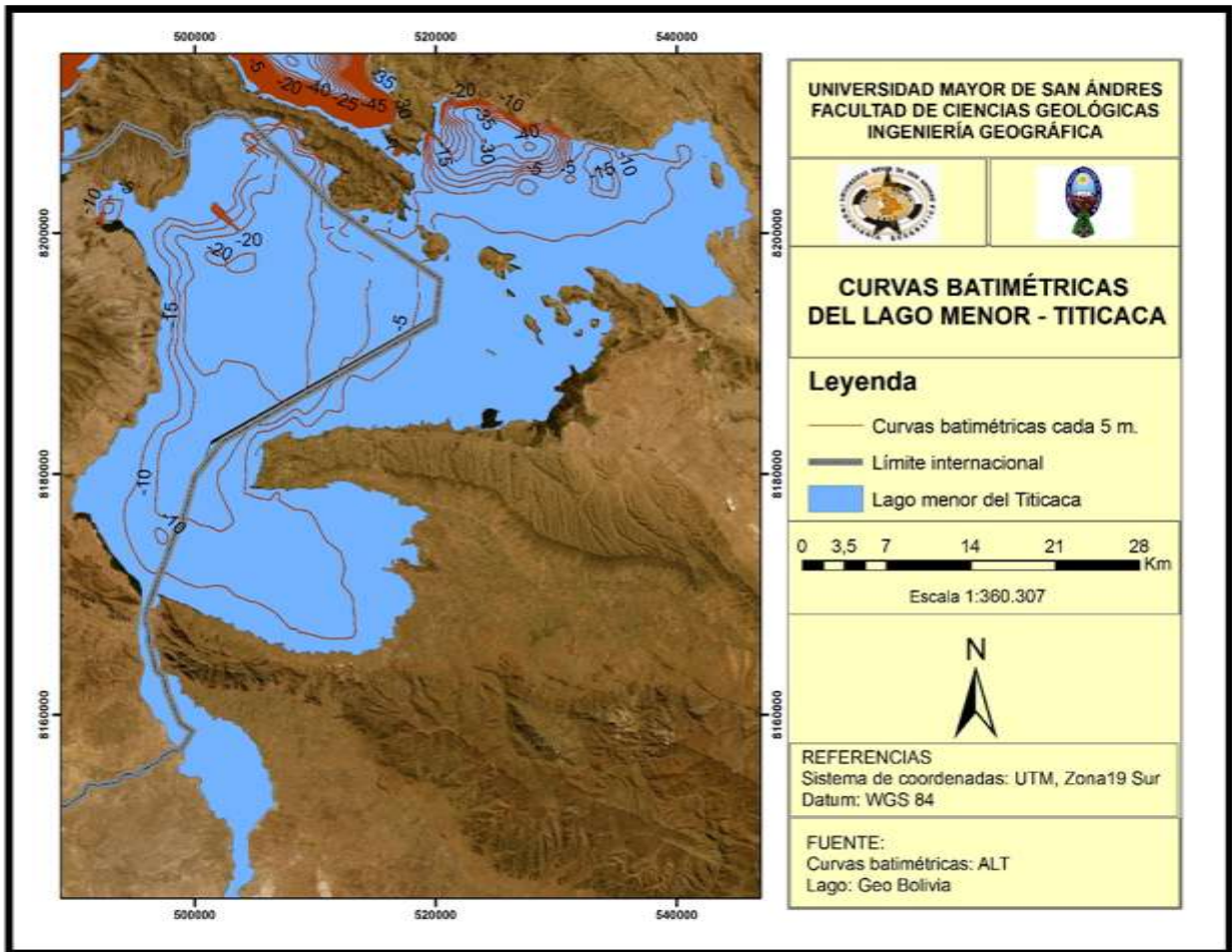
Fuente: (Doña C., 2009)

El segundo algoritmo propuesto ha sido aplicado, en un estudio en lago de La Albufera de Valencia –España. Con el propósito de catalogar si este cuerpo de agua se encuentra en estado de eutrofización, tomando como indicador la clorofila-a. La autora del presente algoritmo; ha realizado diferentes estudios en muchos otros lagos empleando como herramienta de estudio las imágenes Landsat 7, procediendo con la misma metodología. En este caso en particular ha redefinido el algoritmo con datos tomados en campo, obteniendo esta nueva propuesta.

#### **b) Cartografía**

- Lago Titicaca
- Poblaciones circundantes al Lago Menor
- Municipios circundantes al Lago menor
- Batimetría del Lago Menor

**Figura N° 11** Mapa de curvas batimétricas del Lago Menor del Titicaca.



Fuente: Elaboración propia

### 3.4.1.2. Selección e identificación de puntos para la toma de datos

El presente trabajo es uno de los resultados de un proyecto realizado en el Instituto de Investigaciones Geográficas (IIGEO) perteneciente a la carrera de Ingeniería Geográfica, el proyecto titula “Monitoreo Espacial de los efectos del cambio climático en el Lago Titicaca con imágenes de satélite”, que tuvo como Investigador principal a M.sc. Ing. Javier Ñunez. Este esfuerzo fue logrado en coordinación con el Instituto Francés de Investigación para el Desarrollo (IRD), teniendo como investigador principal al Dr. Xavier Lazzaro. Es así que finalmente se formó un equipo de investigadores con los que se logró alcanzar diferentes objetivos.

De modo que para la selección de puntos de muestreo se ha coordinado con el equipo de investigadores de este proyecto; la propuesta del Dr. Lazzaro de incursionar en la parte norte del Lago Menor, fue la más acertada, ya que su trabajo en este sector del Lago ya había tenido un avance, al tener estaciones ya georreferenciadas y visitadas anteriormente en expediciones particulares (Fig. N°12), llamadas estaciones de monitoreo. Es así que en base a esta primera propuesta identificamos los puntos de muestreo en campo.

**Figura N° 12** Estaciones propuesta Dr. Lazzaro.



Fuente: Expedición IIGEO de calibración Clorofila-a Landsat x BBE.

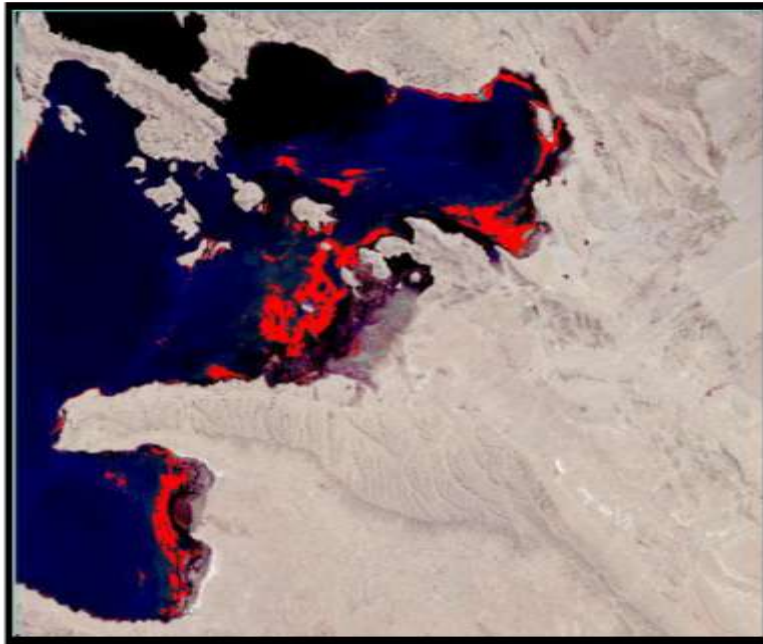
**Tabla N° 5** Coordenadas de estaciones propuestas Dr. Lazzaro.

<b>Nº</b>	<b>ESTACIÓN</b>	<b>LAT (ºS)</b>	<b>LONG (ºO)</b>
Estación de la red de monitoreo			
1	EOLH - Huatajata	16.215826	68.691224
2	EOLC – Chúa	16.210300	68.769200
3	E165	16.211000	68.613200
4	E164	16.222400	68.621400
5	E166	16.234400	68.610900
6	E163	16.244096	68.637081
7	E162	16.260600	68.648900
8	E167	16.274000	68.604000
9	E168	16.266122	68.621616
10	E169	16.327094	68.631983
11	EIC2	16.330501	68.718908
12	EIC1	16.328435	68.723367
13	E0I2	16.341853	68.732960
14	E0I1	16.331424	68.740405
15	EOL3 - Sukuta	16.311513	68.745000

Fuente: Expedición IIGEO de calibración Clorofila-a Landsat x BBE.

Como equipo de investigadores que formaron parte de este proyecto, también se realizó un precario tratamiento de imágenes de satélite, para poder identificar áreas en estado de eutrofización. La imagen que se escogió para este proceso fue una imagen Landsat 8 del mes de abril del 2015 (Fig. N°13). En el 2015 se reportó el evento llamado Bloom en el Lago Titicaca, entre los meses de marzo y abril, lo que favoreció en gran manera para poder identificar puntos posibles de alto contenido de Clorofila-a.

**Figura N° 13** Imagen satelital de temporada del Bloom de 2015



Fuente: Equipo de investigadores IIGEO

*Nota: las áreas que se ven de color rojo, son las se presentan como eutrofizadas.*

Una vez identificadas las áreas en estado de eutrofización, se elabora una tabla de coordenadas geográficas (Tabla N°6), con los probables puntos de muestreo, para la etapa de campo.

**Tabla N° 6** Coordenadas seleccionadas para toma de datos

Puntos	Estación	LAT (°S)	LONG (°O)
1	V1	16.218792°	68.667602°
2	V2	16.225800°	68.650200°
3	V3	16.214338°	68.699618°
4	V4	16.206265°	68.719025°
5	I1	16.229100°	68.686500°
6	I3	16.223600°	68.621100°
7	LC	16.207375°	68.762139°
8	LH	16.215833°	68.691111°
9	LB	16.239434°	68.681791°
10	156	16.290900°	68.745300°



11	D1	16.209457°	68.615388°
12	D2	16.232632°	68.606974°
13	D3	16.273513°	68.607739°
14	D4	16.278446°	68.610944°
15	D5	16.301309°	68.622907°
16	D6	16.304669°	68.627510°
17	D7	16.303389°	68.638979°
18	D8	16.311457°	68.639068°
19	D9	16.304807°	68.643640°
20	D10	16.305001°	68.650356°
21	D11	16.303954°	68.658791°
22	D12	16.303503°	68.665527°

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.2. Campo

Con el objetivo de calibrar los datos tomados en campo con los datos que ofrecen las imágenes del satélite Landsat 8, se ha seleccionado estratégicamente las fechas de salida de campo; empezando esta etapa en fecha 1 de abril hasta el 19 de mayo del 2018. De modo que esta etapa consta de 4 expediciones al área de estudio.

Es importante remarcar que las imágenes Landsat 8, cuentan con una resolución temporal de 16 días, lo que indica que el paso del satélite sobre del área de estudio es cada 16 días, por ello las fechas de salida de campo son fechas del paso del satélite.



### 3.4.2.1 Expediciones y toma de datos

#### Expedición de fecha 1 de abril de 2018

Tabla N° 7 Coordenadas de puntos de toma de datos

Punto	Estación	Coordenadas	
		Latitud	Longitud
P1	D12	16.303503°	68.665527°
P2	D11	16.303954°	68.658791°
P3	D10	16.305001°	68.650356°
P4	D8	16.311457°	68.639068°
P5	D6	16.304669°	68.627510°
P6	D5	16.301309°	68.622907°
P7	D4	16.278446°	68.610944°
P8	D3	16.273513°	68.607739°
P9	D2	16.232632°	68.606974°

Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 14 (Izq.) y Figura N° 15(Der.) Equipos para toma de datos



Nota: (Izq.) Dr. Lazzaro alistando espectro radiómetro sub acuático y sonda FluoroProbe BBE. (Der.) Sonda FluoroProbe BBE tomando datos.

**Expedición de fecha 17 de abril de 2018**

**Tabla Nº 8** Coordenadas de puntos de toma de datos.

Coordenadas			
Punto	Estación	Latitud	Longitud
1	V3	16.214338°	68.699618°
2	V4	16.206265°	68.719025°
3	LC	16.207375°	68.762139°
4	D8	16.311460°	68.639073°
5	D4	16.222900°	68.596400°

Fuente: Elaboración propia.

**Figura Nº 16** (Izq.) y **Figura Nº 17**(Der.) Toma de datos con sonda FluoroProbe BBE.



*Nota: (Izq.) Toma de datos con el equipo. (Der.) Sonda FluoroProbe BBE (de color negro) y sonda multiparametro (de color blanco).*

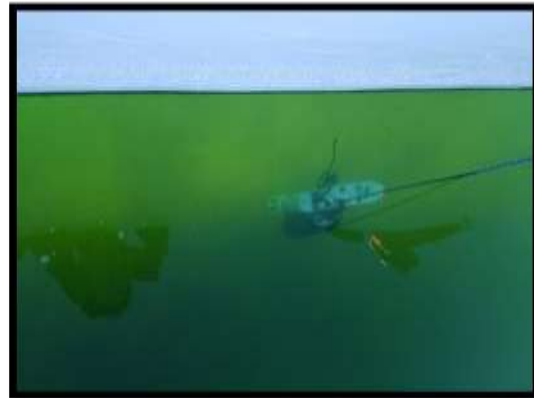
**Expedición de fecha 3 de mayo de 2018**

**Tabla Nº 9** Coordenadas de puntos de toma de datos

Coordenadas			
Punto	Estación	Latitud	Longitud
1	D12	16.30454°	68.66597°
2	D8	16.31121°	68.638505°
3	D3	16.27261°	68.605733°
4	D4	16.2229°	68.5964°
5	V3	16.2143°	68.6996°

Fuente: Elaboración propia.

**Figura Nº 18** (Izq.) y **Figura Nº 19** (Der.) Apunte de datos y sonda FluoroProbe BBE.



*Nota: (Izq.) Apuntes de datos tomados. (Der.) Sonda FluoroProbe BBE, junto a sonda multiparametro entrando en agua.*

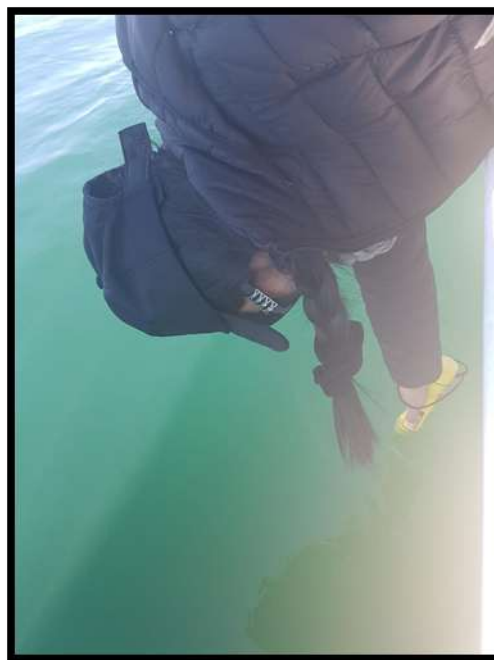
## Expedición de fecha 19 de mayo de 2018

**Tabla N° 10** Coordenadas de puntos de toma de datos.

Coordenadas			
Punto	Estación	Latitud	Longitud
1	LH	16.21598°	68. 69122°
2	LC	16.207375°	68. 762139°
3	156	16.290900°	68. 748300°
4	D12	16.303504°	68. 665531°

Fuente: Elaboración propia.

**Figura N° 20** (Izq.) y **Figura N° 21** (Der.) Espectro radiómetro sub-acuático, toma de profundidad en el punto.



*Nota: (Izq.) Espectro radiómetro sub acuático, que ayuda a medir la reflectividad (parte del equipo). (Der.) Toma de la profundidad en cada punto, con el profundímetro.*

**Tabla N° 11** Cuadro resumen de puntos tomados en etapa de campo.

Punto	Estación	Fecha	Coordenadas		Clorofila-a superficial	Clorofila-a máxima	Clorofila-a media	Profundidad (m)
			Latitud S°	Longitud O°				
P1	D12	01/04/2018	16.303503°	68.665527°	2,79	5,32	4,03	2,1
P2	D11	01/04/2018	16.303954°	68.658791°	3,46	3,51	3,23	1,8
P3	D10	01/04/2018	16.305001°	68.650356°	1,96	2,67	2,04	1,9
P4	D8	01/04/2018	16.311457°	68.639068°	4,80	7,63	4,94	1,1
P5	D6	01/04/2018	16.304669°	68.627510°	2,89	3,15	3,03	1,3
P6	D5	01/04/2018	16.301309°	68.622907°	3,65	7,55	3,65	1,7
P7	D4	01/04/2018	16.278446°	68.610944°	2,18	2,40	2,23	1,9
P8	D3	01/04/2018	16.273513°	68.607739°	2,93	3,13	2,74	2
P9	D2	01/04/2018	16.232632°	68.606974°	3,41	3,93	3,60	3,6
P10	V3	17/04/2018	16.214338°	68.699618°	4,43	10,83	6,33	1,6
P11	V4	17/04/2018	16.206265°	68.719025°	2,92	2,92	2,66	1,5
P12	LC	17/04/2018	16.207375°	68.762139°	1,39	13,92	7,07	40,2
P13	D8	17/04/2018	16.311460°	68.639073°	1,20	4,24	2,70	1,3
P14	D4	17/04/2018	16.222900°	68.596400°	15,22	19,38	17,33	1,8
P15	D12	03/05/2018	16.30454°	68.66597°	0,96	8,95	1,58	2
P16	D8	03/05/2018	16.31121°	68.638505°	1,51	2,99	2,07	1,3
P17	D3	03/05/2018	16.27261°	68.605733°	2,75	3,70	3,33	2,5
P18	D4	03/05/2018	16.2229°	68.5964°	13,58	17,38	16,76	1,5
P19	V3	03/05/2018	16.2143°	68.6996°	4,00	5,06	5,03	2,2
P20	LH	19/05/2018	16.21598°	68.69122°	4,21	5,99	4,82	4,8
P21	LC	19/05/2018	16.207375°	68.762139°	1,29	15,61	13,84	44,8
P22	156	19/05/2018	16.290900°	68.748300°	2,05	6,69	2,52	3,8
P23	D12	19/05/2018	16.303504°	68.665531°	1,21	1,85	1,41	2,2

Fuente: Elaboración propia, datos de campo.

### 3.4.3. Post Campo

Con la información recogida se procedió a cumplir con parte de los objetivos específicos trazados.

#### 3.4.3.1. Descarga y pre-procesamiento de imágenes de satélite

Se ha obtenido las imágenes de satélite de la plataforma de USGS sigla en inglés (Servicio Geológico de los Estados Unidos). Las cuatro imágenes empleadas

corresponden al path y row 01 y 071, respectivamente, y a las fechas 01/04/2018, 17/04/2018, 03/05/2018 y 19/05/2018 (coincidentes con las medidas en campo).

Es importante hacer notar que para la corrección de las imágenes de satélite Landsat 8, contar los metadatos, estos vienen en un archivo MTL, al momento de la descarga de la imagen.

#### **a) Corrección geométrica**

En el acápite de marco teórico se ha mencionado que la corrección geométrica es básicamente ponerle coordenadas a la imagen satelital, dándole así una posición correcta. Una de las bondades de las imágenes Landsat 8, es que estas ya están georreferenciadas, de modo que este paso no fue necesario para este trabajo.

#### **b) Corrección radiométrica**

##### **Conversión a Reflectancia TOA**

Los datos de las imágenes Landsat 8 pueden ser convertidos a valores de reflectancia (TOA) en el techo de la atmósfera (Fig. N°22), usando para ello los coeficientes de reflectancia reescalados, suministrados en el archivo de metadatos MTL. La siguiente ecuación es usada para convertir los ND niveles digitales a valores de reflectancia:

$$\rho\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p$$

Donde:

$\rho\lambda'$  = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar. Note que  $\rho\lambda'$  no contiene una corrección por el ángulo solar.

$M_p$  = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x, donde x es el número de la banda).

$A_p$  = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x , donde x es el número de la banda).

$Q_{cal}$  = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de píxel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen. (Ariza, 2013, p.38)

### **Conversión a Reflectancia TOA con corrección angular**

El cálculo de la reflectancia real de una cubierta captada por un sensor espacial está condicionado por el comportamiento de la atmósfera, así como del ángulo de observación.

De esta manera, la reflectancia en el techo de la atmósfera TOA con una corrección para el ángulo solar es entonces:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\cos(\theta_{SZ})} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\sin(\theta_{SE})}$$

Donde:

$\rho_{\lambda}$  = Es el valor reflectancia planetaria o en el techo de la atmósfera TOA, con corrección por ángulo solar.

$\theta_{se}$  = Es el ángulo de elevación solar. El ángulo de elevación solar del centro de la escena es provisto en el metadato de la imagen (SUN\_ELEVATION).

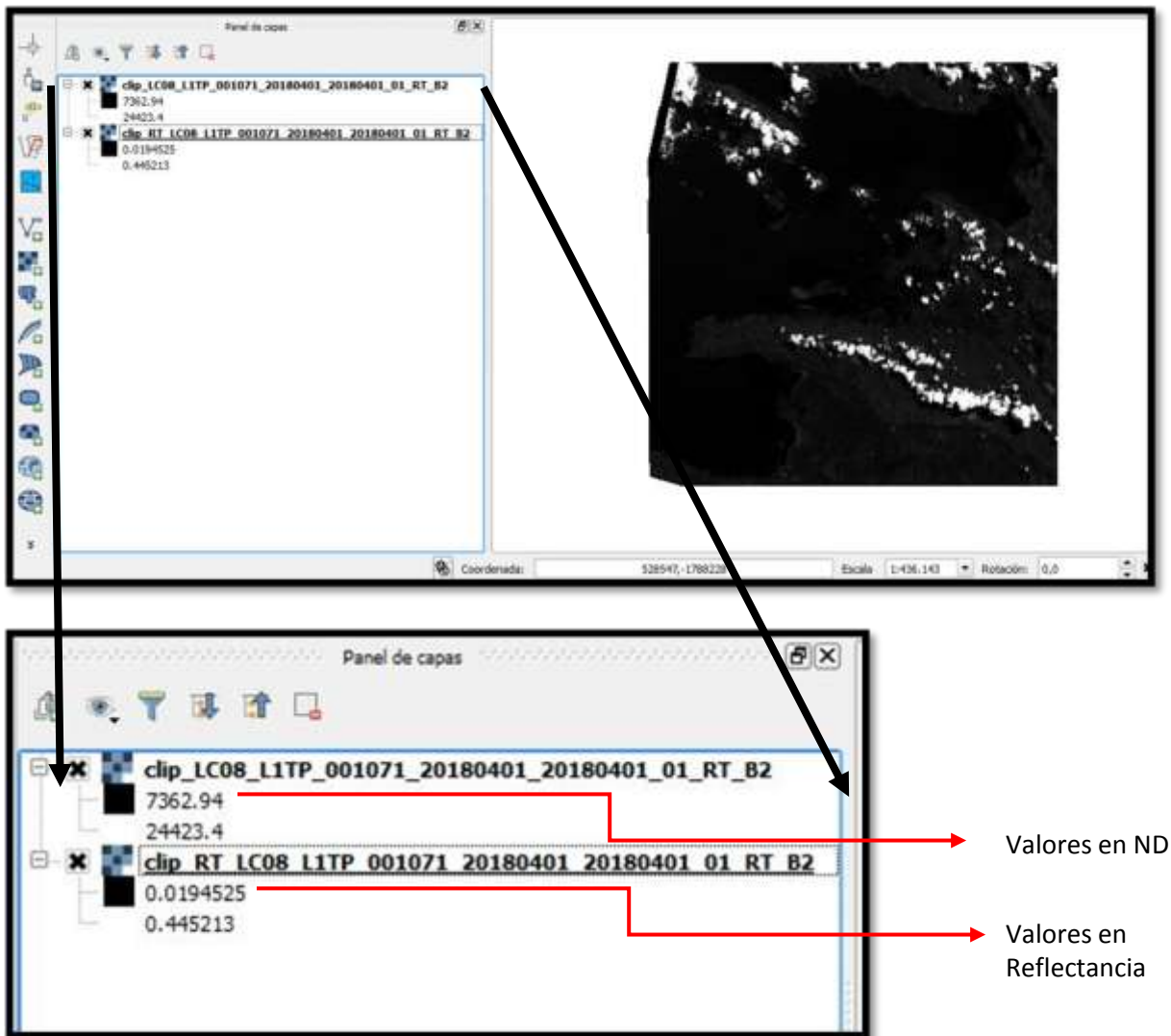
$\theta_{sz}$  = Es el ángulo solar zenith local.

Es el ángulo solar zenith local, corresponde al ángulo complementario de observación y puede obtenerse de la siguiente manera:

$\theta_{sz} = 90^{\circ} - \theta_{se}$ . (Ariza, 2013, p.40)

Una vez hecha las correcciones que son necesarias para la aplicación del algoritmo propuesto a la imagen, se ha obtenido:

**Figura N° 22** Imagen satelital con valores en ND llevados reflectancia.



Fuente: Elaboración propia.



## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Calibración con algoritmo propuesto

En las diferentes pruebas que se realizó con los algoritmos que se propuso en el capítulo III, se ha decidido trabajar con el modelo que propone C. Tenjo. Por las siguientes razones:

Es un modelo de transferencia radiativa para agua HydroLight. Mobley (como citó en Tenjo et. al.). Dichas simulaciones se hicieron teniendo en cuenta que las masas de agua continentales son bastante variables en su composición. Los métodos obtenidos fueron validados con datos reales de imágenes Landsat-8 y medidas in situ en diferentes lagos y embalses españoles.

Es un modelo sencillo de procesar en los diferentes programas de tratamiento de imágenes de satélite o SIG. Probablemente porque el modelo se basa en la ecuación de regresión lineal. Este último factor fue influyente en la decisión de poder trabajar con este algoritmo.

Este modelo ya ha sido aplicado en el Lago Titicaca, hace unos años atrás, mucho antes del evento del Bloom en 2015. De modo que es interesante volver a aplicarlo y ver qué resultados ofrece con los nuevos datos.

Fue el modelo que mejor se adaptó para hallar resultados más óptimos cercanos a la realidad.

El modelo tan solo utiliza en sus variables, 2 de las 11 bandas de la imagen satelital Landsat 8. Siendo estas las más importantes (banda azul y verde), para poder captar niveles de concentración de Clorofila-a.

De modo que el siguiente algoritmo es:

$$(Chl-a) = 4.46 (R560/R440) - 0.55 \text{ (mg/m}^3\text{)}$$

Donde:

Chl-a: es el valor de clorofila-a que ofrece la imagen satelital.

4.46: es una constante que presenta el algoritmo

R560: es la **banda verde** de la imagen satelital, en el entendido que esta banda, se encuentra entre el rango de 500 a 600 nm. en el espectro visible.

R440: es la **banda azul** de la imagen satelital, en el entendido que esta banda, se encuentra entre el rango de 400 a 500 nm. en el espectro visible.

0.55: es una constante que presenta el algoritmo.

Es importante resaltar que las unidades de Clorofila-a que ofrece el algoritmo son en miligramos sobre metro cubico (mg/m<sup>3</sup>) y las unidades que presentan los datos de Clorofila-a tomados en campo son en microgramos sobre litro (um/l), siendo estas unidades equivalentes.

De modo que se ha obtenido los mapas preliminares de cada salida (Fig. N° 23, 24, 25,26). Aplicando el algoritmo propuesto en cada imagen satelital de acuerdo a la fecha de cada expedición. Asimismo se ha superpuesto las coordenadas de los puntos donde se tomó los datos; con el objetivo de extraer el valor del pixel y de esta manera calibrar los datos de campo con los del satélite. Se ha obtenido:

**Figura N° 23** Mapa de contenido de Clorofila-a satelital expedición 01/04/2018



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 12** Datos de Clorofila-a satelital y de campo, expedición 01/04/18.

Clorofila-a			
Punto	Estación	Satelital (mg/m3)	Campo (um/l)
1	D12	5,65113	2,79
2	D11	5,47778	3,46
3	D10	5,35504	1,96
4	D8	5,35995	4,8
5	D6	5,18755	2,89
6	D5	5,25266	3,65
7	D4	5,31755	2,18
8	D3	5,12872	2,93
9	D2	4,51335	3,41

Fuente: Elaboración propia.

**Figura N° 24** Mapa de contenido de Clorofila-a satelital expedición 17/04/2018



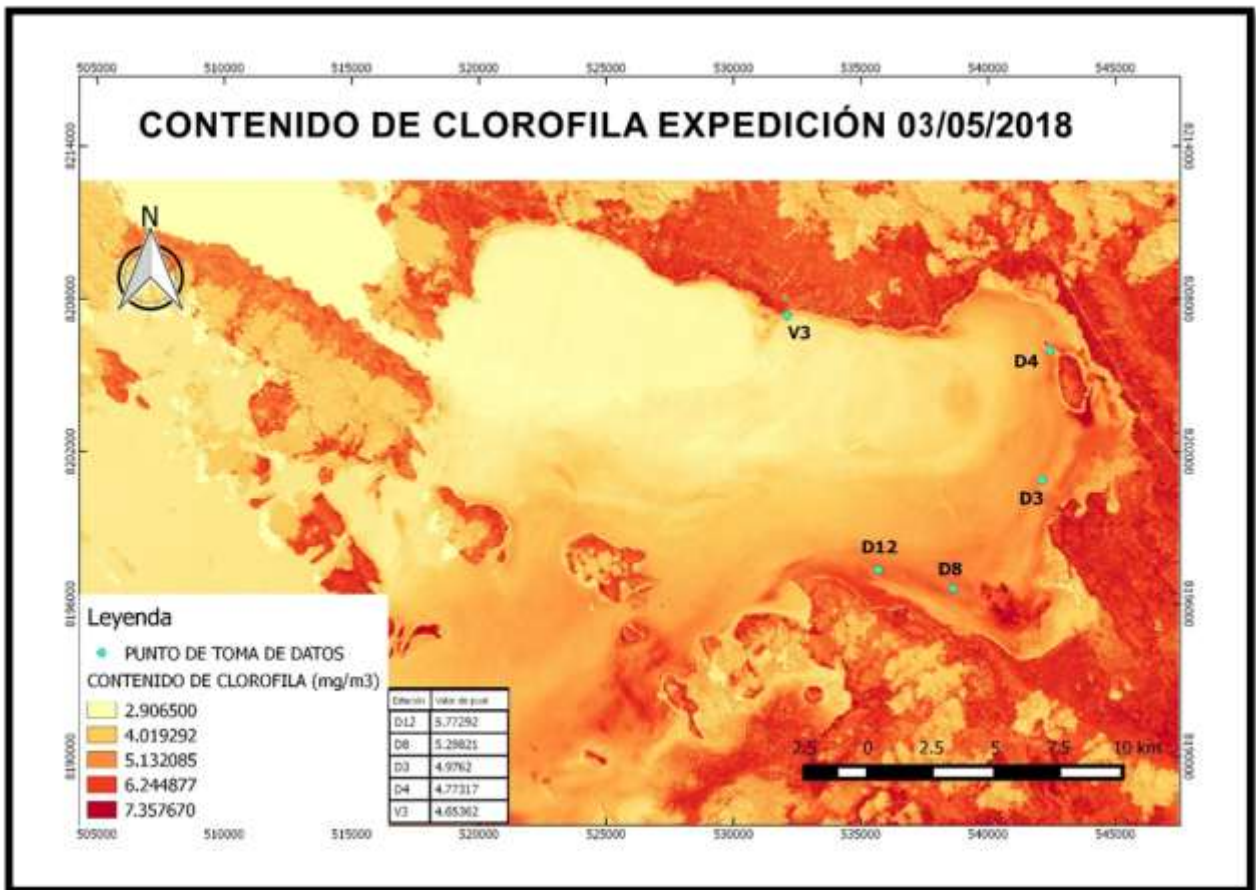
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 13** Datos de Clorofila-a satelital y de campo, expedición 17/04/18.

Clorofila-a			
Punto	Estación	Satelital (mg/m3)	Campo (um/l)
1	V3	5,65854	4,43
2	V4	6,11249	2,92
3	LC	3,47231	1,39
4	D8	6,71522	1,20
5	D4	5,71486	15,22

Fuente: Elaboración propia.

**Figura N° 25** Mapa de contenido de Clorofila-a satelital expedición 03/05/2018



Fuente: Elaboración propia.

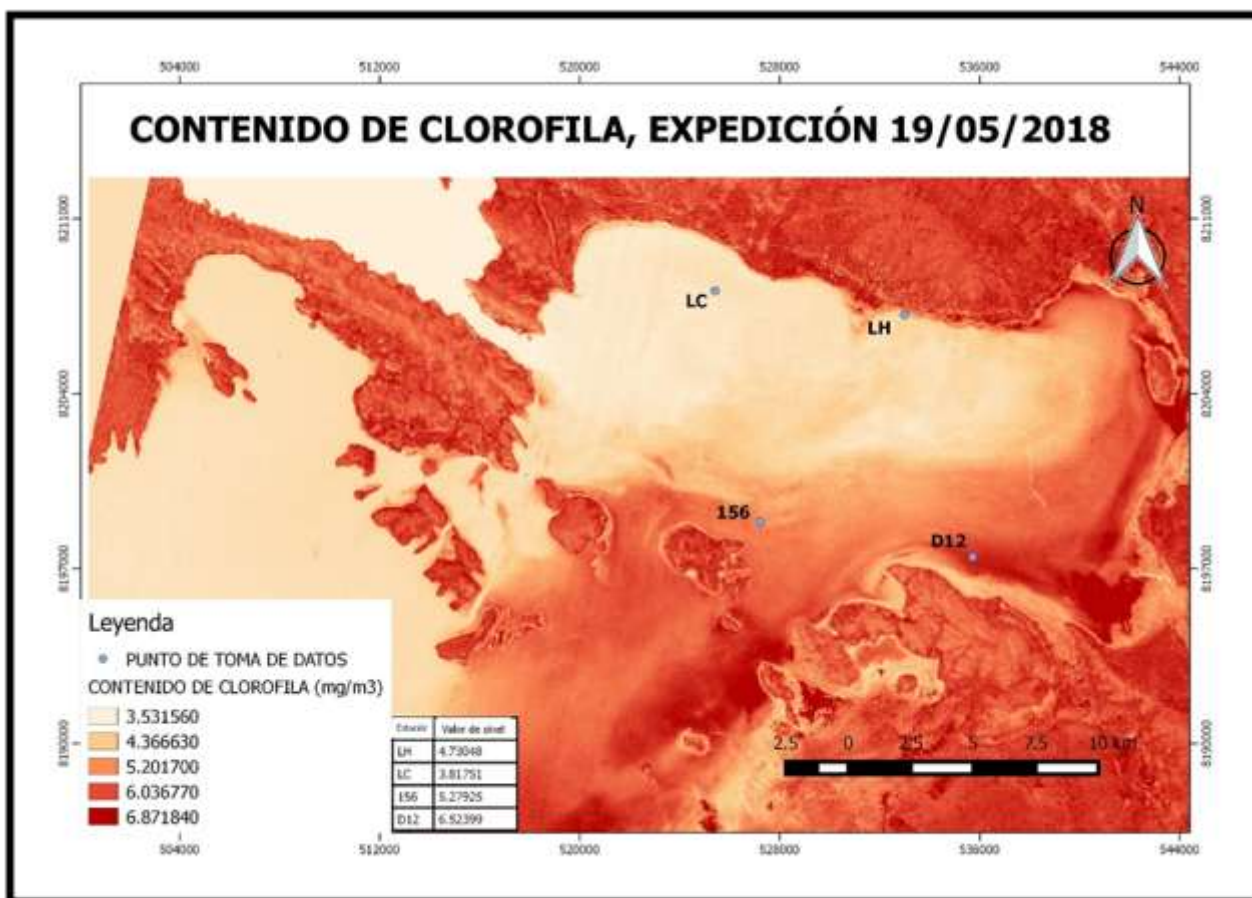
**Tabla N° 14** Datos de Clorofila-a satelital y de campo, expedición 03/05/18.

Punto	Estación	Clorofila-a	
		Satelital (mg/m3)	Campo (um/l)
1	D12	5,77292	0,96
2	D8	5,29821	1,51
3	D3	4,9762	2,75
4	D4	4,77317	13,58
5	V3	4,65362	4,00

Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 26** Mapa de contenido de Clorofila-a satelital expedición 03/05/2018



Fuente: Elaboración Propia.

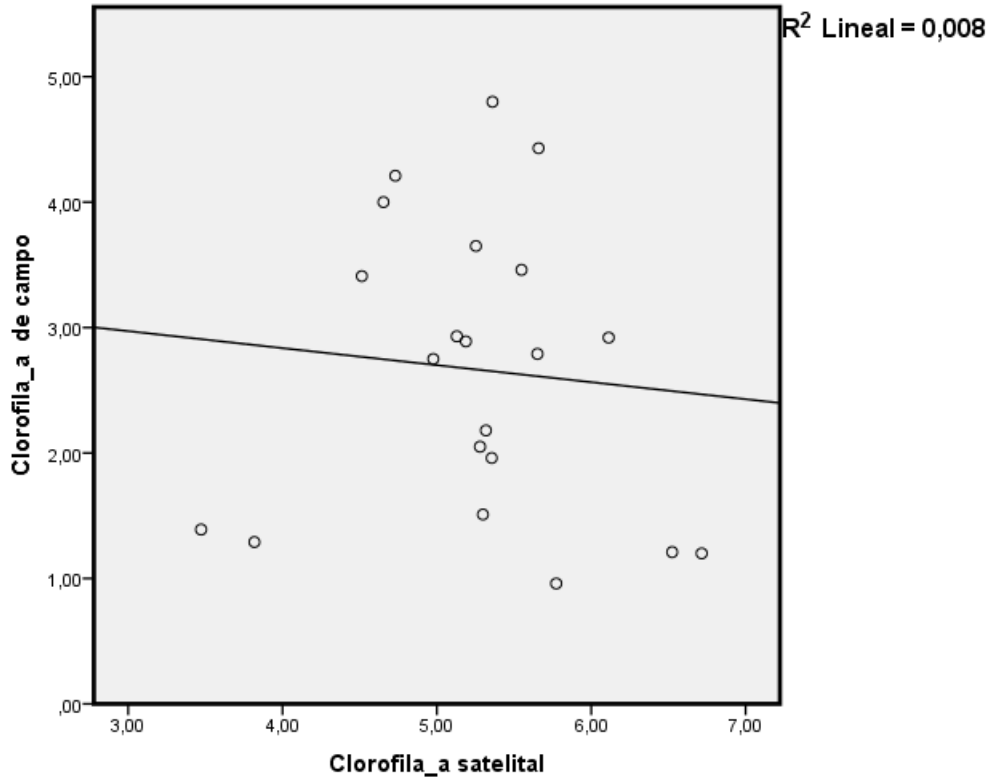
**Tabla N° 15** Datos de Clorofila-a satelital y de campo, expedición 19/05/18.

Clorofila-a			
Punto	Estación	Satelital (mg/m3)	Campo (um/l)
1	LH	4,73048	4,21
2	LC	3,81751	1,29
3	156	5,27925	2,05
4	D12	6,52399	1,21

Fuente: Elaboración propia.

Haciendo un análisis de correlación de los datos obtenidos:

**Figura N° 27** Gráfica de correlación de Clorofila-a satelital y de campo



Nota: Representación de los valores utilizados para la modelización de Clorofila-a (mg/l) satelital respecto a la que se tomó en campo, que cuenta con un  $R^2=0.008$ , que indica no tener una buena correlación.

#### 4.2. Análisis estadístico de las variables

Para un análisis estadístico se ha acudido a la correlación y regresión lineal, de modo que el algoritmo pueda ser redefinir a partir de los datos que ofrece la imagen satelital, con la extracción del valor del pixel en reflectancia de las bandas 2 y 3 (azul y verde) y los tomados en campo (clorofila-a superficial). (Tabla N°16)

### a) Extracción de variables

**Tabla N° 16** Valor de pixeles individuales, relaciones de banda y Clorofila-a superficial.

Punto	Estación	Banda 2 REF	Banda 3 REF	DIV_B3/B2	DIV_B2/B3	Clorofila-a (um/l)
P1	D12	0,0259	0,03601	1,39034749	0,719244654	2,79
P2	D11	0,02699	0,0369	1,367173027	0,731436314	3,46
P3	D10	0,02622	0,03472	1,324180015	0,755184332	1,96
P4	D8	0,02369	0,03139	1,325031659	0,754698949	4,8
P5	D6	0,02237	0,02878	1,286544479	0,777275886	2,89
P6	D5	0,0222	0,02888	1,300900901	0,768698061	3,65
P7	D4	0,0222	0,0292	1,315315315	0,760273973	2,18
P8	D3	0,02282	0,02905	1,273006135	0,785542169	2,93
P9	D2	0,02369	0,02689	1,135078092	0,880996653	3,41
P10	V3	0,01532	0,02152	1,404699739	0,711895911	4,43
P11	V4	0,01922	0,03132	1,629552549	0,61366539	2,92
P12	LC	0,03137	0,04367	1,392094358	0,718342111	1,39
P13	D8	0,02323	0,0347	1,493758071	0,66945245	1,20
P14	D4	0,01659	0,01496	0,901748041	1,108957219	15,22
P15	D12	0,01965	0,02817	1,433587786	0,697550586	0,96
P16	D8	0,01591	0,02139	1,344437461	0,743805517	1,51
P17	D3	0,02063	0,03007	1,45758604	0,686065846	2,75
P18	D4	0,0199	0,03188	1,60201005	0,624215809	13,58
P19	V3	0,01832	0,0235	1,282751092	0,779574468	4,00
P20	LH	0,02244	0,03559	1,58600713	0,630514189	4,21
P21	LC	0,0165	0,01616	0,979393939	1,021039604	1,29
P22	156	0,01799	0,0213	1,183991106	0,844600939	2,05
P23	D12	0,01682	0,02198	1,306777646	0,765241128	1,21

Fuente: Elaboración propia.

### b) Análisis de regresión

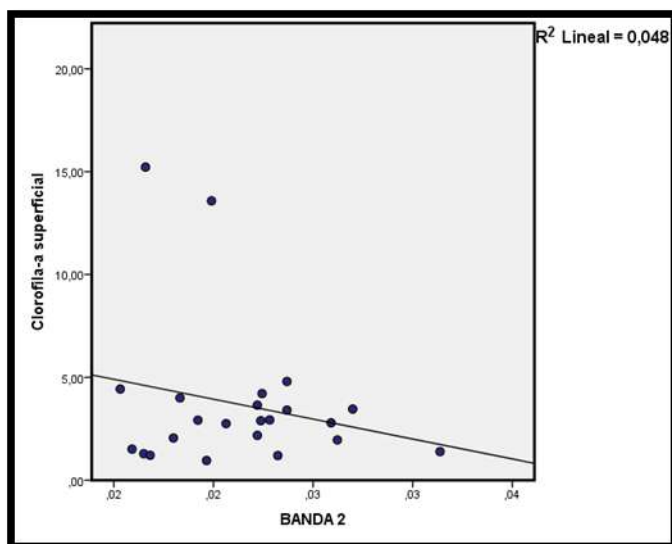
#### Píxeles individuales

Como se observa en las Figuras N° 28 y 29, el análisis de correlación arroja que existe muy poca relación entre la Clorofila-a tomada en campo, respecto a las

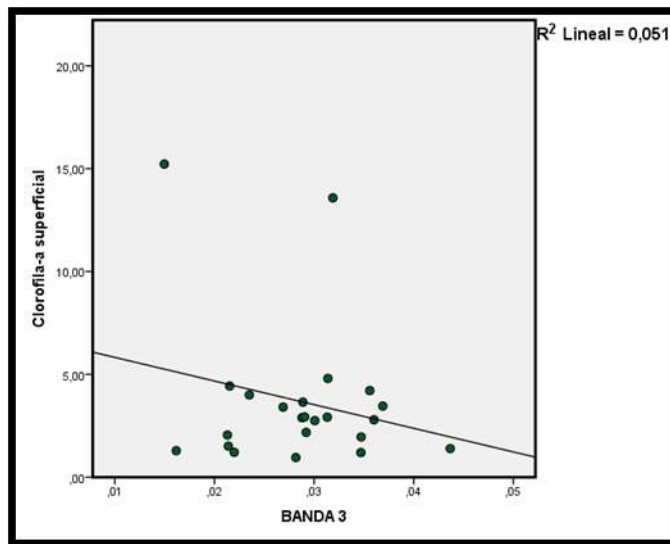


BANDAS 2 y 3, teniendo como  $R^2 = 0.048$  y  $R^2 = 0.051$  respectivamente. Que indica no tener una buena correlación.

**Figura N° 28** Relación B2 y Cl-a



**Figura N° 29** Relación B3 y Cl-a



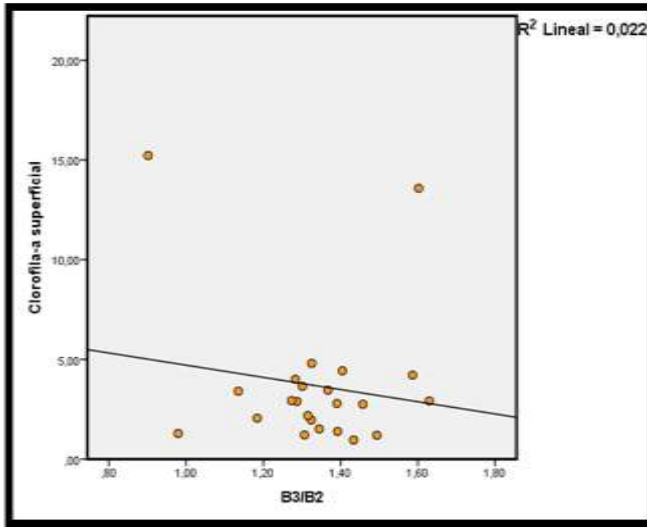
Fuente: Elaboración propia.

*Nota: La figura 28 muestra una correlación inversamente proporcional, que indica que a medida que la clorofila-a disminuye, reflectancia de la banda 2 aumenta. Sin embargo no existe una buena correlación. La figura 29 muestra una similar relación entre Clorofila-a, respecto a la banda 3; mientras la Clorofila-a disminuye, la reflectancia de la banda 3 aumenta. Aun así la correlación no es buena.*

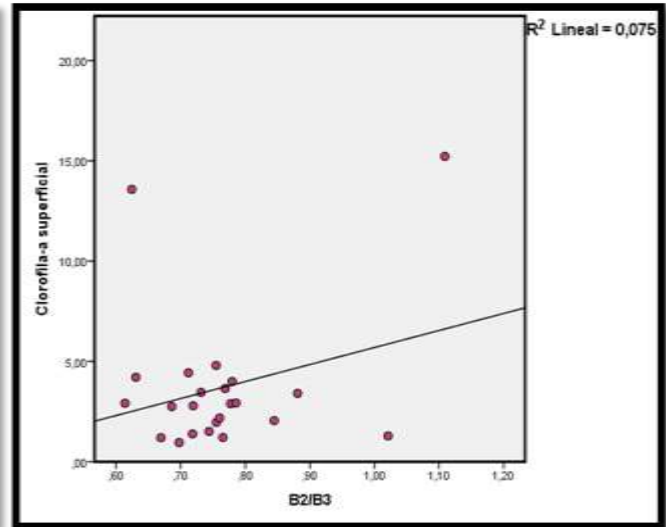
### **Relación de bandas**

En el análisis de relación de bandas (band ratios), se ha obtenido los coeficiente de relación:  $R^2 = 0.022$  y  $R = 0.075$  (Fig. N° 30 y 31), de la división de los valores de las bandas 3-2 y 2-3 respectivamente, con relación a Clorofila.

**Figura N° 30** Relación de B3/B2 y Cl-a



**Figura N° 31** Relación de B2/B3 y Cl-a



Fuente: Elaboración propia.

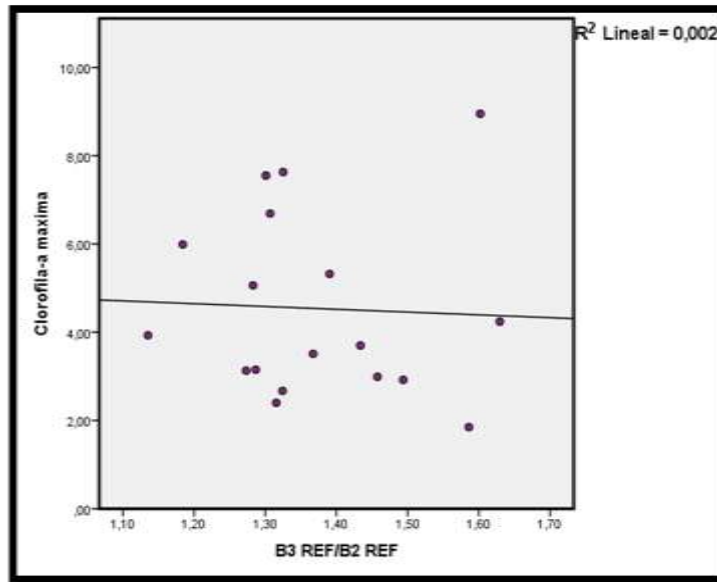
*Nota: Como se ve en ambas figuras existen valores que se alejan, estos fueron identificados. Para poder realizar una nueva correlación, con los nuevos datos y obtener un mejor ajuste.*

#### **4.2.1. Redefinición de algoritmo**

Una vez identificados los valores altos, se ha aislado del análisis de correlación, para que este pueda ajustarse mejor, estos datos aislados fueron un total de 5, que tenían valores altos en las tres categorías de Clorofila-a, que ofrecen los datos de campo.

Se ha procedido a un análisis de correlación con los datos de Clorofila-a máxima, media y superficial, respecto a la división de bandas 3/2. (Figuras 32, 33 y 34 respectivamente). Esto porque el algoritmo propuesto indica la división de las bandas en este orden. De modo que se ha obtenido un mejor ajuste con los datos de Clorofila-a superficial.

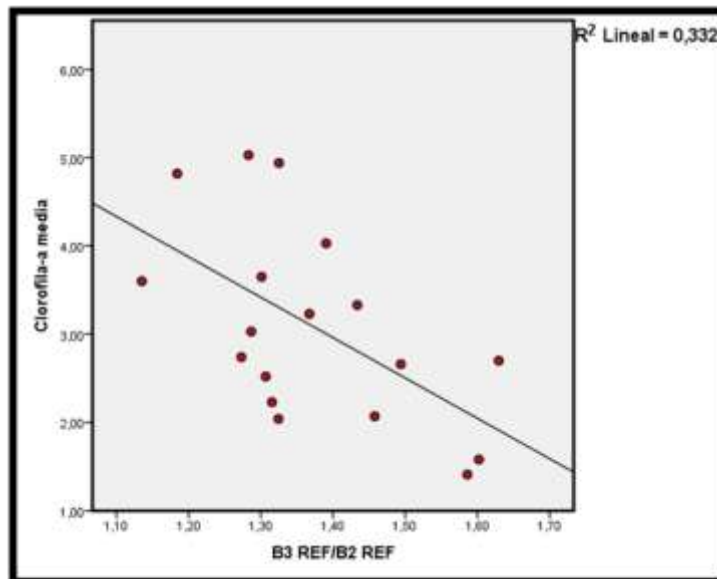
**Figura N° 32** Relación de B3/B2 (valores en reflectancia) y Clorofila-a máxima.



Fuente: Elaboración Propia.

*Nota: La correlación muestra un  $R^2=0.002$ , alejándose de lo que se busca.*

**Figura N° 33** Relación de B3/B2 (valores en reflectancia) y Clorofila-a media.

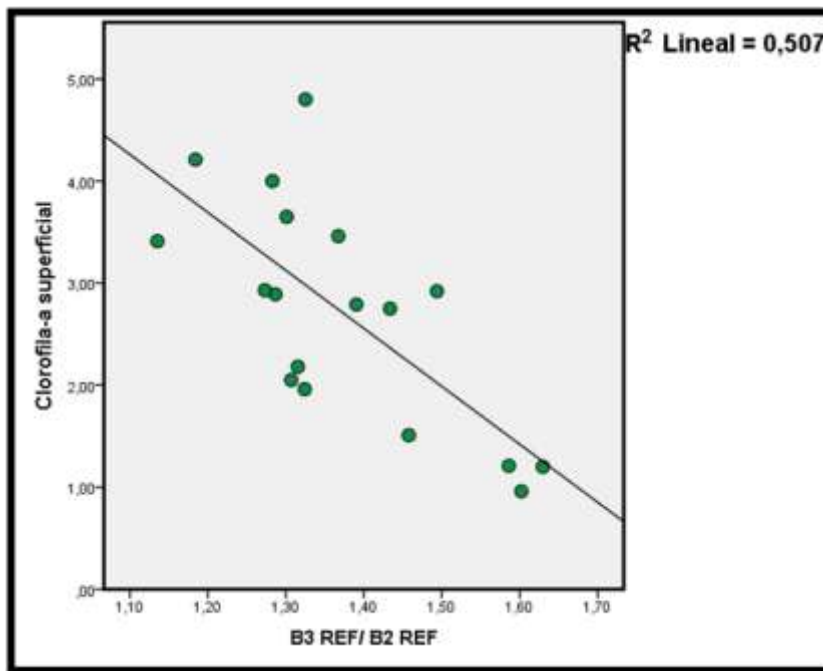


Fuente: Elaboración propia.

*Nota: En esta nueva relación de la división de las bandas 3/2, respecto a Clorofila-a media, el ajuste a mejorado, obteniendo un  $R^2= 0.332$ , lo que significa que el modelo está siendo explicado en un 30%.*

De modo que se llegó a un mejor ajuste con los datos de la división de bandas 3/2, respecto a la Clorofila-a superficial, obteniendo un  $R^2=0.507$ , explicando más del 50% del modelo. Asimismo se obtuvo un nivel de significancia de 0.001.

**Figura N° 34** Relación de B3/B2 (valores en reflectancia) y Clorofila-a superficial.



Fuente: Elaboración propia.

### Análisis de ecuación de regresión lineal

**Variables introducidas/eliminadas<sup>a</sup>**

Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	B3/B2 <sup>b</sup>	.	Introducir

a. Variable dependiente: Clorofila-a superficial

b. Todas las variables solicitadas introducidas.

**Resumen del modelo**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,712 <sup>a</sup>	,507	,477	,79766

a. Variables predictoras: (Constante), B3/B2

**ANOVA<sup>a</sup>**

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	10,482	1	10,482	16,474	,001 <sup>b</sup>
1 Residual	10,180	16	,636		
Total	20,662	17			

a. Variable dependiente: Clorofila-a superficial

b. Variables predictoras: (Constante), B3/B2

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo	Coefficients no estandarizados		Coefficients tipificados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	10,508	1,929		5,447	,000
1 B3/B2	-5,680	1,399	-,712	-4,059	,001

a. Variable dependiente: Clorofila-a superficial

De modo que se obtiene la redefinición del algoritmo bajo el modelo de la ecuación de regresión:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

Donde:

- $\beta_0$ : El valor de la ordenada donde la línea de regresión se intersecta al eje Y.
- $\beta_1$ : El coeficiente de regresión poblacional (pendiente de la línea recta)
- $\varepsilon$  : El error.

$$Cl - a = 10.508 - 5.68 (B3/B2)(mg/m^3)$$

### 4.3. Validación

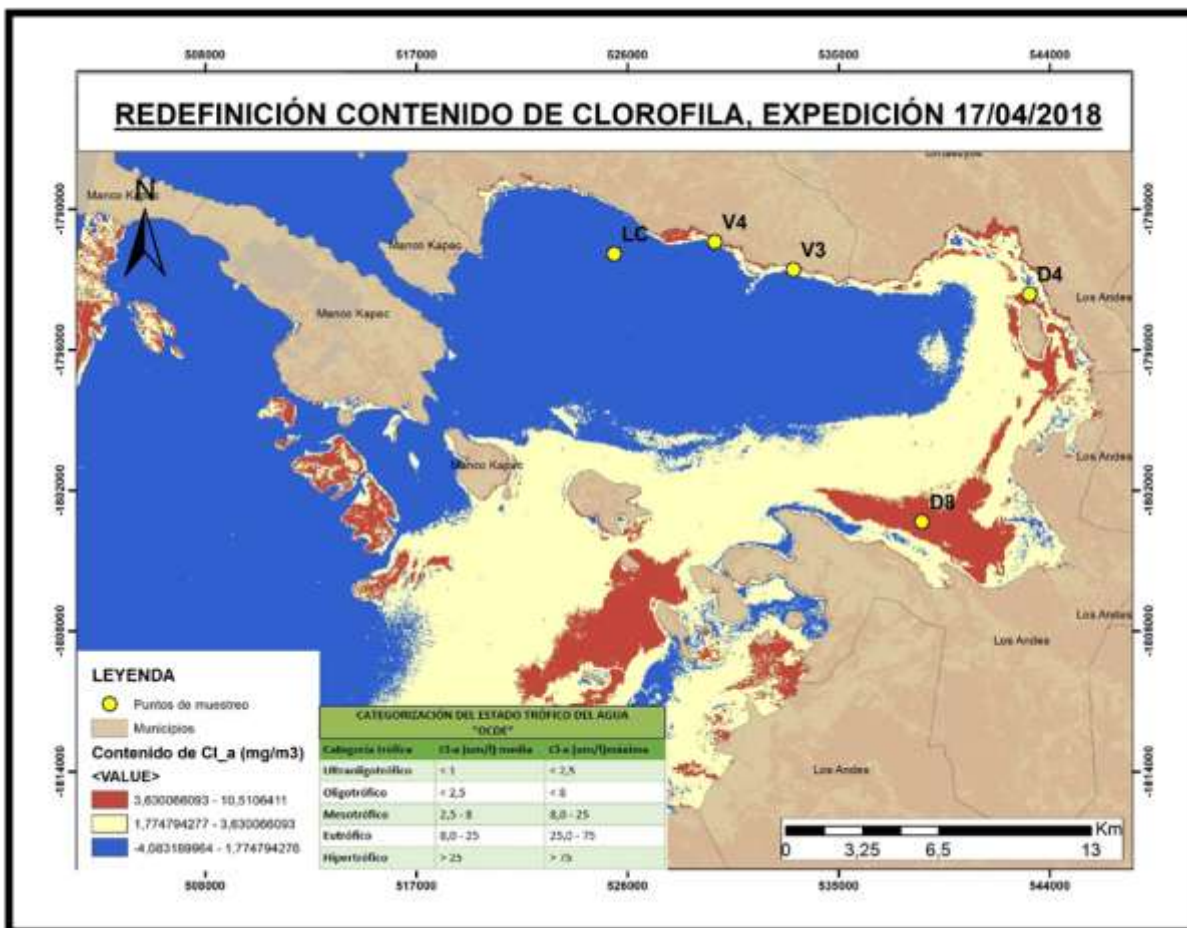
Para concretar la validación, se ha aplicado el nuevo algoritmo redefinido a las cuatro imágenes de satélite, que corresponden a cada fecha en que se realizaron las expediciones. De modo que se ha elaborado los mapas del contenido de Clorofila-a (Fig. N° 35, 36, 37 y 38), para cada expedición. Para una mejor interpretación y cotejar con la leyenda de cada mapa, se ha insertado la tabla de categorización del estado trófico de cuerpo de agua según el contenido de Clorofila-a, elaborado por la OCDE (Organización para la Cooperación del Desarrollo Económico). El nuevo modelo ha producido valores aceptables, ya que se acercan a los valores tomados en etapa de campo.

Figura N° 35 Mapa de contenido de Clorofila-a, expedición 01/04/2018



*Nota: para una mejor interpretación, se ha insertado la tabla de categorización del estado trófico de un cuerpo de agua de la OCDE. También se ha añadido los puntos de muestreo, con el propósito de tener una idea de en qué cuerpo de agua se tomó los datos.*

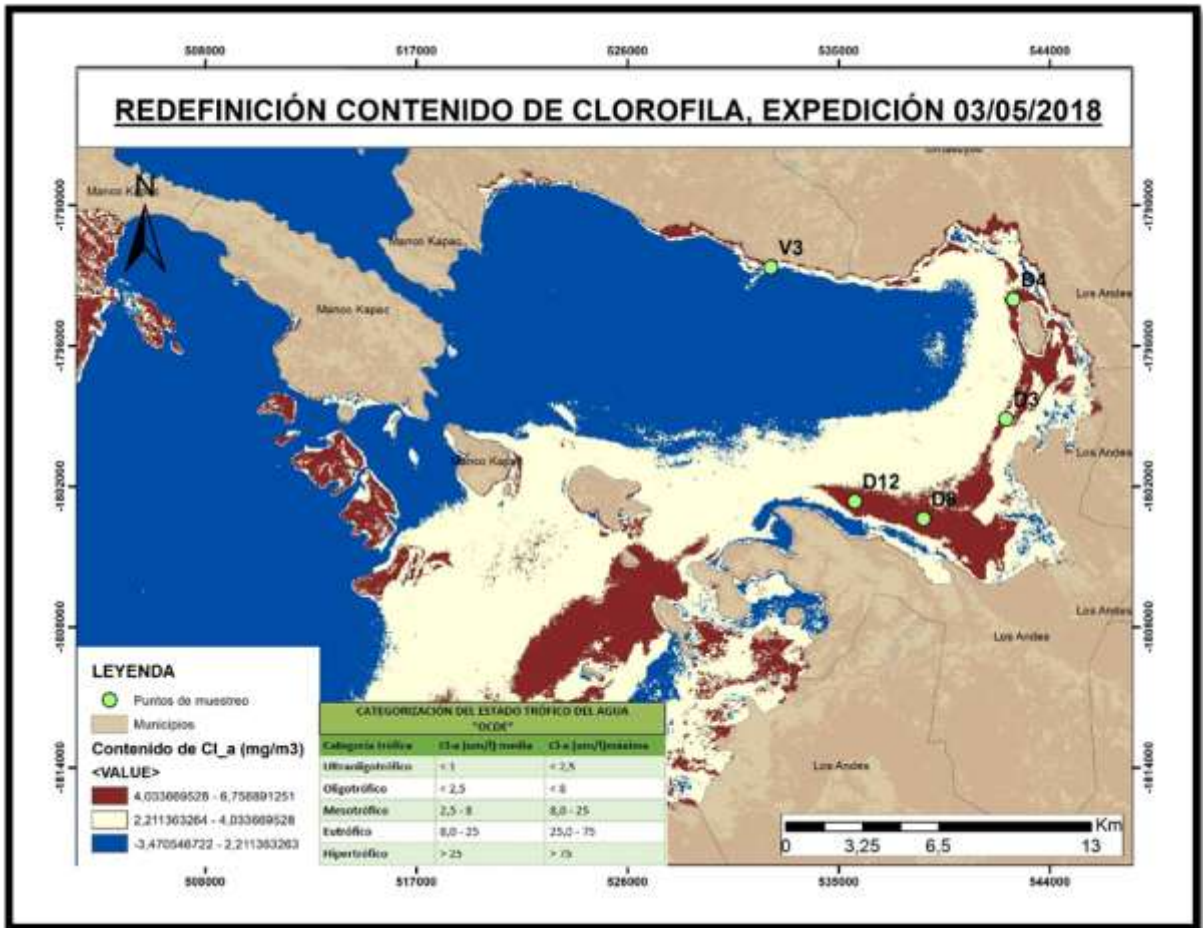
Figura N° 36 Mapa de contenido de Clorofila-a, expedición 17/04/2018



*Nota: para una mejor interpretación, se ha insertado la tabla de categorización del estado trófico de un cuerpo de agua de la OCDE. También se ha añadido los puntos de muestreo, con el propósito de tener una idea de en qué cuerpo de agua se tomó los datos.*

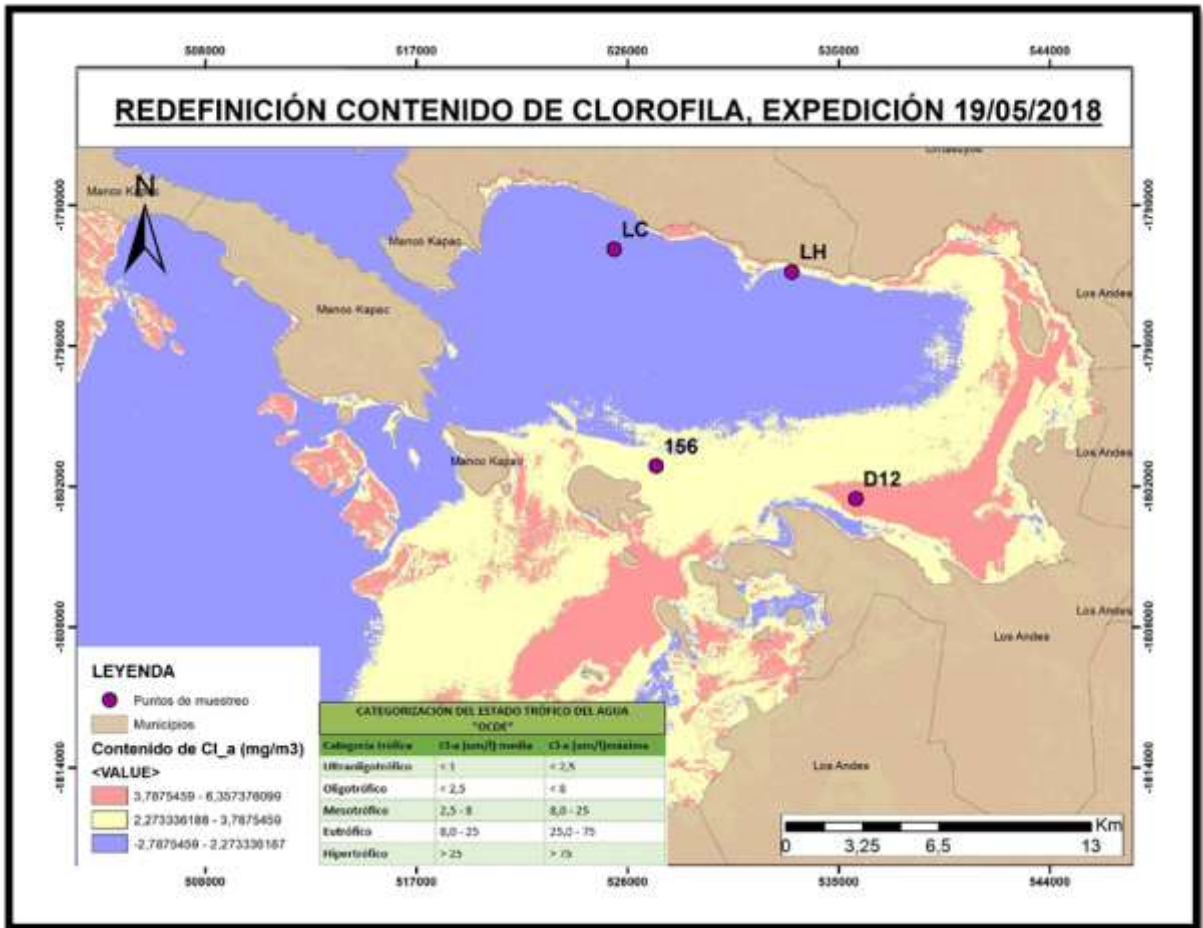


Figura N° 37 Mapa de contenido de Clorofila-a, expedición 03/05/2018



Nota: para una mejor interpretación, se ha insertado la tabla de categorización del estado trófico de un cuerpo de agua de la OCDE. También se ha añadido los puntos de muestreo, con el propósito de tener una idea de en qué cuerpo de agua se tomó los datos.

Figura N° 38 Mapa de contenido de Clorofila-a, expedición 19/05/2018



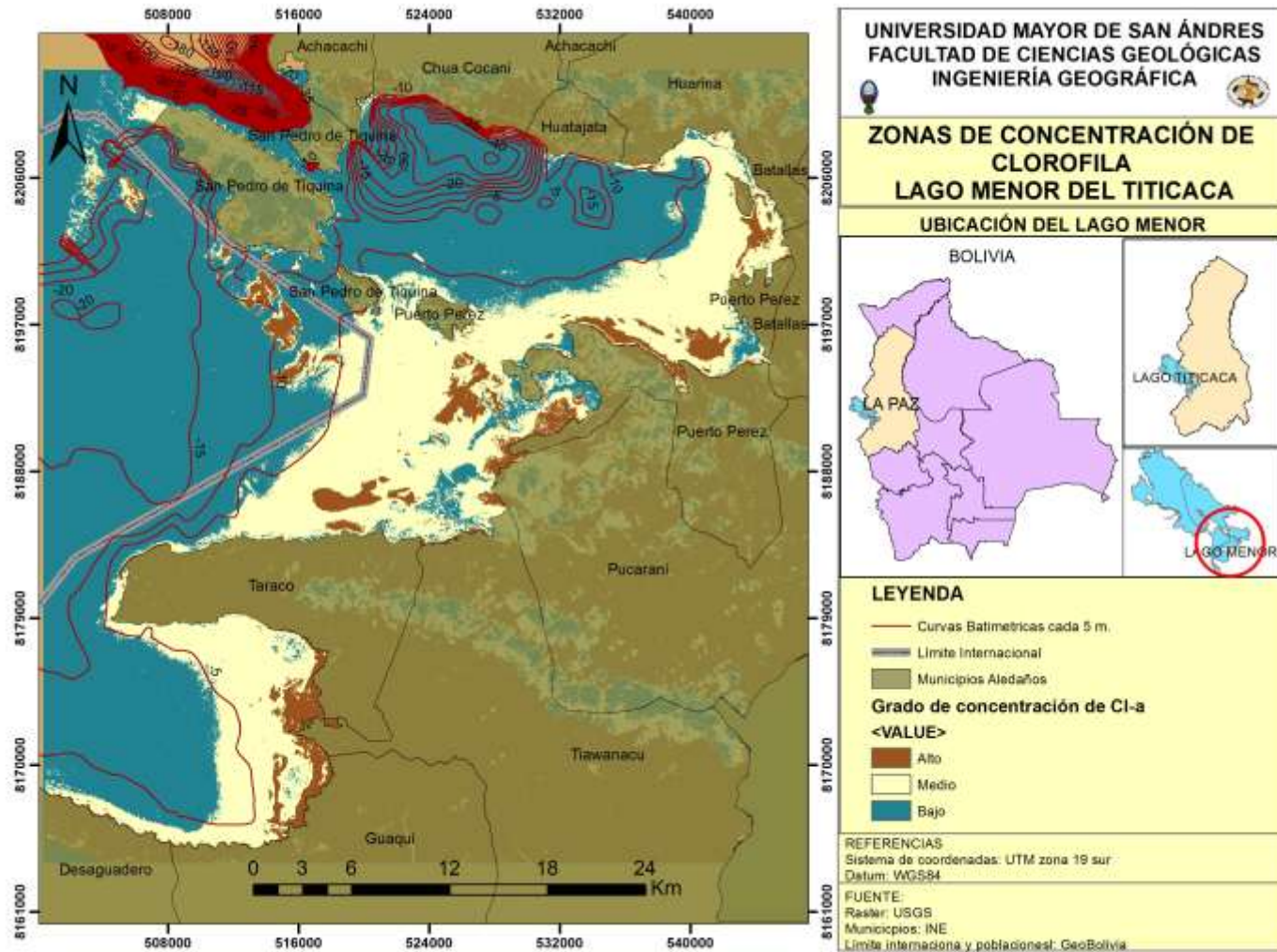
Nota: para una mejor interpretación, se ha insertado la tabla de categorización del estado trófico de un cuerpo de agua de la OCDE. También se ha añadido los puntos de muestreo, con el propósito de tener una idea de en qué cuerpo de agua se tomó los datos.

#### **4.4. Cartografía de identificación de concentración de Clorofila-a**

Para realizar la cartografía del mapa de “Zonas de concentración de Clorofila” (Fig. N°39). Se ha tomado como referente uno de los cuatro mapas preliminares donde se realizó la validación del algoritmo. En este entendido se trabajará con la imagen del 1 de abril de 2018, por tales razones:

- En esta fecha es donde se tomó mayor cantidad de datos para poder validar el algoritmo.
- Como se tomó la mayor cantidad de datos en esta fecha, el algoritmo fue redefinido en gran parte con estos datos.
- En la etapa de selección de puntos para las salidas de campo, uno de los factores que ayudo para la selección, fue el pre-procesamiento de una imagen satelital del mes de abril de 2015 (fecha del evento Bloom). Los resultados del procesamiento, mostraron que la parte este del Lago Menor, se encontraba con niveles considerados de Clorofila-a. Se ha considerado también este motivo.

Figura N° 39 Mapa de concentración de Clorofila-a.



#### 4.5. Cartografía de poblaciones afectadas por eutrofización

Los valores que ofrece el algoritmo en la imagen satelital, del contenido de Clorofila-a, ayudará a catalogar el estado trófico del cuerpo de agua. Haciendo una clasificación de los valores de la imagen satelital con la tabla de valoración del estado trófico de un cuerpo de agua de la OCDE (Organización para la Cooperación del Desarrollo Económico) (Tabla N°17). Mismo que se citó en el Capítulo II del Marco Teórico.

**Tabla N° 17** Categorización de estado trófico de un cuerpo de agua, indicador Cl-a

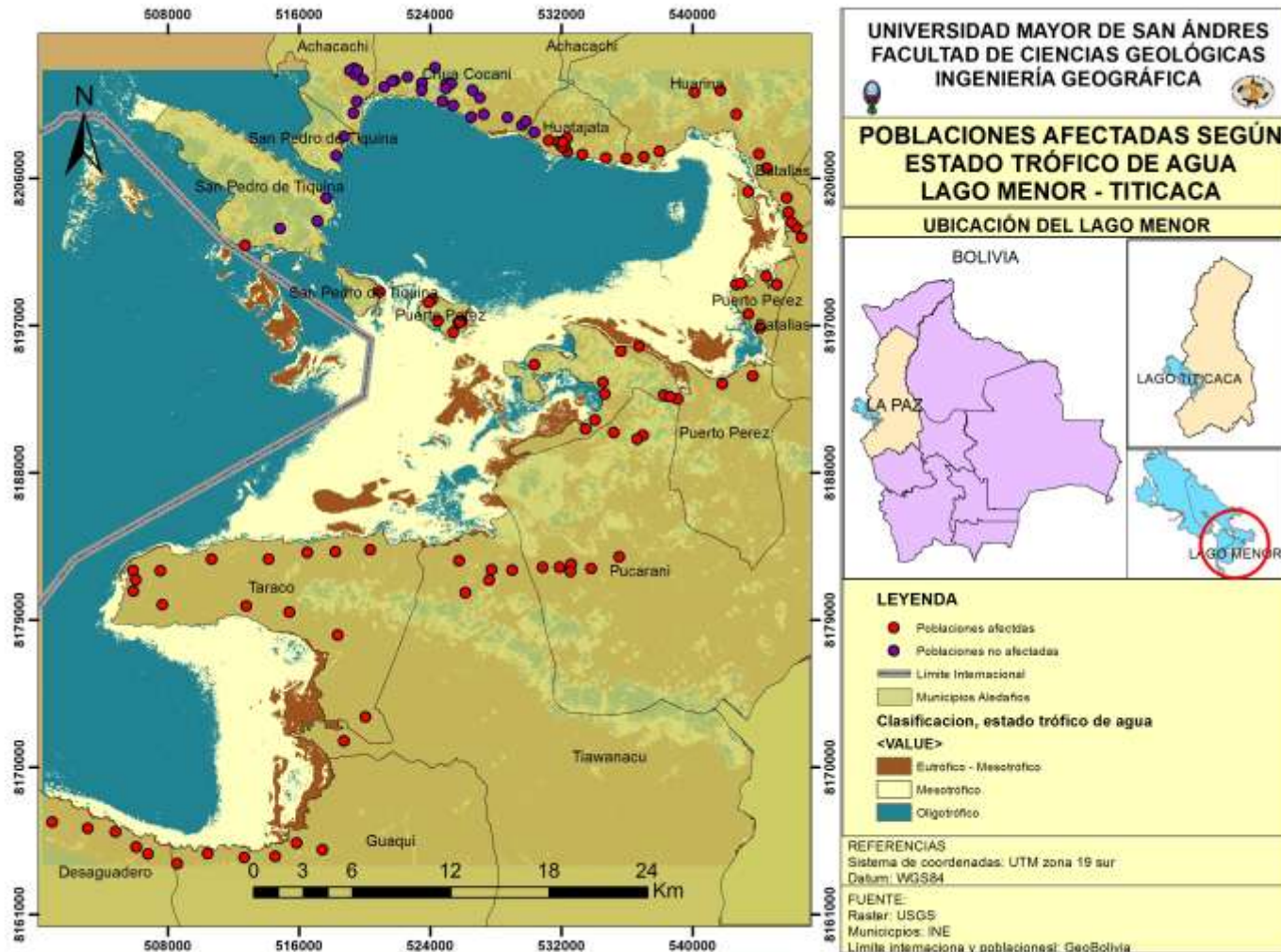
CATEGORIZACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DEL AGUA "OCDE"		
Categoría trófica	Cl-a (um/l) media	Cl-a (um/l)máxima
Ultraoligotrófico	< 1	< 2,5
Oligotrófico	< 2,5	< 8
Mesotrófico	2,5 - 8	8,0 - 25
Eutrófico	8,0 - 25	25,0 - 75
Hipertrófico	> 25	> 75

Fuente: Recopilado de Doña, 2009

Se ha obtenido el mapa de concentración de Clorofila-a, a partir de este se ha podido identificar las zonas más afectadas por eutrofización. De modo que se ha sobrepuesto las poblaciones que están asentadas a la ribera del Lago Menor para hacer el análisis espacial, relacionando a que cuerpo de agua están expuestas estas poblaciones. Para que de esta manera se pueda identificar y cuantificar las poblaciones se encuentran afectadas por este evento, de modo que surge el mapa de "Poblaciones afectadas según el estado trófico de agua" (Fig. N°40).



Figura Nº 40 Mapa de poblaciones afectadas según estado trófico de cuerpo de agua.



#### **4.5.1. Análisis de cartografía, identificación y cuantificación**

Para la elaboración del mapa, se ha unido las variables: datos que ofrece el algoritmo en la imagen y las poblaciones que están asentadas a la ribera del Lago Menor. De modo que se tomó en cuenta a las poblaciones que se encuentran a 2 km. de la orilla; esto con base en la escala de trabajo.

Por lo que se ha identificado un total de 125 poblaciones, que se extienden desde la parte sur del Desaguadero, hasta San Pedro de Tiquina. De las cuales 93 poblaciones están expuestas a aguas de estado eutrófico-mesotrófico y mesotrófico, y 32 poblaciones todavía cuentan con orillas del Lago que se puede catalogar como oligotrófico.

Este resultado es lógico ya que, al acudir al mapa de curvas batimétricas, indican que el sector donde el cuerpo de agua es catalogado como oligotrófico; es la parte más profunda del Lago Menor (40 m.). Esta característica ayuda que el cuerpo de agua pueda tener mayor capacidad de resiliencia.

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

El enunciado de las conclusiones se ha basado en el cumplimiento de los objetivos tanto general como específico, en tal sentido al finalizar el presente proyecto se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Se ha aplicado técnicas de teledetección en la calibración y validación del indicador de eutrofización; Clorofila-a, en la parte del Lago Menor del Titicaca, obteniendo un resultado favorable, en cuanto a investigación se refiere.
- Para la selección de puntos de muestreo en campo, ha servido de mucho la coordinación del equipo de investigadores del IIGEO, pues con la experiencia del Dr. Xavier Lazzaro que ya había incursionado anteriormente en este sector. La etapa de campo fue más provechosa, en cuanto a tiempo, eficacia y accesibilidad se refiere. Como ya se conocía la ruta que se debía navegar, se ganó tiempo, para que de esta manera se pueda obtener mayor cantidad de datos y realizar en menor tiempo un mejor trabajo en cuanto a la toma de datos se refiere. Cabe resaltar que el trabajo se basa en una comparación de datos tomados en el mismo día del paso de satélite Landsat 8, con la cantidad de datos que se pueda tomar en el día de salida de campo, por lo que fue de total importancia el poder tomar mayor cantidad de datos que a su vez hayan sido bien tomados, para hacer la comparación respectiva.
- Una de los objetivos como menciona en el título del tema fue la calibración de los datos tomados en campo con los datos que ofrece el algoritmo propuesto. A simple vista se ha detectado que los datos que se tomó en campo no tenían una relación estrecha con los resultados que daba la imagen satelital procesada con el algoritmo. En el análisis estadístico de



correlación de las variables, en las cuatro expediciones, se obtuvo  $R^2=0.0008$ , que indica que existe una muy baja correlación. De modo que se puede concluir en cuanto a calibración se refiere, que queda comprobado que se requiere de una redefinición del algoritmo propuesto; esta vez con los datos tomados en campo, para que se pueda dar más fuerza a la técnica de percepción remota. Y a su vez poder validar estos resultados.

- Para la validación del algoritmo; de los 23 datos que se ha obtenido en campo de clorofila-a, máxima, mínima y superficial. Ha sido necesario prescindir de los valores más altos, pues si no se hubiese quitado estos valores (que fueron 5), no se hubiese encontrado una buena ecuación de regresión para redefinir el algoritmo. Después de haber hecho un análisis estadístico arduo, finalmente se ha obtenido el mejor ajuste de  $R^2= 0.507$ , que explica más de un 50% la ecuación de regresión para redefinir el algoritmo.
- De modo que se ha obtenido un nuevo algoritmo que fue aplicado a las cuatro imágenes de satélite: obteniendo así mejores datos de Clorofila-a satelital, datos que se acercan a la realidad.
- En la identificación de zonas de concentración de Clorofila-a, tan solo se ha utilizado una de las cuatro imágenes, escogiendo la más representativa, bajo criterios que ya fueron expuestos. Se ha identificado gran parte de la zona pelágica del Lago Menor, con concentración de Clorofila-a.
- Las razones de concentración de Clorofila-a se debe principalmente a la descarga de las aguas residuales que vienen desde las áreas urbanas, su principal alimentador es el río Katari que desemboca en la parte de Bahía Cohana, sirviendo como nivel de base el Lago Menor. Otra razón se debe a que el Lago Menor se caracteriza por ser somero. Las curvas batimétricas muestran claramente que la parte menos profunda coincide con la parte de mayor concentración de Clorofila-a.
- Se ha cumplido con la identificación y cuantificación de poblaciones, que están expuestas a aguas en estado trófico, preocupante. Me atrevo a decir

que de acuerdo a los resultados obtenidos, el 50% del Lago está expuesto a aguas mesotróficas. Aun así el resultado que lanzó el algoritmo redifinido para la validación. Define en el mapa que existen considerables sectores que se categorizan como aguas eutróficas, obteniendo un valor de 10.45 (mg/m<sup>3</sup>) de Clorofila-a como máximo. Lo que indica que nuestro Lago Menor está a un paso de ser un cuerpo de agua eutrofizado. Según la clasificación de la OCDE, se ha pasado por 2 (mg/m<sup>3</sup>) para ser un cuerpo de agua eutrofizado. En ciertos sectores del Lago Menor.

- Los resultados de las poblaciones ribereñas expuestas a un cuerpo de agua eutrófico-mesotrófico y mesotrófico, son una mayoría. Pues de las 125 que se ha identificado, tan solo 32 están expuestas a un ambiente que no pelagra de contaminación.

## **5.2.RECOMENDACIONES**

- Para la aplicación de un algoritmo en el área de teledetección, es importante tener al menos tres o cuatro opciones; pues aunque existe una variedad de modelos, no todos corren en los diferentes programas de manejo de imágenes de satélite. Está claro que también existen varios programas para poder realizar el tratamiento de imágenes de satélite, pero no todos pueden ser adaptados a los modelos o algoritmos que se presentan.
- También se recomienda trabajar con un programa que sea accesible y confiable en cuanto a tratamiento de imágenes se refiere.

Para realizar una buena y real calibración de datos, hay que tomar las siguientes precauciones:

- Factor tiempo, temporal y recursos: como se realizó una calibración del paso del satélite con el día de toma de datos, es importante fijar fechas donde no sea temporada de lluvias, pues las imágenes de satélite salen con nubes.

- En caso que se decida una temporada de salida de campo, hay que estar pendiente al temporal que habrá en las fechas de paso del satélite con el que se desee trabajar. Es importante salir desde horas muy tempranas, pues el factor tiempo, no colabora al momento de la toma de datos.
- Aunque se haya planeado mucho antes la salida de campo, en muchas ocasiones no se logra el objetivo trazado, con referencia a alcanzar a tomar datos en las estaciones planeadas.
- Los recursos para una toma de datos insitu, pueden salir un tanto costosos, si se realiza con recursos propios. El costo del viaje en bote y la persona que lo maneja, además de los equipos que se requieren para la toma de datos.
- Para poder obtener mejores resultados y más cercanos a la realidad, se requiere de más puntos de toma de datos, que puedan ser tomados en el mismo día y así se pueda tener más opciones para un mejor análisis estadístico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Almeida, A., (2015). *Procesamiento digital de imágenes multiespectrales Landsat 8, para aplicaciones agronómicas en la subcuenca del río Guayllabamba*. (Tesis de pre grado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Ariza, A., (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8*. Recuperado de <http://www.unspider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Chuvienco, S.E. (2002). *Teledetección Ambiental*. Barcelona, España: Ariel S.A.
- Comisión Nacional del Agua. (2005). *Percepción Remota, fundamentos de teledetección espacial*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/365840214/Fundamentos-de-Teledeteccion-Espacial>
- Copa, D., (2012). *Evaluación de las amenazas climáticas en el Altiplano Norte de La Paz, a través del procesamiento y análisis digital de imágenes de satélite* (trabajo de pre grado). Escuela Militar de Ingeniería, La Paz, Bolivia.
- Doña, C., (2016). *Monitoring water quality and hydrological patterns of wetlands using recent techniques in remote sensing* (tesis de doctorado). Universidad de Valencia, Valencia, España.
- Doña, C., Caselles, V., Sanchez, J. M., Ferril, A. y Camacho, A. (2010). Herramienta para el estudio del estado de eutrofización de masas de agua continentales. *Revista de teledetección*, 36, 40-50.
- Fontúrbel, F. (2003). Algunos criterios biológicos sobre el proceso de eutrofización a orillas de seis localidades del lago Titikaka. *Ecología Aplicada*, 2(1), 75-79.
- Fontúrbel, F. (2005). Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del lago Titikaka (Bolivia). *Ecología Aplicada*, 4(1,2), 135-141.
- Fontúrbel, F., Molina, C. y Richard, E. (2006). Evaluación rápida de la diversidad de fitoplancton en aguas eutróficas del lago Titikaka (Bolivia) y su uso como indicador del grado de contaminación. *Ciencia Abierta Internacional*, 29, 1-12.
- Fontúrbel, F.E. (2008). Contaminación ambiental y cultural en el lago Titicaca: estado actual y perspectivas. La Paz, Bolivia: Editorial Publicaciones Integrales.

Hernández, S.R., Fernández, C.C., Baptista, L. M., (2010). Metodología de la investigación. México D.F., México: Interamericana Editores S.A. de C. V.  
Recuperado de  
<https://docplayer.es/28837841-Proceso-de-eutrofizacion.html>

Ingenieria, (2016). *Arquiografico: Qué es batimetría*, Bolivia. Recuperado de  
<https://arquiografico.com/que-es-la-batimetria/>

Jiménez, J.C., Llinares M., Ruiz A., Tenjo C., Delegido J., Sobrino J.A. y Moreno J. (Abril de 2015). Propiedades ópticas y térmicas del lago Titicaca a partir de imágenes Landsat-8 y MODIS. En F. Ponzoni (Presidencia), *Simposio Brasileiro de sensoramiento remoto*. Simposio llevado a cabo en el XVII congreso INPE, Joao Pessoa, Brasil.

Lazzaro X., (noviembre, 2017). *Misión de calibración de imágenes Landsat-8 con datos de campo sincrónicos a su paso para la evaluación de la concentración de la clorofila-a en la columna de agua de la región norte del lago menor*.

Lazzaro X. (marzo, 2018). *Expedición IIGEO de calibración clorofila-a Landsat X BBE*. Propuesta para expedición de proyecto “Monitoreo Espacial de los efectos del cambio climático en el Lago Titicaca con imágenes de satélite”

LIDEMA, 2012. *Problemas socio ambientales de la Bahía de Cohana*. La Paz, Bolivia.

Mendiburu, F., *Análisis de Regresión lineal y el procedimiento regresión lineal*. Recuperado de  
<http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/GuiaSPSS/18reglin.pdf>

Mendiburu, F., *Análisis de Regresión y Correlación*. Recuperado de  
<https://tarwi.lamolina.edu.pe/~fmendiburu/index-filer/academic/metodos1/Regresion.pdf>

Molina, C., Lazzaro, X., Guédron, S. y Achá, D. (2017). Contaminación de la Bahía de Cohana, Lago Titicaca (Bolivia): Desafíos y oportunidades para promover su recuperación. *Ecología en Bolivia*, 52(2), 65-76.

Oliveros, J., (2014). *Aplicación de percepción remota para la detección de florecimientos de algas en valle de Bravo* (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., México.

Oliveros, O. (2010). *Eutrofización* (diapositivas de PowerPoint). Recuperado de

Pereira, M., (2015). *Estudio multitemporal mediante teledetección de la eutrofización de la bahía de Cohana* (tesis de maestría). Universidad de Valencia, Valencia, España.

- Sosa, M., (2014). *Determinación de la concentración de la clorofila a en bahía Cohana a partir de técnicas de teledetección* (tesis de maestría). Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Peña R. & Moreno J. (2014). Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat-8. *UD y la Geomática*, (9), 37-46
- Vega, L. y Paz, O. (2014). Condiciones tróficas de la bahía de Aygachi del lago Titicaca. *ResearchGate*, 1-10. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/260677059> CONDICIONES TROFICAS DE LA BAHIA DE AYGACHI DEL LAGO TITICACA

## GLOSARIO

**Autótrofos:** Entendemos por autótrofo a todos los organismos que tienen la capacidad de elaborar su propio alimento a partir de sustancias inorgánicas tales como los elementos no vivos del planeta (luz, agua, etc.).

**Bacterioclorofila:** Las bacterioclorofilas son unos pigmentos fotosintéticos que se encuentran en varias bacterias fotótrofas. Están relacionadas con las clorofilas, que son los pigmentos primarios en plantas, algas y cianobacterias. Las bacterias que contienen bacterioclorofila realizan la fotosíntesis pero no producen oxígeno.

**Banda espectral:** es una selección de longitudes de onda con comportamientos electromagnéticos similares.

**Batimetría:** Es el levantamiento del relieve de superficies sub acuáticas, ya estamos hablando del fondo del mar como cursos de aguas, lagos, embalses, etc. Es decir la cartografía de los fondos, como si se tratara de un terreno seco.

**Cianobacterias:** son un filo del dominio Bacteria que comprende las bacterias capaces de realizar fotosíntesis oxigénica y, en algún sentido, a sus descendientes por endosimbiosis, los plastos. Son las únicas procariotas que llevan a cabo ese tipo de fotosíntesis, por ello también se les denomina oxifotobacterias.

**Clorofitas:** Las clorofitas tienen clorofila a y b. Se les llama algas verdes por su color. Su pared celular está compuesta de celulosa. Hay de dos clases, cloroficeae y charoficeae, las primeras son microscópicas y las segundas pueden ser apreciadas a simple vista. Las algas clorofitas sirven para indicar la calidad del agua de un lugar, entre mayor sea su presencia en el agua, más limpia se encuentra ésta

**Criptofitas:** Cryptophyta, Cryptomonada o criptofitas es un grupo pequeño de algas unicelulares con unas 200 especies que viven en aguas marinas y continentales. Son miembros importantes del fitoplancton y se pueden encontrar en aguas estancadas, soportando moderados niveles de contaminación.

**Diatomeas:** son algas unicelulares; constituyen el fitoplancton, importante en la alimentación de diversos organismos. Algunas de ellas pueden vivir en colonias formando filamentos o cintas, se hallan rodeadas por una pared celular hecha de sílice llamada frústula.

**Dinoflagelado:** Los dinoflagelados (Dinoflagellata, Dinophyta o Pyrrhophyta) son un extenso grupo de protistas flagelados, con unas 2400 especies conocidas. El

nombre proviene del griego *dinos*, girar y del latín, *flagellum*, látigo, describiendo el movimiento rotatorio propio de estos organismos. Estos microorganismos son unicelulares (aunque pueden formar colonias) y forman parte del fitoplancton de agua dulce (unas 220 especies) y marino (el resto).

**Estructura del radar:** el transmisor, la antena (normalmente usada para la transmisión y recepción), el receptor y el equipo de manejo de datos. Un sistema de radar de apertura sintética incluye un procesador de imagen, a pesar de que éste puede tener una ubicación lejana de la electrónica del radar, tanto en tiempo como en espacio.

**Eucariota:** o eucarionte es un adjetivo que se utiliza en la biología para referirse a las células que presentan un núcleo diferenciado, protegido por una membrana y con citoplasma organizado. También se conoce como eucariota al organismo constituido por este tipo de célula.

**Ficobiliproteínas:** Proteína presente en la cara externa de la membrana de los tilacoides de cianobacterias, rodófitos y criptofitas, que se encuentra unida a un pigmento, la ficobilina, e interviene en la captación de luz durante la fotosíntesis.

**Fitoplancton:** El fitoplancton es un conjunto de microorganismos vegetales que se encuentran especialmente en mares, ríos y lagos y que sirven de alimento para animales. Las algas son los componentes principales de los fitoplánctones.

**Fotótrofos:** Los organismos fotótrofos (del griego: *photo* = luz, *troph* = nutriente) son quienes tienen capacidad de tomar fotones de la luz de Sol como fuente de energía. Esos fotones pueden, pero no necesariamente, ser utilizados para fijar carbono inorgánico en forma de carbono orgánico, y esos organismos se llaman fotoautótrofos (del griego: *photo* = luz, *auto* = sí mismo, *troph* = nutriente), que son organismos que efectúan fotosíntesis para obtener energía.

**HydroLight:** Es un modelo de transferencia radiativa que calcula la distribución de la radiancia y otras variables derivadas (irradiancias, reflectividades, etc.) en cualquier cuerpo de agua, dependiendo de sus OAC y de las condiciones de iluminación, permitiendo simular la reflectividad que mediría en la superficie del agua cualquier sensor, siempre que conozcamos su caracterización espectral.

**Imagen multispectral:** o multibanda es un conjunto de imágenes, con las mismas propiedades geométricas, cada una de las cuales recoge el valor de reflectancia en un determinado intervalo de longitud de onda del espectro electromagnético.

**Radar:** Sensor electromagnético que se caracteriza por la detección y la localización por radio (radio detection and ranging). Los principales componentes en la



**Reflectancia o reflectividad:** de los cuerpos varía según la longitud de onda que incide sobre ellos, normalmente la reflectividad aumenta a medida que la longitud de onda disminuye, no obstante existen cuerpos donde esta relación es inversa (nieve) o irregular (vegetación). También la reflectividad está influenciada por la textura del cuerpo, para una misma longitud de onda, la reflectividad más baja se encuentra en el agua, aumenta para el suelo, vegetación enferma, vegetación sana y es máxima para la nieve.

**Resolución:** La resolución de un sensor es su habilidad para registrar información en detalle de las distintas cubiertas. La resolución depende de la capacidad de los sensores para distinguir variaciones de la energía electromagnética, del detalle espacial que captura y del número y ancho de las bandas que alberga.

**Respuesta Espectral:** Cada tipo de material radia una combinación de frecuencias característica (respuesta espectral) como consecuencia de su composición, estructura y actividad.

**Satélite:** Cualquier objeto que recorre una órbita alrededor de un cuerpo celeste como la luna. El término se usa normalmente para designar las plataformas artificiales que orbitan la Tierra.

**Ultravioleta :** Radiaciones solares con longitudes de onda entre la luz visible y los rayos X. Las UV-B (280 - 320 nm) son una de las tres bandas de las radiaciones UV, son nocivas para la vida en la superficie de la Tierra y son absorbidas en su mayor parte por la Capa de Ozono.

**Xantofilas:** Las xantofilas se encuentran también de forma natural en muchas plantas, son compuestos pigmentados y presentan también acción fotosintética. Estos pigmentos, más resistentes a la oxidación que las clorofilas, proporcionan sus tonos amarillentos y parduzcos a las hojas secas.