

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE TECNOLOGIA
CARRERA DE GEODESIA, TOPOGRAFIA
Y GEOMATICA**



**PROYECTO DE GRADO
NIVEL LICENCIATURA
PROCESAMIENTO E INTERPRETACION DE
IMAGENES SATELITALES PARA EL MONITOREO DE
CALIDAD DE AGUA, APLICADO A LA LAGUNA
ALALAY
COCHABAMBA-BOLIVIA**

POSTULANTE: RUDDY RONALD QUISPE SANTOS

TUTOR: MSC.ING. JOSE LUIS DELGADO ALVAREZ

**LA PAZ-BOLIVIA
2020**

DEDICATORIA:

Primero a Dios el creador y misericordioso

A mis padres y hermano

A mis amigos y compañeros que confiaron en mi

AGRADECIMIENTOS A

Hipólito Elías Quispe Mamani:

Mi padre un hombre trabajador y valiente con ganas de siempre superarse en la vida. Gracias por tu apoyo en todo momento, gracias por tu paciencia, gracias por confiar en mí.

Elvira Melania Santos Quispe:

A mi madre por haberme dado la vida, por su amor y cariño, mi madre amada la amo tanto, que daría la vida por ella, inspiración razón de vivir y seguir adelante.

Boris Roger Quispe Santos:

Mi hermano por estar presente en mi vida un amigo y compañero a pesar de su estado delicado de salud, con la fe de que algún día te sanaras hermano mío.

Msc. Ing. José Luis Delgado Álvarez:

Mi tutor agradecerle por el conocimiento y colaboración en la elaboración del presente proyecto.

Distinguidos Tribunales:

Ing. Vitaliano Miranda Angles

Ing. Natalia I. Palacios Zuleta

Lic. Richard Ramos

Gracias por su tiempo y conocimiento aportado en la Culminación del presente proyecto.

Señor Dios creador del universo te pido por mí, y mi familia que nos guardes y protejas de toda maldad y tentación, dame sabiduría e inteligencia para ser un profesional que aporte a su país, y que predique el evangelio a través de mi profesión, enséñame a ser valiente, misericordioso y lento para la ira, en el nombre amado de tu hijo Jesucristo amen.

INDICE

1 INTRODUCCION	1
1.1 Antecedentes	2
1.1.1 Calidad del agua en las Américas	2
1.1.2 Problema de calidad de aguas en las Américas- eutrofización	4
1.1.3 Historia de la laguna Alalay	5
1.1.4 Características generales de la laguna Alalay	6
1.1.5 Contaminación de la laguna Alalay	11
1.2 Marco referencial	12
1.2.1 Zona de estudio	12
1.2.2 Ubicación Geográfica.....	13
1.2.3 Características climáticas	14
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
1.4 Justificación.....	16
2 MARCO TEORICO.....	16
2.1 Contaminación del agua	16
2.1.1 Parámetros de calidad del agua	17
2.2 Ecosistemas acuáticos interiores	19

2.2.1 Componentes de un ecosistema lacustre	20
2.2.2 Componente abiótico.....	20
2.2.3 Componente biótico	25
2.2.4 Eutrofización en lagos o lagunas.....	28
2.3 ¿Qué son la proliferación de algas nocivas?	29
2.3.1 ¿Qué causa la proliferación de algas nocivas?	30
2.4 Teledetección Espacial	30
2.4.1 Espectro electromagnético	30
2.4.2 Formación de la imagen multispectral	31
2.5 Componentes de un sistema de Teledetección	32
2.6 Resoluciones de un sensor.....	33
2.6.1 Resolución espacial	33
2.6.2 Resolución radiométrica.....	33
2.6.3 Resolución espectral.....	34
2.6.4 Resolución temporal.....	34
2.6.5 Resolución angular	34
2.7 Satélites para el monitoreo de calidad del agua	35
2.8 Teledetección de la calidad del agua.....	37
2.8.1 La calidad del agua afecta sus propiedades ópticas	38
2.8.2 Indicadores de la calidad del agua observables por satélites	38

2.8.3	Cómo la luz interactúa con el agua	38
2.8.4	Propiedades ópticas inherentes y el color del agua	39
2.9	Índice de vegetación.....	41
2.9.1	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	42
3	MATERIALES Y METODOS	43
3.1	Materiales y equipo	43
3.2	Metodología Aplicada.....	43
4	RESULTADOS Y DISCUSION.....	44
4.1	Recopilación de información y datos	44
4.1.1	Periodo 1998-2004 (Estado de aguas turbias).....	48
4.1.2	Periodo 2004-2009 (Estado de plantas flotantes).....	48
4.1.3	Periodo 2010-2015 (Estado de aguas claras y plantas flotantes)	51
4.1.4	Periodo 2013-2017 (Estado de cianobacterias).....	53
4.2	Obtención de imágenes satelitales e interpretación, para el monitoreo de calidad del agua de la laguna Alalay.....	54
4.3	Serie temporal de Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (NDVI)	57
4.3.1	Análisis y comparación de serie temporal de Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (NDVI).	60
4.4	Categorización de NDVI de la laguna Alalay	70

4.4.1 Analisis y comparacion de serie temporal NDVI y categorizacion NDVI de la laguna	
Alalay.....	74
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
6 BIBLIOGRAFIA.....	77
ANEXOS.....	79
Anexo tablas.....	79
Anexo fotos.....	82

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Distribución de agua en la Tierra.....	1
Figura 2 Actividades en la cuenca y usos del suelo que contribuyen tanto a la contaminación puntual como difusa en ríos y lagos	4
Figura 3. Fotografía de la laguna Alalay 1922.....	6
Figura 4 Distritos colindantes a la laguna Alalay	7
Figura 5 Esquema de drenajes laguna Alalay	8
Figura 6 Comunidad de totora (<i>Schoenplectus californicus sbsp.tatora</i>) y matara (<i>Typha dominguensis</i>).....	9
Figura 7 Comunidad de <i>Potamogeton pectinatus-Zanichelia andina</i>	10
Figura 8 Comunidad de <i>Eichornia crassipes</i>	10
Figura 9 Ubicación Geográfica	13
Figura 10 Afluentes a la laguna Alalay	14
Figura 11 Radiación solar global de Cochabamba.....	15
Figura 12 Parámetros convencionales de calidad del agua	18
Figura. 13 Algunos contaminantes de importancia de acuerdo a su grado de afectación.....	19
Figura 14 Formas de crecimiento de las plantas acuáticas en un lago	27
Figura 15. Proliferación de algas.....	30
Figura 16 Espectro electromagnético	31
Figura 17. Componentes de un sistema de Teledetección	32
Figura 18 Satélites para el monitoreo de proliferación de algas nocivas	35
Figura 19 Bandas espectrales de distintas misiones satelitales	35
Figura 20 Bandas de las misiones Landsat.....	36
Figura 21 Interacción de emisión y reflectancia entre la fuente y el sensor	37

Figura 22 Como interactúa la luz con el agua.....	39
Figura 23 Propiedades ópticas inherentes que afectan el color del agua	39
Figura 24 Firmas espectrales de las propiedades inherentes.....	40
Figura 25 Firma espectral clorofila	40
Figura 26. Reflectancia de la vegetación	41
Figura 27 Reflectancias de vegetación y clorofila	42
Figura 28 Ecuación de índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI)	42
Figura 29 Metodología aplicada.....	43
Figura 30 Puntos de muestreo de calidad del agua de la laguna Alalay para actividades de monitoreo por parte del CASA.....	45
Figura 31 Dinámica de los nutrientes en la laguna Alalay, fósforo total (PT) y fósforo reactivo total (PRT), de junio estiaje a Marzo 2016. E: promedio meses de estiaje; LL: promedio meses de lluvia.....	45
Figura 32 Dinámica de los nutrientes en la laguna Alalay: Nitrógeno amoniacal (N-NH ₃) y nitrógeno orgánico total (Norgtot o NKT, entre agosto de 2003 y marzo de 2016, datos de monitoreo CASA-ULRA (UMSS). E: promedio meses de estiaje; LL: promedio meses de lluvia	46
Figura 33 Dinámica de los nutrientes en la laguna Alalay: nitrógeno de nitratos y nitrógeno de nitritos, entre abril 1990 a marzo de 2016, datos de monitoreo CASA-ULRA (UMSS). E: promedio meses de estiaje; LL: promedio meses de lluvia.....	47
Figura 34 Dinámica del oxígeno disuelto del agua de la laguna Alalay, entre junio 2003 a marzo de 2016. La flecha roja indica los bajos valores de OD coincidiendo con alta cobertura de macrófitas Pistia, Myriophyllum, Azollay el bloom de cianobacterias. En base a datos de monitoreo de la ULRA-CASA (UMSS).	48

Figura 35 Repollito de agua o macrofitas (<i>Pistia stratipotes</i>) planta flotante presente en la laguna Alalay	49
Figura 36 Variación de oxígeno disuelto (mg/l) y la cobertura de plantas flotantes (%) entre junio de 2003 y diciembre 2006. La flechas indican extracción de las plantas por el gobierno municipal de Cochabamba (Fuente: Acosta, 2018)	49
Figura 37 Alternancia de los estados de aguas turbias en que es dominante la biomasa fitoplanctonica y de plantas flotantes	50
Figura 38 Plantas flotantes macrofitas	51
Figura 39 Estados de aguas claras con dominio de la vegetación sumergida (amarillo), y de plantas flotantes (rojo y naranja) y su relación con el oxígeno disuelto del agua.....	52
Figura 40 Imagen de proliferación de plantas flotantes (macrofitas) (19-05-2019)	82
Figura 41 Proliferación de fitoplancton (19-05-2019)	83
Figura 42 Imagen de la laguna lado noreste (15-05-2019)	83
Figura 43 Imágenes de afluentes a la laguna Alalay (15-05-2019).....	84
Figura 44 Imagen izquierda observamos un can sin vida en unos de los afluentes de la laguna Alalay en la imagen derecha observamos basura presente	85
Figura 45 Imagen de rastros de salinización laguna Alalay (19-05-2019)	85
Figura 46 Imagen de toma de coordenadas GPS de las afluentes de la laguna Alalay (19-52019)	86
Figura 47 Punto banco de nivel (BM) del servicio nacional de cuencas	87
Figura 48 Foto parte Oeste de la Laguna Alalay invierno (06-08-2019)	87
Figura 49 Garzas blancas (06-08-2019)	88
Figura 50 Aves en la laguna Alalay Cormoran (06-08-2019).....	88

Figura 51 Ingreso de aguas residuales que causa contaminación a la laguna Alalay (06-08-2019)	89
Figura 52 Limpieza de plantas acuáticas en el espejo de agua laguna Alalay.	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Promedio mensual de variables meteorológicas, estación (AASANA, 2017).....	15
Tabla 2 Bandas de las misiones Sentinel2A y Sentinel2B (ARSET, 2018).....	36
Tabla 3 Valores de NDVI calculados por el algoritmo periodo 1999 a 2019.....	79

INDICE DE ABREVIATURAS

NDVI:	Índice de Vegetación Diferenciada Normalizada.
CREMPLA:	Comité de Recuperación, Mejoramiento y Preservación de la Laguna Alalay.
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
GAMCBBA:	Gobierno Municipal Autónomo de Cochabamba.
UMSS:	Universidad Mayor de San Simón.
CASA:	Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental.
ULRA:	Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos.
CLAS:	Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales.
AASANA:	Administración de Aeropuerto y Servicios Auxiliares a la Navegación Aérea.
INE:	Instituto Nacional de Estadística.
IANAS:	Red de Academias de Ciencias en América
ARSET:	Programa de Formación y Aplicaciones de Sensores Remotos.
IMTA:	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
INPE:	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales.
ATP:	Trifosfato de Adenosina.
P:	Fósforo.
N:	Nitrógeno.
OLI:	Imágenes Operacionales Tierra.
ETM:	Mapeador Temático Mejorado.
TM:	Mapeador Temático.

MSI: Instrumento Multiespectral
NIRS: Infrarrojo Cercano.
SWIR: Infrarrojo de Longitud de Onda Corta.

RESUMEN

A nivel mundial, el deterioro de la calidad del agua ha pasado por un proceso de cambio paralelo a las modificaciones de las actividades humanas.

La laguna Alalay es un cuerpo de agua contaminado, debido al exceso de nutrientes como ser: Nitrógeno y Fósforo, causando la proliferación de plantas flotantes como ser: algas, cianobacterias, y macrofitas, entre otras. Este fenómeno es llamado eutrofización.

En el presente proyecto, se monitoreo la proliferación de plantas flotantes que cubren el espejo de agua de la laguna Alalay, entre los periodos 1999 a 2019. Mediante el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales, se pudo generar series temporales NDVI y categorizaciones NDVI, de la vegetación que cubre el espejo de agua de la laguna Alalay. Mostrando como resultado la evolución de plantas acuáticas flotantes a través de los años; para así poder inferir en el nivel o grado de contaminación del cuerpo de agua de la laguna Alalay a través de los años.

Como resultado se observó que la calidad del agua de la laguna Alalay se ha ido degradando en el tiempo. Actualmente se encuentra híper- eutrofizada (altamente contaminada). Debido a la proliferación de plantas flotantes.

Los resultados obtenidos se validaron con datos e informes de campo de parámetros de calidad del agua por parte de la Unidad de Limnología y recursos acuáticos pertenecientes a la Universidad Mayor de San Simón.

1 INTRODUCCION

Nuestro planeta Tierra está cubierto por más superficie de agua que de tierra, el 97% de agua que se tiene se encuentra en los océanos, es agua salada, es decir, no apto para el consumo humano. Solo el 3% de agua es apta para consumo humano (figura 1).

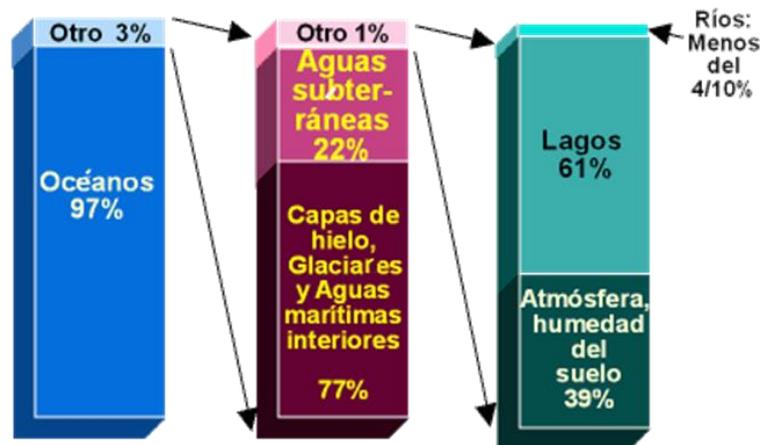


Figura 1 Distribución de agua en la Tierra
(Fuente: U.S.G.S, 1984)

El agua es uno de los recursos naturales más importantes para la vida del ser humano; sin embargo, su acceso cada vez se ve limitado debido a la ineficiencia de su uso, a su degradación por efecto de la contaminación, la sobreexplotación de aguas subterráneas, aumento de la demanda para satisfacer las necesidades humanas, agrícolas e industriales y el cambio climático.

En la actualidad, se está dando más importancia a la calidad del agua que a la evaluación de balances hídricos, debido a la importancia que implica la calidad del agua para el ser humano. La contaminación en los lagos y lagunas, se debe a la mayor parte por actividades antrópicas; es decir, al crecimiento demográfico, agricultura, e industrias, (llamadas también fuentes difusas y puntuales). El resultado de la contaminación en lagos y lagunas ya sea por fuentes puntuales o difusas, entre otras, es el incremento de nutrientes como ser el fósforo y nitrógeno. Causando la proliferación de plantas acuáticas como ser el fitoplancton, cianobacterias y macrofitas, que degradan la calidad del agua, a este fenómeno se lo denomina eutrofización.



La laguna Alalay es un cuerpo de agua de suma importancia para el departamento de Cochabamba, por sus características físicas y biológicas, a través del tiempo ha sufrido degradación en su calidad de agua, debido a actividades antrópicas que han causado su eutrofización, actualmente la laguna se encuentra híper-eutrofizada.

Por tal razón la Gobernación, Alcaldía y Universidad han puesto sus ojos en la gestión de la laguna Alalay, para el proceso de limpieza, mantenimiento y reducción del grado de eutrofización.

La Universidad Mayor de San Simón, ha monitoreado por más de 20 años la calidad del agua, con el objetivo de evaluar la calidad del mismo a través del tiempo.

Debido a las limitaciones que se tiene en recursos humanos y económicos para el monitoreo de calidad del agua en sitio, mediante el presente proyecto se propone investigar el índice de biomasa, NDVI como método complementario para el monitoreo de calidad del agua de la laguna Alalay.

La teledetección es una técnica que ha evolucionado en las últimas décadas, sus aplicaciones son múltiples, un ejemplo claro es la aplicación en el monitoreo de la calidad del agua. Actualmente se cuenta con una plataforma de procesamiento de imágenes satelitales en la nube llamada Google Earth Engine, que facilita el procesamiento múltiple de imágenes.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Calidad del agua en las Américas

Los recursos hídricos, son un componente clave para apoyar y fortalecer el desarrollo sostenible en el hemisferio americano y en el mundo.

En un principio, los conceptos de manejo se centraban más en el balance hídrico de las diferentes cuencas, pero hoy en día, la disponibilidad de este recurso natural, está claramente influenciada por los impactos antropogénicos que afectan su calidad; a su vez, la disponibilidad para diferentes usos, lo que conduce a problemas de seguridad hídrica para la población humana y para los ecosistemas.



La restauración de la calidad del agua involucra muchos aspectos, desde la protección de las cuencas hidrográficas hasta la aplicación de normas ambientales y su implementación efectiva; todo ello con el fin de reducir los riesgos y la vulnerabilidad para garantizar la seguridad del agua.

A nivel mundial, el deterioro de la calidad del agua ha pasado por un proceso de cambio, paralelo a las modificaciones de las actividades humanas como ser: el crecimiento demográfico, crecimiento de urbanizaciones, industrias y cambios progresivos en el uso de la tierra.

El deterioro de la calidad del agua, comenzó con la contaminación fecal y orgánica en tiempos en los que el tratamiento del agua estaba muy poco avanzado en el siglo XIX, y fue seguido por un aumento de la contaminación por metales con características especiales de bioacumulación, de los ecosistemas acuáticos hasta el siglo XX. A partir de la década de 1960, con el aumento de la aportación de nutrientes a los cuerpos de agua receptores, se observaron procesos de eutrofización en todo el continente, que finalmente alcanzaron niveles que provocaron la proliferación de cianobacterias, lo que dio lugar a la liberación de cianotoxinas en lagos y embalses.

Desde los grandes lagos de América del Norte hasta los embalses y lagos de América del Sur, la preocupación de las personas iba en aumento siendo que la rápida proliferación de los brotes de algas era cada vez más objeto de estudios. “Estos estudios se vieron favorecidos por el rápido desarrollo de los métodos y equipos químicos”, que fueron rápidamente adoptados por equipos de investigación, que buscaban identificar y resolver la contaminación del agua. Después de algunas décadas de estudios, se hizo cada vez más evidente que tanto las fuentes puntuales, como las fuentes difusas (fig. 2) son causas importantes de contaminación: las fuentes puntuales (por ejemplo, fábricas, vertidos de aguas residuales municipales), sin un tratamiento adecuado de los residuos estaban causando eutrofización.

Fuentes no puntuales como ser: la escorrentía de la agricultura que son fuentes de entrada de fósforo, nitrógeno y otros agroquímicos en los principales cuerpos de agua. Los productos químicos

orgánicos se usaron ampliamente en la agricultura. Los contaminantes orgánicos persistentes (COP), los herbicidas e insecticidas y el aumento del uso incontrolado de fertilizantes se convirtieron en una fuente importante de contaminación de los recursos hídricos y de las aguas superficiales y subterráneas.

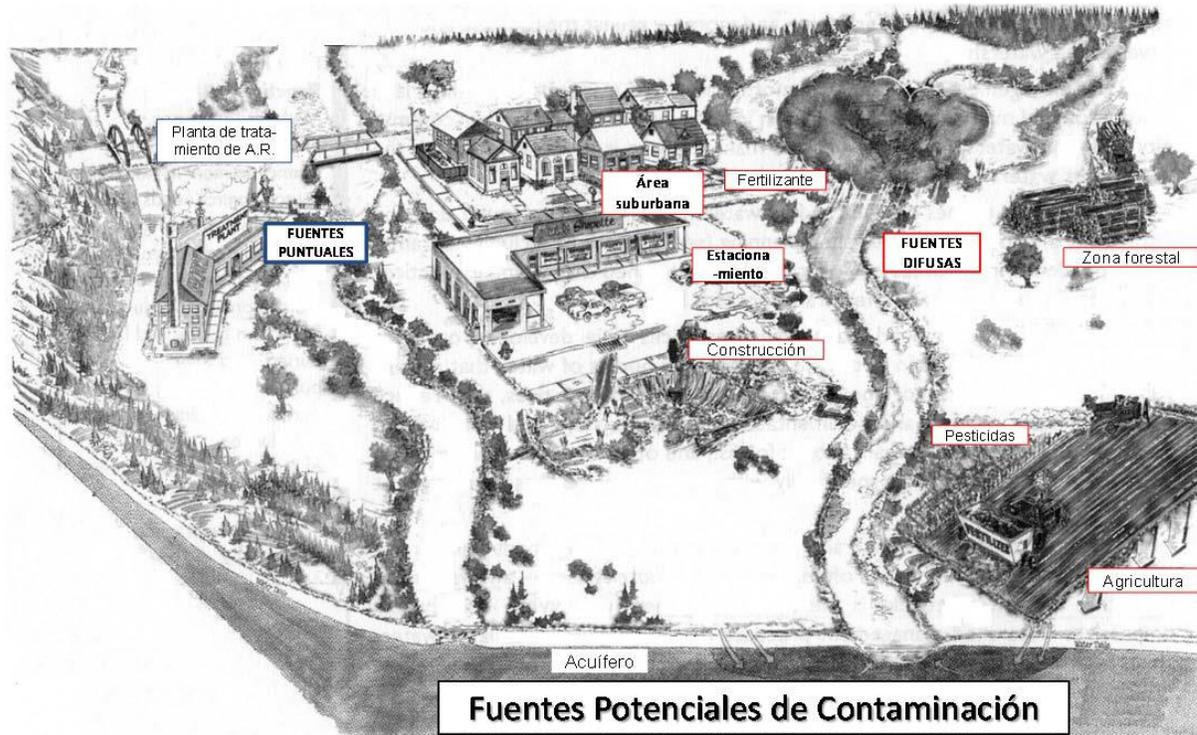


Figura 2 Actividades en la cuenca y usos del suelo que contribuyen tanto a la contaminación puntual como difusa en ríos y lagos
(Fuente: Bravo, 2013)

Los cambios en el uso de la tierra que promovieron la deforestación para la expansión de la producción agrícola y ganadera también crearon una sedimentación generalizada en las aguas superficiales: lagos, embalses, ríos y lagunas costeras (IANAS, 2019).

1.1.2 Problema de calidad de aguas en las Américas- eutrofización

Prácticamente todos los países de las Américas, experimentan algún grado de eutrofización artificial en sus cursos y cuerpos de agua. Con frecuencia, la eutrofización se caracteriza como cultural, lo que significa que el fenómeno se establece artificialmente por un exceso de nutrientes en las aguas, que son vertidos por las actividades



agropecuarias e industriales, en lugar de proceder exclusivamente de fuentes naturales. Los resultados son variados, e incluyen floraciones algales, que a veces son tóxicas y agotan el oxígeno disuelto. La eutrofización puede hacer que el agua no sea apta para el consumo humano u otros fines, y llegar a desestabilizar el ecosistema acuático. Esto último suele dar lugar a la proliferación de algas, con la consiguiente liberación de toxinas y el crecimiento explosivo de especies no deseadas.

1.1.3 Historia de la laguna Alalay

Antiguamente llamada la T'ago Laguna, por la presencia de algarrobas en la zona, se constituía en una depresión topográfica en la parte más baja del valle central de Cochabamba, que contaba con dos canales de drenaje para renovar sus aguas.

De acuerdo a registros fotográficos, se hace referencia a la T'ago laguna, como un cuerpo de agua descuidado ya desde principios del año 1900, el arquitecto Francisco Vargas, hace referencia a que, desde finales del siglo XIX, se hace manifiesta la necesidad de ampliar la laguna para regular las crecidas del río Rocha, mismas que ocasionaban inundaciones en las zonas bajas de la ciudad (Villa Coronilla, La Maica, Jayhuaico, etc.). Esta situación se hace evidente inclusive hasta la década de 1930, donde, de acuerdo a publicaciones de la época, todavía se tenían este tipo de problemas.

Construyeron un túnel que permitía el desvío del caudal del río Rocha hacia la laguna Alalay, utilizando la mano de obra provista por los presos de la guerra del Chaco, entre las décadas de 1930 a 1940, de acuerdo a una publicación del periódico el País, 1937 (GAMCBBA, 2018).

El aporte de agua de la laguna Alalay viene del río Rocha. La ampliación de la laguna Alalay en la década de los 30, tenía como principal propósito evitar las constantes inundaciones que sufrían las zonas bajas de la ciudad, colindantes al curso natural del río Rocha, además de considerar a la laguna como zona de recreación y turismo. Esta laguna actúa como pulmón de la ciudad de Cochabamba, mantiene una adecuada humedad para los habitantes de la región, y acomoda una variedad de fauna silvestre, así como aves y peces (GAMCBBA, 2018).



Figura 3. Fotografía de la laguna Alalay 1922
(Fuente: UMSS, 2016)

1.1.4 Características generales de la laguna Alalay

La laguna Alalay se encuentra ubicada en el departamento de Cochabamba, Provincia Cercado al Sudeste de la ciudad de Cochabamba, la cuenca de la laguna está comprendida dentro de los distritos 6, 7, 8, 10 y 11 (fig. 4). El espejo de agua propiamente de la laguna, se encuentra dentro del distrito 6, sobre los 2570 m.s.n.m, zona más baja del valle central. La laguna ocupa una superficie aproximada de 219.5 hectáreas y un perímetro de 8121m, recibe un volumen máximo de agua de aproximadamente 2 997 744 m³ (Acosta, 2018).

Se trata de una laguna somera (profundidad máxima 5 metros), es una laguna polimictica cálida; esto quiere decir, que presenta circulación frecuente o continua.

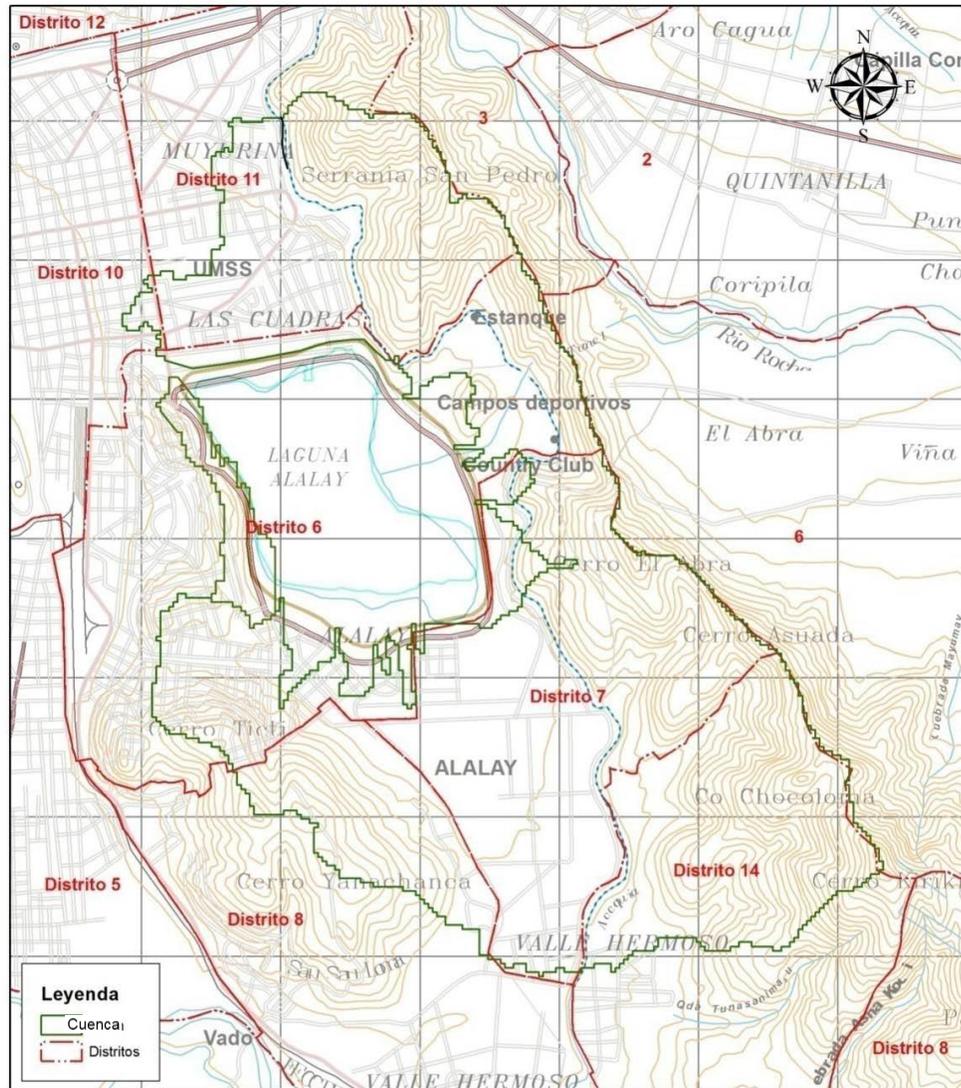


Figura 4 Distritos colindantes a la laguna Alalay
(Fuente: GMACBBA, 2017)

El principal afluente de agua, del cual la laguna obtiene alrededor del 60% de su volumen, es el río Rocha, eventualmente recibe aportes del embalse Angostura. También ingresan volúmenes importantes por escorrentía durante la época de lluvias, y por numerosos canales pluviales conectados a ella (fig. 5), donde esporádicamente suelen circular aguas contaminadas de fuentes difusas provenientes de la zona sud de la laguna, La laguna Alalay se caracteriza por sus aguas mineralizadas, y de $\text{pH} > 7$, (ligeramente básico), el oxígeno disuelto en sus aguas puede variar entre la anoxia y la

sobresaturación, y el contenido de nutrientes (fósforo y nitrógeno) es alto lo que determina su estado entre eutrófico e hipertrófico (Acosta, 2018).



Figura 5 Esquema de drenajes laguna Alalay
(Fuente: Acosta, 2018)

La comunidad vegetal está compuesta por vegetación palustre o helofitos, caracterizada por la presencia de totora (*Schoenoplectus californicus subsp. Tatora*) y matara (*Typha dominguensis*) (fig. 6).



Figura 6 Comunidad de totora (*Schoenoplectus californicus subsp.tatora*) y matara (*Typha dominguensis*)
(Fuente: GAMCBBA, 2018)

Ambas especies crecen en los márgenes de la laguna en forma de mosaico, desarrollan una gran densidad y pueden alcanzar una altura de 3 m.

Las plantas sumergidas o hidrofitos comprenden principalmente *Potamogeton pectinatus*, *Myriophyllum quitense* y *Zanichelia andina* (fig. 7), estas especies se desarrollan en aguas muy mineralizadas, alcalinas, moderadamente salinas y eutróficas, pueden dominar masivamente con una dinámica temporal.



Figura 7 Comunidad de *Potamogeton pectinatus*-*Zanichelia andina*
(Fuente: GAMCBBA, 2018)

Las plantas flotantes o pleustofitos están representadas por *Pista stratiotes*, *Eichornia crassipes* (fig.8), (repollitos de agua y taropes), las cuales son indicadores de aguas mineralizadas y eutróficas (ricas en nitrógeno y fosforo), pueden desarrollar en forma explosiva y cubrir grandes extensiones de la superficie de la laguna (Acosta, 2018).



Figura 8 Comunidad de *Eichornia crassipes*.
(Fuente: GAMCBBA, 2018)

La vegetación en la laguna Alalay, es un componente importante para las poblaciones de aves acuáticas, como *Phalaropus tricolor* (Falaropo), *Larus serranus* (Gaviota Andina), *Tringa Flavipes*



(Archibebe Patigualdo Chico), *Egretta thula* (Garcita blanca) *Ardea alba* (Garza blanca), *Phalacrocorax Brasilianus* (Cormoran), etc. Que llegan a este cuerpo de agua para cubrir necesidades biológicas como refugio, cría y alimentación. Además, la franja de totoras y matara, que rodea a la laguna es una zona de protección ya que asimilan los nutrientes convirtiéndolos en biomasa vegetal, y son zonas importantes en el proceso de desnitrificación. Sin embargo, se debe realizar un manejo adecuado de la vegetación para evitar que se conviertan en emisoras de nutrientes, una vez que han completado su ciclo de vida (Acosta, 2018).

El fitoplancton, se caracteriza por su variable diversidad y la dominancia temporal de algunos géneros pertenecientes a *Cyanophyta* (antes llamada algas verdes –azules, hoy cianobacterias), *Euglenophyta* (algas flageladas) o *Chlorophyta* (algas verdes). El zooplancton herbívoro puede estar representado por el cladocero *Daphnia similis* principalmente y el copepodo calanoide *Notodiaptomus cf. Incompositus* (Acosta, 2018).

Los peces están representados por especies nativas como los platinchos (*Oligosarcus schindleri*, *Astyanax bimaculatus*), e introducidas como el pez mosquito (*Gambusia affinis*), el pejerrey (*Odontesthes bonariensis*) y la carpa común (*Cyprinus carpio*) (Acosta, 2018).

1.1.5 Contaminación de la laguna Alalay

La laguna Alalay ha sido especialmente vulnerable a la contaminación con el paso del tiempo. Ya en los años 80 y principios de los 90, se encontraba en un estado de hipóereutrofización, presentando su máxima degradación y casi extinción, ocasionando una gran mortandad de peces. Posteriormente, después de un dragado y rellenado, la laguna Alalay se recuperó y varias especies de peces, tales como el platincho (*Oligosarcus schindleri*), pejerrey (*Odontesthes bonariensis*) y carpa (*Cyprinus carpio*), volvieron a recolonizar el ambiente. En febrero del 2016, se volvió a evidenciar la mortandad de peces y aves, por factores similares a los de los años pasados; es decir, falta de oxígeno en el agua (anoxia), debido a la descomposición de materia orgánica y a la hipóere-contaminación con desechos



humanos e industriales. Los estudios realizados en la laguna Alalay y el río Rocha en los últimos 30 años, realizados por investigadores de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS), describen la evolución urbana en la zona de la laguna, y la influencia del clima y la población sobre la calidad de sus aguas, se destaca la importancia de la biodiversidad, y se da información sobre la diversidad y abundancia de aves acuáticas presentes en la laguna. También se presentan resultados de estudios de algas y macro invertebrados bentónicos (organismos que habitan en el fondo de los ríos, como larvas de insectos y diversos tipos de gusanos), presentes en el recorrido del río Rocha y la laguna Alalay como bioindicadoras de la calidad del agua, y para la determinación e interpretación de los grados de alteración de estos ecosistemas acuáticos (UMSS, 2016).

Para el manejo de esta laguna es necesaria la acción conjunta de los siete municipios involucrados, evitando el desagüe de aguas residuales industriales y domésticas, la disposición de sólidos orgánicos y contaminantes en la cuenca del río Rocha, haciendo cumplir las normas nacionales e implementando nuevas normas con los debidos controles y medidas paliativas para la conservación de estos ecosistemas acuáticos (UMSS, 2016).

1.2 Marco referencial

1.2.1 Zona de estudio

La zona de proyecto laguna Alalay se encuentra ubicado en el departamento de Cochabamba provincia Cercado, municipio de Cochabamba, con coordenadas Norte=8 073 247m, Este= 803 370m y altitud= 2558 msnm (fig.9).

Cochabamba se encuentra en la zona de los valles, ubicado en el corazón de Sudamérica, está conformada por 16 provincias y 47 municipios tiene una población aproximada de 1 972 000 habitantes según proyección 2018 (INE, 2018).

1.2.2 Ubicación Geográfica

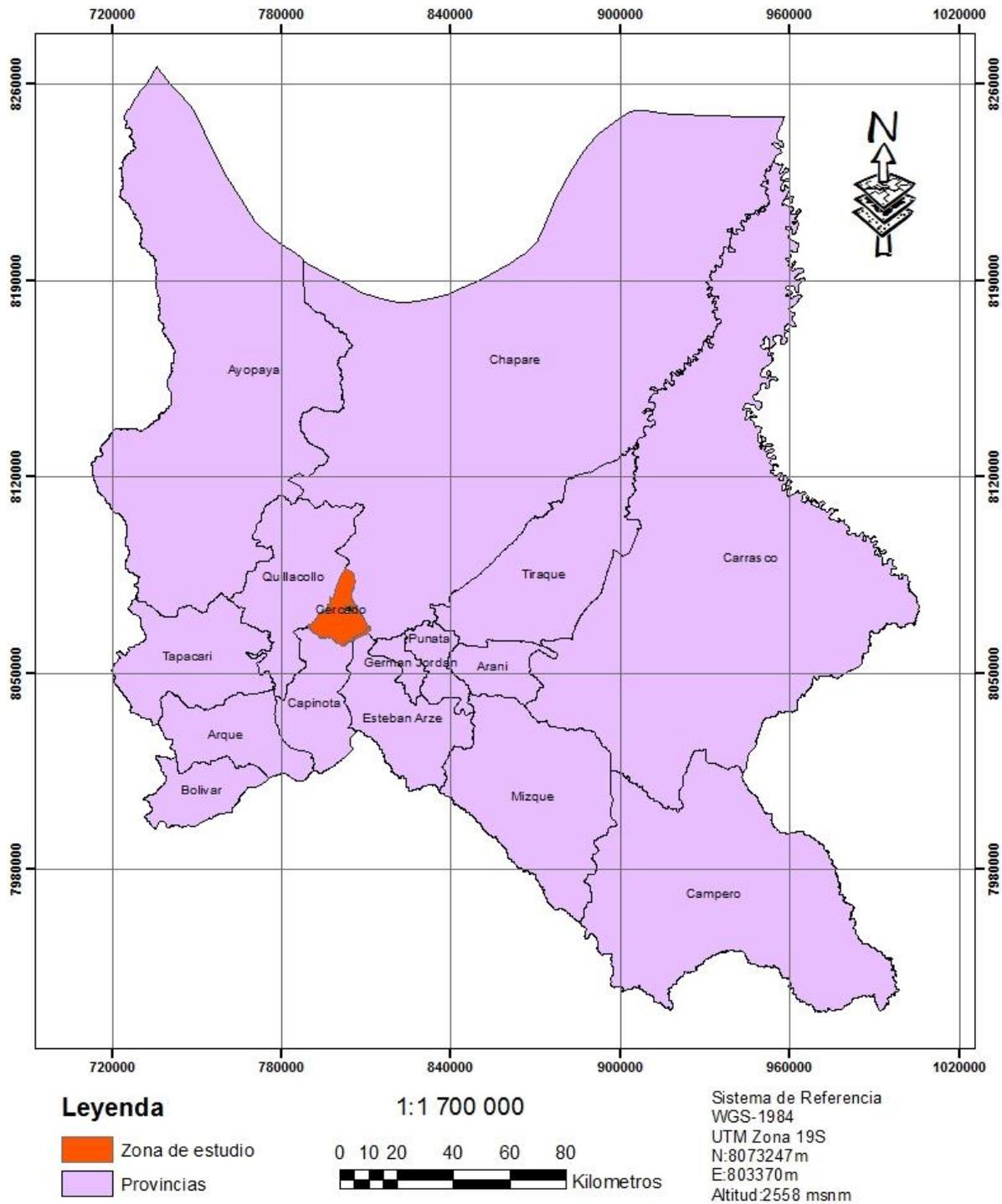


Figura 9 Ubicación Geográfica
(Fuente: elaboración propia en base a la cartografía de Geo-Bolivia)

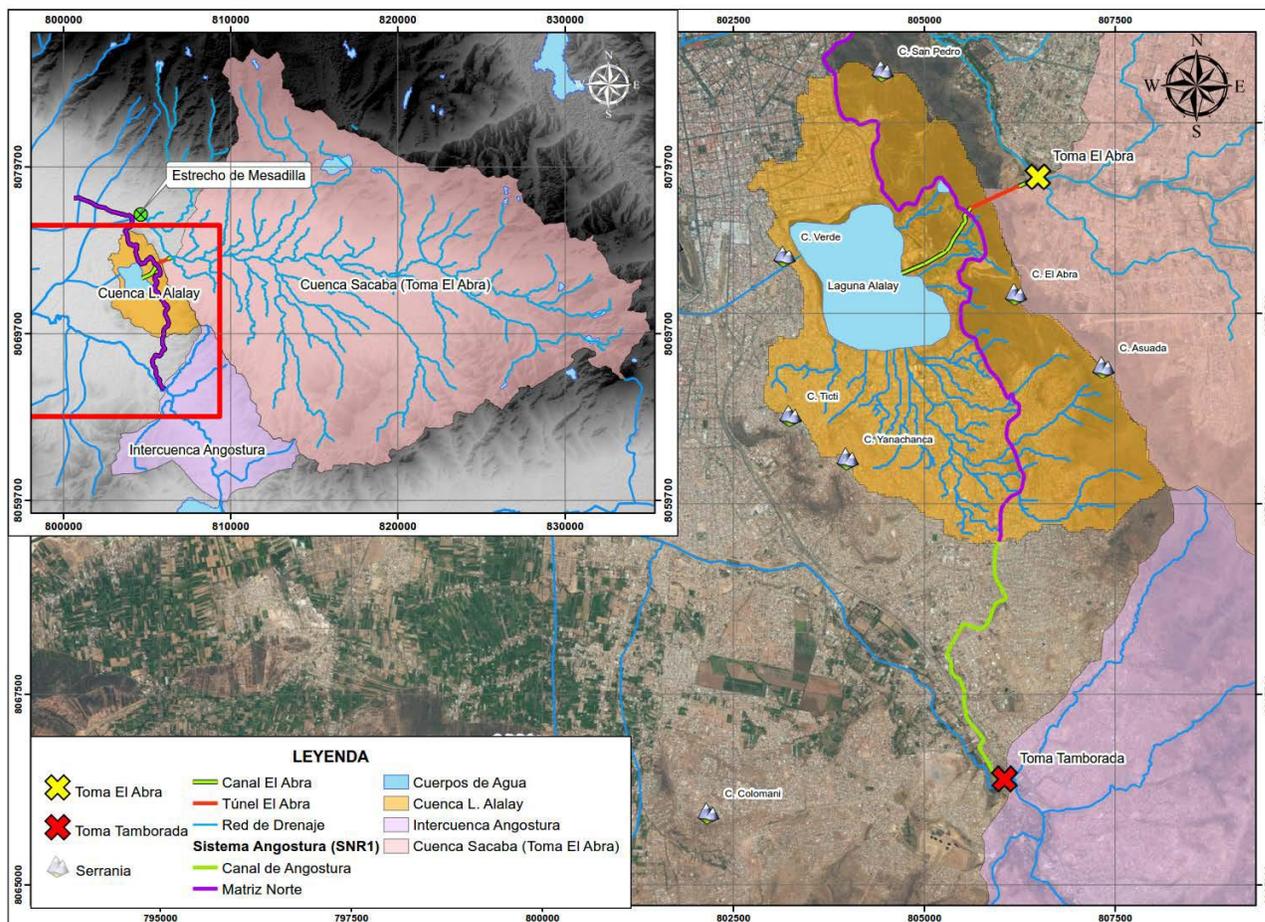


Figura 10 Afluentes a la laguna Alalay
(Fuente: CREMPLA, 2018)

1.2.3 Características climáticas

Por su ubicación entre los paralelos 17° y 18° de Latitud Sur, el área de estudio tiene características climáticas netamente tropicales, aunque debido a la altura el clima es templado y hasta frío. En las partes altas, de las cuencas del proyecto, en especial en la parte norte de la cuenca de Sacaba, el clima es frío y semi húmedo, en tanto que, hacia el Sur del Valle de Sacaba, incluyendo la microcuenca de la laguna Alalay y la intercuenca del río Tamborada, el clima es semiárido y templado (GAMCBBA, 2018).

La estación climatológica con datos de temperatura, precipitación, humedad relativa, evaporación y velocidad del viento más representativa del área de influencia del proyecto, es la estación ASSANA aeropuerto ubicado en el Valle Central, a unos 3.8 Km al Oeste de la micro cuenca de la laguna Alalay,

la radiación solar global media mensual para distintas localidades se refleja en la siguiente figura ver (fig.11). (GAMCBBA, 2018).

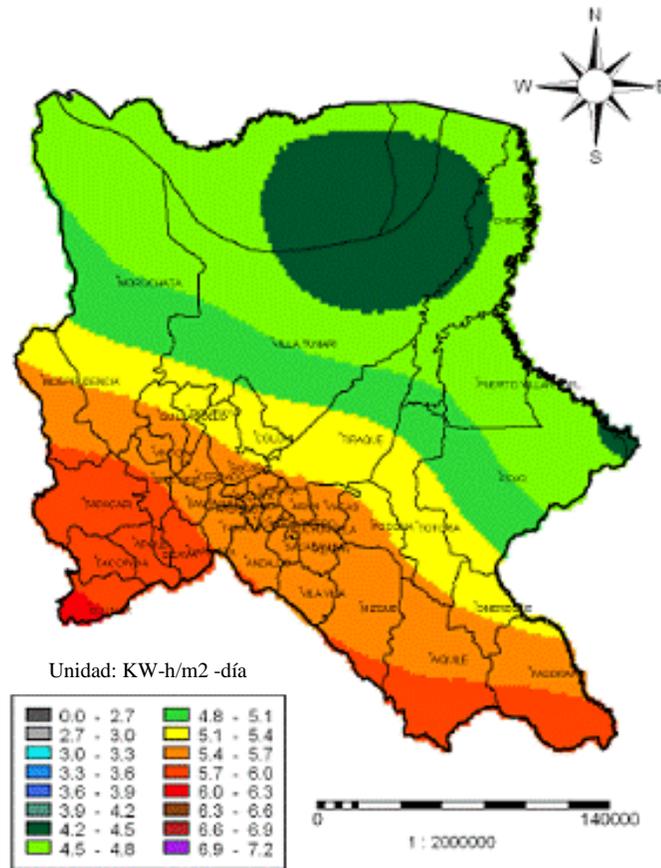


Figura 11 Radiación solar global de Cochabamba
(Fuente: Lucano y Fuentes I, 2010)

Tabla 1. Promedio mensual de variables meteorológicas, estación (AASANA, 2017)

Mes	Prec mm	Temperatura °C			Humedad Relativa%	ETO mm	Viento		Radi. Solar Global Kw-h/m ² -día
		Media	Máxima	Mínima			Vel.(Km/h)	Direc.	
Ene	115.9	18.6	24.8	12.3	63.31	116.1	4	SE	6.3
Feb	95.3	18.4	24.6	12	63.43	109.5	3.6	SE	6.07
Mar	65.8	18.3	25.3	11.3	62.58	113.1	3.3	SE	5.68
Abr	17.6	17.5	26	8.8	58.09	112.9	1.9	SE	5.19
May	3.2	15.2	25.7	4.7	51.25	107.3	1.9	SE	4.56
Jun	1.9	13.3	24.2	2	50.37	95	1.4	SW	4.45
Jul	2.2	13.4	24.6	2.2	48.4	105.2	2	SW	4.47
Ago	4.9	15.1	25.7	4.5	45.64	124.5	3.8	SW	4.9
Sep	7.7	17	26.1	7.6	46.95	140	5.7	SW	5.6
Oct	18.5	18.8	27.5	10.2	46.77	152.7	6.2	N	5.82
Nov	46.7	19.6	27.5	11.7	50	140.1	6.2	SE	6.21
Dic	90.2	19.2	26.1	12.3	55.75	114.1	5	SE	6.06
Total	470.2	17.1	24.8	8.4	53.55	1434.5	3.8	SE	



1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el estado de contaminación por presencia de vegetación acuática flotante en la laguna Alalay mediante el uso de imágenes satelitales, entre los periodos 1999-2019.

1.3.2 Objetivos específicos

- Recolectar información de parámetros de calidad del agua e información de sucesos históricos de la ecología del ecosistema acuático de la laguna Alalay.
- Obtención de imágenes satelitales e interpretación, para el monitoreo de calidad del agua.
- Generar la serie temporal de NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada), entre los periodos 1999-2019, mediante la plataforma Google Earth Engine.
- Realizar la categorización de NDVI de la vegetación acuática que cubre el espejo de agua de la laguna Alalay.

1.4 Justificación

La laguna Alalay, es uno de los cuerpos de agua más importantes de la ciudad de Cochabamba, y a la vez la más contaminada, por lo que el municipio y otras instituciones se ven obligadas al monitoreo de la calidad de agua de la laguna.

Debido a que el monitoreo en campo se ve limitado en el espacio y tiempo. El presente proyecto hará uso de la Teledetección, como método complementario para el monitoreo de la calidad de agua, ya que ofrece ciertas ventajas respecto al monitoreo tradicional de campo.

2 MARCO TEORICO

2.1 Contaminación del agua

La acción y el efecto de introducir materias, o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que de modo directo o indirecto, que impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores, o con su función ecológica, producirán cambios físico y químicos como color



entre otros, aspectos del agua que indican que está contaminada, pero la presencia de contaminantes peligrosos solo se puede detectar mediante pruebas químicas y biológicas específicas y precisas (IMTA, 2019).

2.1.1 Parámetros de calidad del agua

Se refiere a las características Físicas (temperatura, color, turbidez, transparencia, sólidos totales disueltos, sólidos suspendidos, color), químicas (conductividad eléctrica, pH, dureza, oxígeno disuelto, demanda de oxígeno, concentraciones de nitrógeno y fósforo, cloruros, metales pesados, biocidas, entre otros) y microbiológicas (presencia de bacterias patógenas, virus, helmintos y protozoarios, entre otras consideraciones), indicadores el estado de la calidad del agua. Por ello, en los últimos años el concepto de calidad del agua ha ido cambiando de un enfoque físico y químico, a otro que integra todos los componentes del ecosistema. De hecho, la directiva del parlamento Europeo, ha propuesto como medida de la calidad de los ecosistemas acuáticos, establecer el estado ecológico del sistema estudiado, mediante el empleo de indicadores biológicos, hidro morfológicos y fisicoquímicos (IANAS, 2019).

La figura 12 muestra los parámetros de calidad del agua como ser: parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

Tipo de parametro	Parametros
Fisicos	Color, Olor, Sabor Transparencia del agua. Temperatura Turbiedad Solidos(solidos suspendidos totales) Conductividad
Quimicos 	Alcalinidad, dureza Oxigeno disuelto PH No metales (sulfatos, cloruros, cianuros) Metales Nutrimentos NO_3 NO_2 NH_3 P-totales, etc.) Cloro residual
Materia organica	Demanda quimica de oxigeno(DQO) Demanda biologica de oxigeno (DBO) Carbono organico total (COT) Sustancias activas al azul de metileno(SAAM) Grasas y aceites
Bacteriologicos microbiologicos 	Coliformes fecales y coliformes totales Vibrio cholere Shigele, Samonela Giardia lambia Huevos de helminto

Figura 12 Parámetros convencionales de calidad del agua
(Fuente: IMTA, 2019)

La (fig.13), muestra algunos contaminantes y sus ejemplos de procedencia y el problema que estos causan al medio ambiente.



Contaminante	Ejemplo de procedencia	Problema ambiental causado
Grasas aceites	Mantenimiento de carro, disposcion de aceites al agua, emisiones industriales, etc.	Toxicidad; contaminacion de los sedimentos de arroyos urbanos;contaminacion de agua subterranea.
Solidos suspendidos	Escorrentia de la tierra de cultivo, erosion de las tierras altas; acumulacion de solidos en las superficies urbanas no porosas; construccion.	Sedimentaciion en cuerpos y pozas naturales; acarrea nutrietes y compuestos organicos.
Microorganismos fecales patogenos	Falla en los sistemas de tanque sépticos: rompimiento de redes de alcantarillado y contaminación de la red de agua potable.	Problema de salud , falta de cumplimineto con estandares de recreacion (cierre de playas)
Fósforo	Erosion del suelo; fertilizantes agricolas; contaminacion de la escorrentia humana (por ejem. Con detergentes)	Eutrofizacion de las aguas dulces ; degradacion ecologica proliferacion de crecimientos algales; toxicidad; incremento en el tratamiento de agua potable.
Nitrógeno	Fertilizantes agricolas; desechos pecuarios; emisiones de trafico; depositacion atmosferica.	Eutrofizacion (especial de las aguas costeras); contamiacion de agua potable .
Metales pesados	Escorrentia urbana; agua residual y industrial	Toxicidad. Afectaciones geneticas en humanos y animales.

Figura. 13 Algunos contaminantes de importancia de acuerdo a su grado de afectación
(Fuente: IMTA, 2019)

2.2 Ecosistemas acuáticos interiores

Lagos. Son cuerpos de agua naturales de condiciones lenticas (estancadas), cuyo origen es continental; Puede definirse como un cuerpo de agua cerrado (generalmente agua dulce), totalmente rodeado de tierra y sin acceso directo al mar, generalmente son grandes con más de 8 m de profundidad, constituyen masas de agua permanente y que se depositan en una depresión del terreno (cuenca lacustre) (Cervantes, 2007).

Laguna. Son cuerpos de agua con aparente similitud con los lagos; su existencia puede corresponder a cualquier origen de drenaje y de dimensiones. Permanecen relativamente estancados y son un tanto inestables, con variaciones en el nivel de agua; pueden ser temporales o permanentes, dependiendo del régimen pluvial. Son depósitos con una profundidad media menor a 8 metros y de forma cóncava. Esta profundidad tiende a provocar una turbiedad que origina una menor transparencia



del agua en comparación con un lago la cual resulta de color pardo por la presencia de materia orgánica, por el crecimiento de algas y por la presencia de sólidos suspendidos (Cervantes, 2007).

2.2.1 Componentes de un ecosistema lacustre

En los lagos y lagunas distinguimos un componente abiótico, caracterizado por diversos factores que determinan las condiciones ambientales en que viven los organismos acuáticos, quienes conforman el componente biótico. Su conocimiento nos ayuda a comprender aspectos importantes del funcionamiento de estos ecosistemas (Acosta, 2018).

2.2.2 Componente abiótico

Es importante enfatizar, que la vida en nuestro planeta y particularmente en el agua, depende de la radiación solar que actúa regulando, a través de la luz y temperatura, diferentes procesos físicos, químicos y biológicos en los ecosistemas acuáticos. Las plantas acuáticas y algas son la puerta de entrada en el ecosistema lacustre, a través de la cual la energía solar se convierte en energía química, y esta a su vez se transmite al resto de los organismos de la red trófica acuática.

La luz. La penetración de la luz en los lagos y lagunas se ve afectada por la presencia de partículas en suspensión y disueltas, material orgánico e inorgánico y el plancton, según la cantidad de ellos tenemos lagos de aguas transparentes o de aguas turbias. La distancia en la cual el 99% de la luz incidente se extingue, corresponde a la zona eufótica o fótica en un ecosistema acuático. Esta distancia representa la intensidad mínima de luz que permite la fotosíntesis, o sea que corresponde aproximadamente, al 1% de la luz incidente en la superficie. Por debajo, está la zona llamada afótica, donde la productividad por fotosíntesis es casi nula. La profundidad de la zona fótica puede medirse por diversos mecanismos, por ejemplo, las celdas fotoeléctricas que miden la composición de la luz a diferentes profundidades, e disco de Secchi (transparencia de Secchi) mide la mitad del recorrido de la luz, si esta medida de la transparencia de Secchi se multiplica por 1.7, se obtiene una profundidad de la zona fótica (Acosta, 2018).



Temperatura. Está determinada por la cantidad de energía calorífica que es absorbida por un cuerpo de agua y juega un rol fundamental en todos los procesos biológicos. La temperatura, por lo general, no es uniforme en un ecosistema lacustre y puede presentar periodos de estratificación (formación de capas de agua de diferente temperatura), de larga o corta duración. Durante la estratificación, una de las capas de lago, por ejemplo, la superficial, muestra mayor temperatura (epilimnio), y menor densidad que la capa inferior (hipolimnio), de agua más fría y densa, entre ambas capas se forma una zona de descenso brusco de temperatura denominada termoclina (metalimnio), que se presenta durante el periodo de verano en los ecosistemas templados. En la estación otoñal, las condiciones cambian por el enfriamiento de la capa superficial, que se hace más densa y se hunde desplazando el agua profunda más caliente hacia la superficie donde también se enfría, esto uniformiza la temperatura de la cubeta de agua y el viento puede mezclar toda la columna de agua. No en todos los lagos se presentan los cambios estacionales de estratificación, siendo común en los lagos de clima templado.

En los lagos tropicales, la cantidad de radiación durante el año es más constante. El régimen de temperatura varía con la altitud, por lo que se habla de lagos de aguas cálidas o frías. Los periodos de estratificación en estos lagos tropicales, son de corta duración y se originan por la variación de temperatura entre el día y la noche, por lo que la circulación del agua es permanente (lagos polimíticos), además el efecto de los periodos de lluvia no permite una estratificación estable y duradera. Los lagos polimíticos, se dividen en polimíticos fríos (altas montañas) y cálidos (generalmente las lagunas tropicales) (Acosta, 2018).

El oxígeno disuelto. Es uno de los gases más importantes en la dinámica de los ecosistemas acuáticos lacustres. Los aportes de oxígeno provienen de la atmosfera y de la fotosíntesis que realizan las algas y plantas acuáticas. La concentración de oxígeno será mayor en la zona superficial de la columna de agua (zona eufótica o epilimnio), ya que es en esta zona donde se realiza la actividad



fotosintética por la mayor luminosidad; hacia el nivel más profundo, la concentración de oxígeno es generalmente mucho más bajo, debido a los procesos de oxidación de la materia orgánica, y la escasa o nula luminosidad (zona afótica o hipolimnio). La concentración de oxígeno disuelto en el agua es afectada por la temperatura, aumenta con la disminución de la temperatura, mientras que a mayor temperatura la concentración de oxígeno disuelto es menor; sin embargo, otros factores como la presión parcial de gases y la salinidad, pueden también afectar la solubilidad del oxígeno del agua (Acosta, 2018).

Sales minerales. En las aguas continentales las sales minerales más abundantes son los carbonatos, los sulfatos y los cloruros. Los cationes de mayor importancia son el calcio el magnesio, el sodio y el potasio. Estos iones determinan la mineralización del agua, y la concentración varía de acuerdo a la naturaleza de las rocas que forman la cuenca del lago, condiciona la presencia o ausencia de las especies acuáticas, porque exige que los organismos desarrollen eficientes mecanismos fisiológicos de regulación osmótica, que les permitan adaptarse a estas condiciones.

Medir la conductividad del agua nos da una idea bastante razonable de la cantidad de sales que contiene una laguna, y nos ayuda a clasificar aguas por su mineralización.

pH. Las aguas naturales pueden variar en cuanto a la acidez o basicidad, dependiendo de la cantidad de materia disuelto causante de ello. Los efectos letales para los organismos acuáticos empiezan a manifestarse por debajo un pH ácido < 4.5 aproximadamente y por encima de pH 9.5 (básico). La alcalinidad de las aguas se refiere a la cantidad y clase de compuesto presentes, capaces de modificar el pH ácido de 4.5 aproximadamente y por encima de pH 9.5 (básico). La alcalinidad de las aguas, se refiere a la cantidad y clase de compuestos presentes capaces de modificar el pH desde un estado neutro hacia el lado básico. Es debida principalmente a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. La acidez muy raramente es vista en los ecosistemas naturales; sin embargo, el dióxido



de carbono combinado, los ácidos fuertes y bases débiles, son responsables de que las aguas disminuyan su pH (Acosta, 2018).

El pH regula procesos biológicos mediados por enzimas (ej. fotosíntesis, respiración), la disponibilidad de nutrientes esenciales para el crecimiento biológico en los ecosistemas, la movilidad de metales pesados como el cobre es tóxica para muchos microorganismos, así como también la estructura y función de macromoléculas y organelos, tales como ácidos nucleicos, proteínas estructurales y sistemas de la pared celular y membranas (Acosta, 2018).

Nutrientes. El nitrógeno y el fósforo, constituyen importantes nutrientes para la productividad de los lagos y lagunas, y son componentes del protoplasma celular de los organismos acuáticos. Su concentración es baja en ecosistemas oligotróficos y alta en ecosistemas eutrofizados.

Los nutrientes varían en las zonas templadas con las estaciones, mientras que en las zonas tropicales varían con la época de lluvia y de sequía (Acosta, 2018).

Nitrógeno. La principal fuente de nitrógeno para los ecosistemas acuáticos es la atmósfera, y es el componente fundamental de las proteínas, las cuales son la base estructural de los seres vivos. De una compleja variedad de formas de nitrógeno que pueden encontrarse en la naturaleza, el amonio y los nitratos son los más importantes en los ecosistemas acuáticos. El fitoplancton y las plantas acuáticas, incorporan el nitrógeno en citoplasma y lo utilizan para la síntesis de proteínas. Además, ciertas bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, pueden también convertir el nitrógeno a los tejidos, a través del proceso metabólicos, los organismos devuelven el nitrógeno al medio ambiente por la orina o heces, o una vez que los organismos mueren, el nitrógeno se va al medio ambiente a través de los procesos de descomposición (Acosta, 2018).

El ciclo del nitrógeno es de naturaleza microbiana; es decir, son las bacterias las que catalizan las transformaciones del nitrógeno, la descomposición de la materia orgánica realizadas por hongos y



bacterias, produce amonio (amonificación). El amonio producido puede difundir a la columna de agua donde puede ser utilizado por las algas acuáticas.

Por otra parte, en las capas superficiales del sedimento, el amonio puede ser transformado macrobiamente a nitrato, proceso llamado nitrificación. Cuando el nitrato se encuentra en situación anaerobia (sin oxígeno), puede ser transformado macrobiamente a (nitrógeno gaseoso), el cual no puede ser utilizado por algas y plantas, y desaparece como hacia la atmosfera. Este proceso llamado desnitrificación, puede constituir en la mayor pérdida de nitrógeno de los lagos (Acosta, 2018).

Fósforo. Es un muy importante en el metabolismo biológico de los lagos y lagunas, es muy escasa en la mayor parte de los cuerpos de agua naturales, en comparación con los demás nutrientes. El fósforo es parte de las moléculas más esenciales para la vida, entre las cuales tenemos el ATP (trifosfato de adenosina), que es el portador de energía, el ADN y ARN, síntesis de proteínas. La fuente principal de fósforo se encuentra en las rocas principalmente como fósforo, este es transportado a los cuerpos de agua por disolución del agua de lluvia.

El fósforo total es utilizado para medir el estatus de nutrientes en los lagos, está compuesto por fósforo particulado que se encuentra presente en las algas, organismos, material suspendido, y por fósforo soluble (reactivo y no reactivo). El fósforo soluble reactivo (ortofosfato o fósforo biodisponible o SRP), es la forma que las plantas acuáticas y algas puedan absorberlo. El fósforo disponible aumenta el pH básico y disminuye a pH ácido.

En lagos tropicales, las temperaturas aumentan el metabolismo de las plantas y algas, haciendo que el fósforo soluble reactivo (biodisponible), sea asimilando más rápidamente, por lo que los valores detectados de esta forma de fósforo, son por lo general bajos (Acosta, 2018).

Los sedimentos de los ecosistemas lacustres representan un importante reservorio de fósforo. La materia orgánica se descompone en esta zona a través del metabolismo bacteriano, cuando existe



suficiente oxígeno, el fósforo queda atrapado en el sedimento por fuertes enlaces químicos, mientras cuando existe un déficit de oxígeno o anoxia, el fósforo es liberado hacia la columna de agua.

El fósforo puede ser aportado a los lagos y lagunas a través de la lluvia, el agua subterránea, escorrentía y aguas corrientes. En general, el aporte de fósforo mediante la precipitación es inferior en las regiones no pobladas, en comparación a las zonas urbanas e industriales, donde generalmente es más alto debido a la erosión de los suelos y la contaminación. La cantidad de fósforo que entra a las lagunas por el drenaje superficial del agua, depende de su cantidad en los suelos, de la topografía, de la cobertura vegetal, del uso de la tierra y la densidad poblacional (Acosta, 2018).

2.2.3 Componente biótico

El componente biótico en lagos y lagunas está representado por diferentes comunidades acuáticas, vegetales y animales, cada comunidad está conformada por un conjunto de poblaciones que viven en una interacción directa o indirecta al compartir ambientes o hábitats. Así podemos hablar sobre la comunidad de fitoplancton, zooplancton, macroinvertebrados, peces, plantas acuáticas o macrofitas, etc (Acosta, 2018).

Plancton. Pertenecen al plancton los organismos que flotan o viven suspendidos a merced de los movimientos de las aguas, sin locomoción propia suficientemente fuerte para dirigir sus propios desplazamientos. El plancton compuesto por vegetales recibe el nombre de fitoplancton, y el que está formado por animales se denomina zooplancton (Acosta, 2018).

Fitoplancton. El fitoplancton representa el primer eslabón de la red alimenticia o red trófica; junto con las plantas superiores acuáticas, constituyen el grupo de organismos llamados “productores primarios”. El fitoplancton está compuesto por algas microscópicas, se encuentran libres en el agua y utilizan la luz para transformar la energía química, para generar su propia materia orgánica o biomasa mediante procesos de fotosíntesis, de la cual depende el resto de los organismos de la red



trófica. El oxígeno generado por las algas es utilizado por otros organismos acuáticos en el proceso de respiración.

La abundancia de la comunidad de fitoplancton está determinada por la cantidad de luz, la temperatura, y la concentración de nutrientes que se encuentran en el agua, principalmente fósforo y nitrógeno. Por ello, en lagos oligotróficos y fríos (baja cantidad de nutrientes (lagos eutróficos) y más cálidos existen una alta densidad. Para determinar la abundancia del fitoplancton, generalmente se mide la cantidad de clorofila que representa la biomasa (Acosta, 2018).

Zooplankton. Es el componente animal del plancton de los sistemas acuáticos, se encuentra más desarrollado en lagos y lagunas que en los sistemas que presentan algún de corriente (ríos, arroyos). Existen tres grupos principales en el zooplankton, que han sido ampliamente estudiados: los rotíferos, los copepodos y los cladóceros.

Macrófitas acuáticas. Son plantas vasculares que tienen diferentes formas de crecimiento a lo largo de un gradiente de profundidad en el lago.

La ribera de los lagos es ocupada por plantas emergentes o halófitos, son plantas acuáticas enraizadas en el fondo, cuyos tallos y hojas emergen por encima de la superficie de agua, por ejemplo, la totora (*Schoenoplectus tatora*), el junquillo (*Cyperus giganteus*) y la matara (*Tipha dominguensis*). Estas plantas pueden alcanzar una gran productividad, acumulando nutrientes en su biomasa, y por ello lechos de halófitos, pueden ser utilizados como un filtrador biológico, para reducir el contenido de nutrientes del agua (Acosta, 2018).

En zonas de mayor profundidad, pueden hallarse aquellas plantas enraizadas en el fondo o hidrófitos, algunas con sus hojas flotantes sobre la superficie del agua (*Nymphaea amazonum*, *Victoria regia*) o bien con sus hojas totalmente sumergidas en el agua (*Miriophyllum quitense*, *Potamogeton pectinatus*). En diferentes zonas pueden aparecer plantas con hojas flotantes o pleustifitos, que son

plantas macroscópicas que flotan libremente, sin llegar a enraizar en el fondo, son ejemplo los taropes (*Eichornia crassipes*, *Pistia stratiotes*), (fig.14) (Acosta, 2018).

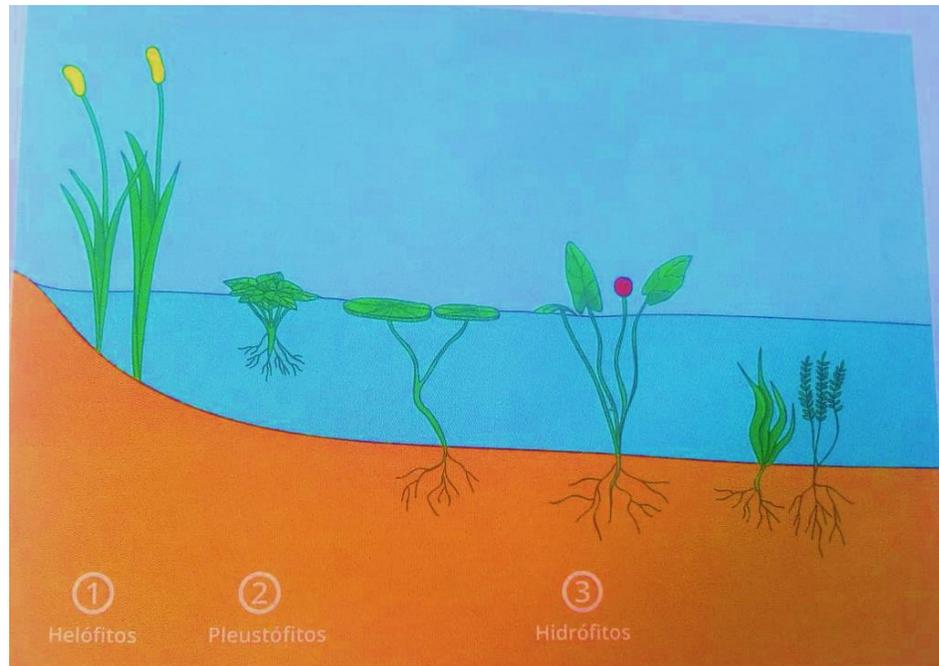


Figura 14 Formas de crecimiento de las plantas acuáticas en un lago
(Fuente: Acosta, 2018)

La presencia de vegetación en los lagos influye en el funcionamiento de los mismos, provee refugio a pequeños organismos contra la depredación ejercida por organismos más grandes, cambia la dinámica del ecosistema, y previene la resuspensión de los sedimentos. Los lagos vegetales son usualmente muy ricos en invertebrados y peces, además atrae a un gran número de aves en comparación a lagos sin vegetación (Acosta, 2018).

Macroinvertebrados. Bajo este término se agrupan todos los organismos que pueden ser observados a simple vista, con tamaños superiores a 0.5 mm de largo. Pueden encontrarse en la zona litoral donde existe abundante vegetación acuática (perizoon), en el fondo adherido a un sustrato (bentos), en la superficie del agua (neuston), o pueden vivir nadando activamente en el agua como los peces (necton). Muchos macroinvertebrados como los hidrozooos, turbelarios (gusanos planos), anélidos (gusanos anillados), y moluscos pasan vida larvaria en el agua y en su estado adulto son



terrestre y voladores. Los macroinvertebrados exhiben una gran diversidad de hábitos alimenticios, pueden ser carnívoros que se alimentan de otros animales, entre los que se pueden citar a los celenterados, turbelarios y una gran variedad de insectos. Los herbívoros, son los que se alimentan de vegetales, se encuentran entre ellos larvas de tricoteros, lepidópteros y coleopteros. Los detritívoros, se alimentan del detrito tanto vegetal como animal, como las larvas de plecópteros y tricoteros (Acosta, 2018).

Actualmente, los macroinvertebrados se destacan como indicadores de las condiciones ambientales, su presencia refleja las condiciones donde viven, y las diferentes presiones sobre los ecosistemas naturales, por lo que son utilizados como una importante herramienta de monitoreo de los ecosistemas acuáticos.

Peces. Generalmente los peces adultos de gran tamaño suelen encontrarse en la zona pelágica de lagos y lagunas, mientras que las larvas y especies de pequeño tamaño suelen refugiarse en la zona nerítica. El impacto de los peces sobre la dinámica, la estructura y regeneración de nutrientes en un lago puede ser muy importante, su rol en la red trófica de los lagos será tratado más adelante (Acosta, 2018).

2.2.4 Eutrofización en lagos o lagunas

En su expresión más simple, la eutrofización es la respuesta biológica al exceso de nutrientes. El aumento de la biomasa produce una serie de efectos que individualmente, y colectivamente resultan en un uso deficiente del agua, destacan que la eutrofización es un proceso natural, que en muchos casos se ve alterada. En aguas superficiales, se obtiene una alta productividad de biomasa beneficiosa con altos rendimientos de peces.

Un cambio acelerado, o inducido por el hombre, en el estado trófico sobre el estado natural del lago, es la causa común de los problemas asociados con la eutrofización (Acosta, 2018).



Pueden ocurrir cambios en cualquier cuerpo de agua, incluidas en las aguas costeras marinas, aunque la progresión y los efectos de la eutrofización también están mediados por el clima. Como resultado, los lagos tropicales y subtropicales cálidos, se ven más afectados que los lagos fríos.

Las altas concentraciones de nutrientes en un lago, se derivan de insumos externos de la cuenca. La biomasa final obtenida, está determinada principalmente por el conjunto de nutrientes disponibles para crecer, al inicio de la temporada de crecimiento. Los nutrientes primarios tales Como nitrógeno y fósforo, se utilizan hasta completar el crecimiento y el agotamiento. Por definición, el nutriente que se agota es el nutriente limitante en cualquier sistema de lago (Meybeck, 1989) sugieren que, en aguas con una relación N / P superior a 7 a 10, el fósforo será limitante, mientras que el nitrógeno será limitante en lagos con una relación N / P inferior a 7 (Chapman, 1996).

2.3 ¿Qué son la proliferación de algas nocivas?

La Proliferación de algas nocivas (fig.15), ocurren cuando las colonias de algas plantas simples que viven en el mar o en el agua dulce, crecen fuera de control y producen efectos tóxicos o nocivos en las personas, peces, mariscos, mamíferos y aves marinas. Las enfermedades humanas causadas por las PAN, aunque raras, pueden ser debilitantes y hasta mortales.

Como las PAN pueden Ser Nocivas

- Producen toxinas
- Causan pérdidas económicas
- Contaminan el agua potable
- Asfixian organismos bentónicos
- Agotan el oxígeno
- Impiden a depredadores visuales
- Atenúan la luz que llega a la vegetación subacuática y a los corales. (Mehta & Palacios, 2017).

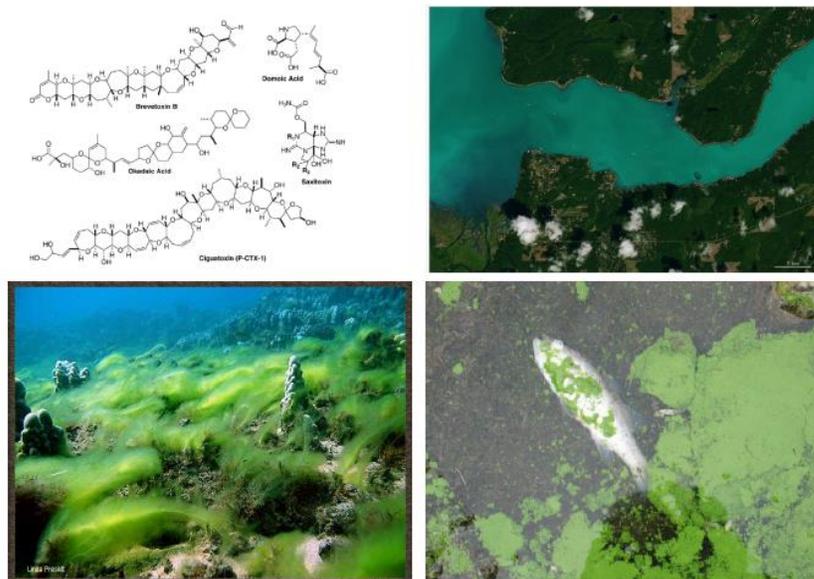


Figura 15. Proliferación de algas
(Fuente: Mehta, 2017)

2.3.1 ¿Qué causa la proliferación de algas nocivas?

- Carga de nutrientes (eutrofización)
- Contaminación
- Agua tibia
- Cambios en la red alimentaria
- Especies introducidas
- Cambios en el flujo de agua., después de eventos como huracanes, sequías o inundaciones.
- Otros factores aún desconocidos.

2.4 Teledetección Espacial

Se define la Teledetección Espacial, como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos asumiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya sea por emisión propia (Chuvieco, 1995).

2.4.1 Espectro electromagnético

Se deduce que podemos describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse

una serie de bandas en donde la radiación electro-magnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia, se denomina espectro-electromagnético (figura 13). Comprende, en un continuo, desde longitudes de onda más cortas (rayos gama, rayos X), hasta las kilométricas (telecomunicaciones) (Chuvienco,1995).

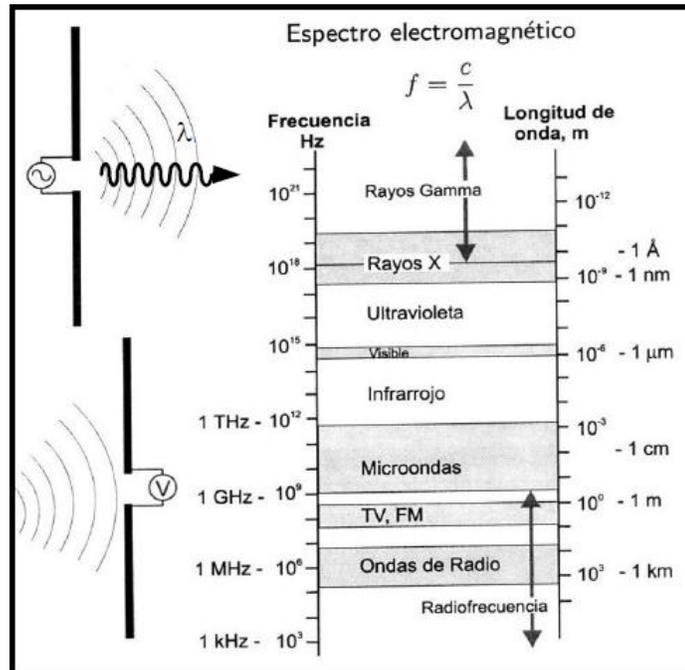


Figura 16 Espectro electromagnético
(Fuente: Perez & Muños, 2006)

2.4.2 Formación de la imagen multispectral

La imagen es capturada a bordo del satélite mediante una serie de detectores fotoeléctricos, que transforman los niveles de radiancia, procedentes de la superficie terrestre, en valores numéricos que se denominan niveles digitales.

El valor del nivel digital correspondiente a un pixel será de este modo, proporcional a la intensidad de radiancia procedente del terreno. Para ello se utilizan dispositivos de conversión analógica a digital.

Este procedimiento de formación de la imagen digital se repite para cada una de las bandas generándose como resultado final una matriz tridimensional en la que el valor del nivel digital de cada

pixel está ubicado en una fila una columna y una banda. De este modo se acuña el concepto de imagen multiespectral (Perez & Muños, 2006).

2.5 Componentes de un sistema de Teledetección

El fenómeno de la Teledetección, es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con las cubiertas terrestres. Estas tienen un comportamiento reflectivo variable, condicionando tanto por factores externos (ambientales), como por sus propias características físico químicas en el momento de la toma de imagen (fig.17), (Perez & Muños, 2006).

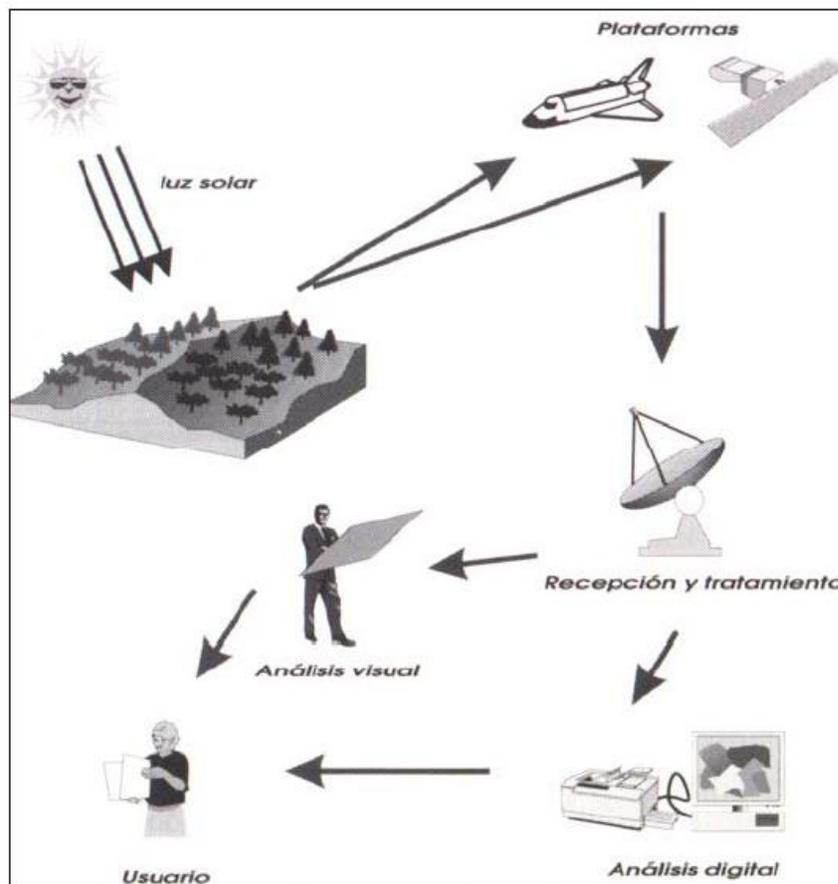


Figura 17. Componentes de un sistema de Teledetección
(Fuente: Perez & Muños, 2006))

Los manuales describen un sistema de Teledetección como un conjunto de componentes imprescindibles que permiten aproximarnos al conocimiento de esta técnica.

El primero de estos componentes es una fuente de radiación electromagnética como el sol, La energía originada por esta fuente en las distintas cubiertas terrestres, y atravesar la atmosfera, es



recogida por sensores óptico-electrónicos situados a bordo de satélites. Dicha información es transmitida a Tierra, como una señal digital en forma de matriz numérica.

En los sistemas de recepción se lleva a cabo un primer tratamiento de la imagen, gracias al cual son depurados algunos errores de índole geométrico o radiométrico antes de ser distribuidos a los usuarios.

Por último, la imagen en formato analógico o digital es analizada por los usuarios, estos realizan procesos de tratamiento visual o digital, tras los cuales se obtienen unos nuevos datos que pueden cobrar forma de mapas temáticos, o de tablas estadísticas, que recogen el comportamiento de una determinada variable espacial (Perez & Muños, 2006).

2.6 Resoluciones de un sensor

Mientras que en otros tipos de sistemas cartográficos estamos acostumbrados a relacionar de forma exclusiva resolución y precisión geométrica, en los sistemas sensores de Teledetección se habla de cinco resoluciones distintas; gracias a ellas, pueden evaluarse rangos de precisión referentes a distintos conceptos de suma importancia para el análisis de las imágenes espaciales, dichas resoluciones son espacial, radiométrica, espectral, temporal y angular (Perez & Muños, 2006).

2.6.1 Resolución espacial

Este concepto describe la capacidad de sistema para distinguir objetos en función de su tamaño. Dicho de otro modo, la resolución espacial suele interpretarse como el tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen del pixel sobre el terreno (Perez & Muños, 2006).

2.6.2 Resolución radiométrica

Indica la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia. La energía electromagnética recibida por el sensor, cuando se convierte a nivel digital, necesita un formato binario (número de bits) para codificarse. A mayor número de bits reservados para almacenar el valor de la reflectancia de un pixel, mayor resolución radiométrica.



2.6.3 Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. En este sentido, un sensor tendrá una resolución espectral más grande cuanto mayor sea el número de bandas que proporcione.

A la vez conviene que estas bandas sean suficientemente estrechas con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro. Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio que puede encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés (Perez & Muños, 2006).

2.6.4 Resolución temporal

Mide el tiempo de paso del satélite sobre la vertical de un punto. Con ello se determina la periodicidad de adquisición de imágenes de una misma zona. De este modo podemos cuantificar la capacidad que tiene un sistema sensor para registrar los cambios temporales acontecidos sobre una determinada cubierta, lo cual es de vital importancia a la hora de abordar estudios evolutivos. La resolución temporal está condicionada por el tipo de orbita, el ángulo de barrido y la velocidad del satélite (Perez & Muños, 2006).

2.6.5 Resolución angular

Por ella se entiende la capacidad que tiene un sensor para tomar imágenes oblicuas. Esta propiedad permite no solamente acortar los ciclos temporales de recubrimiento, sino que posibilita la generación de imágenes estereoscópicas y por tanto la reconstrucción del relieve.

En un análisis conjunto de las diferentes resoluciones de los satélites llegamos a la conclusión de que un satélite no es mejor ni peor que otro debido a su resolución. Cada misión espacial ha concebido unos sensores adaptados a unos determinados usos y eso es lo importante (Perez & Muños, 2006).

2.7 Satélites para el monitoreo de calidad del agua

Misiones Satelitales Actuales más usados para el monitoreo de medio ambiente: Landsat 7, Landsat 8, Terra, Aqua, Suomi National Polar Partnership (SNPP), Sentinel-2 y Sentinel-3, (fig.18).

Satélites	Sensores	Resolución
Landsat 7	Mapeador Tematico (ETM+)	barrido de 185 Km; 15m, 30m, 60m; revista cada 16 días
Landsat 8	Imágenes operacionales para la Tierra (OLI)	barrido de 185 Km; 15m, 30m, 60m; revista cada 16 días
Terra y Aqua	Imágenes Spectroradiometricas de Mediana Resolución (MODIS)	Barrido de 2330km; 250m, 500m, 1km; revista cada 1 a 2 días
Suomi NPP	Imagen Radiometrica Visible Infrarojo (VIIRS)	Barrido de 3040km; 375m 750m; revista cada 1 a 2 días
Sentinel 2A Y 2B	Imágenes Multiespectrales(MSI)	Barrido de 290km; 10m, 20m, 60m revista cada 5 días
Sentinel 3A	Instrumento Color Oceano y Tierra (OLCI)	Barrido de 1270km; 300m; revista cada 27 días

Figura 18 Satélites para el monitoreo de proliferación de algas nocivas
 (Fuente: Mehta, & Flores, 2018)

En la (figura15), se presentan bandas espectrales de algunos sensores de los diferentes satélites Landsat7, Landsat8, Sentinel2, Y el Satélite Cbers (Mehta & Flores, 2018).

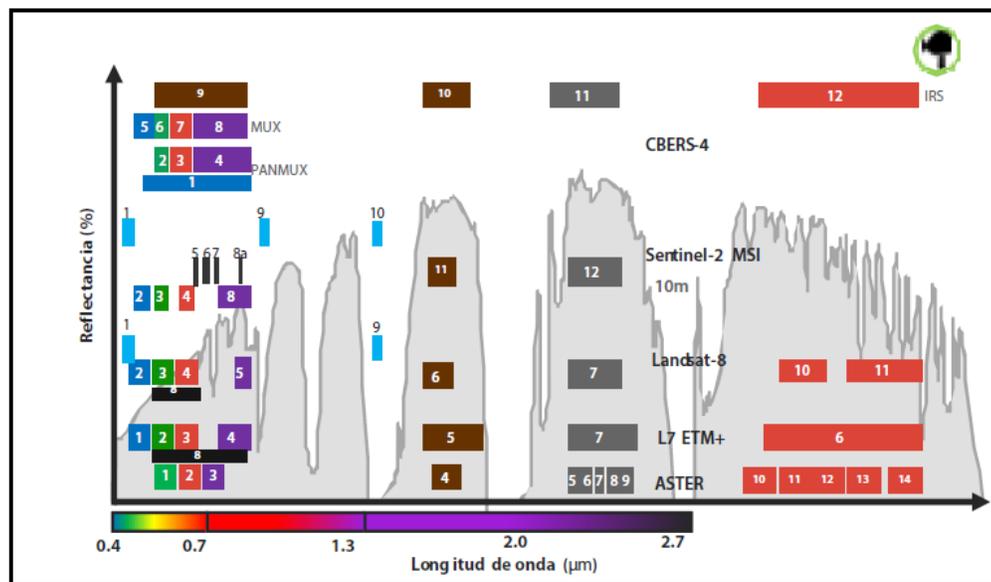


Figura 19 Bandas espectrales de distintas misiones satelitales
 (Fuente: Rodrigez, 2018)



Landsat 7. Tiene abordo el sensor mapeador temático mejorado (ETM+), Satélite de órbita polar, barrido 185km, resolución temporal 16 días, resolución espacial de 15m, 30, 60m.

Fecha de lanzamiento 15 de abril de 1999 hasta el presente.

Landsat 8. Tiene abordo el sensor captador de imágenes de la tierra operativo (OLI), el satélite es de órbita polar, barrido 185 km, resolución temporal 16 días, resolución espacial: 15m, 30m. Fecha de lanzamiento 11 de febrero 2013 hasta la presente fecha (Mehta & Flores, 2018).

Landsat 7 ETM+			Landsat 8 OLI		
Banda	Gama de Banda (µm)	Resolución Espacial (m)	Banda	Gama de Banda (µm)	Resolución Espacial (m)
1	0.45 – 0.515	30	1	0.433 – 0.453	30
2	0.525 – 0.605		2	0.450 – 0.515	
3	0.63 – 0.69		3	0.525 – 0.60	
4	0.775 – 0.90		4	0.630 – 0.680	
5	1.55 – 1.75		5	0.845 – 0.885	
6	10.4 – 12.5	60	6	2.10 – 2.30	15
7	2.08 – 2.35	30	7	0.500 – 0.680	
8	0.52 – 0.9	15	8	2.08 – 2.35	
			9	1.36 – 1.39	30

Figura 20 Bandas de las misiones Landsat
(Fuente: Mehta, & Flores, 2018)

Sentinel-2A y Sentinel-2B. Lanzados por la ESA (Agencia Espacial Europea), ambos en órbita polar, fechas de lanzamiento: sentinel-2A: 23 de junio 2015 al presente, Sentinel-2B: 7 marzo 2017 al presente. Resolución temporal de 5 días, sensores abordo: captador de imágenes multiespectral (MSI).

Captador de Imágenes multiespectral (MSI). Este sensor está a bordo en el satélite Sentinel-2, diseñado para observar la superficie terrestre y oceánica, la resolución espacial varía según la banda: 10m, 20m, 60m. Bandas espectrales 13: 4 bandas con resolución de 10m en visible y en el infrarrojo cercano, 6 bandas con resolución de 20m, 3 bandas de corrección atmosférica con resolución de 60 m (Mehta & Flores, 2018).

Tabla 2 Bandas de las misiones Sentinel2A y Sentinel2B (Mehta, & Flores, 2018)

Tabla 3 Bandas de las misiones Sentinel2A y Sentinel2B (Mehta, & Flores, 2018)

Numero de banda	Sentinel2A		Sentinel2B		Resolucion espacial (m)
	Longitud de honda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de honda central (nm)	Ancho de banda (nm)	
1	443.9	27	442.3	45	60
2	496.6	98	492.1	98	10
3	560	45	559	46	10
4	664.5	38	665	39	10
5	703.9	19	703.8	20	20
6	740.2	18	739.1	18	20
7	782.5	28	779.7	28	20
8	835.1	145	833	133	10
8a	864.8	33	864	32	20
9	945	26	943.2	27	60
10	1373.5	75	1376.9	76	60
11	1613.7	143	1610.4	141	20
12	2202.4	242	2185.7	238	20

2.8 Teledetección de la calidad del agua

Los satélites llevan instrumentos y sensores a bordo para medir: radiación solar reflejada, generalmente en la región del visible e infrarrojo (400 a 900nm) del espectro electromagnético, que son más adecuadas para la aplicación (Mehta & Flores, 2018).

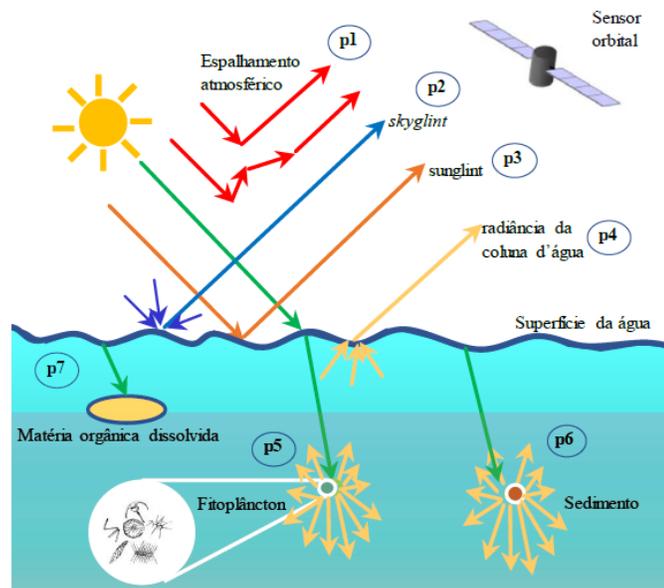


Figura 21 Interacción de emisión y reflectancia entre la fuente y el sensor (Fuente: Barbosa, Novo, & Martins, 2019)



2.8.1 La calidad del agua afecta sus propiedades ópticas

Con la teledetección se puede monitorear las, tonalidades del color del agua, el cual puede ser un indicador de la calidad del agua:

La materia disuelta y suspendida en el agua le cambia las propiedades ópticas, lo cual la cambia de color, materia orgánica disuelta que es causado por materia orgánica proveniente de hojas, raíces y residuos de plantas, materia suspendida incluye partículas de arcilla, minerales sin disolver, pláctones y floraciones algales, algunas especies de proliferación de algas nocivas (PAN), tienen propiedades únicas que afectan el color del agua (por ejemplo, mareas rojas), (fig.21) (Mehta & Palacios, 2017).

2.8.2 Indicadores de la calidad del agua observables por satélites

- Turbiedad y sedimentos.
- Materia Orgánica Disuelta Coloreada (CDOM por sus siglas en inglés).
- Temperatura Superficial Marina (SST por sus siglas en inglés).
- Clorofila-a (fitoplancton).
- Salinidad.
- TSS (Sólidos Suspendidos Total por sus siglas en inglés).
- Altura de la línea de fluorescencia.
- Profundidad eufótica.

2.8.3 Cómo la luz interactúa con el agua

Definición de reflectancia de Teledetección (Rrs) ‘Color Oceanico’

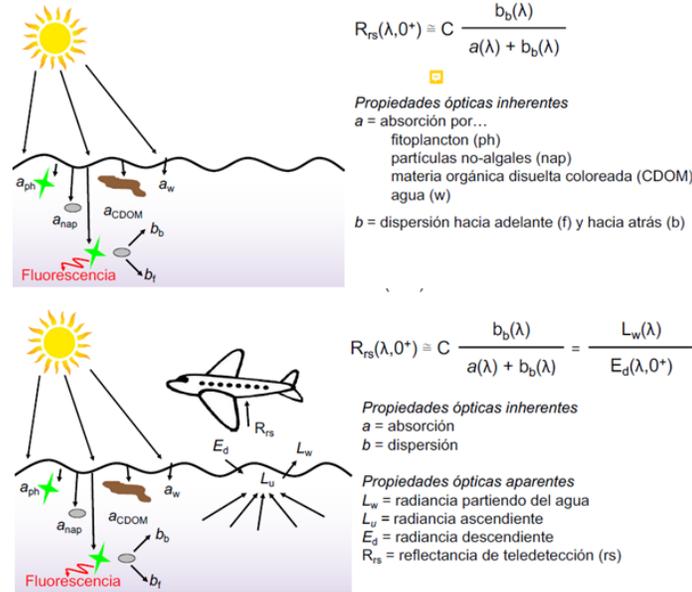


Figura 22 Como interactúa la luz con el agua
(Fuente: Mehta & Flores, 2018)

2.8.4 Propiedades ópticas inherentes y el color del agua

Absorción (*a*) de la luz por fitoplancton (ph), partículas no-algales (nap), agua (w) y materia orgánica disuelta coloreada (CDOM).

$$a = a(ph) + a(nap) + a(CDOM) + a(w)$$

Dispersión (*b*) de la luz por partículas hacia adelante (bf) y hacia atrás (bb).

$$b = bf + bb$$

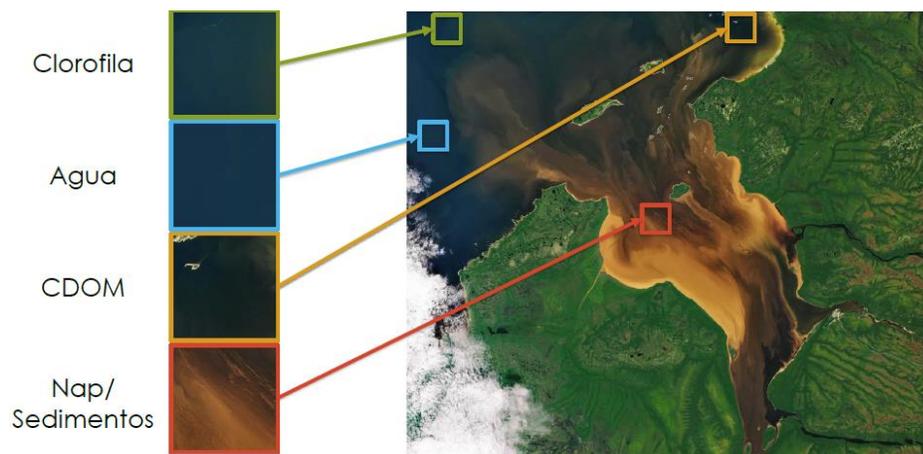


Figura 23 Propiedades ópticas inherentes que afectan el color del agua
(Fuente: Mehta & Flores, 2018)

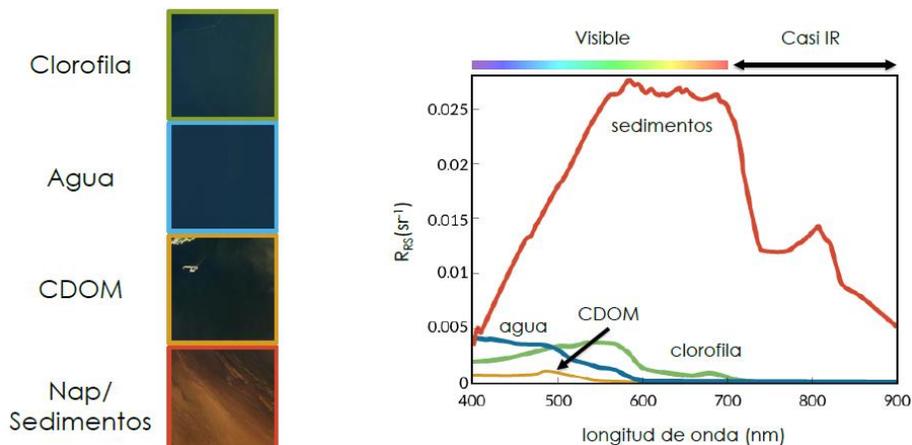


Figura 24 Firmas espectrales de las propiedades inherentes
 (Fuente: Mehta & Flores, 2018)

Un ojo humano típico tiene receptores de detección cromática que perciben la luz de la siguiente manera:

- 420-440 nm ‘azul’
- 534-555 nm ‘verde’
- 564-580 nm ‘rojo’

El agua con un alto contenido de clorofila se ve verde porque refleja fuertemente en la parte verde del espectro (Mehta & Palacios, 2017).

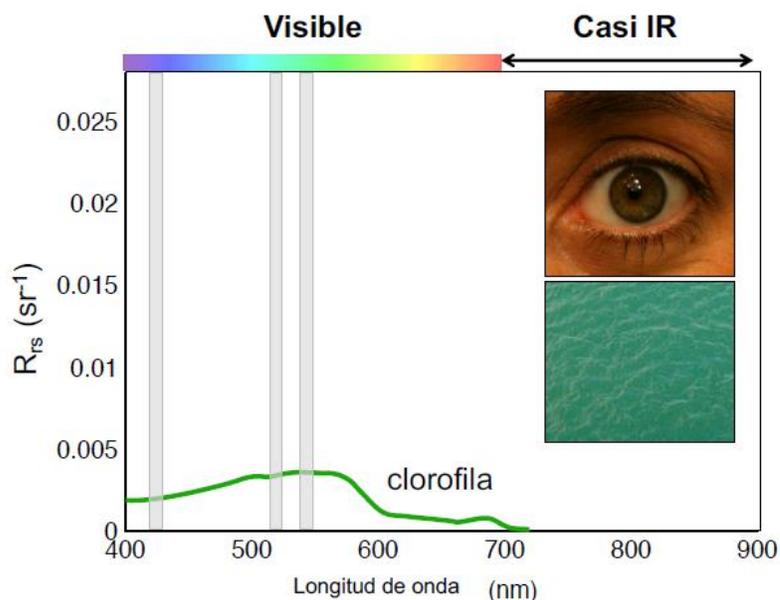


Figura 25 Firma espectral clorofila
 (Fuente: Mehta & Flores, 2018)

2.9 Índice de vegetación

Los índices se generan a través de combinaciones de bandas que intentan enfatizar alguna variable de interés: vegetación, agua, mineral.

Su diseño se apoya en el comportamiento radiactivo de esa variable: maximizar su separación del resto. Obtención de información a través del trabajo con las bandas de la imagen, combinación entre bandas.

Ventajas de los Índices de Vegetación:

- Realzan la contribución de la vegetación en la respuesta espectral de las superficies.
- Atenúan otros factores: suelo, atmósfera, iluminación, topografía.
- La abundancia de vegetación afecta la respuesta espectral en un pixel.

Los índices de vegetación nos permiten estimar la abundancia de vegetación utilizando datos espectrales. La vegetación aparece muy diferente en el visible y en el infrarrojo cercano. Comparando ambos se puede medir la masa vegetal y su vigor.

La vegetación saludable absorbe la mayor parte del espectro visible y refleja una gran parte del infrarrojo cercano (Rodríguez, 2018).

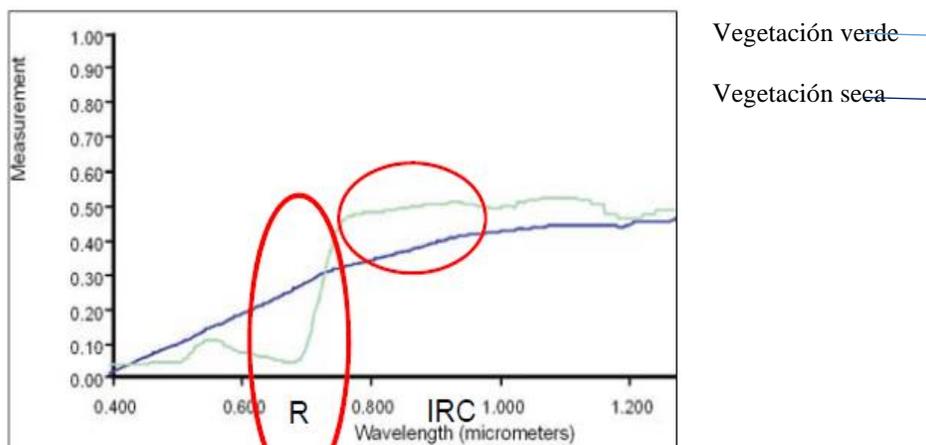


Figura 26. Reflectancia de la vegetación
(Fuente: Rodríguez, 2018)

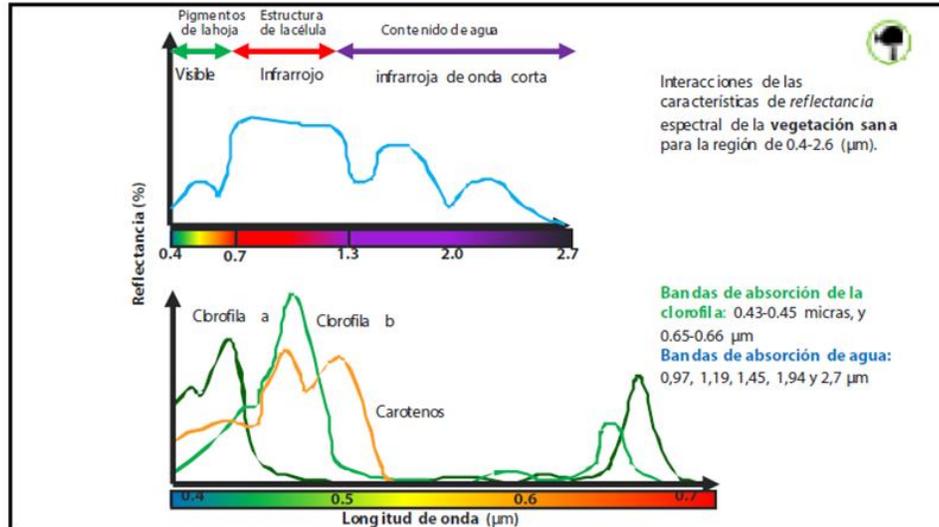


Figura 27 Reflectancias de vegetación y clorofila
(Fuente: Rodrigez, 2018)

2.9.1 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Se basan principalmente en relaciones entre las bandas infrarrojo cercano (INR) y rojo (R), $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$. El intervalo de valores oscila entre -1 y +1. Los valores negativos están asociados a zonas de agua y nieve. Valores positivos próximos a 0 representan zonas rocosas y desnudas que pueden adquirir algo de vegetación hasta llegar a valores próximos a 0,3. A partir de este valor encontramos presencia de vegetación. Cuanto mayor sea el valor más frondoso será la vegetación hasta adquirir valores próximos a 1 (Rodriguez, 2018).

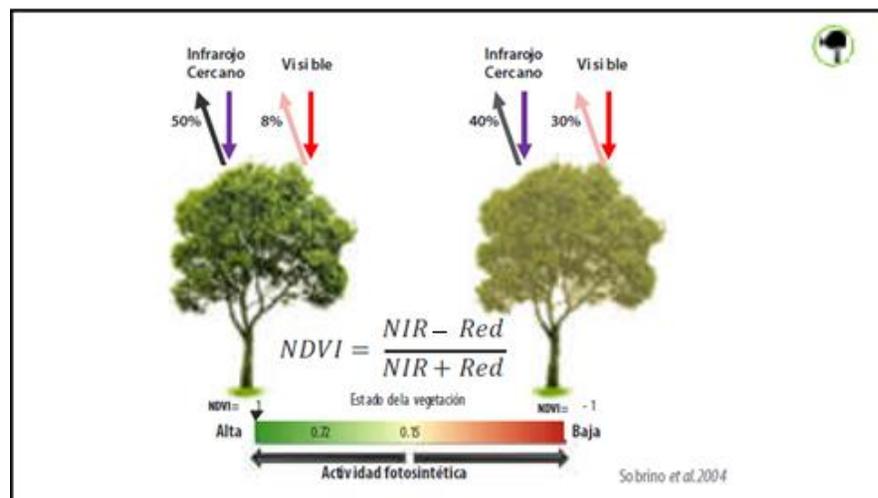


Figura 28 Ecuación de índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI)
(Fuente: Rodrigez 2018)

3 MATERIALES Y METODOS

La metodología que se aplicó en el presente proyecto se describe a continuación.

3.1 Materiales y equipo

- Cámara fotográfica
- Computadora portátil
- GPS navegador con precisión de 3 m.
- Imágenes satelitales Landsat 7 Landsat 5 Landsat 4 y Landsat 8 con resolución espacial y temporal de 30 m y 16 días.
- Imágenes satelitales Sentinel 2. Con resolución espacial de 10m y resolución temporal de 5 días
- Plataforma Google Earth Engine.
- Programa Arc-Gis y Programa Erdas imagine.

3.2 Metodología Aplicada

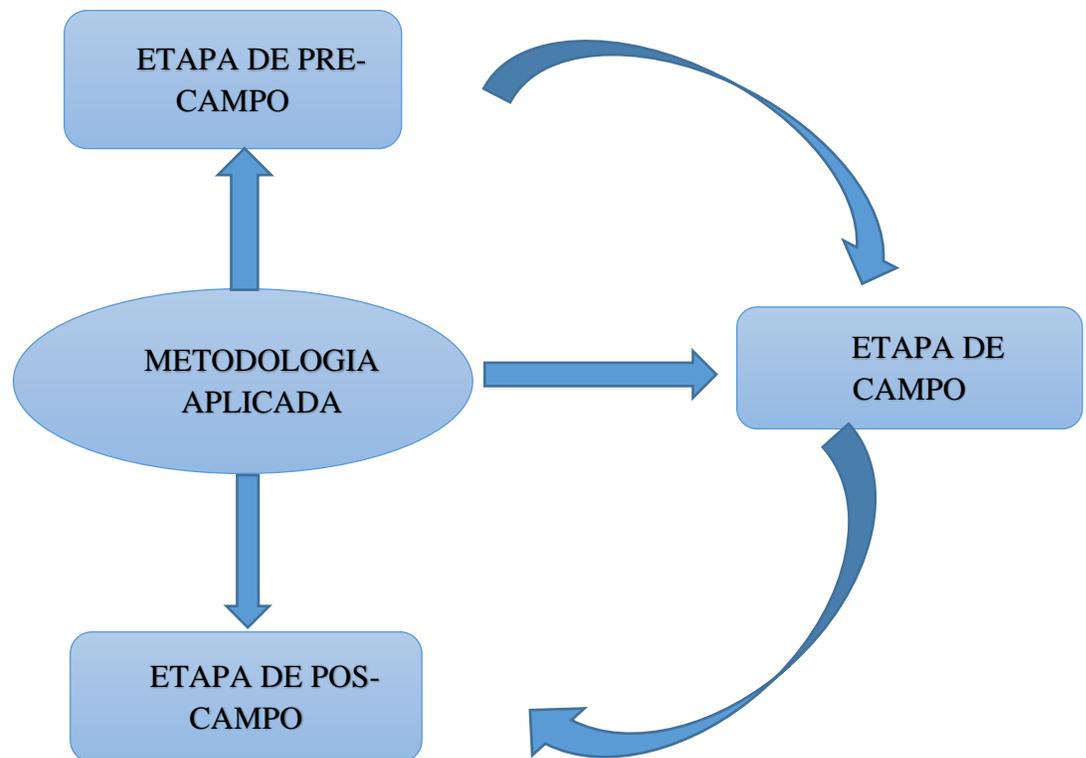


Figura 29 Metodología aplicada
(Fuente: elaboración propia)



Etapa de pre-campo. - En esta etapa se recopiló información, de datos de parámetros de calidad del agua y de sucesos históricos ecológicos de la laguna Alalay. Seguidamente se preparó, los materiales para la salida a campo como ser: GPS navegador y cámara fotográfica.

Etapa de campo. - En esta etapa se realizó el reconocimiento, de la zona de estudio tomando fotografías del lugar y la toma de puntos GPS, de los diferentes afluentes a la laguna Alalay que causan el deterioro de la calidad del agua.

Etapa de pos-campo. - En esta etapa se procesó e interpreto las imágenes satelitales: landsat4 landsat5, landsat7, landsat8 y Sentinel2.

Se procedió a la generación del algoritmo, que calcula la serie temporal de NDVI, en la plataforma Google Earth Engine.

4 RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Recopilación de información y datos

Se recolectó información de parámetros de calidad del agua de los periodos 2003 a 2016, también se recolectó información de sucesos históricos de la ecología del ecosistema acuático (laguna Alalay) para su respectivo análisis y comparación con los resultados hallados, de instituciones públicas como ser: Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CASA), unidad de Limnología y recursos acuáticos (ULRA), comité de recuperación, mejoramiento y preservación de la laguna Alalay (CREMPLA).

En la siguiente figura se puede observar los puntos espaciales de muestreo en campo por parte del CASA.



Figura 30 Puntos de muestreo de calidad del agua de la laguna Alalay para actividades de monitoreo por parte del CASA
 (Fuente: UMSS, 2016)

Los resultados del monitoreo de calidad del agua por parte del CASA (fig.31), muestra la dinámica que tuvo la concentración de fósforo total y fósforo reactivo en el periodo entre junio del 2003 a marzo del 2016. Si se compara los valores de fósforo con los de OECD (Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo), se observa que durante todo el tiempo las concentraciones de fósforo son superiores a los 0,1 mg/L, por lo que las aguas de la laguna Alalay se consideran hipereutrofizadas.

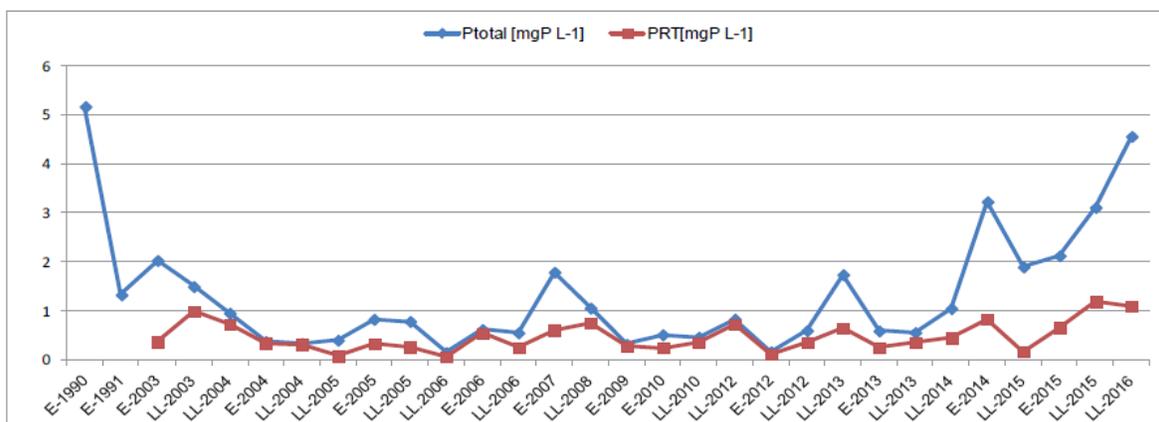


Figura 31 Dinámica de los nutrientes en la laguna Alalay, fósforo total (PT) y fósforo reactivo total (PRT), de junio estiaje a Marzo 2016. E: promedio meses de estiaje; LL: promedio meses de lluvia.
 (Fuente: UMSS, 2016)

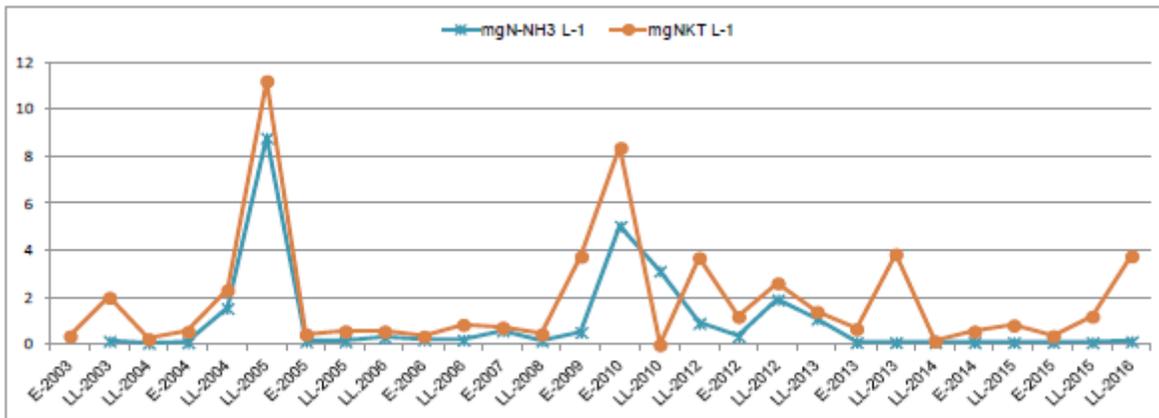


Figura 32 Dinámica de los nutrientes en la laguna Alalay: Nitrógeno amoniacal (N-NH₃) y nitrógeno orgánico total (Norgtot o NKT, entre agosto de 2003 y marzo de 2016, datos de monitoreo CASA-ULRA (UMSS). E: promedio meses de estiaje; LL: promedio meses de lluvia (Fuente: UMSS, 2016).

La (fig.32), muestra la variabilidad del nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico total de las aguas de la laguna Alalay entre el año 2003 a marzo del 2016, altas concentraciones de nitrógeno, orgánico y amoniacal se detectaron en los años 2004-2005 y 2009 a 2010, periodos donde se advierte el ingreso de aguas residuales provenientes de rebases de alcantarillado y que lograron alcanzar al espejo de agua. Las concentraciones de nitrógeno también son elevadas por la relación que se tiene entre el nitrógeno y fósforo, se advierte que para un sistema como la laguna Alalay, el nitrógeno es el nutriente limitante del sistema, siendo el fósforo el que en mayores concentraciones de biodisponibilidad se encuentra.

En la (fig. 33) se presenta la variabilidad temporal del nitrógeno presente en aguas de la laguna Alalay como nitratos y nitritos, del mismo se observa que las concentraciones son relativamente bajas, ello puede deberse al proceso casi instantáneo que sucede por la asimilación de nutrientes por la nueva biomasa que se va produciendo.

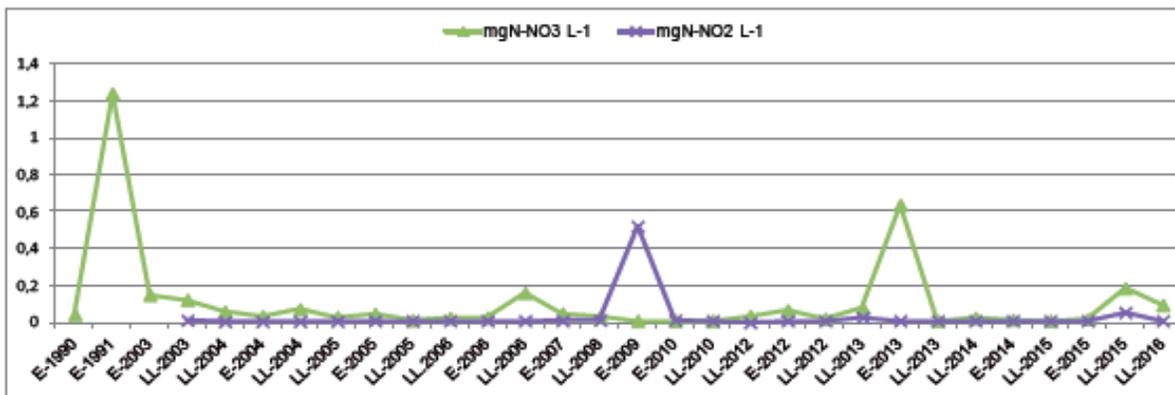


Figura 33 Dinámica de los nutrientes en la laguna Alalay: nitrógeno de nitratos y nitrógeno de nitritos, entre abril 1990 a marzo de 2016, datos de monitoreo CASA-ULRA (UMSS). E: promedio meses de estiaje; LL: promedio meses de lluvia.
(Fuente: UMSS, 2016)

La otra variable importante para la calidad de los lagos, el oxígeno disuelto, (fig.34) también ha presentado grandes variaciones, con altas concentraciones por el proceso de fotosíntesis y periodos de anoxia (valores bajos de oxígeno disuelto), coincidiendo con variaciones en el tipo de macrófitas Presentes en el ecosistema.

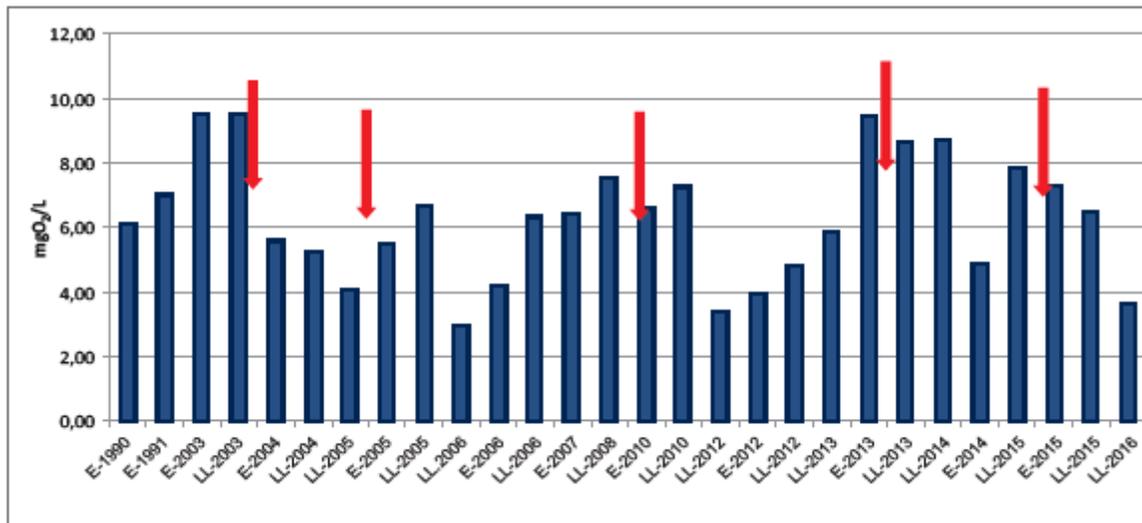


Figura 34 Dinámica del oxígeno disuelto del agua de la laguna Alalay, entre junio 2003 a marzo de 2016. La flecha roja indica los bajos valores de OD coincidiendo con alta cobertura de macrófitas Pistia, Myriophyllum, Azollay el bloom de cianobacterias. En base a datos de monitoreo de la ULRA-CASA (UMSS). (Fuente: UMSS, 2016)

4.1.1 Periodo 1998-2004 (Estado de aguas turbias)

Entre enero de 1998 y marzo de 2004, la laguna presento un estado de aguas turbias que se caracterizó por el dominio de fitoplancton, la transparencia del agua, la ausencia de las plantas sumergidas y baja cobertura de plantas flotantes.

En el estado de aguas turbias, la baja transparencia del agua, por tanto, baja penetración de la luz, se debió principalmente a la entrada de sólidos por afluentes (como el canal proveniente de la angostura).

4.1.2 Periodo 2004-2009 (Estado de plantas flotantes)

A partir de 2004, se presentaron episodios con gran desarrollo de plantas flotantes, especialmente el repollito de agua (*Pistia stratiotes*).

Entre 2004 y 2007, la cobertura de plantas flotantes incremento desde 25% hasta 80% cuando se tenían las más altas coberturas (principalmente entre enero y mayo) se presentaba una disminución de oxígeno disuelto en el agua. Las plantas flotantes fueron extraídas manualmente del ecosistema, logrando un mínimo de cobertura a fin de cada año, la misma que se acompañó con el incremento de biomasa fitoplanctonica (Chl=clorofila a), mostrando una relación inversa entre ambos productores primarios.

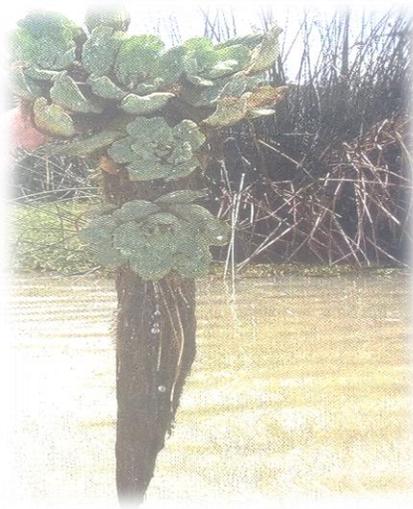


Figura 35 Repollito de agua o macrofitas (*Pistia stratipotes*) planta flotante presente en la laguna Alalay (Fuente: Acosta, 2018)

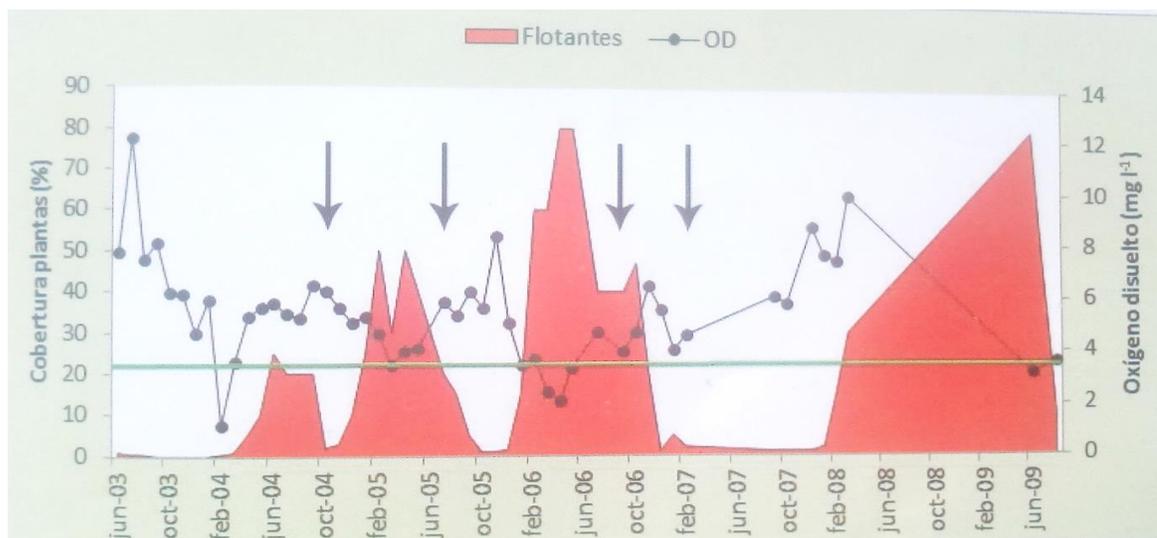


Figura 36 Variación de oxígeno disuelto (mg/l) y la cobertura de plantas flotantes (%) entre junio de 2003 y diciembre 2006. Las flechas indican extracción de las plantas por el gobierno municipal de Cochabamba (Fuente: Acosta, 2018)

Si bien en los periodos de alta cobertura de plantas flotantes se observó que el nivel de oxígeno disminuía después de las extracciones realizadas, el oxígeno tendía a recuperar rápidamente, los datos sugieren que como medida precautoria, las plantas flotantes no deberían exceder el 20% de cobertura para evitar la fuerte caída del oxígeno en el agua.

Hasta 2009, la laguna presento patrones alternantes entre estado de plantas flotantes y de aguas turbias dominadas por fitoplancton, cuya abundancia se expresa como concentración de (clorofila a). Nótese que cuando la cobertura de plantas flotantes disminuye, existe un aumento del fitoplancton, sugiriendo una competencia por los recursos.

El periodo de plantas flotantes fue el resultado de la gran disponibilidad de nutrientes, la baja transparencia del agua y la competencia por la aceptación de nutrientes entre los productores primarios.

Las plantas flotantes pueden ser extraídas del cuerpo de agua, permiten así extraer nutrientes y solidos del agua.

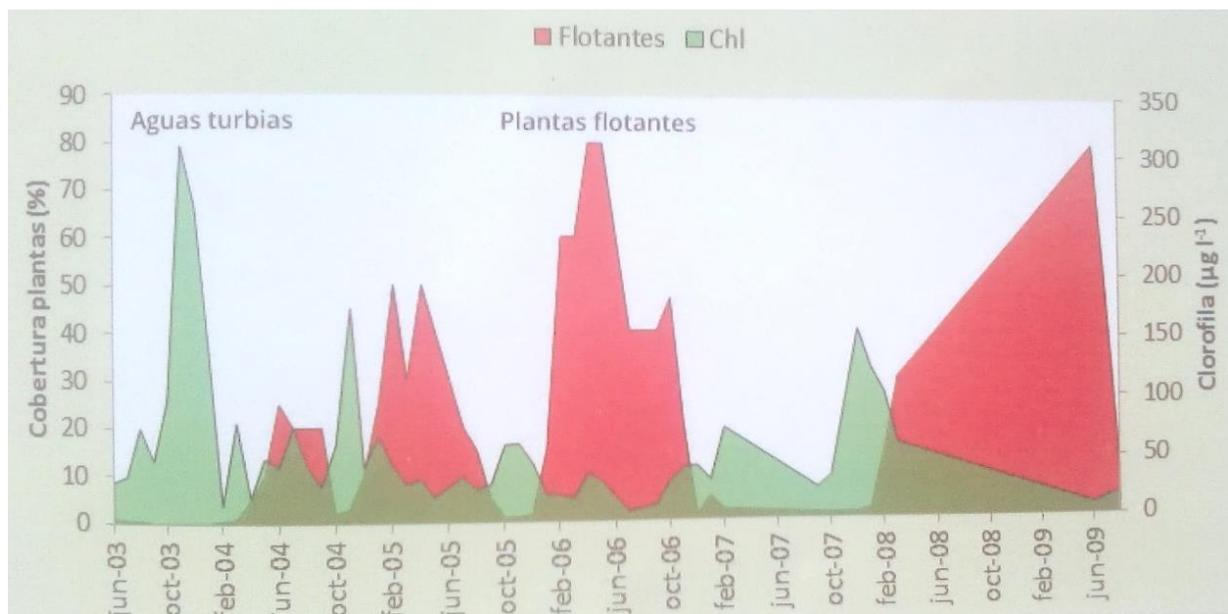


Figura 37 Alternancia de los estados de aguas turbias en que es dominante la biomasa fitoplanctonica y de plantas flotantes
(Fuente: Acosta, 2018)



Figura 38 Plantas flotantes macrofitas
(Fuente: elaboración propia)

4.1.3 Periodo 2010-2015 (Estado de aguas claras y plantas flotantes)

A partir del año 2010, la laguna nuevamente cambio desde un estado de plantas flotantes a uno de aguas claras con dominio de vegetación sumergida, un primer periodo permaneció hasta inicios del 2011, y un segundo periodo se presentó entre 2013 y 2015, entre ellos hubo un corto periodo con plantas flotantes.

Las frecuentes extracciones de plantas flotantes de la laguna y con ella la extracción de nutrientes y sólidos del agua, resulto en momentos de mayor claridad del agua, lo cual permitió el rebrote de la vegetación sumergida a partir del 2010. Las plantas sumergidas son mayormente dependientes de los nutrientes presentes en los sedimentos y no tanto de los disueltos en el agua, además como la extracción de plantas flotantes aumentaron la disponibilidad de luz hacia el sedimento, las plantas sumergidas fueron capaces de rebrotar a partir de los bancos de semillas presentes en el fondo de la laguna.

El fitoplancton fue desplazado por el efecto de sombreado provocado por las plantas flotantes y posteriormente por las plantas sumergidas, además ambos tipos de vegetación pueden producir sustancias químicas alelopáticas que inhiben el desarrollo del fitoplancton.

Durante el periodo de aguas claras, las plantas sumergidas llegaron a cubrir toda la cubeta, pero a pesar de que también estuvieron sometidas a extracciones manuales, no se logró controlar su excesivo crecimiento.

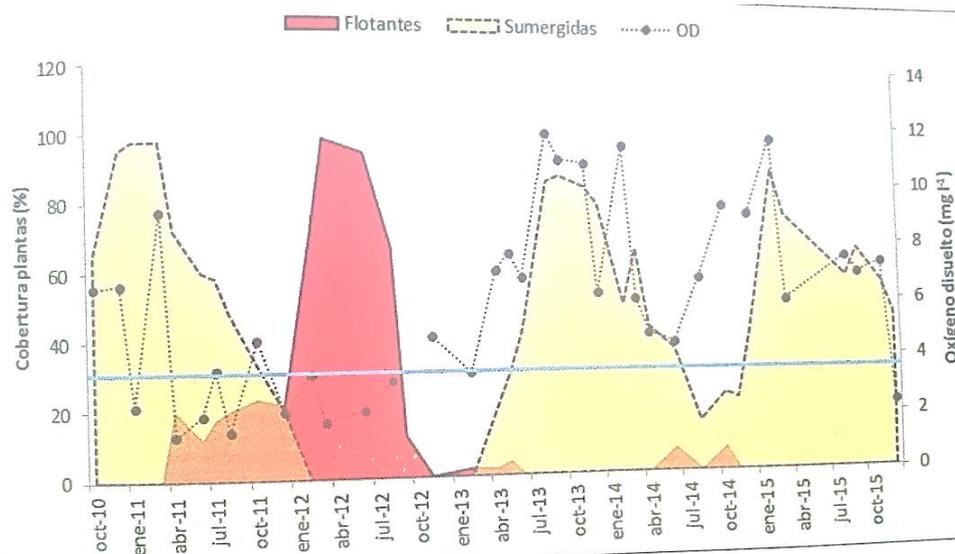


Figura 39 Estados de aguas claras con dominio de la vegetación sumergida (amarillo), y de plantas flotantes (rojo y naranja) y su relación con el oxígeno disuelto del agua (Fuente: Acosta, 2018)

4.1.4 Periodo 2013-2017 (Estado de cianobacterias)

A partir del año 2016 la laguna cambio nuevamente, desde un estado de aguas claras dominado por plantas sumergidas, hacia el estado de cianobacterias, generando un florecimiento o “Bloom”. Este último se caracterizó por la baja transparencia del agua, el bajo nivel de oxígeno disuelto en la laguna, la ausencia de plantas sumergidas y una mortandad masiva de peces y de aves (marzo de 2016).

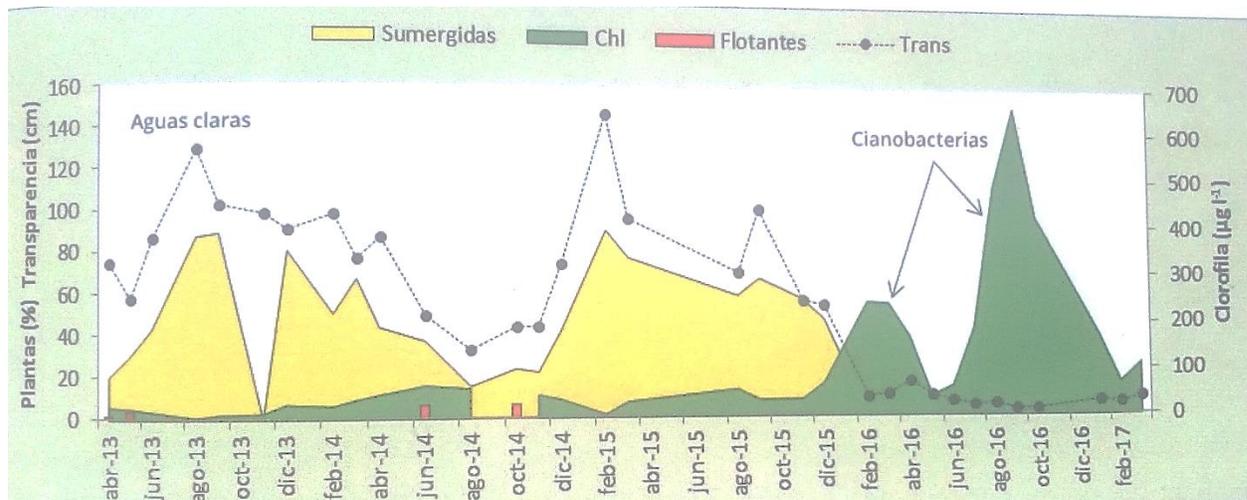


Figura 40 Cambio de un estado de aguas claras dominadas por plantas sumergidas (abril 2013 diciembre 2015) a un estado de Cianobacterias (febrero 2016 a marzo 2017) y su relación con la transparencia de agua (Fuente: Acosta, 2018)

Las cianobacterias dominantes pertenecen al género *Arthospira*, comprendiendo alrededor de 99% de la biomasa fitoplanctonica. Además, durante este periodo disminuyó la riqueza de especies tanto del fitoplancton como del zooplancton. Es probable que la gran disponibilidad de nutrientes en el sedimento, debido a ingresos externos y al reciclaje interno de la materia orgánica generada dentro de la laguna (muerte de plantas y otros organismos) conjuntamente a otros factores como los incendios (julio, agosto y septiembre de 2015), en la zona de totorales (lado este de la laguna) hayan vuelto más vulnerable a la laguna.

El estado de cianobacterias en la laguna Alalay, con un franco dominio del género *Arthospira*, generó un ambiente con baja penetración de la luz, baja transparencia, condiciones de anoxia y potencial liberación de cianotoxinas. Bajo estas condiciones organismos como el zooplancton

herbívoro, importante en la red trófica, no tiene opciones de sobrevivencia ya que las cianobacterias no son comestibles por los herbívoros zooplanctónicos.

4.2 Obtención de imágenes satelitales e interpretación, para el monitoreo de calidad del agua de la laguna Alalay.

Con las imágenes satelitales podemos evaluar de forma cualitativa la calidad del agua, mediante la observación de uno de sus parámetros físicos como el cambio de color del agua, qué son causados por sólidos disueltos, sólidos suspendidos, minerales, clorofila, y etc.

Con la combinación de bandas espectrales de imágenes satelitales, se puede realzar mejor la vegetación acuática flotante o biomasa que cubre el espejo de agua de la laguna Alalay, por ende, a si monitorear la calidad del agua de la laguna Alalay. A continuación, se observa las siguientes imágenes satelitales que muestran la variación de vegetación acuática flotante en el espejo de agua de la laguna Alalay.

Imagen satelital Landsat4
Laguna Alalay 19-01-1988
Combinación de bandas 5-4-3



Imagen satelital Landsat5
Laguna Alalay 31-10-1990
Combinación de bandas 5-4-3



Imagen satelital Landsat5
Laguna Alalay 03-05-2000
Combinación de bandas 5-4-3



Imagen satelital Landsat5
Laguna Alalay 17-04-2009
Combinación de bandas 5-4-3

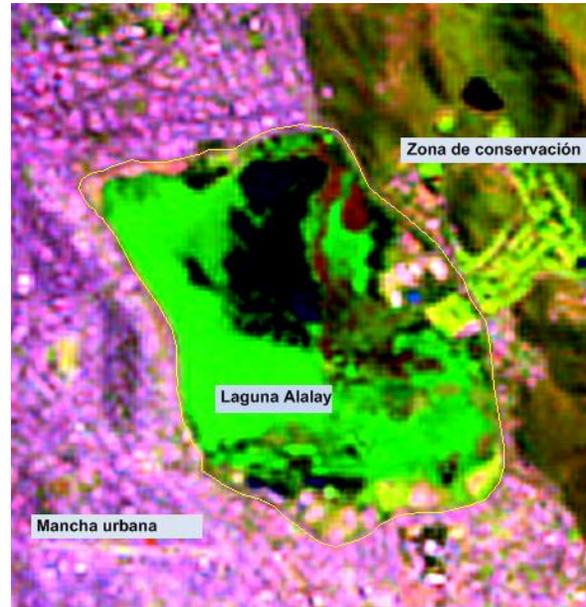


Imagen satelital Sentinel2A
Laguna Alalay 11-09-2016
Combinación de bandas 12-8-4



Imagen satelital Sentinel2A
Laguna Alalay 18-06-2019
Combinación de bandas 12-8-4



Imagen satelital Landsat4 (19-01-1988) combinación de bandas 5-4-3.- Se observa un cuerpo de agua con un grado de contaminación bajo debido al verdor que produce la vegetación acuática flotante,



también se puede observar un color azul claro que representa el ingreso de aguas hacia la laguna Alalay.

Imagen satelital Landsat5 (31-10-1990) combinación de bandas 5-4-3.- Se observa un déficit hídrico, sin presencia de agua.

Imagen Satelital Landsat5 (03-05-2000) combinación de bandas 5-4-3.- Se observa que la laguna Alalay refleja aguas claras debido a la ausencia de vegetación flotante y por ende un grado de contaminación muy bajo.

Imagen satelital Landsat5 (17-04-2009) combinación de bandas 5-4-3.- Se observa que el espejo de agua de la laguna Alalay refleja la proliferación de vegetación acuática flotante, llamado eutrofización, produciendo la degradación de la calidad del agua.

Imagen satelital Sentinel2A falso color (11-09-2016) combinación de bandas 12-8-4.- Se observa que el espejo de agua se encuentra de color verde, lo que representa la presencia de vegetación acuática flotante (cianobacterias) y por ende causando eutrofización en el cuerpo de agua.

Imagen satelital Sentinel2A falso color (18-06-2019) combinación de bandas 11-8-4.- Se observa que el espejo de agua no presenta vegetación acuática flotante, y por ende de forma general podemos concluir que no existe un alto grado de eutrofización.

4.3 Serie temporal de Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (NDVI)

Google Earth Engine. Es una plataforma de computación en la nube diseñada para almacenar y procesar, grandes conjuntos de datos (a escala de peta byte) para análisis y toma de decisiones finales.

Para el procesamiento de imágenes satelitales se empleó la plataforma Google Earth Engine. Se procesó alrededor de 381 imágenes satelitales en la nube.

Como resultado obtenemos la serie temporal de índice de biomasa que refleja la actividad fotosintética de la biomasa (vegetación acuática flotante), que se encuentra en el espejo de agua de la laguna Alalay entre los periodos 1999 a 2019.

Para calcular la serie temporal de NDVI, se tomó un polígono como región de muestreo que cubre todo el espejo de agua de la laguna Alalay ver (fig.41).



Referencia

-  Polígono de muestreo

Figura 41 Polígono de muestreo para calcular la serie NDVI
(Fuente: elaboración propia)



Diagrama de flujo para la generación de la serie temporal NDVI que muestra la actividad fotosintética de la vegetación acuática flotante.

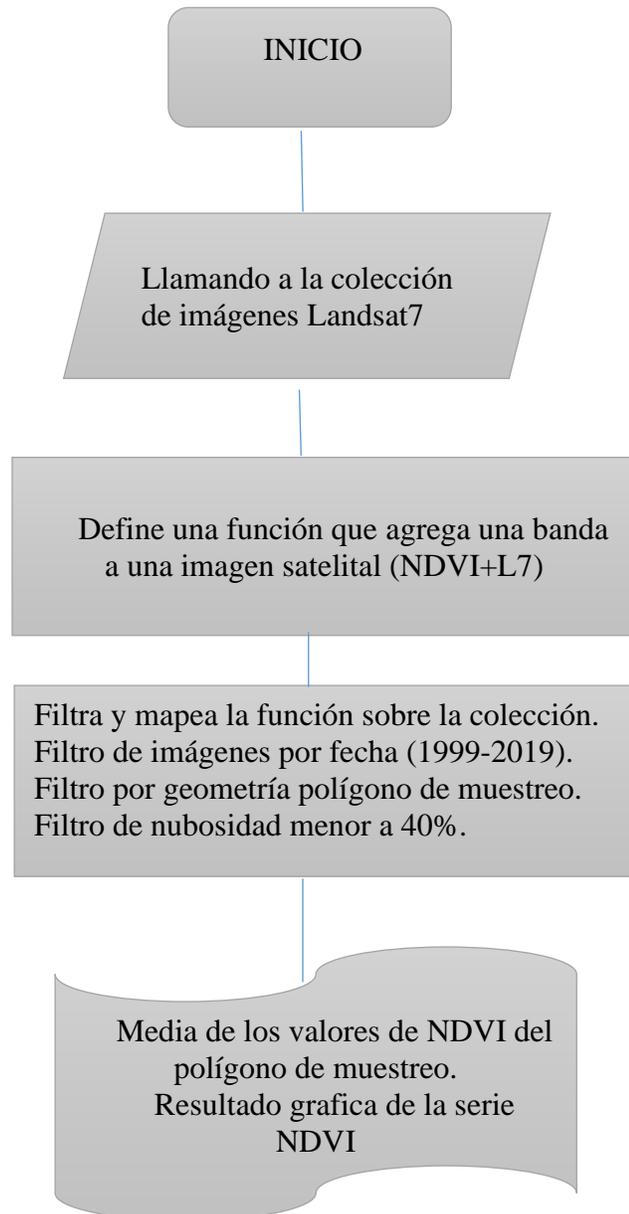


Figura 42 Diagrama de flujo para la generación de serie temporal de NDVI (Fuente: elaboración propia)



A continuación, se presenta el código para generar la serie temporal media de NDVI, entre los periodos 1999 a 2019, con el programa Google Earth Engine, la colección de imágenes utilizadas son Landsat7. Los comentarios escritos con color verde explican el proceso detallado del código.

```
Imports (2 entries)
var roi: Polygon, 61 vertices
var l7: ImageCollection "USGS Landsat 7 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance" (10 bands)
1 // Defina una función que agregará una banda NDVI a una imagen de Landsat 7.
2 var addNDVI = function(image) {
3   // Calculamos el NDVI, renombramos y adicionamos a la colección
4   var ndvi = image.normalizedDifference(['B4', 'B3']).rename('NDVI');
5   return image.addBands(ndvi);
6 };
7
8 // Filtra y mapea la función sobre la colección.
9 //Filtra las imágenes por fechas que deseamos analizar
10 var withNDVI = l7.filterDate('1999-01-01', '2019-12-30')
11 // Condicion de contorno que es definido por el poligono de muestreo
12 | .filterBounds(roi)
13 //Filtra imágenes con un porcentaje menor del 40% de nubosidad
14 | .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 40)
15 // Añade la función sobre la colección
16 | .map(addNDVI); // <-- map() the function over the collection.
17
18 // Hacer un gráfico.
19 var chart = ui.Chart.image.series({
20   imageCollection: withNDVI.select('NDVI'),
21   // Selección la geometría definido por el poligono de muestreo
22   region: roi,
23   // Grafica la media de los valores de NDVI del poligono de muestreo, para cada fecha
24   reducer: ee.Reducer.median(),
25   scale: 30
26 });
27 //var roi = roi.buffer(500);
28 // Definir opciones personalizadas para el gráfico.
29 var options = {
30   title: 'Serie Temporal NDVI',
31   hAxis: { title: 'Tiempo' },
32   vAxis: { title: 'NDVI' },
33   series: {
34     0: { color: 'green' }
35   }
36 };
37 Map.centerObject(roi,14)
38
39
40 // Establece las opciones del gráfico e imprímelo.
41 chart = chart.setOptions(options);
42 print(chart);
43
44
```

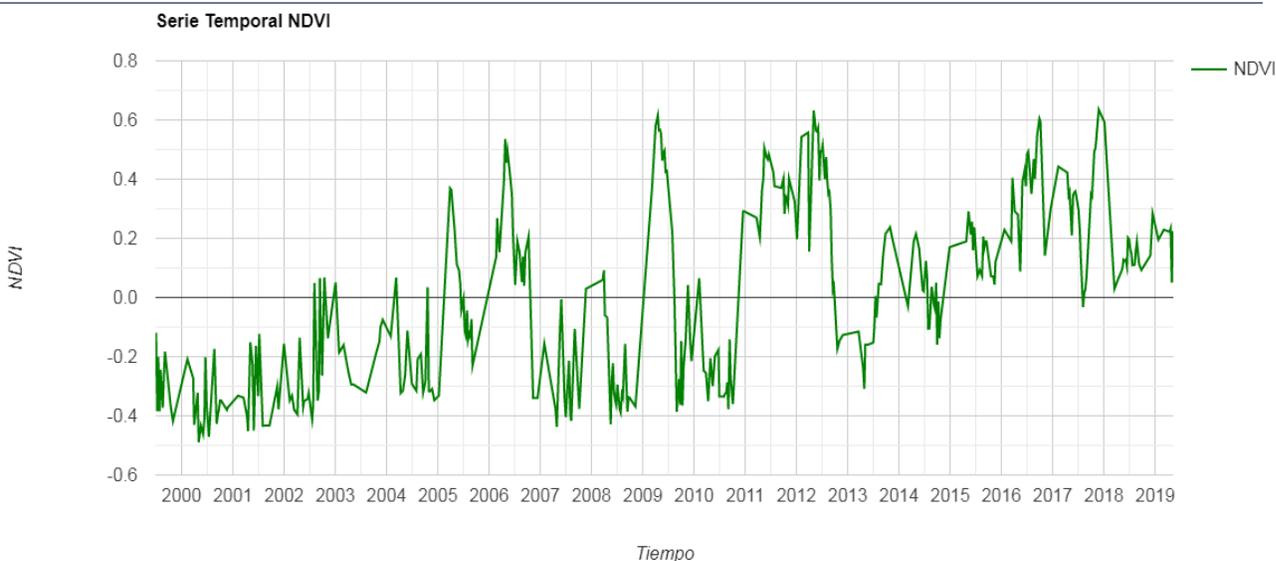


Figura 43 Serie temporal NDVI periodo 1999-2019 Landsat7
(Fuente: elaboración propia)

4.3.1 Análisis y comparación de serie temporal de Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (NDVI).

La serie temporal de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) o biomasa hallada, Se correlaciona muy bien con los sucesos históricos ecológicos del ecosistema acuático de la laguna Alalay mencionados por el Unidad de Limnología y Recursos acuáticos (ULRA).

Análisis del periodo 1999-2004

Se observa que la serie temporal media de NDVI del periodo 1999 a 2004 (Figura 44) presenta valores de 0 a -0.5, estos valores indican la baja actividad fotosintética de la vegetación acuática flotante en el espejo de agua de la laguna Alalay, y por ende presentado un estado de aguas claras (disminución del grado eutrófico), ver (Figura 45).

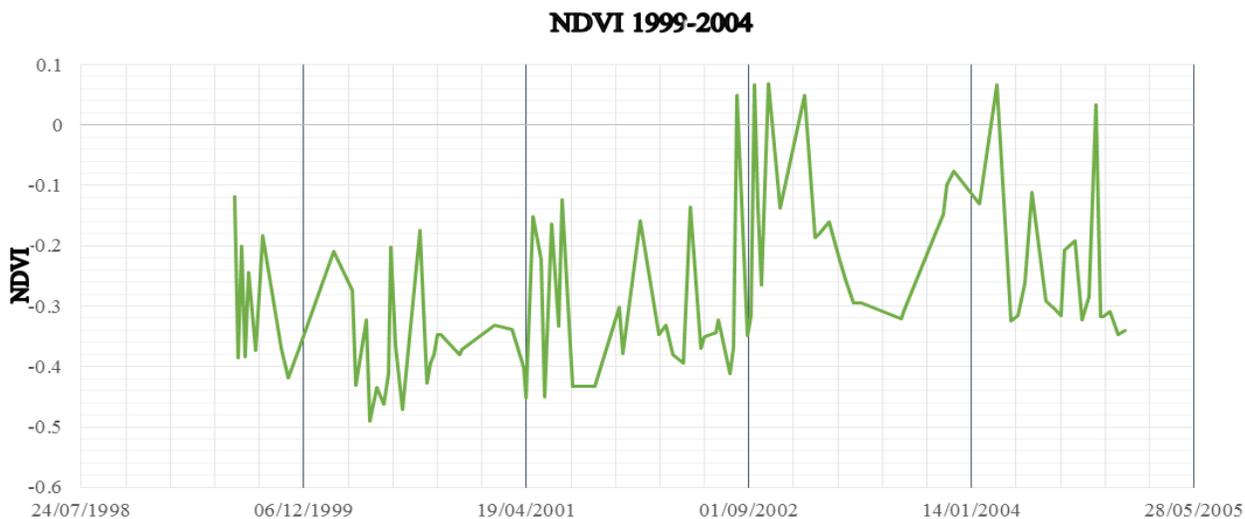


Figura 44 Periodo de NDVI que refleja la ausencia biomasa (plantas flotantes)
(Fuente: elaboración propia)



Figura 45 Imagen Landsat5 (03-05-2000)
(Fuente: elaboración propia)

Análisis del periodo 2004- 2009 (Estado de plantas flotantes)

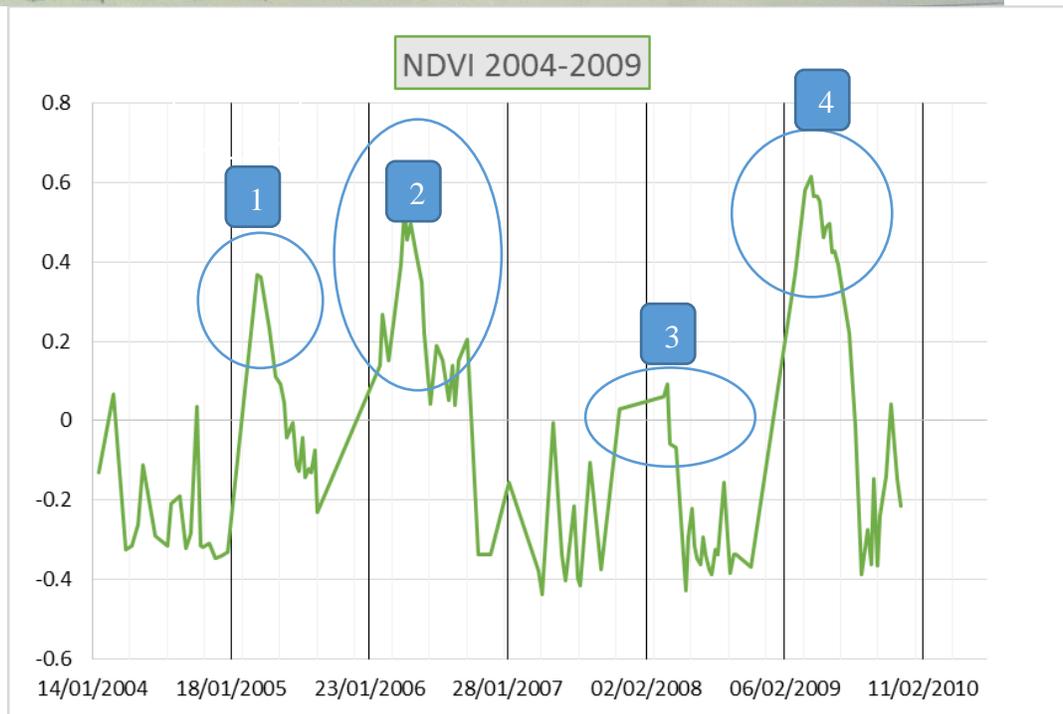
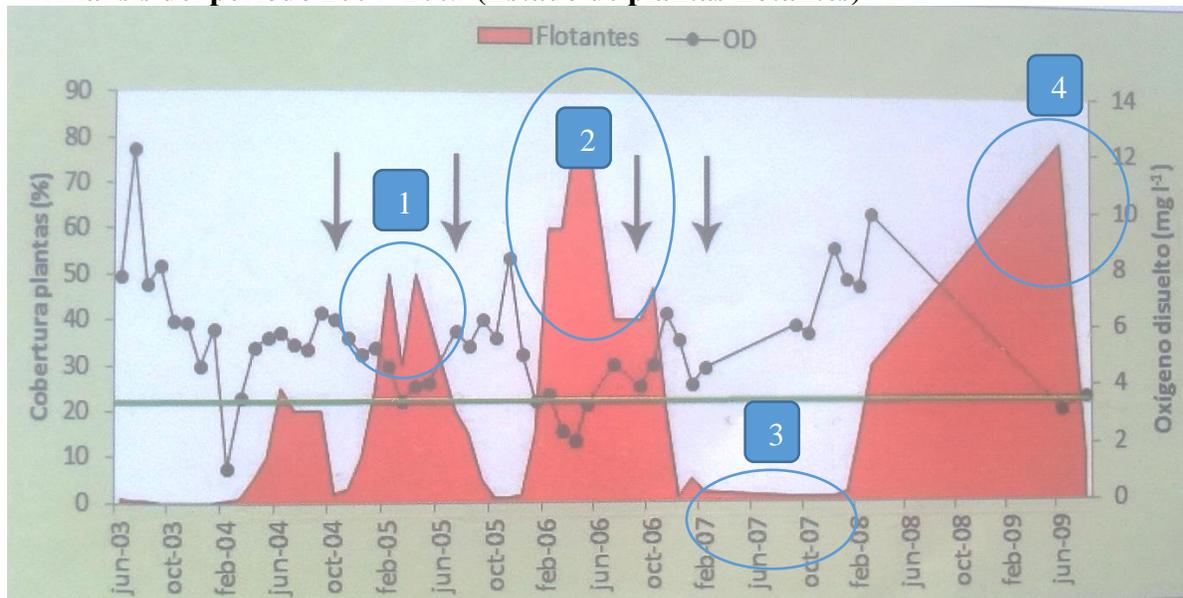


Figura 46 Análisis de gráficas de plantas flotantes y NDVI (procesamiento satelital) periodo 2004-2009 (Fuente: elaboración propia)

Comparando de forma visual la serie obtenida a través de la teledetección (NDVI), y la serie obtenida en campo por parte de la unidad de Limnología y recursos acuáticos (ULRA), se pudo inducir la buena correlación que existe entre ambas gráficas.

La serie NDVI del periodo 2004 a 2009, muestra valores altos de NDVI en los años 2005, 2006 y 2009. Estos valores indican densa cobertura de biomasa sobre la laguna.

Apoyándonos con imágenes satelitales para poder validar de forma visual la cobertura de biomasa, se tiene la imagen satelital Landsat5 del 17 de abril del 2009 con resolución espacial de 30 m y combinación de bandas espectrales 5-4-3 que realzan la vegetación del agua ver (figura. 47). Y podemos evidenciar evidentemente que se observa una laguna cubierta de biomasa o plantas flotantes (macrofitas).

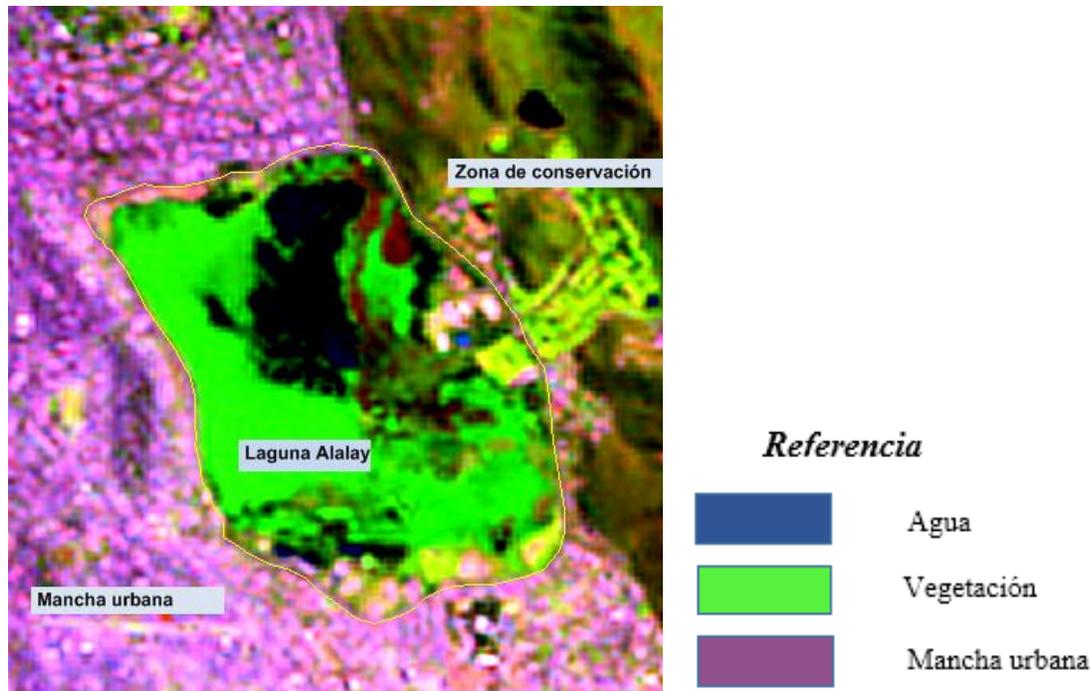


Figura 47 Imagen Landsat5 del 17-04-2009
(Fuente: elaboración propia)



Figura 48 Proliferación de plantas acuáticas o repollitos de agua
(Fuente: elaboración propia)

Relacionándose muy bien con los sucesos históricos y monitoreo de campo de calidad del agua de la laguna Alalay por parte de la unidad de Limnología y recursos acuáticos (ULRA). En la figura 46



en la parte de arriba de la figura se puede observar que, en los años 2005, 2006 y 2009 baja el oxígeno disuelto e incrementa la cobertura de plantas flotantes.

Podemos atribuir las bajadas de NDVI que ocurre a mediados de cada año, en los meses de junio, Julio y Agosto (invierno), debido al descenso de temperaturas. Ya que la temperatura juega un rol importante en los procesos biológicos (reacción Química).

También podemos atribuir las bajadas de NDVI, debido a la limpieza que realiza las instituciones públicas, un ejemplo claro de ello es el año 2007 en el que se creó el comité de recuperación y mantenimiento paulatino de la laguna Alalay (CREMPLA), donde realizo labores de limpieza y mantenimiento de la laguna.

Análisis del periodo 2010-2015 (Estado de aguas claras y plantas flotantes)

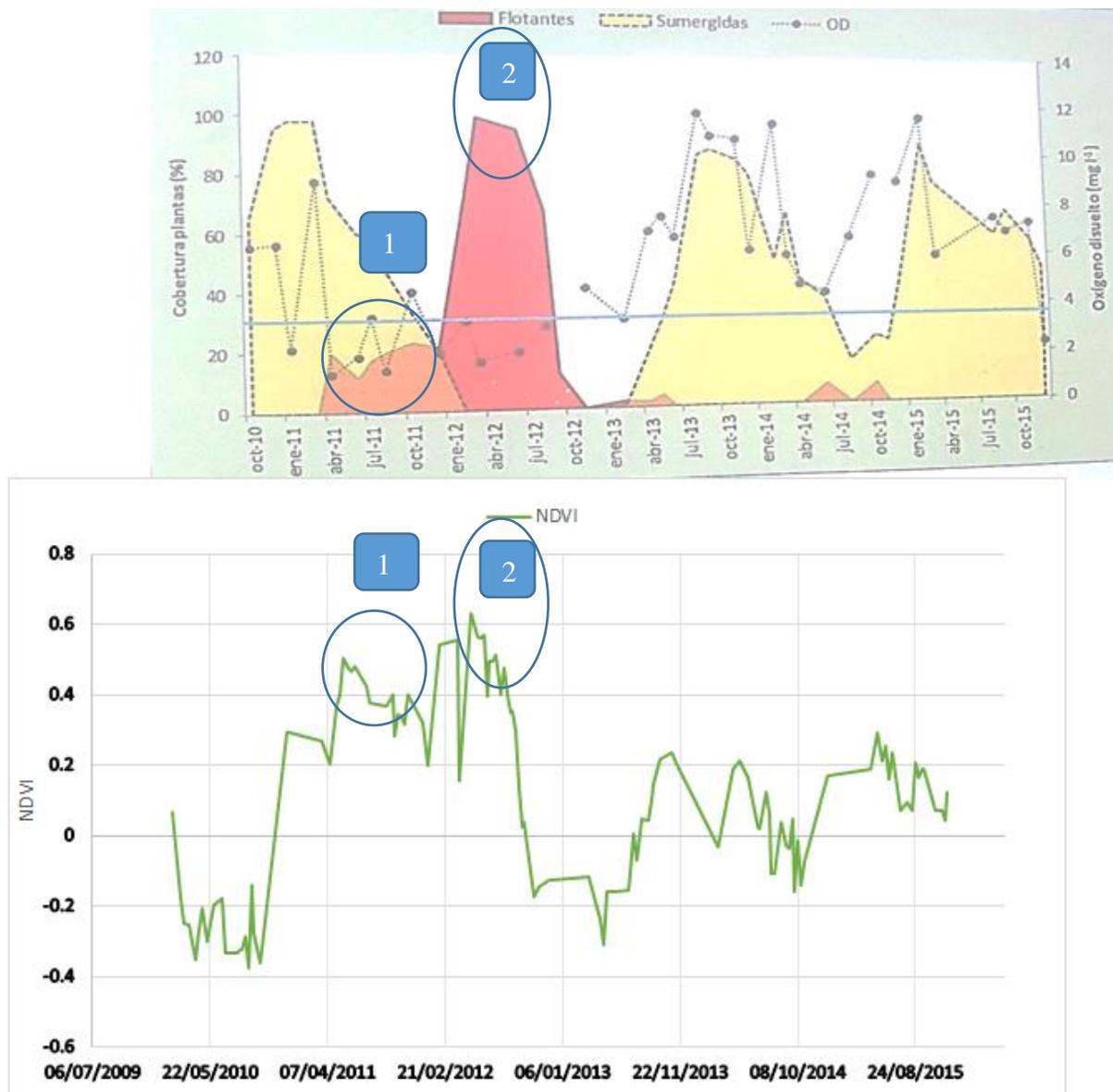


Figura 49 Análisis de plantas flotantes y NDVI (procesamiento satelital)
(Fuente: elaboración propia)

En la serie temporal se puede observar valores bajos de NDVI, en el periodo 2010 se presentan valores bajos, esto indica baja actividad fotosintética es decir ausencia de biomasa, plantas flotantes



(macrofitas), coincidiendo con la época de aguas claras que describe la unidad de investigación, unidad de Limnología y recursos acuáticos (ULRA).

El periodo del año 2011 presenta valores elevados de NDVI, esto indica una alta actividad fotosintética es decir incremento de plantas flotantes (macrofitas), coincidiendo con la época de mortandad de peces, y la declaratoria de emergencia por parte del municipio. En el periodo 2012 caja 2 de la figura 49 se pudo observar que se mantiene valores altos de NDVI, coincidiendo con la época de invasión de macrofitas, en junio del mismo año se declara emergencia ambiental por invasión de macrofitas, también podemos observar el decremento de NDVI, esto se atribuye a la extracción de plantas flotantes (macrofitas) por parte del municipio.

En el periodo 2013 a 2015 caja 3, vea figura 49, se observan valores bajos de este índice es decir ausencia de plantas flotantes (baja cobertura de biomasa), coincidiendo con la época de aguas claras que describe el monitoreo de campo por parte de la unidad de investigación de Limnología y recursos acuáticos.

Análisis del Periodo 2016-2019 (estado de cianobacterias)



Figura 50 Análisis de clorofila y NDVI
(Fuente: elaboración propia)

En la serie temporal de NDVI podemos observar que en el año 2016 caja 1, presenta valores altos de NDVI, esto quiere decir que se genera una alta actividad fotosintética (alta cobertura de biomasa), coincidiendo con la etapa de cianobacterias monitoreadas en campo, el año 2016 ver (figura 50) caja 1, que causó la muerte de cientos de peces debido a la anoxia de la laguna.

Las flechas de color amarillo representan periodos de tiempo donde se cosecharon macrofitas, y se redujeron los valores de NDVI. El año 2017 y 2019 se realizan labores de limpieza y mantenimiento de la laguna Alalay.

En la imagen satelital Sentinel 2A ver, (figura 51) con resolución espacial de 10 m y con combinación de bandas espectrales 12-8-4, que contrasta la vegetación del agua, se observa la vegetación acuática flotante que cubre todo el espejo de agua.

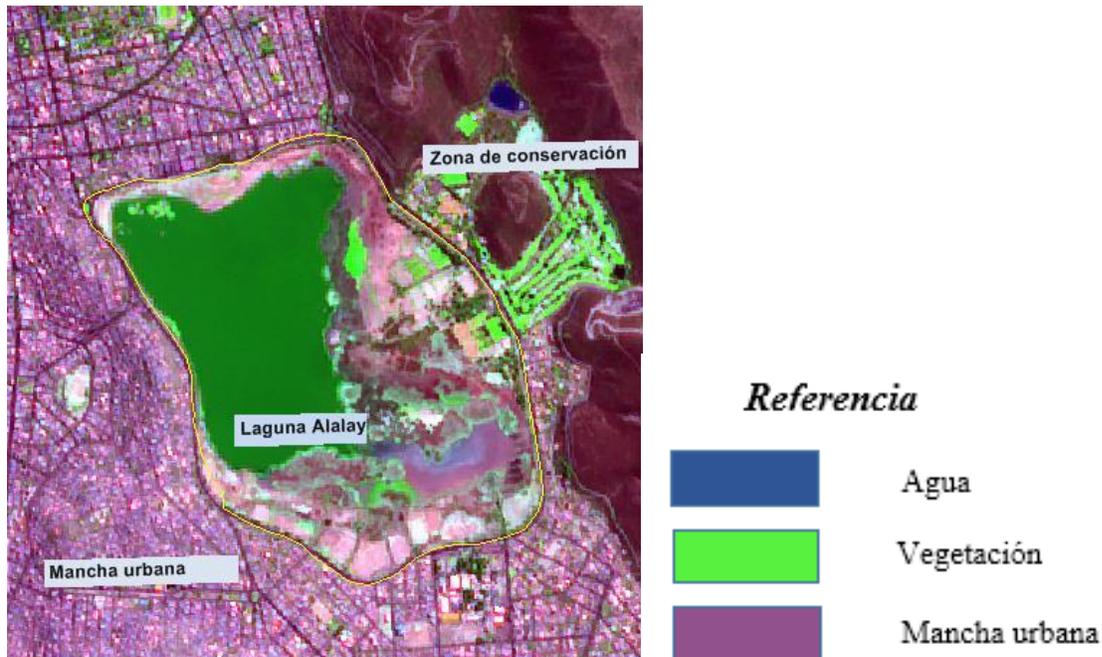


Figura 51 Imagen Sentinel 2A (11-09-2016)
(Fuente: elaboración propia)



Figura 52 Estado de cianobacterias, mortandad de peces (UMSS&CASA, 2018)
(Fuente: elaboración propia)

Análisis y comparación de oxígeno disuelto y el índice de biomasa

La serie temporal de NDVI o índice de biomasa obtenida, muestra valores altos de NDVI, en ciertos periodos de tiempo como se observa en la (figura 53), coincidiendo con la reducción de oxígeno disuelto de la laguna cuando el índice de biomasa es alto.

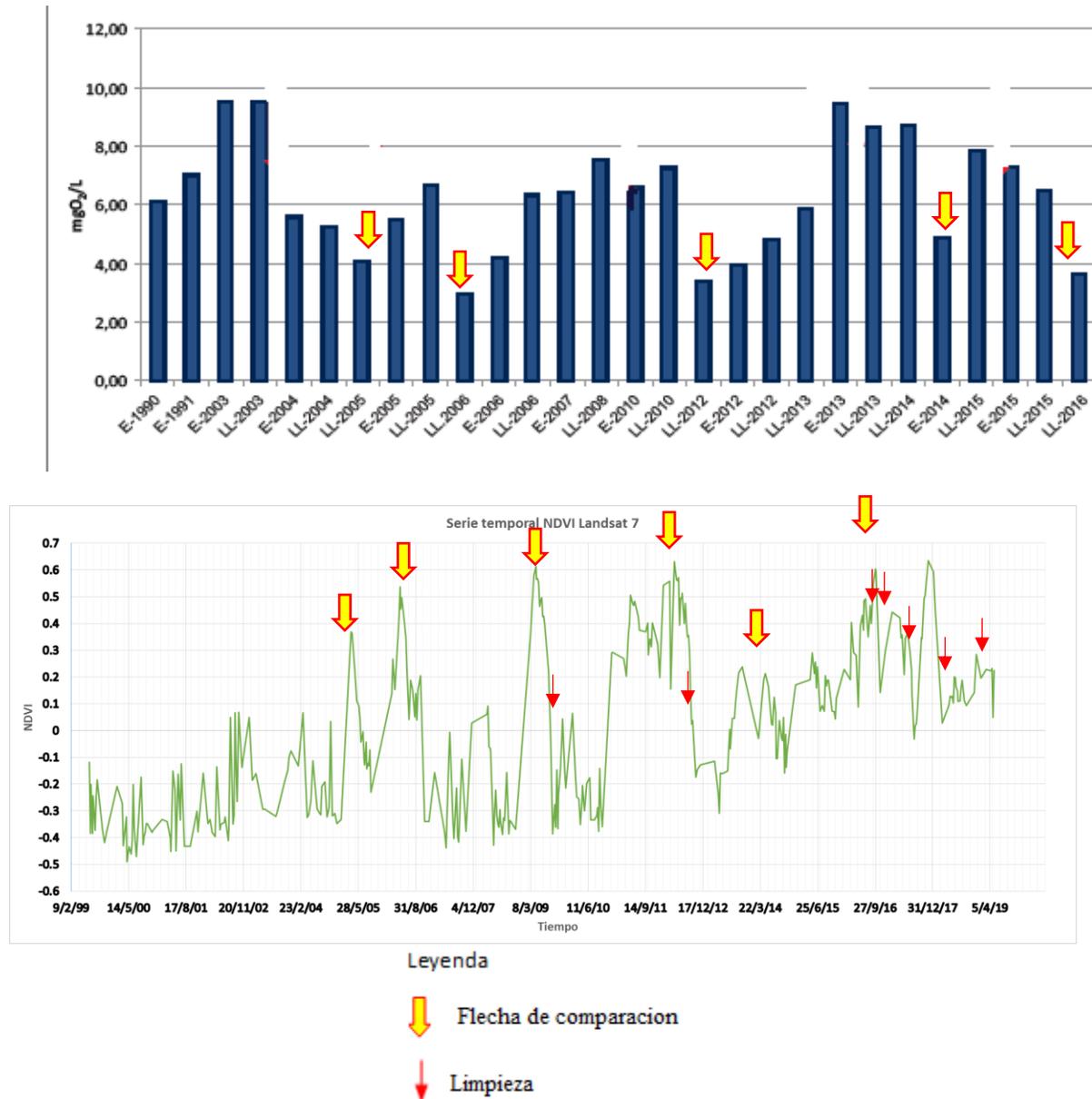


Figura 53 Análisis y comparación de oxígeno disuelto y NDVI, las flechas amarillas en la primera figura indican valores bajos de oxígeno disuelto, y las flechas amarillas en la figura de abajo indican valores altos de NDVI y las flechas rojas indican la limpieza de plantas acuáticas flotantes. (Fuente: elaboración propia)

4.4 Categorización de NDVI de la laguna Alalay

Cálculo y categorización, de NDVI de la laguna Alalay de tres años diferentes: 2000, 2009 y 2016.

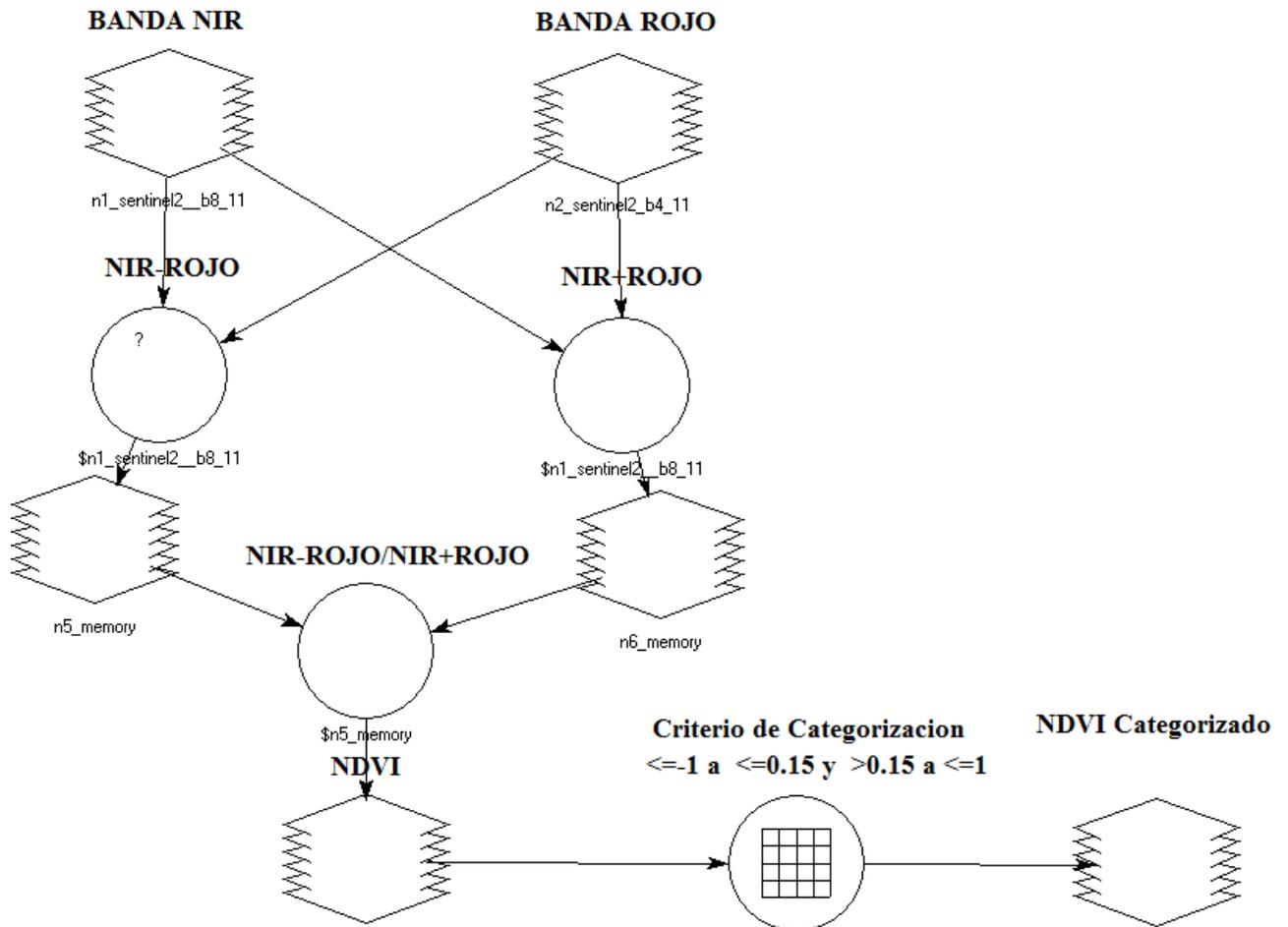
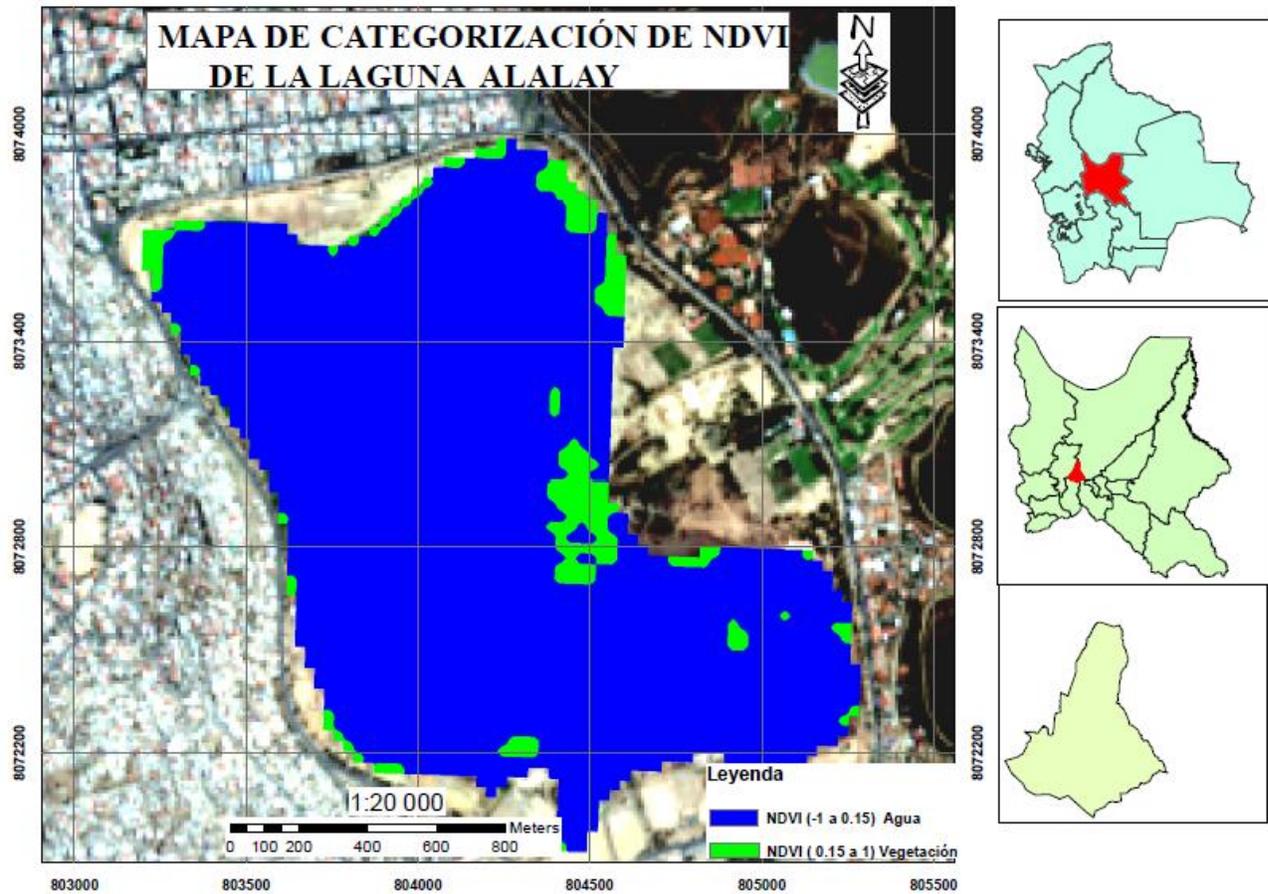


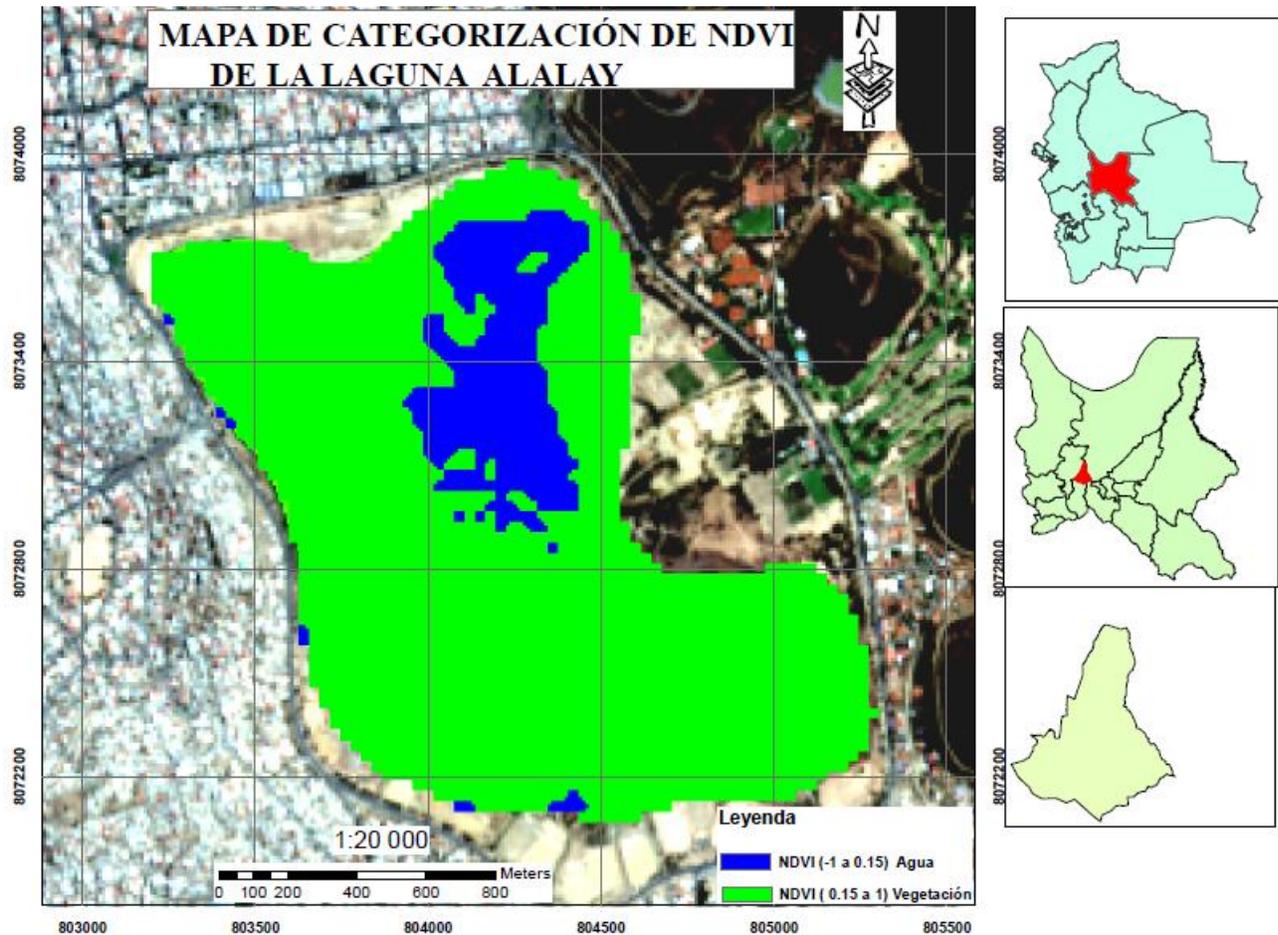
Figura 54 Erdas imagine modelo espacial para calcular y categorizar NDVI
(Fuente: elaboración propia)

En la figura 55, se observa que el espejo de agua, no se encuentra cubierta por vegetación en su totalidad, presentando una vegetación parcial en los perímetros de la laguna Alalay. Coincidiendo con el periodo de menor grado de contaminación de la laguna.



**Figura 55 Categorización NDVI (03-05-2000) Landsat5
(Fuente: Elaboración propia)**

En la figura 56 se puede observar, que el espejo de agua se encuentra cubierta, parcialmente de vegetacion. Coincidiendo con el periodo de alto grado de contaminacion de la laguna Alalay, debido a la proliferacion de vegetacion acuatica.



**Figura 56 Categorización NDVI 8(17-04-2009) Landsat5
(Fuente: Elaboracion propia)**

En la figura 57, se puede observar, que el espejo de agua de la laguna, se encuentra cubierta por vegetación acuática en su totalidad. Coincidiendo con el periodo de alto grado de contaminación de la laguna, debido a la proliferación de cianobacterias.

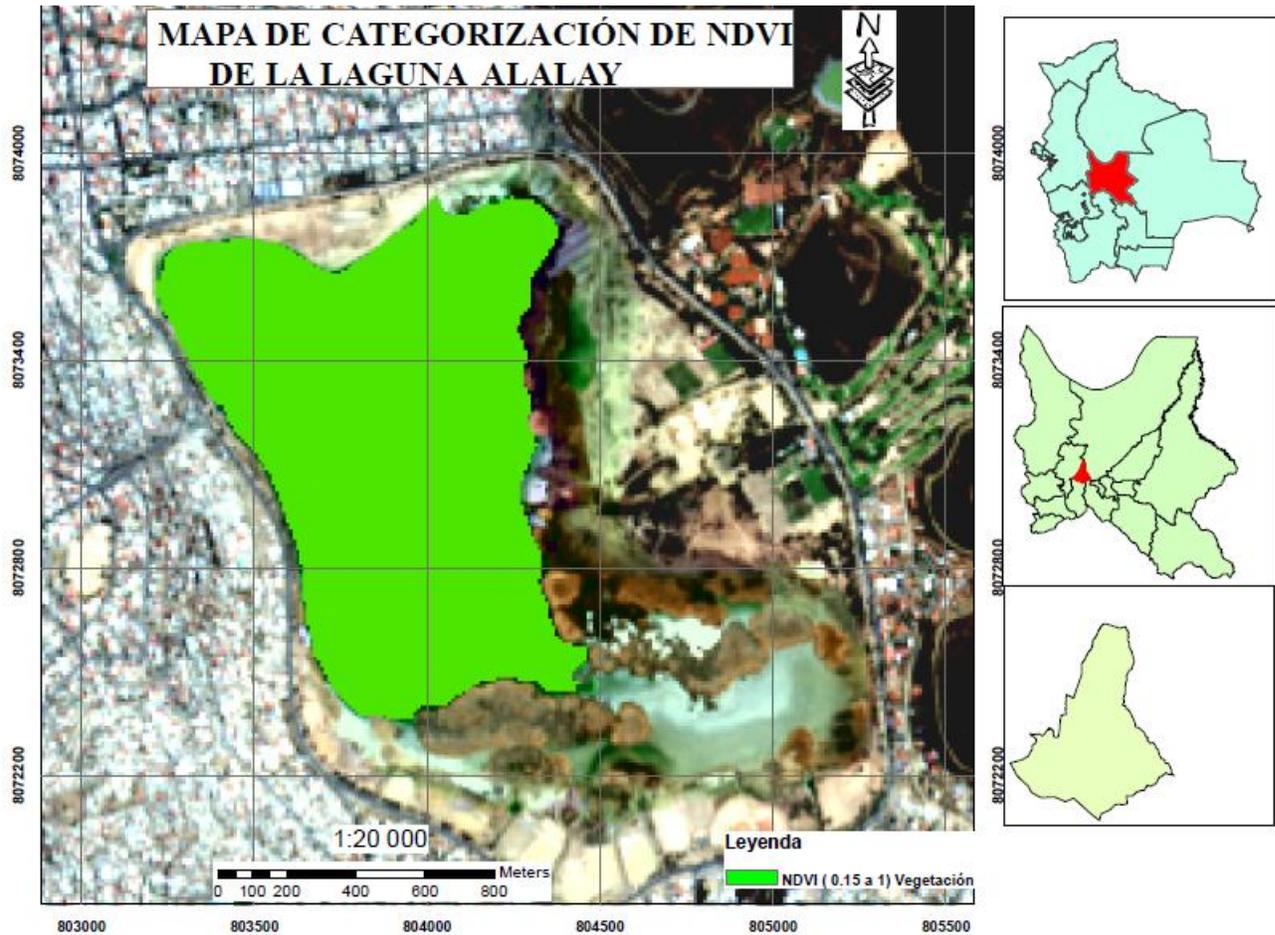


Figura 57 Categorización NDVI (11-09-2016) Landsat5
(Fuente: Elaboración propia)

4.4.1 Analisis y comparacion de serie temporal NDVI y categorizacion NDVI de la laguna Alalay.

Alalay.

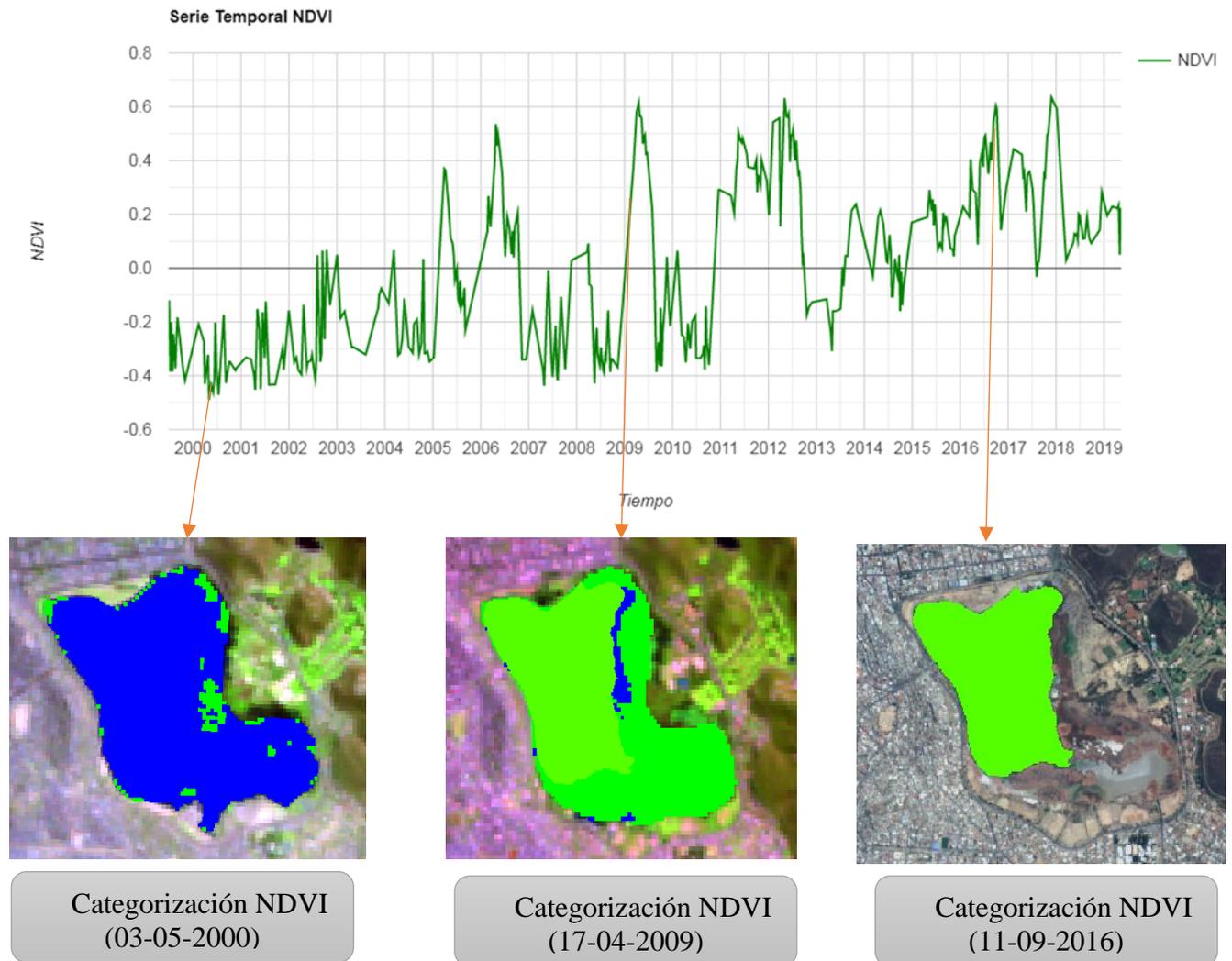


Figura 58 Análisis y comparación de serie temporal NDVI y categorización NDVI
(Fuente: Elaboración propia)

En la figura 58, se puede observar y analizar, que la serie temporal NDVI, muestra valores promedios de NDVI, de una determinada región. Comparando con los mapas de categorización de NDVI.



5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones a las que se llega son las siguientes:

- Los parámetros de calidad del agua recolectados por el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (CASA) y la Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos (ULRA), muestran la degradación ecológica del ecosistema acuático (eutrofización) de la laguna Alalay a través de los años, debido al incremento de contaminantes como el fósforo y nitrógeno.

-La Teledetección es una herramienta complementaria para el monitoreo de la calidad del agua, es decir no sustituye el monitoreo en campo (in situ).

-Con la combinación de bandas espectrales de imágenes satelitales, podemos evaluar de forma visual el problema ambiental llamado eutrofización.

-La serie temporal de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) o índice de biomasa entre los periodos 1999 a 2019, refleja el nivel de proliferación de vegetación acuática flotante (eutrofización).

-El índice de biomasa o NDVI, refleja de forma general el grado de (eutrofización) de la laguna Alalay a través del tiempo.

-El NDVI no clasifica plantas acuáticas flotantes, es decir no diferencia fitoplancton o cianobacterias de macrofitas.

-Con la serie temporal de NDVI podemos evaluar, de forma cualitativa la cosecha de vegetación acuática flotante que realiza las entidades públicas para mejorar la calidad del agua, en función a la subida y bajada de valores de NDVI.

- Con la categorización de NDVI, se demostró que la serie temporal de NDVI muestra valores promedios de NDVI de la cobertura de vegetación acuática, y por ende no muestra el nivel preciso de contaminación por eutrofización, pero si muestra de forma general el nivel de contaminación.



Para el monitoreo de calidad del agua, a través de la Teledetección, se debe tener en cuenta el tipo de sensor que se va a elegir, teniendo en cuenta la fecha de lanzamiento del satélite, y sus respectivas resoluciones, como ser: resolución temporal, espacial, radiométrica y espectral, en función del área de estudio a analizar y de la variable Física o Química que se quiere estudiar.

El índice de NDVI generado es propio de la laguna Alalay, si se quiere inferir a otros ecosistemas acuáticos, se debe realizar la validación correspondiente con datos de campo y de sucesos históricos de la ecología del ecosistema acuático.

Para generar la serie temporal de NDVI, se debe tener cuidado con la región de muestreo. La región de muestreo se debe delimitar en función del objetivo de estudio que se desea realizar.



6 BIBLIOGRAFIA

- Acosta, F. (2018). *Laguna Alalay: Ecología, síntesis de los cambios y aspectos de restauración*, (Cochabamba-Bolivia). Unidad y Limnología y Recursos Acuáticos-Universidad Mayor de San Simon. 76p.
- Barbosa, C., Novo, E., & Martins, V. (Abril de 2019). *Introducción a sensores remotos de sistemas acuáticos*. Sao Paulo, Brasil.
- Bravo, L. (2004). *Serie autodidáctica en materia de normas técnicas relacionadas con la inspección y verificación*. Cuauhnáhuac, Mexico.
- Cervantes, M. (2007). *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Mexico.
- Chapman, D. (1996). *Water Quality Assessments -A Guide to use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. London: Great Britain at the University Press Cambridge.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección*. Madrid: REALP, S.A.
- GAMCBBA. (2018). *Línea base ambiental, análisis legal y diagnóstico socioeconómico del estado actual de la Laguna Alalay y su microcuenca*. Consultoría por producto diseño final de recuperación y gestión integral de la Laguna Alalay. Cercado, Cochabamba.
- Gonzales, F., Ruiz, J., & Marques, F. (31 de Octubre de 2013). *Tutorial de Teledetección Espacial*. Recuperado de <https://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2014/07/COMPLETO.pdf>
- IMTA. (21 de Marzo de 2019). *La contaminación física, química y biológica de cuerpos de agua y sus impactos en la salud pública*. Cercado, Cochabamba.
- Mehta, A., & Flores, A. (5 de Septiembre de 2018). *ARSET Capacitación en Teledetección aplicada*. USA. Recuperado de <http://arset.gsfc.nasa.gov/>
- Mehta, A., & Palacios, S. (1 de Septiembre de 2017). *Introducción a la Teledetección de floraciones algales nocivas*. USA. Recuperado de <https://arset.gsfc.nasa.gov/water/webinars/HABs17>



- Perez, C., & Muños, A. (2006). *Teledeteccion. Nociones y Aplicaciones*.USA. Recuperado de <https://mundocartogeo.files.wordpress.com/2015/03/teledeteccion-nocionesaplicaciones-2006publico.pdf>
- Rodriguez, A. (2018). *Monitoreo de vegetacion*. Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales (CLASS). Cochabamba, Bolivia.
- SENAMHI. (Martes de Junio de 2019). *Servicio nacional de meteorologia e hidrologia*. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.bo/departamental.php?depto=03>
- UMSS. (2016). *Analisi de la problematica de la Laguna Alalay y el rio Rocha protegiendo la biodiversidad*. Cochabamba, Bolivia. Recuperado de https://www.de.academia.edu/35931757/An%C3%A1lisis_de_la_problema_tica_de_la_laguna_Alalay_y_el_r%C3%ADo_Rocha.



ANEXOS
Anexo tablas

Tabla 4 Valores de NDVI calculados por el algoritmo periodo 1999 a 2019

NDVI					
03/07/1999	-0.119	14/03/2002	-0.38	07/12/2004	-0.348
12/07/1999	-0.385	06/04/2002	-0.395	23/12/2004	-0.34
19/07/1999	-0.201	22/04/2002	-0.136	08/01/2005	-0.332
28/07/1999	-0.384	17/05/2002	-0.37	29/03/2005	0.369
04/08/1999	-0.244	24/05/2002	-0.35	07/04/2005	0.363
20/08/1999	-0.373	18/06/2002	-0.343	30/04/2005	0.231
29/08/1999	-0.251	25/06/2002	-0.323	16/05/2005	0.112
05/09/1999	-0.183	20/07/2002	-0.412	01/06/2005	0.091
16/10/1999	-0.369	27/07/2002	-0.368	10/06/2005	0.045
01/11/1999	-0.418	05/08/2002	0.049	17/06/2005	-0.043
24/11/1999	-0.371	28/08/2002	-0.349	03/07/2005	-0.004
12/02/2000	-0.209	06/09/2002	-0.316	12/07/2005	-0.113
24/03/2000	-0.273	13/09/2002	0.066	19/07/2005	-0.127
31/03/2000	-0.431	22/09/2002	-0.138	28/07/2005	-0.043
25/04/2000	-0.323	29/09/2002	-0.265	04/08/2005	-0.143
02/05/2000	-0.49	15/10/2002	0.068	13/08/2005	-0.122
18/05/2000	-0.434	09/11/2002	-0.138	20/08/2005	-0.131
03/06/2000	-0.462	03/01/2003	0.05	29/08/2005	-0.073
12/06/2000	-0.411	28/01/2003	-0.186	05/09/2005	-0.231
19/06/2000	-0.202	04/02/2003	-0.181	21/02/2006	0.138
28/06/2000	-0.365	01/03/2003	-0.161	28/02/2006	0.268
14/07/2000	-0.471	24/03/2003	-0.223	16/03/2006	0.153
22/08/2000	-0.174	09/04/2003	-0.262	17/04/2006	0.394
07/09/2000	-0.427	25/04/2003	-0.294	26/04/2006	0.536
16/09/2000	-0.394	11/05/2003	-0.294	03/05/2006	0.455
23/09/2000	-0.38	08/08/2003	-0.321	12/05/2006	0.496
02/10/2000	-0.348	15/08/2003	-0.309	28/05/2006	0.427
09/10/2000	-0.348	18/10/2003	-0.19	13/06/2006	0.348
19/11/2000	-0.38	12/11/2003	-0.148	20/06/2006	0.222
26/11/2000	-0.372	19/11/2003	-0.1	06/07/2006	0.042
07/02/2001	-0.332	05/12/2003	-0.076	22/07/2006	0.189
18/03/2001	-0.339	31/01/2004	-0.131	07/08/2006	0.152
12/04/2001	-0.402	10/03/2004	0.067	23/08/2006	0.052
19/04/2001	-0.452	11/04/2004	-0.324	01/09/2006	0.138
05/05/2001	-0.151	27/04/2004	-0.315	08/09/2006	0.04
21/05/2001	-0.224	13/05/2004	-0.262	17/09/2006	0.152
30/05/2001	-0.45	29/05/2004	-0.112	10/10/2006	0.206
15/06/2001	-0.163	30/06/2004	-0.292	11/11/2006	-0.339
01/07/2001	-0.334	16/07/2004	-0.304	13/12/2006	-0.339
08/07/2001	-0.124	01/08/2004	-0.315	30/01/2007	-0.156
02/08/2001	-0.433	10/08/2004	-0.208	20/04/2007	-0.378
19/09/2001	-0.433	02/09/2004	-0.192	29/04/2007	-0.438
13/11/2001	-0.301	18/09/2004	-0.322	22/05/2007	-0.103
22/11/2001	-0.378	04/10/2004	-0.285	31/05/2007	-0.006
31/12/2001	-0.158	20/10/2004	0.034	23/06/2007	-0.337
10/02/2002	-0.348	29/10/2004	-0.317	02/07/2007	-0.404
26/02/2002	-0.332	05/11/2004	-0.318	25/07/2007	-0.214
		21/11/2004	-0.309	03/08/2007	-0.396



Valores de índice de vegetación de diferencia normalizada calculados por el algoritmo periodo 1999-2019

10/08/2007	-0.417	05/12/2009	-0.148	04/06/2012	0.572
04/09/2007	-0.106	14/12/2009	-0.215	13/06/2012	0.395
06/10/2007	-0.377	07/02/2010	0.065	20/06/2012	0.494
23/11/2007	0.029	04/03/2010	-0.18	29/06/2012	0.494
21/03/2008	0.06	11/03/2010	-0.248	06/07/2012	0.513
30/03/2008	0.092	27/03/2010	-0.255	22/07/2012	0.4
06/04/2008	-0.06	12/04/2010	-0.351	31/07/2012	0.475
22/04/2008	-0.068	21/04/2010	-0.268	07/08/2012	0.4
08/05/2008	-0.294	28/04/2010	-0.205	16/08/2012	0.35
17/05/2008	-0.429	14/05/2010	-0.3	23/08/2012	0.355
24/05/2008	-0.294	30/05/2010	-0.198	01/09/2012	0.296
02/06/2008	-0.223	24/06/2010	-0.177	08/09/2012	0.139
09/06/2008	-0.316	01/07/2010	-0.335	17/09/2012	0.025
18/06/2008	-0.347	02/08/2010	-0.335	24/09/2012	0.038
25/06/2008	-0.362	11/08/2010	-0.325	19/10/2012	-0.174
04/07/2008	-0.295	18/08/2010	-0.323	04/11/2012	-0.145
11/07/2008	-0.337	27/08/2010	-0.287	27/11/2012	-0.127
20/07/2008	-0.377	03/09/2010	-0.377	19/03/2013	-0.115
27/07/2008	-0.388	12/09/2010	-0.142	20/04/2013	-0.238
05/08/2008	-0.326	19/09/2010	-0.275	29/04/2013	-0.309
12/08/2008	-0.337	05/10/2010	-0.36	06/05/2013	-0.159
28/08/2008	-0.157	17/12/2010	0.291	22/05/2013	-0.16
13/09/2008	-0.386	24/12/2010	0.292	02/07/2013	-0.152
22/09/2008	-0.337	23/03/2011	0.269	09/07/2013	-0.105
29/09/2008	-0.339	15/04/2011	0.204	18/07/2013	0.005
09/11/2008	-0.369	01/05/2011	0.366	25/07/2013	-0.068
08/03/2009	0.372	10/05/2011	0.401	10/08/2013	0.046
02/04/2009	0.58	17/05/2011	0.506	26/08/2013	0.045
18/04/2009	0.615	02/06/2011	0.475	04/09/2013	0.104
25/04/2009	0.565	11/06/2011	0.467	11/09/2013	0.147
04/05/2009	0.567	18/06/2011	0.483	27/09/2013	0.215
11/05/2009	0.553	20/07/2011	0.424	29/10/2013	0.238
20/05/2009	0.463	29/07/2011	0.376	14/11/2013	0.201
27/05/2009	0.486	15/09/2011	0.37	06/03/2014	-0.03
05/06/2009	0.496	01/10/2011	0.403	16/04/2014	0.19
12/06/2009	0.425	08/10/2011	0.282	02/05/2014	0.214
21/06/2009	0.428	17/10/2011	0.342	25/05/2014	0.165
28/06/2009	0.392	24/10/2011	0.338	19/06/2014	0.025
30/07/2009	0.222	02/11/2011	0.314	26/06/2014	0.021
15/08/2009	-0.014	09/11/2011	0.402	12/07/2014	0.124
31/08/2009	-0.387	20/12/2011	0.323	21/07/2014	0.064
16/09/2009	-0.276	05/01/2012	0.197	28/07/2014	-0.105
25/09/2009	-0.362	06/02/2012	0.543	06/08/2014	-0.105
02/10/2009	-0.147	25/03/2012	0.558	22/08/2014	0.037
11/10/2009	-0.366	01/04/2012	0.155	07/09/2014	-0.026
18/10/2009	-0.241	03/05/2012	0.632	14/09/2014	-0.038
03/11/2009	-0.139	19/05/2012	0.564	23/09/2014	0.05
19/11/2009	0.043	28/05/2012	0.56	30/09/2014	-0.159



Valores de índice de vegetación de diferencia normalizada calculados por el algoritmo periodo 1999-2019

09/10/2014	-0.014	26/05/2017	0.345
16/10/2014	-0.138	02/06/2017	0.354
25/10/2014	-0.074	11/06/2017	0.359
28/12/2014	0.17	18/06/2017	0.343
26/04/2015	0.19	04/07/2017	0.296
12/05/2015	0.291	13/07/2017	0.228
28/05/2015	0.213	20/07/2017	0.135
06/06/2015	0.256	05/08/2017	-0.032
13/06/2015	0.16	14/08/2017	0.018
22/06/2015	0.238	21/08/2017	0.025
15/07/2015	0.072	30/08/2017	0.071
31/07/2015	0.093	01/10/2017	0.349
16/08/2015	0.072	08/10/2017	0.342
25/08/2015	0.206	24/10/2017	0.493
01/09/2015	0.167	02/11/2017	0.506
10/09/2015	0.189	25/11/2017	0.635
17/09/2015	0.189	05/01/2018	0.592
19/10/2015	0.072	21/01/2018	0.463
04/11/2015	0.071	17/03/2018	0.029
13/11/2015	0.043	11/04/2018	0.061
20/11/2015	0.121	04/05/2018	0.086
23/01/2016	0.229	13/05/2018	0.099
11/03/2016	0.19	20/05/2018	0.128
20/03/2016	0.404	29/05/2018	0.124
05/04/2016	0.292	05/06/2018	0.128
28/04/2016	0.28	14/06/2018	0.104
14/05/2016	0.087	21/06/2018	0.202
30/05/2016	0.391	30/06/2018	0.196
15/06/2016	0.43	07/07/2018	0.165
24/06/2016	0.376	16/07/2018	0.147
01/07/2016	0.484	23/07/2018	0.109
10/07/2016	0.493	08/08/2018	0.111
17/07/2016	0.456	17/08/2018	0.163
02/08/2016	0.35	24/08/2018	0.189
11/08/2016	0.404	09/09/2018	0.112
18/08/2016	0.468	25/09/2018	0.093
27/08/2016	0.401	28/11/2018	0.142
12/09/2016	0.549	14/12/2018	0.284
28/09/2016	0.604	24/01/2019	0.195
05/10/2016	0.595	04/03/2019	0.229
30/10/2016	0.255	14/04/2019	0.222
06/11/2016	0.141	21/04/2019	0.233
17/12/2016	0.299	30/04/2019	0.05
10/02/2017	0.442	07/05/2019	0.224
15/04/2017	0.422	23/05/2019	0.228
24/04/2017	0.347	17/06/2019	-0.011
01/05/2017	0.357		
17/05/2017	0.21		

Anexo fotos

Visita a campo



Figura 59 Imagen de cianobacterias laguna Alalay (19-05-2019)



Figura 40 Imagen de proliferación de plantas flotantes (macrofitas) (19-05-2019)



Figura 41 Proliferación de fitoplancton (19-05-2019)



Figura 42 Imagen de la laguna lado noreste (15-05-2019)



Figura 43 Imágenes de afluentes a la laguna Alalay (15-05-2019)



Figura 44 Imagen izquierda observamos un can sin vida en unos de los afluentes de la laguna Alalay en la imagen derecha observamos basura presente



Figura 45 Imagen de rastros de salinización laguna Alalay (19-05-2019)



Figura 46 Imagen de toma de coordenadas GPS de las afluentes de la laguna Alalay (19-52019)



Figura 47 Punto banco de nivel (BM) del servicio nacional de cuencas



Figura 48 Foto parte Oeste de la Laguna Alalay invierno (06-08-2019)

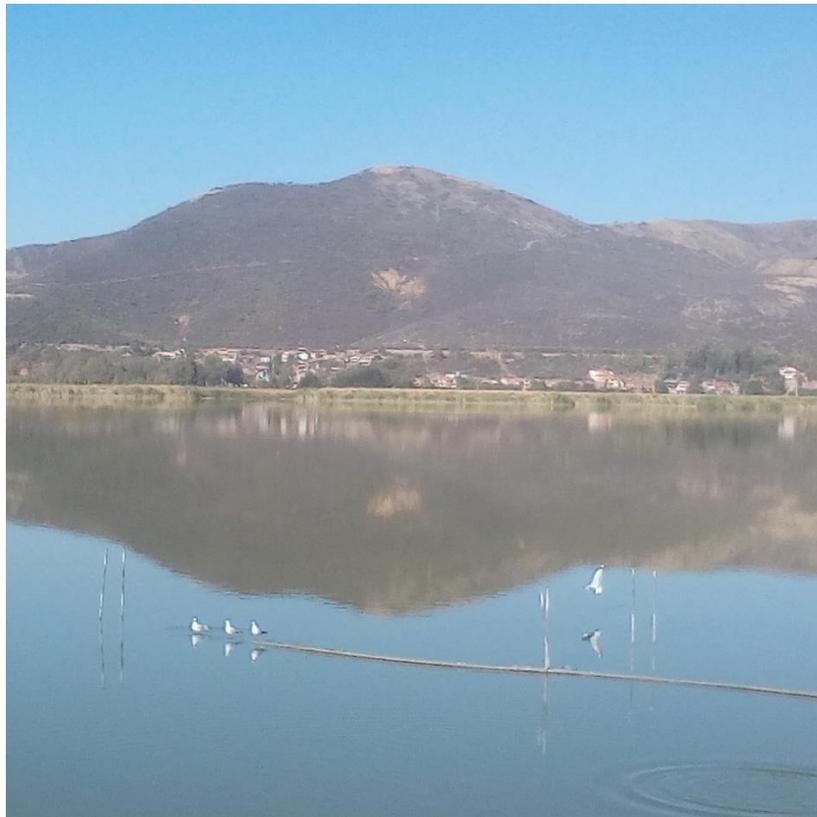


Figura 49 Garzas blancas (06-08-2019)



Figura 50 Aves en la laguna Alalay Cormoran (06-08-2019)



Figura 51 Ingreso de aguas residuales que causa contaminación a la laguna Alalay (06-08-2019)



Figura 52 Limpieza de plantas acuáticas en el espejo de agua laguna Alalay.