



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE
PERCEPCIÓN REMOTA EN LA LAGUNA DE TUXPAN,
GUERRERO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRA EN
CIENCIAS DEL AGUA**

PRESENTA:

MARÍA MARCELA ALANÍS BUSTOS

TUTORA ACADÉMICA:

DRA. MARIVEL HERNÁNDEZ TÉLLEZ

TUTORES ADJUNTOS:

DRA. MERCEDES LUCERO CHÁVEZ

DR. CARLOS ALBERTO MASTACHI LOZA

Septiembre, 2024

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	10
ABSTRACT	12
RESUMEN	13
1 CAPÍTULO I	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 Problemática	3
1.3 ANTECEDENTES	4
1.4 JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA	11
1.5 HIPÓTESIS	12
1.6 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	12
1.6.1 Objetivo general	12
1.6.2 Objetivos específicos	12
2 CAPÍTULO II	13
2.1 MARCO DE REFERENCIA	13
2.1.1 Percepción remota	13
2.1.2 Espectro electromagnético	15
2.1.3 Interacción del agua con el espectro electromagnético	18
2.1.4 Calidad del agua	21
2.1.5 Parámetros de calidad del agua	22
2.1.6 Parámetros estudiados mediante percepción remota	24
2.1.7 Conceptos: Plataforma satelital y Sensor remoto	24
2.1.8 Características de Landsat 8	26
2.1.9 Características de Landsat 9	28

2.1.10	Características de Sentinel 2	30
2.1.11	Imagen satelital y su preprocesamiento	31
2.1.12	Descarga de imágenes	33
2.1.13	Modelo de Regresión Lineal Múltiple (MRLM).....	34
3	CAPÍTULO III	35
3.1	METODOLOGÍA	35
3.2	Área de estudio.....	36
3.2.1	Importancia	37
3.3	Recorrido previo para el reconocimiento del área	38
3.4	Determinación de fecha de muestreo in situ	38
3.5	Determinación de sitios de muestreo	39
3.5.1	Clasificación no supervisada.....	39
3.5.2	Clasificación supervisada	39
3.6	Recolección de muestras in situ.....	40
3.7	Descarga de imágenes Landsat y Sentinel	46
3.8	Trabajo de Laboratorio y de gabinete.....	46
3.8.1	Determinación de Clorofila-a (chl-a).....	46
3.8.2	Determinación de sólidos disueltos totales (SDT).....	46
3.8.3	Determinación de turbidez	47
3.9	Aplicación de encuestas a la población local	48
3.10	Desarrollo del modelo de correlación (Datos in situ y valores de reflectancia) ..	50
3.11	Validación de resultados	51
4	CAPÍTULO IV	51
4.1	RESULTADOS	51
4.2	Recorrido previo para el reconocimiento del área	52
4.3	Determinación de fecha de muestreo in situ	64

4.4	Descarga de imágenes Landsat y Sentinel	70
4.5	Determinación de sitios de muestreo	71
4.5.1	Clasificación no supervisada.....	71
4.5.2	Clasificación supervisada	75
4.6	Recolección de muestras in situ.....	76
4.7	Trabajo de Laboratorio y de gabinete.....	85
4.7.1	Determinación de Clorofila-a (chl-a).....	85
4.7.2	Determinación de sólidos disueltos totales (SDT).....	88
4.7.3	Determinación de turbidez	90
4.7.4	Concentración de parámetros estudiados y límites permisibles	90
4.8	Análisis de la encuesta aplicada	92
4.8.1	Análisis comparativo con relación a los Criterios Ecológicos de calidad del Agua CE-CCA-001/89	97
4.9	Análisis del modelo de regresión	102
4.9.1	Representación gráfica de modelos.....	107
4.10	Validación de resultados	114
4.11	CONCLUSIONES	116
4.12	OBSERVACIONES	120
4.13	RECOMENDACIONES.....	121
5	CAPÍTULO V	122
5.1	BIBLIOGRAFÍA.....	122
5.2	ANEXOS.....	135
5.2.1	Acrónimos y abreviaturas	135
5.2.2	Encuesta aplicada	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Representación gráfica de los elementos de la percepción remota	13
Figura 2.2 Propiedades de una onda: Amplitud, longitud de onda, cresta y frecuencia	16
Figura 2.3 Longitudes de onda del espectro electromagnético visible	16
Figura 2.4 Interacción del agua con el espectro electromagnético, donde, la longitud de onda Azul es mayormente reflejada.....	19
Figura 3.1 Diagrama metodológico para el desarrollo de la investigación	36
Figura 3.2 Mapa de ubicación del área de estudio	37
Figura 3.3 Multiparamétrico marca HANNA, modelo HI 9829	40
Figura 3.4 Disco secchi para la toma de datos de transparencia del agua	41
Figura 3.5 Enumeración de botellas para la recaudación de muestras	43
Figura 3.6 Toma de muestras de agua	44
Figura 3.7 Lectura de datos paramétricos de calidad del agua con multiparamétrico	44
Figura 3.8 Esterilización de téster, para el nuevo registro de datos paramétricos	45
Figura 3.9 Medición y registro de la transparencia con disco Secchi.....	45
Figura 4.1 Muelle principal de la laguna Tuxpan y área de ocio / zona de manantiales.	53
Figura 4.2 Pez diablo (Hypostomus sp) a orillas de la Laguna y presencia de bomba extractora de agua, de uso restaurantero.....	54
Figura 4.3 Zona de lavaderos artesanales y residuos detergentes	55
Figura 4.4 La recreación por visitantes y habitantes genera desechos sólidos cerca de la laguna	56
Figura 4.5 Cultivo de limón	57
Figura 4.6 Cultivo de maíz	57
Figura 4.7 Zona de desazolve de la laguna Tuxpan	58
Figura 4.8 Georreferenciación de puntos característicos identificados durante el recorrido .	59
Figura 4.9 Cultivo de maíz identificado en el área de estudio	60
Figura 4.10 Diferentes puntos con agricultura de maíz.....	61
Figura 4.11 Diferentes puntos identificados con cultivo de mango	62
Figura 4.12 Distintos puntos de cultivo de limón	62
Figura 4.13 Cultivo de forraje	63
Figura 4.14 Georreferenciación de segundo recorrido realizado en el área de estudio.....	64

Figura 4.15 Meses con mayor frecuencia para muestreo in situ.....	67
Figura 4.16 Días con mejor disponibilidad para muestreo in situ del mes de enero	68
Figura 4.17 Días con mejor disponibilidad para muestreo in situ del mes de noviembre	68
Figura 4.18 Días con mejor disponibilidad para muestreo in situ del mes de diciembre.....	69
Figura 4.19 Cluster de variación de reflectancia del año 2021 en la “Laguna Tuxpan”	71
Figura 4.20 Cluster de variación de reflectancia del año 2022 en la “Laguna Tuxpan”	72
Figura 4.21 Cluster de variabilidad de reflectancia del año 2023 en la “Laguna Tuxpan”	73
Figura 4.22 Cluster general de variabilidad de reflectancia, considerando las tres fechas	74
Figura 4.23 Clasificación supervisada de coberturas y usos de suelo en la cuenca Tuxpan ..	75
Figura 4.24 Panorama del área de estudio.....	77
Figura 4.25 Capturas durante el trayecto en el área de estudio	78
Figura 4.26 Entorno laguna de Tuxpan.....	79
Figura 4.27 Actividades de lavado de ropa dentro el cuerpo de agua	80
Figura 4.28 Presencia de actividad humana en la laguna	81
Figura 4.29 Presencia de desechos sólidos dentro el cuerpo de agua.....	82
Figura 4.30 Zona de manantiales dentro de la laguna	83
Figura 4.31 Georreferenciación y distribución de puntos de muestreo	84
Figura 4.32 Equipo de filtración por membrana	85
Figura 4.33 Membrana sin presencia de clorofila-a (chl-a)	86
Figura 4.34 Muestra de clorofila-a (chl-a) obtenida.....	87
Figura 4.35 Observación de muestra en microscopio	88
Figura 4.36 Valoración de la población local acerca la calidad del agua en la “Laguna Tuxpan”	92
Figura 4.37 Principal actividad que afecta la calidad del agua de la Laguna	93
Figura 4.38 Desecho de basura generada en vivienda o espacio de trabajo	93
Figura 4.39 Especies mayormente comercializadas	94
Figura 4.40 Otras especies acuáticas presentes en la Laguna.....	95
Figura 4.41 Disminución de presencia de especies en la Laguna	95
Figura 4.42 Iniciativas institucionales o locales en pro del cuidado del agua de la “Laguna Tuxpan”	96
Figura 4.43 Concentración de SDT.....	107
Figura 4.44 Concentración de Turbidez	108

Figura 4.45 Grado de pH.....	109
Figura 4.46 Conductividad eléctrica (CE)	110
Figura 4.47 Concentración de SDT.....	111
Figura 4.48 Concentración de turbidez	112
Figura 4.49 Conductividad eléctrica (CE)	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Elaboración propia con resultados obtenidos de la investigación “Limnología de la Laguna Tuxpan” del libro Aproximación Holística en el manejo integrado de las cuencas, para la conservación y recuperación de cuerpos de agua superficiales.....	5
Tabla 2.1 Regiones del espectro electromagnético más utilizadas comúnmente en teledetección.....	17
Tabla 2.2 Características de resolución espacial y espectral de Landsat 8	28
Tabla 2.3 Características de resolución espacial y espectral de Landsat 9 OLI 2 / TIRS 2	29
Tabla 2.4 Características de resolución espacial y espectral de Sentinel 2	31
Tabla 3.1 Conversión de transparencia (cm) a unidades nefelométricas de turbidez (UNT) ..	48
Tabla 3.2 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA).....	49
Tabla 3.3 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA) para la Acuacultura	49
Tabla 3.4 Error estimado, considerando rangos	51
Tabla 4.1 Puntos de visita correspondientes al 05 de agosto	52
Tabla 4.2 Coordenadas correspondientes al recorrido del 03 de septiembre	59
Tabla 4.3 Fechas de imágenes Landsat con mejor condición de nubosidad.....	65
Tabla 4.4 Días disponibles por mes.....	66
Tabla 4.5 Fechas estimadas de paso Landsat 8-9 de los meses contemplados para muestreo	69
Tabla 4.6 Características de imagen satelital Landsat 8.....	70
Tabla 4.7 Características de escena Sentinel 2.....	70
Tabla 4.8 Puntos de muestreo	76
Tabla 4.9 Concentración de sólidos disueltos totales (SDT)	89
Tabla 4.10 Concentración de turbidez en unidades nefelométricas (UNT)	90
Tabla 4.11 Concentración paramétrica obtenida en relación con límites permisibles	91
Tabla 4.12 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA) para la Acuacultura.....	99
Tabla 4.13 Comparación de concentraciones obtenidas	100
Tabla 4.14 Matriz de correlación entre valores de reflectancia (Landsat 8) y datos in situ ...	102
Tabla 4.15 Modelos de regresión Landsat 8	103
Tabla 4.16 Matriz de correlación Sentinel 2	104
Tabla 4.17 Modelos de regresión Sentinel 2.....	105

Tabla 4.18 Modelos Landsat-8 y Sentinel-2 considerados para la representación gráfica de concentración y distribución de parámetros.....	106
Tabla 4.19 Estimación de error relativo entre la concentración real (in situ) y la concentración estimada (por rangos), Landsat 8.	114
Tabla 4.20 Estimación de error relativo entre la concentración real (in situ) y la concentración estimada (por rangos), Sentinel 2.....	115

ABSTRACT

The present study has the finality assess the water quality under the parameters: total dissolved solids (TDS), turbidity, pH, electrical conductivity (EC), temperature, dissolved oxygen (DO), through remote sensing techniques (Landsat y Sentinel) in the lagoon Tuxpan, Guerrero, analyzing too the platform more efficient for detection of parameters.

In total there they registered 16 sample points where the concentrations of TDS varied from 353.92 to 421.12 mg/L, DO from 4.60 mg/L to 6.30 mg/L, the turbidity presents form 7 to 21 NTU (Nephelometric Turbidity Units), the pH presents values form 7.88 to 8.48, the EC varies from 553 to 658 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and the temperature oscillate from 21.5 °C to 28.8 °C. Considering that water is used for various activities such as: wash the clothes, showers and even the washing of dishes and in accordance with the permissible limits in the Official Mexican Standard NOM-127-SSA1-2021, Water for human use and consumption: pH (6.5 to 8.5), TDS (1000 mg/L), and turbidity (4.0 NTU). The parameter that is outside the permitted limit is turbidity, since it exceeds the limit established by the Standard.

To obtain the optimal regression models, the reflectance values of Landsat 8 and Sentinel 2 were correlated with the data obtained in field. The results indicate that Landsat 8 is the satellite with the best coefficient of determination to predict water quality parameters, mainly for: TDS ($R=0.86$), turbidity ($R=0.94$), pH ($R=0.52$) and EC ($R=0.86$), while Sentinel 2 obtained TDS ($R=0.77$), turbidity ($R=0.93$) and EC ($R=0.78$).

The results were validated through relative error estimate, considering the pixel value, showing an acceptable error that allows the reliability in the use of remote sensing for this type of studies.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del agua en la Laguna de Tuxpan, Guerrero, utilizando parámetros de sólidos disueltos totales (SDT), turbidez, pH, conductividad eléctrica (CE), temperatura y oxígeno disuelto (OD), mediante técnicas de percepción remota utilizando imágenes de Landsat y de Sentinel.

Se registraron puntos de muestreo, donde se midieron los parámetros de calidad del agua mencionados previamente, los cuales fueron correlacionados con los valores de reflectancia de Landsat 8 y Sentinel 2 para obtener los modelos de regresión.

Los puntos de muestreo fueron dieciséis, donde se encontraron que las concentraciones de SDT están entre 353.92 y 421.12 mg/L, OD de 4.60 a 6.30 mg/L, turbidez de 7 a 21 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez), pH de 7.88 a 8.48, CE de 553 a 658 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperatura de 21.5 °C a 28.8 °C. Comparado con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, que establece límites para pH (6.5 a 8.5), SDT (1000 mg/L) y turbidez (4.0 UNT), la turbidez es el único parámetro fuera del límite permitido.

Los modelos de regresión mostraron que Landsat 8 tuvo un mejor coeficiente de determinación para predecir SDT ($R=0.86$), turbidez ($R=0.94$), pH ($R=0.52$) y CE ($R=0.86$), mientras que Sentinel 2 mostró coeficientes de determinación menores $R=0.77$ para SDT, $R=0.93$ para turbidez y $R=0.78$ para CE. Los resultados fueron validados mediante la estimación de error relativo, lo que demuestra la confiabilidad de la percepción remota en este tipo de estudios.

1 CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

El agua dulce es imprescindible para el desarrollo de la vida (Escandón & Cáceres 2022), sin embargo, la cantidad y calidad están críticamente influenciados por las diferentes actividades antrópicas como: ganadería, agricultura, turismo y asentamientos humanos (Franco & Rodríguez 2016; Papausa & Hadjimitsis, 2013; Sepúlveda, 2011; Escandón & Cáceres, 2022), causando la contaminación de ríos y lagos (Landeró, 2019).

Los seres humanos dependemos de su disponibilidad, no solo para el consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y la continuidad de las diferentes actividades (Landeró, 2019). De acuerdo con información de Rodríguez (2022) la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA), señala que el 59.1% de los ríos, arroyos, lagos, lagunas, presas y zonas costeras que se monitorean están contaminados. Por lo tanto, la calidad del agua no es buena. Esto, como efecto de las diferentes actividades humanas.

El monitoreo de calidad del agua es importante para la prevención y protección de la degradación de ecosistemas, como es el caso de los lagos, ya que, son fuente de diversos servicios ecosistémicos para los diferentes seres vivos, por ello, la importancia de realizar este tipo de estudios encaminados a la toma de mejores decisiones para una mejor gestión del recurso.

Una de las técnicas más conocidas y utilizadas para el estudio de calidad del agua, es mediante el análisis de parámetros, los cuales, pueden detectarse directamente mediante la recolección periódica de muestras de agua y posteriormente el análisis en el laboratorio (Gökçe, 2016; Rivera, 2020). Sin embargo, el monitoreo in situ suele presentar desventajas respecto al tiempo, el alto costo por campañas a campo y análisis de laboratorio, además, limita a puntos de monitoreo de difícil acceso y al análisis espacio temporal de áreas extensas (Cruz & Durango 2023; González, et al., 2018; IDEAM, 2019).

Por esta razón, la teledetección surge como una alternativa complementaria al monitoreo tradicional (Gholizadeh et al., 2016; Ogashawara et al., 2017). Mediante la estimación de parámetros fisicoquímicos con ventajas de bajo costo, el análisis de grandes áreas superficiales (Martínez, 2022; Sepúlveda; 2011) y el análisis espacio temporal de áreas de interés (Deutsch et al., 2018; Rivera, 2020). Algunos de los satélites más utilizados para este tipo de estudios son Landsat y Sentinel (Pizani, et al., 2020), debido a su libre acceso.

En la presente investigación se realiza el análisis de calidad del agua mediante técnicas de percepción remota y datos de muestreo in situ en la “Laguna Tuxpan” perteneciente al estado de Guerrero, Puesto que, la teledetección de acuerdo con diversos estudios ha demostrado ser una herramienta apta y confiable principalmente en el monitoreo de contaminantes del agua como: clorofila-a (chl-a), turbidez y sólidos disueltos totales (SDT); aunque este último parámetro es ópticamente inactivo; por las actividades que existen, se busca e intenta encontrar algún modelo que tenga una mejor predicción, ya que, según estudios, la estimación de parámetros ópticamente no activos, incluidos los sólidos disueltos totales (SDT), suponen que existe un proceso que generalmente ocurre con cambios en estos, o la salinidad que afecta los parámetros de calidad del agua ópticamente activos. Sin embargo, es posible que estos procesos no siempre coexistan en la misma magnitud (Adjovu, et al., 2023d). Por ello, considerando la resolución y la posibilidad de encontrar una correlación significativa, se indaga el comportamiento de la percepción remota con los valores in situ. Además, el uso de esta técnica ofrece ciertas ventajas como el monitoreo de regiones y cuerpos de agua a gran escala, obteniendo la información en menor tiempo, con menos esfuerzos de trabajo de campo, permite identificar variaciones espaciotemporales de la calidad del agua, además, de tener un menor costo (Uribe, 2022), lo cual, facilita el análisis y estudio de parámetros fisicoquímicos.

1.2 Problemática

En México una de las situaciones preocupantes son los graves problemas de degradación que se presentan en las cuencas debido a la deforestación, el incremento de superficies agrícolas, la ganadería extensiva, los sistemas de producción inadecuados y la casi nula planeación de los procesos de producción y de asentamientos humanos, originan el deterioro de grandes superficies con alto potencial agrícola, silvícola o pecuario (Mijangos & González 2016; Ortega, 2015).

La “Laguna Tuxpan”, es un cuerpo de agua dulce de origen tectónico formado en una depresión que permite almacenar agua debido a la baja porosidad de los sedimentos (Wetzel, 2001). Esta cuenca, presenta pocos afluentes que la alimentan, por lo que, los aportes de agua subterránea pueden ser muy importantes y llegar a representar la mitad del aporte hidrológico anual con grandes cargas de fósforo y nitrógeno, como parece suceder en este caso. Solamente el río Tomatal se incorpora al cauce con escurrimiento permanente (Mijangos & González, 2016).

Las principales fuentes de contaminación que se presencian en la cuenca son: la deforestación masiva que da paso a la erosión del suelo y al transporte de sedimentos mediante escorrentías en épocas de lluvia, así como, basura, presencia de especies invasoras, contaminación por actividades agropecuarias, por sólidos suspendidos totales, coliformes fecales, nitrógeno, fósforo, azolvamiento, atrazina, ftalatos y contaminación por actividades de lavado de ropa, turismo, etc. (Mijangos & González 2016).

Se señala que la profundidad de la laguna anteriormente era de 15 m y albergaba una alta variedad de peces y crustáceos nativos, pero hace más de 50 años una capa de sedimentos de cuatro a seis metros fue depositada por la desviación hacia el cuerpo de agua del efluente “El Tomatal”. Por lo tanto, estos sedimentos provocaron la pérdida de 800 a 1000 años de registros paleolimnológicos. Los sedimentos antiguos indican aportes de material erosionado de las márgenes de la laguna y los aportes de la cuenca llevados por las escorrentías (Mijangos & González 2016).

Tras los efectos naturales y antropogénicos generados en la “Laguna Tuxpan” los ciudadanos locales, municipales y autoridades han exhortado a diferentes instituciones como la Secretaría del Medio Ambiente, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), y a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para realizar un estudio exhaustivo de contaminación ambiental en la laguna y así validar bajo evidencias y bases científicas la importancia que tiene la gestión de este tipo de trabajos no solo en el cuerpo de agua, sino también en la zona norte del estado de Guerrero. Por otra parte, también se busca continuar impulsando la actividad turística en beneficio de los igualtecos, locatarios y visitantes (Transformando Guerrero, 2023). En acuerdo, la Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) contempló un operativo para el ejercicio de acciones y recursos pertinentes para el total saneamiento y rescate de la laguna (Ramírez, s.f.).

Respecto a las continuas peticiones basadas en reuniones y mesas de trabajo de diferentes asociaciones, dependencias de gobierno municipal y distintos actores sociales se iniciaron algunas actividades de desazolve con el fin de conservar y restaurar los recursos naturales (Transformando Guerrero, 2023).

1.3 ANTECEDENTES

En un estudio realizado por Bravo, et al., (2016), en la “Laguna Tuxpan” se muestrearon cinco puntos, tanto, en época de estiaje (enero) como en época de lluvia (septiembre). Los parámetros estudiados fueron: temperatura, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), pH, turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), sustancias activas al azul de metileno, grasas y aceites, fosfatos totales, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitrógeno total, fósforo total y coliformes fecales, de los cuales, los parámetros: sólidos disueltos totales (SDT), pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE) y temperatura coinciden con los estudiados en la presente investigación.

En la Tabla 1.1, se observan algunas de las características obtenidas y los límites permisibles de los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001-1989, o CECA), correspondientes a: Criterio para uso en Riego Agrícola (RA), Criterio de Uso Público Urbano (UPU) y el Criterio de Protección a la vida Acuática (PVA).

Tabla 1.1 Elaboración propia con resultados obtenidos de la investigación “Limnología de la Laguna Tuxpan” del libro Aproximación Holística en el manejo integrado de las cuencas, para la conservación y recuperación de cuerpos de agua superficiales

Parámetro	Concentración obtenida	Concentración permisible	Norma o acuerdo ecológico
Temperatura °C	En la superficie de 22.3 a 31.05 °C entre meses de lluvia y secas. En lo profundo de 22. 4 °C (verano) a 29.4 °C (invierno), y más profundo 24.17 °C a 25.0°C.		
Oxígeno disuelto (OD) mg/L	Enero (7.41), en agosto de lo profundo (0.44)	5.0 mg/L	Criterio de Protección de la Vida Acuática (PVA)
Conductividad eléctrica (CE) µS/cm	Entre 421 y 445. En agosto (306), septiembre (445), promedio mensual de 300 en agosto a 420 en enero y septiembre	1,000 µS/cm	Criterio para uso en Riego Agrícola (RA)
pH	Ligeramente alcalino, mínimo de 7.94, en el fondo (septiembre), máximo de 8.40 (secas), con 8.2 la mayor parte de la superficie y promedio de 8.05. Un pH de 8.6, no permite realizar la fotosíntesis a algunos organismos.	Adecuada para el riego agrícola 4.5–9	Criterio para uso en Riego Agrícola (RA)
Turbidez	Varía de 5.6 a 24.9, promediando 12.3 UNT, un punto presentó 17 UNT, el valor es 8.4 veces mayor a la profundidad promediando 104 UNT.		
SST	De 12.5 (septiembre) a 17.2 mg/L (enero). En uno de los puntos la concentración en septiembre fue de 38.7 mg/L.	50 mg/L	Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA)
Sustancias activas al azul de metileno	Índice de concentración de detergentes en el agua acompañada del fósforo por descargas urbanas y por lavado de ropa dentro la laguna. Va de 0 en secas a 0.096 mg/L en lluvias, esto coincide con los lavaderos ubicados al norte y este de la laguna.	0.1 mg/L	Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA).
Grasas y Aceites	Afectan el intercambio de oxígeno en las branquias, sofocando a los peces y causando su muerte. Se presentaron valores bajos en septiembre y en enero (estiaje) tres puntos presentaron 42.2, 39.3 y 33.4 mg/L. En estiaje puede haber estrés para el desarrollo de la vida acuática.		
Fosfatos totales	En superficie entre 0.020 a 0.210 mg/L, en promedio 0.101 mg/L en septiembre. En el fondo valores mayores 0.860 mg/L. Los valores promedio fueron de 0.056 mg/L	0.025 mg/L para lagos y embalses	Criterio de Protección de la Vida Acuática (PVA)
Nitrógeno amoniacal	En promedio 0.37 mg/L, en dos puntos valores altos de 0.410 y 0.408 mg/L, el mínimo fue de 0.159 en septiembre, y el máximo de 0.577 mg/L en enero. Todos los puntos rebasan por mucho el límite establecido.	0.06 mg/L	Criterio de Protección de la Vida Acuática (PVA)
Nitrógeno orgánico	El nitrógeno orgánico destaca como el más abundante osciló entre 0.624 y 1.400 mg/L (en el fondo).		
Nitrógeno total	Incrementa con relación a los aportes del río El Tomatal y del poblado de Tuxpan. El promedio es de 1.112 a 1.754 mg/L en la capa superficial de la laguna. Se reportan valores de 1.493 (en el fondo), 1.754 y 1.537 mg/L, por aporte de escorrentías cerca al poblado Tuxpan y por actividad agropecuaria.		Los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA) no definen un límite permisible para N-total
Fósforo total	El promedio más alto del fósforo total fue de 1.829 mg/L.		
Coliformes fecales	Buena calidad del agua (muestras superficiales). Valores > 3 (en secas) y con 2.4x 10 ² NMP/100 ml (septiembre), otro de los puntos (fondo) fue de 1.10 x 10 ³ NMP/100 m (septiembre). Estos dos últimos valores no cumplen.	PVA (200 NMP/100 ml) y RA y UPU (1,000 NMP/100 ml).	Criterio la Protección de Vida Acuática y para Riego Agrícola y Uso Público Urbano (UPU)

Considerando los resultados y la evaluación del Índice de Estado Trófico (IET), Bravo, et al., (2016) determinaron la “Laguna Tuxpan” como cuerpo de agua cálido tropical somero eutrófica de ligera turbidez provocada por la concentración de sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales.

Los parámetros que no cumplieron con los límites establecidos por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001-1989) para la Protección de la Vida Acuática (PVA) para algún punto fueron: los fosfatos totales, el nitrógeno amoniacal y los coliformes fecales. En contraste, los parámetros que sí cumplieron con los Criterios Ecológicos para la PVA fueron: oxígeno disuelto, cloruros, nitrógeno de nitratos y las sustancias activas al azul de metileno. Los valores promedio de fósforo total y nitrógeno indican que el nutriente limitante en este sistema es el fósforo (Bravo, et al., 2016).

Las características fisicoquímicas y biológicas indican que la laguna experimenta una creciente influencia antropogénica, caracterizada por el vertido de aguas residuales, aporte de detergentes por lavaderos ubicados dentro del cuerpo de agua, deforestación, erosión de la subcuenca, entrada de sólidos y nutrientes por escorrentías en época de lluvias, las actividades de los restaurantes a la orilla de la laguna. Esta presenta condiciones de estrés ambiental en algunos puntos para el oxígeno disuelto y potencial redox. El pH en el lago tuvo valores alcalinos, que sugieren una productividad primaria intermedia y una leve generación de oxígeno disuelto en la superficie del lago. Por el grado de contaminación del río Tomatal, así como las diversas actividades humanas cercanas, morfometría y color del agua, se estima que el nivel de eutroficación del lago va en aumento (Bravo, et al., 2016)

Lo anterior, es importante como antecedente para conocer el estado ambiental y de calidad del agua, ya que, en la presente investigación se abordarán algunos de los parámetros analizados, lo cual, permite tener información previa para el contraste con los datos obtenidos. Pues, aunque se ha introducido el uso de técnicas de

percepción remota, a estudios de calidad del agua, también se utiliza el muestreo in situ, para determinar parámetros directos en campo.

La teledetección para el monitoreo de calidad del agua introducida en 1978 y los sistemas de información geográfica (SIG), juegan un papel importante en estos estudios, haciéndose cada vez más utilizados para la detección de fuentes de contaminación (Moore et al., 2015). Esto, ha sido posible mediante satélites que cuentan con escáneres multiespectrales que permiten obtener la radiancia reflejada de la radiación solar incidente en la superficie terrestre (DGAPA, 2014).

De acuerdo, con literatura, aún no existe una definición clara de los parámetros de ópticamente inactivos que pueden monitorearse mediante percepción remota, sin embargo, esto se define de una manera más precisa en las correlaciones existentes por cada parámetro y por ende el coeficiente de determinación. Esto, dependerá de la concentración y características del agua (Ferdous & Ghosh, 2019). No obstante, los principales parámetros ópticos de calidad del agua estudiados mediante esta técnica son: turbiedad, sólidos suspendidos y clorofila-a [chl-a] (DGAPA, 2014; Torres, et al., 2021), considerando en algunos estudios también a los sólidos disueltos totales (Karakaya et al. 2011, Kulkarni, 2011, González, et al. 2018).

En menor medida, otros autores señalan parámetros de estudio como: claridad del agua, temperatura, oxígeno disuelto, nitritos, nitratos, profundidad (Bonansea et al. 2019 a, b; González-Márquez et al. 2018a; Ma et al. 2019; Masocha et al. 2018; Page, et al., 2019; Torres, et al., 2021) y materia orgánica disuelta coloreada [MODC] (Zhang, et al., 2021) conductividad eléctrica (CE) demanda química de oxígeno (DQO) y pH (Abdelmalik, 2018). La determinación de concentración de nitrito y nitrato es a partir de mediciones continuas de la concentración de clorofila (Chen et al., 2007). Sin embargo, los resultados varían, no siempre obteniendo moldeos de predicción asertivos.

En México, los trabajos de evaluación de calidad del agua y percepción remota son mínimos, por lo tanto, es necesario la formación de recursos humanos que contribuyan a impulsar las aplicaciones de la percepción remota en la evaluación de

la calidad del agua y en general en diversas aplicaciones a la ingeniería ambiental (DGAPA, 2014).

Algunos estudios recientes que han aplicado este tipo de técnicas son los siguientes:

Kalele (2019), realizó un estudio en el río Charles, Nueva Inglaterra centrado en el uso de mediciones de reflectancia de Landsat 8 para derivar valores respecto a la concentración estimada del parámetro turbidez. Las mediciones de turbidez y otros parámetros como la temperatura, oxígeno disuelto [OD], pH, clorofila-a (chl-a), y conductividad eléctrica (CE) fueron recolectados en campo mediante una estación o boya instalada en el río y los datos de reflectancia se obtuvieron mediante Google Earth Engine. Bajo técnicas estadísticas se exploraron las mejores correlaciones de turbidez, obteniendo valores superiores a 0.5 en las bandas roja, verde y rojo/azul. Por lo que los modelos de regresión con mejor coeficiente $R^2 = 0.842$ se obtuvieron con las bandas B2 (Azul), B3 (Verde) y valores de $R^2 = 0.838$ respectivamente.

Otro de los estudios enfocados a turbidez, fue por Lotfi, et al., (2019) en el humedal de Gandoman, Irán. Para ello, se tomaron muestras en tres ocasiones, con intervalos de 30 días de septiembre a diciembre de 2017. Se estudió la relación entre datos terrestres y de imágenes Landsat 8 y Landsat TM, mediante análisis de regresión lineal y coeficiente de correlación. La mayor correlación se produjo entre los valores de reflectancia de las bandas rojas y azules con coeficientes de $R^2 = 0.94$ y $R^2 = 0.97$. Por lo tanto, los resultados del análisis de regresión realizado para estudiar la relación entre la turbidez in situ y la turbidez de imágenes de satélite revelaron que existía una relación significativa entre los valores de reflectancia de las bandas roja y azul y la turbidez medida.

Omondi, et al., (2023), realizaron un estudio en la Presa dos Ríos, Kenia para estimar clorofila-a (chl-a), sólidos suspendidos totales (SST) y turbidez mediante Landsat 8. Donde, se relacionaron los valores de concentración de las muestras in situ con los valores de reflectancia, validándose con 5 puntos. De cada parámetro seleccionaron los coeficientes más altos. En el caso de turbidez se obtuvo un coeficiente de $R^2 = 0.763$ y 0.818 respectivamente, mientras que la estimación de

sólidos suspendidos totales (SST) tuvo valores de $R^2 = 0.809$ y 0.721 y la clorofila-a (chl-a) se estimó con precisiones de $R^2 = 0.803$ y 0.731 . Con base en los resultados, se concluyó que los parámetros de calidad del agua brindan una visión espaciotemporal de la calidad del agua que se puede recuperar a partir de datos satelitales con una precisión razonable.

Rivera, (2020) estimó los parámetros clorofila-a (chl-a), turbiedad y transparencia mediante técnicas de campo y percepción remota con Landsat 8 y Sentinel 2. Ambos satélites presentaron buena respuesta ante el análisis y estimación, sin embargo, los modelos con mejor correlación fueron con Sentinel-2 para clorofila-a con $R^2 = 0.853$ y turbiedad con $R^2 = 0.578$. Para turbidez, las bandas utilizadas fueron: B3 (Roja), B5 (Borde rojo 1), B8A (Infrarrojo cercano 2) y en el caso de clorofila-a B1(Aerosol), B2 (Azul), B6 (Borde rojo 2) B8 (Infrarrojo cercano 1). En general la laguna presenta poca variabilidad de los parámetros analizados. Sin embargo, se identifica claramente un sector con problemas de calidad de agua, indicando valores elevados para todos los parámetros.

El autor López, (2021), utilizó imágenes Sentinel-2 para determinar los parámetros fisicoquímicos de: pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y salinidad en la Laguna Moyua de ciudad Dario, Matagalpa. Los datos se obtuvieron tanto en época secas como en época de lluvias. El análisis de relación entre datos in situ y valores de reflectancia mostró correlaciones moderadas con valores que van de 0.43 a 0.47 entre los parámetros: salinidad, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y pH, bajo las bandas: B5 (Borde rojo 1), B8 (Infrarrojo cercano 1) y B9 (Vapor de agua).

Para conocer la capacidad de predicción bajo el uso de Landsat 8 y Sentinel 2, se estudiaron los parámetros: clorofila-a, profundidad del disco secchi, turbidez y temperatura (esta última utilizando Landsat 8), en el embalse hidroeléctrico en Brasil. También se consideraron parámetros ópticamente no activos como temperatura, pH y oxígeno disuelto (OD). Todos los parámetros ópticamente activos produjeron fuertes modelos de regresión $R^2 = >0.75$, tanto en Sentinel como

Landsat. Los modelos para los parámetros ópticamente no activos produjeron resultados menos sorprendentes para la temperatura con coeficiente de $R^2 = 0.03$ y para pH y oxígeno disuelto un coeficiente de $R^2 = > 0.8$. Como conclusión ambos sensores funcionaron para crear múltiples modelos de regresión de tres componentes ópticamente activos: clorofila-a (chl-a), profundidad del disco Secchi y turbidez. Además, el sensor MSI funcionó ligeramente mejor que el OLI para los parámetros ópticamente no activos: pH y oxígeno disuelto (Pizani, et al., 2020).

Cruz y & Durango (2023) realizaron un estudio de calidad del agua en las ciénagas Guartinaja, Momil y Sapal de Córdoba-Colombia, considerando la evaluación de los parámetros: pH, temperatura, turbidez, oxígeno disuelto (OD) y conductividad eléctrica (CE) por medio del análisis espectral de Landsat 8. Sin embargo, los modelos obtenidos de conductividad eléctrica (CE), pH, temperatura y turbiedad presentaron un coeficiente por encima de $R^2 = 0.6$ y el oxígeno disuelto (OD) por encima de $R^2 = 0.8$. Lo cual indica, que la percepción remota es apta para este tipo de estudios.

Bielski & Toś (2022) estudiaron la concentración de clorofila-a (chl-a) y turbidez en el lago Dobczyce, ubicado en el powiat de Myślenice, en Polonia, mediante imágenes Sentinel 2. Para calcular las concentraciones de dichos parámetros a partir de la reflectancia satelital se desarrolló un modelo con valores de reflectancia extremadamente altos o bajos, obteniendo una reflectancia significativa con las longitudes de onda: 665, 705, 740 y 842 nm para clorofila-a (chl- a) y las longitudes de onda 705, 740 y 783 nm para turbidez, permitiendo un coeficiente de determinación para clorofila-a de $R^2 = 0.944$ y para turbidez de $R^2 = 0.939$.

Por su parte, Tham et al., (2022) realizó el análisis de varios indicadores de calidad del agua, en el río Rojo Vietnam, sin embargo, se utilizaron los parámetros: sólidos suspendidos totales y turbidez para generar el modelo de correlación y estimar la concentración total mediante imágenes Sentinel 2. Los valores de reflectancia importantes fueron representados por las bandas visibles (Azul, Verde y Roja) y una banda de infrarrojo cercano 1 (Banda 8). Encontrando correlaciones significativas en la concentración de sólidos suspendidos de $R^2 = 0.776$ y para turbidez $R^2 = 0.774$.

En el estuario del Sado, Portugal se evaluó el potencial del monitoreo de calidad del agua para los parámetros: clorofila-a (chl-a) y turbidez mediante Sentinel 2. La reflectancia significativa para la turbidez fue en la longitud de onda 783 nm, la cual mostró una alta consistencia de $R^2= 0.84$ con las observaciones in situ lo que indica las grandes capacidades del sensor MSI para monitorear este parámetro. Sin embargo, para el parámetro clorofila-a (chl-a) se requiere más investigación, ya que, utilizando las reflectancias de 665 y 705 nm se obtuvo una correlación de $R^2= 0.57$, considerado un nivel de consistencia bajo (Sent et al., 2021).

En el embalse de San Roque, provincia de Córdoba, Argentina, se utilizaron imágenes Sentinel 2 y datos de campo para desarrollar un modelo de predicción que permitiera obtener la relación significativa respecto a la concentración de clorofila-a (chl-a), las bandas utilizadas y de mejor correlación fueron la Banda 8 (NIR: 0.842 nm) y la Banda 4 (Rojo: 0.665 nm). Resultando con un coeficiente de $R^2 = 0.789$ (Germán et al., 2017).

1.4 JUSTIFICACIÓN CONTEXTUAL Y CIENTÍFICA

El agua es crucial en el desarrollo de la sociedad, para el abastecimiento de las diferentes actividades socioeconómicas, como la industria, la agricultura, la pesca, la recreación y el consumo humano, representa el hábitat para diferentes especies de la vida silvestre y acuática. Sin embargo, muchas de las actividades antropogénicas han causado alteración de las aguas superficiales sometidas a contaminación natural, arrastre de partículas de material disuelto, así como descargas de aguas domésticas, escorrentía agrícola, entre otros.

La presente situación no es excepción, dado que, la “Laguna Tuxpan” perteneciente al municipio de Iguala de la Independencia, ubicado en el estado de Guerrero, es colector principal de la subcuenca, donde el agua captada contiene contaminantes por las diferentes actividades como el lavado de ropa en la orilla, lavado de autos, vertido de desechos de restaurantes ubicados en la rivera del cuerpo de agua, efectos del servicio turístico, emisión de agroquímicos por cultivos, se emplea como abrevadero in situ, y para pequeñas granjas causando efectos directos en la calidad

del agua desde variaciones en las condiciones fisicoquímicas e impactando en las condiciones ambientales.

Por lo cual, se busca conocer la situación actual de la calidad del agua mediante datos de campo y la respuesta espectral de imágenes Landsat 8 y Sentinel 2, con la finalidad de estimar la concentración principalmente de clorofila-a (chl-a), turbidez y sólidos disueltos totales (SDT).

1.5 HIPÓTESIS

El uso de la percepción remota permitirá evaluar la calidad del agua a través de los parámetros clorofila-a (chl-a), turbidez y sólidos disueltos totales (SDT), además, la mayor resolución espacial mejorará la determinación de la concentración de estos contaminantes.

1.6 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

1.6.1 Objetivo general

Evaluar la calidad del agua en la “Laguna Tuxpan” Guerrero, mediante técnicas de percepción remota utilizando datos Landsat 8 y Sentinel 2.

1.6.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar las posibles fuentes de contaminación que inciden en la Laguna.
- Determinar la concentración de parámetros de calidad del agua como: clorofila-a (chl-a), sólidos disueltos totales (SDT) y turbidez.
- Estimar y analizar la concentración de clorofila-a (chl-a) como indicador de eutrofización.
- Determinar las correlaciones significativas entre datos Landsat 8, Sentinel 2 y parámetros in situ.
- Estimar y valorar el modelo de SDT obtenido, como predictor de concentración a partir de percepción remota.
- Comparar los resultados obtenidos de Landsat 8 y Sentinel 2 en relación con datos in situ para valorar los modelos de estimación paramétricos.

2 CAPÍTULO II

2.1 MARCO DE REFERENCIA

2.1.1 Percepción remota

Es la ciencia y arte de obtener información acerca de la superficie terrestre sin entrar en contacto con ella. Esto se realiza detectando y grabando la energía emitida o reflejada; procesando, analizando y aplicando esa información (Hernández, 2017).

La percepción remota se encarga de la captura, procesamiento y análisis de datos obtenidos a través de los sensores remotos. Permitiendo medir y catalogar la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la Tierra, y relacionar dichas mediciones con su naturaleza y distribución (Martínez, 2022).

De acuerdo con Franco (2013) los elementos de la percepción remota son los siguientes (Figura 2.1).

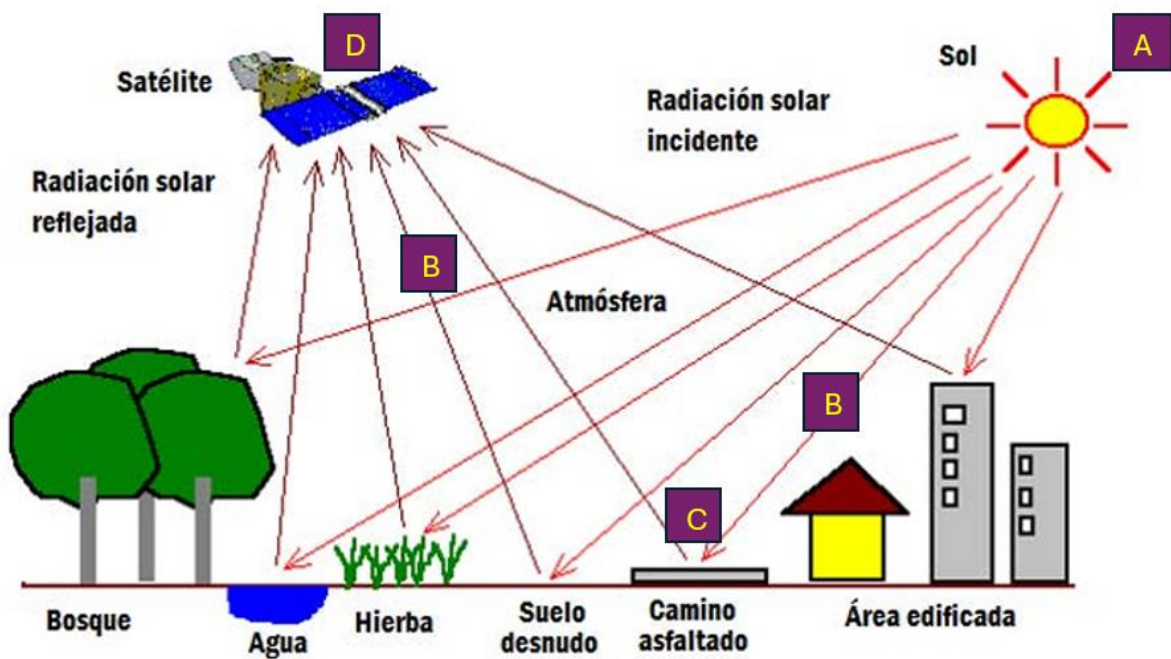


Figura 2.1 Representación gráfica de los elementos de la percepción remota
Fuente: Schmind, s.f.

A) Sol/fuente de energía: Es el primer elemento, ya que es a partir de la fuente natural o artificial, es decir, proveniente del sol o del sensor (activo) del satélite que emite luz, mediante un radar que proveerá de energía luminosa o electromagnética al objeto de interés.

B) Radiación y medio de transmisión: La energía emitida de la fuente al objeto y a la vez la energía reflejada o emitida por el objeto al sensor es transmitida a través de la atmósfera, en dicho trayecto parte de la energía interactúa con las moléculas de la atmósfera provocando una disipación de esta.

C) Interacción con el objeto: Cuando la energía emitida por la fuente entre en contacto con el objeto, éste la transmitirá, absorberá o reflejará dependiendo de sus propiedades.

D) Detección de la energía por medio del sensor: La finalidad del sensor es captar y almacenar la radiación electromagnética proveniente del objeto y de la atmósfera.

E) Transmisión, recepción y procesamiento: La información grabada en el sensor es transmitida usualmente de forma electrónica a una estación de recepción y procesamiento de datos, con el fin de obtener imágenes digitales

F) Interpretación y análisis: A partir de las imágenes digitales se puede extraer información tanto visual como digital a cerca del objeto en estudio. Una de las ventajas de utilizar la información digital es que permite realizar operaciones a través del procesamiento de imágenes que dan como resultado una mayor información.

G) Aplicación: La información obtenida mediante el análisis y la interpretación de las imágenes, en muchos casos amplían el conocimiento acerca del objeto en estudio, ayudando a resolver un problema en particular.

Por tanto, Oliveros (2014), las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto son:

- 1) Reflexión. El sol ilumina la superficie terrestre que refleja la energía en función del tipo de cubierta presente y esta es captada por el sensor
- 2) Emisión. Referida a la energía emitida por la propia cubierta terrestre
- 3) Emisión-reflexión. Energía enviada desde un sensor capaz de generar su propio flujo energético y captar su reflexión sobre la superficie terrestre.

2.1.2 Espectro electromagnético

Al flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial. El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias posibles a las que se produce radiación electromagnética (Ordoñez, 2017).

La radiación electromagnética puede definirse como aquellos procesos en los que se emite energía bajo la forma de ondas o partículas materiales y pueden propagarse tanto a través de un medio material como en el vacío. Se diferencian unas de otras en el valor de su frecuencia. Cuanto mayor es la frecuencia de una radiación, mayor es su energía (Radiación electromagnética, s.f).

Propiedades básicas de las ondas: amplitud, longitud de onda y frecuencia

Una onda se conforma de un valle (punto más bajo) y una cresta (punto más alto). La distancia vertical entre la punta de la cresta y el eje central de la onda se conoce como amplitud. Esta es la propiedad asociada con el brillo, o intensidad, de la onda. La distancia horizontal entre dos crestas o valles consecutivos de la onda se conoce como longitud de onda (Khan Academy, 2024).

Las longitudes de onda se pueden observar de la siguiente manera (Figura 2.2).

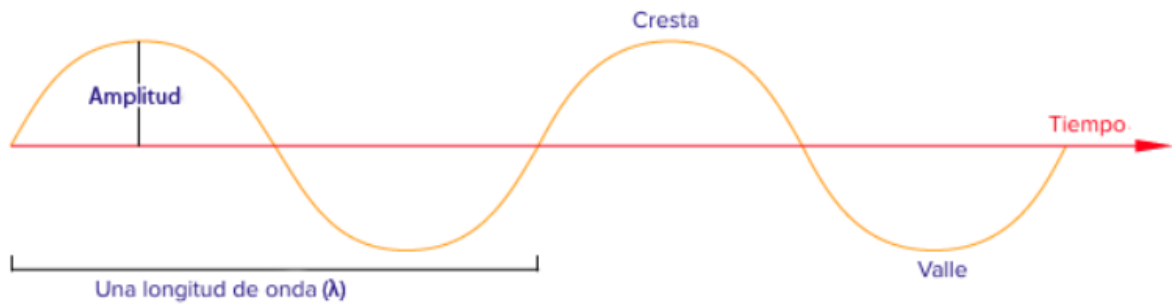


Figura 2.2 Propiedades de una onda: Amplitud, longitud de onda, cresta y frecuencia
Fuente: Khan Academy, 2024

Las ondas electromagnéticas se pueden clasificar y ordenar de acuerdo con sus diferentes longitudes de onda y frecuencias; a esta clasificación se le llama "espectro electromagnético". La Figura 2.3, muestra este espectro, que consiste en todas las clases de radiación electromagnética que existen en nuestro universo (Khan Academy, 2024).

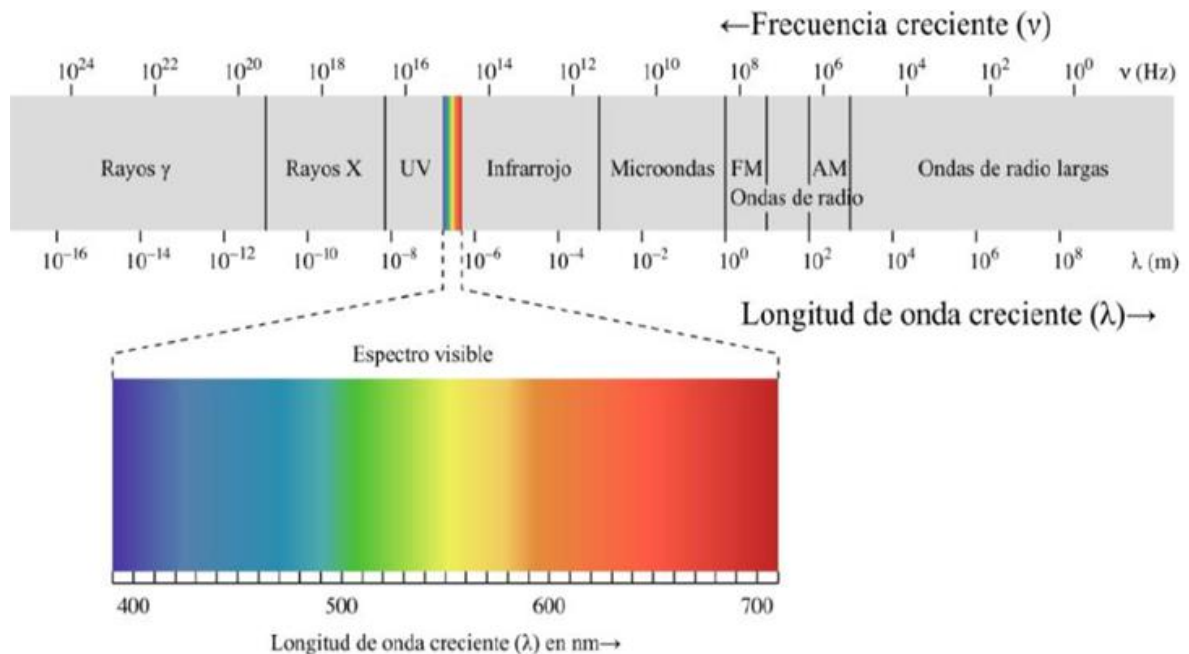


Figura 2.3 Longitudes de onda del espectro electromagnético visible
Fuente: Torrez, 2024

En el espectro electromagnético, la parte visible va de 400 nm a 700 nanómetros (Torrez, 2024) y de acuerdo, con Franco (2013), las regiones del espectro electromagnético más empleadas en percepción remota son las que se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Regiones del espectro electromagnético más utilizadas comúnmente en teledetección

Nombre de la banda	Longitud de onda
Visible	0.4 μm -0.7 μm
Infrarrojo Próximo	0.7 μm -1.3 μm
Infrarrojo Medio	1.3 μm -8.0 μm
Infrarrojo Lejano o Térmico	8.0 μm -14 μm
Microondas	0.1 cm-20 cm

Fuente: Franco, 2013

Espectro Visible

Esta franja del visible (0.4 μm -0.7 μm), es denominada así, porque es la única radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano. Esta pequeña porción del espectro electromagnético se encuentra dividido en tres bandas: la banda del azul (0.4 μm -0.5 μm), la banda verde (0.5 μm -0.6 μm) y la banda roja (0.6 μm -0.7 μm) (Franco. 2013).

Infrarrojo Cercano (NIR)

La franja del infrarrojo próximo (0.7 μm -1.3 μm). Esta parte del espectro se encuentra un poco más allá de la capacidad de percepción del ojo humano (Torrez, 2024), también se conoce como infrarrojo reflejado o fotográfico y puede detectarse haciendo uso de películas dotadas de emulsiones especiales. El NIR es de especial interés debido a su sensibilidad para determinar el estado de la vegetación (Torrez, 2024). Además de ser empleada en la discriminación de coberturas vegetales y contenidos de agua (Franco. 2013).

Infrarrojo Medio (MIR)

En la banda del infrarrojo Medio ($1.3\ \mu\text{m}$ - $8\ \mu\text{m}$) es donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Esta región espectral se encuentra entre las regiones NIR ($0.7\ \mu\text{m}$ - $1.3\ \mu\text{m}$) y del Infrarrojo Térmico TIR ($8\ \mu\text{m}$ - $14\ \mu\text{m}$) incluye la porción emisiva del espectro terrestre. Y, por último, la porción microondas es de gran interés por ser un tipo de energía muy transparente a la cubierta de las nubes (Franco, 2013).

El intervalo entre $1.3 - 2.5\ \mu\text{m}$ es denominado Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) y es utilizado para estimar contenidos de humedad en vegetación y suelos. Esta región proporciona las mejores estimaciones del contenido de humedad del suelo y vegetación y de $3\ \mu\text{m} - 8\ \mu\text{m}$, la señal se vuelve una mezcla continua de energía reflejada por el sol y emitida por la superficie, convirtiéndose el componente emitido más relevante a medida que las longitudes de onda se hacen más largas. El intervalo de $3-5\ \mu\text{m}$ es particularmente útil para detectar fuentes de altas temperaturas, como volcanes o incendios forestales (Torrez, 2024).

Microondas (MW)

Para radiaciones superiores a $1\ \text{cm}$. Esta región espectral es donde funcionan los sistemas de radar. Su principal ventaja es la absorción atmosférica muy baja, lo que nos permite “ver” a través de las nubes. La radiación de MW también puede penetrar en las copas de los bosques a varias profundidades y es muy útil en análisis de humedad del suelo y rugosidad superficial. Requiere de la emisión de un haz energético por parte del sensor (Torrez, 2024).

2.1.3 Interacción del agua con el espectro electromagnético

La proporción del flujo de energía reflejado, absorbido y transmitido depende de las características de la superficie o cobertura (Franco, 2013).

Cuando el agua se encuentra limpia y clara, en la zona del espectro visible, una parte se absorbe y la mayor parte se transmite y en la región del infrarrojo cercano una menor cantidad se transmite, evidenciando un aumento en la absorción, es

decir, en el infrarrojo, el agua absorbe fuertemente la radiación, muy poca se transmite (López, 2021).

Las longitudes de onda visibles verde y roja más largas y la radiación infrarroja (IR) son absorbidas por el agua, más que la longitud de onda Azul (Figura 2.4). Por lo que, el agua normalmente se ve azul o verde-azul. (Schmidt, s.f).

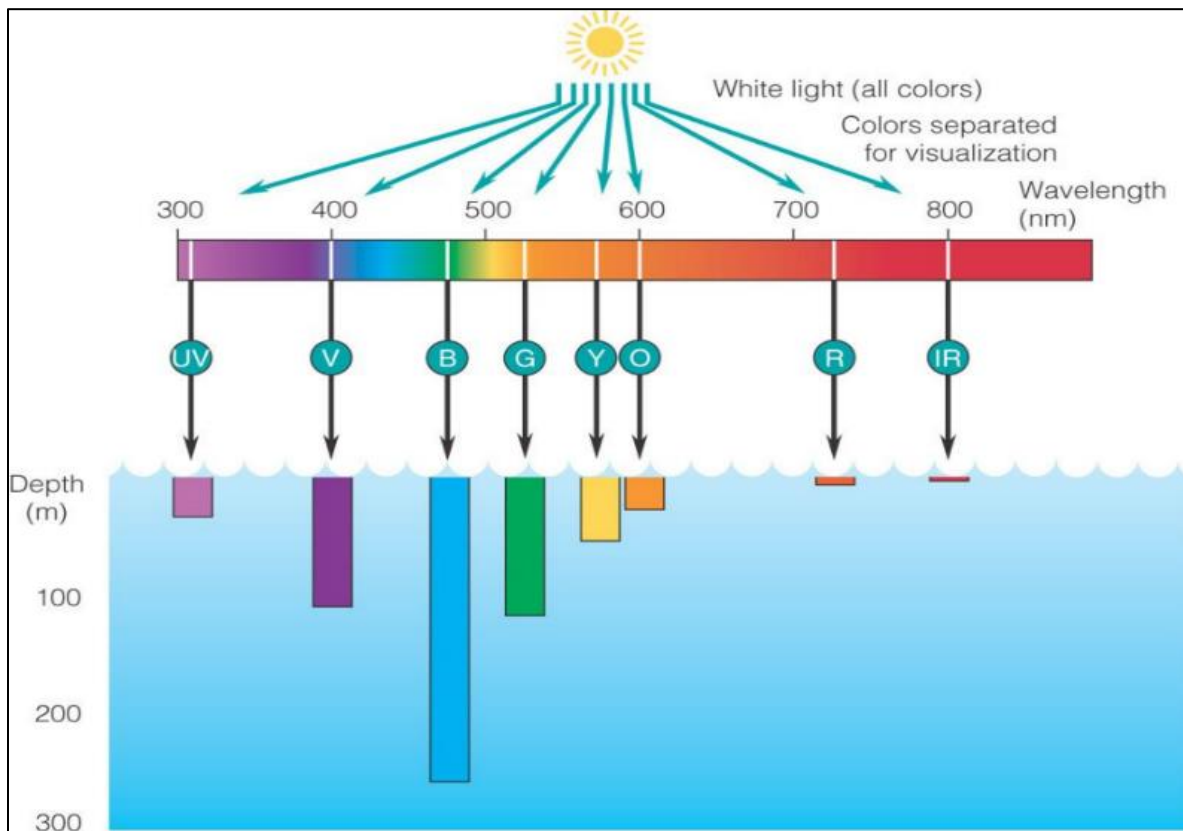


Figura 2.4 Interacción del agua con el espectro electromagnético, donde, la longitud de onda Azul es mayormente reflejada.

Fuente: Air Water Generator, 2023

Por tanto, las excelentes propiedades para transmitir la radiación electromagnética en el espectro visible y de absorción en el infrarrojo las contiene el agua clara (Cruz y Durango, 2023).

Los factores que determinan el comportamiento espectral del agua son: la profundidad, los materiales en suspensión, y la rugosidad de la superficie. En relación con la rugosidad, si la superficie es lisa, se incrementan los efectos especulares, por lo que la reflectividad puede cambiar fuertemente en función de la

posición relativa del sol y del sensor. (López, 2021). En la presencia de condiciones de turbidez, las consecuencias para la respuesta espectral dependerán del tipo de turbidez (Cruz y Durango, 2023), con relación a los materiales en suspensión, si estos tienen clorofila-a o fitoplancton, aparece un aumento en la respuesta espectral de la banda verde y una disminución en la banda azul (López, 2021) y, si son residuos inorgánicos, la reflectividad aumenta principalmente en el rojo visible.

A pesar de que el análisis de calidad del agua mediante percepción remota está limitado a algunos parámetros, los indicadores como: turbiedad, sólidos suspendidos, clorofila-a, temperatura, etc., pueden ser indicadores de problemas de contaminación más específicos (Sepúlveda, 2011).

Entendido esto, la región del espectro electromagnético que abarca la luz visible y la infrarroja (IR) se utiliza para detectar indicadores de calidad del agua. Las mediciones en esta porción del espectro utilizan la energía electromagnética reflejada. También se utiliza el IR térmico, usando mediciones directas de la energía emitida. Por ello, es posible establecer relaciones entre parámetros de calidad del agua y la reflectancia, debido a que la intensidad y color de luz es modificada por el volumen del agua y sus contaminantes. De esta forma pueden generarse relaciones empíricas entre mediciones de reflectancia y ciertos parámetros de calidad del agua de una muestra (Sepúlveda, 2011).

Dicho de otra manera, para determinar parámetros de la calidad del agua, se utilizan las mediciones de radiancia en las longitudes de onda de luz visible e infrarroja. Esto, gracias a la reflectancia emitida, respecto a las propiedades ópticas del agua como: la concentración, características de los sedimentos suspendidos, la materia orgánica disuelta y el fitoplancton existente en esta (Gómez & Delance, 2014; Kulkarni, 2011). A partir de esta información y de la correlación con valores obtenidos en campo, es posible crear modelos matemáticos que arrojen valores de predicción mediante imágenes satelitales del lugar de estudio, lo que permitirá monitorear la calidad del agua a partir de los modelos empíricos (DGAPA, 2014).

2.1.4 Calidad del agua

Calidad del agua es un término que describe las condiciones en que se encuentra el agua respecto a características físicas, químicas y biológicas, en su estado natural o después de ser alteradas por la actividad humana. La calidad del agua se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con estándares permitidos. Este concepto ha sido asociado principalmente al uso del agua para consumo humano, sin embargo, dependiendo de otros usos también se puede definir la calidad del agua en función de ello (Baeza, 2016).

Los estándares y criterios más estrictos se aplican al agua para consumo humano, los siguen las que definen las características del hábitat para los peces y a la vida silvestre, para usos recreativos, agricultura e industrias, el cumplimiento de estos estándares de calidad implica pruebas y mediciones de las concentraciones de contaminantes físicos, químicos y biológicos (López, 2021; CAPRE, 1994).

Los indicadores de calidad del agua se pueden categorizar en:

A) Biológicos: bacterias, algas, B) Físicos: temperatura, turbidez, claridad, color, salinidad, sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos (SD) C) Químicos: pH, oxígeno disuelto (OD), demanda de oxígeno (DO), nutrientes (incluidos nitrógeno y fósforo), compuestos orgánicos e inorgánicos (incluidos tóxicos) y D) Estéticos: olores, manchas, color y materia flotante (Usali et al., 2010).

Considerando que los sensores remotos proporcionan información de las propiedades ópticas aparentes de una masa de agua (POA); como la reflectividad, que depende de las propiedades ópticas inherentes (POI), las cuales, están relacionadas con los niveles de absorción o dispersión de esta; los parámetros, pueden ser ópticamente activos u ópticamente no activos (Tenjo, et al., 2014; Pereira, 2023).

Los parámetros ópticos que por sus características de concentración y la reflectividad pueden dar una respuesta espectral son: clorofila-a (chl-a), sólidos suspendidos totales (SST), materia orgánica disuelta coloreada (MODC) y turbidez (Wang, et al. 2018).

Por otra parte, los parámetros del agua ópticamente inactivos son: temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), demanda química de oxígeno (DQO) y oxígeno disuelto [OD] (Yang, et al. 2022; Hossain, et al. 2022; Adjovu, et al, 2023a).

2.1.5 Parámetros de calidad del agua

Clorofila-a (chl-a)

La concentración de clorofila-a se utiliza para estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas, debido a que es el principal pigmento fotosintético presente en las algas. La clorofila-a también es un indicador del grado de contaminación de los ecosistemas acuáticos y un importante índice del estado fisiológico del fitoplancton (Torrez, 2024).

Turbidez

Pérdida de claridad u opacidad del agua causada por partículas en suspensión (arcilla y sedimentos), partículas orgánicas (Ej: desechos vegetales) y organismos (Torrez, 2024; Sepúlveda, 2011). De acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021, el límite permisible de este parámetro es de 4.0 UNT (Unidades nefelométricas).

Sólidos disueltos totales (SDT)

Son compuestos inorgánicos que se encuentran en el agua, como sales, metales pesados y algunos rastros de compuestos orgánicos que se disuelven en el agua, cuando las concentraciones de SDT se encuentran en los rangos 50 a 600 mg/litro el agua llega a presentar un sabor agradable, que se deteriora progresivamente (López, 2021), pero si las concentraciones sobrepasan el límite permisible 1000 mg/L determinado por la NOM-127-SSA1-2021, puede resultar inaceptable debido a su insipidez (López, 2021).

Son los que se obtienen después de la evaporación de una muestra previamente filtrada y que pasan el filtro, también son conocidos como sólidos filtrables (Sepúlveda, 2011).

Sólidos suspendidos totales (SST)

Los sólidos suspendidos, tales como limo, arena y entre otros, son generalmente responsables de impurezas visibles. La materia suspendida consiste en partículas muy pequeñas, que no se pueden quitar por medio de deposición (Lenntech, 2007).

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST): Son los que se obtienen después de la evaporación de una muestra previamente filtrada y que son retenidos en el filtro, también son conocidos como sólidos no filtrables (Sepúlveda, 2011).

Temperatura

Cantidad de energía lumínica que queda atrapada en los dos primeros metros de la columna de agua, produciéndose un aumento de la misma en el cuerpo de agua. La temperatura en el agua está vinculada con la cantidad de energía calórica presente en el agua. Este parámetro permite definir el grado de estratificación térmica 17° dentro de un cuerpo de agua [Agrupación de láminas de agua de igual temperatura dentro de un cuerpo de agua] (López, 2021). De acuerdo, con Beita & Barahona (2011) en condiciones naturales del agua fluyente, la temperatura varía de 0°C a 30°C. Dependiendo hora del día, época del año, condiciones del tiempo, flujo y profundidad de la corriente.

Oxígeno disuelto (OD)

Es la cantidad de oxígeno gaseoso disuelto en el agua que indica si el agua es apta para poder mantener vida acuática. (Peña, 2007). El OD normal varía entre los 5.0 y 12 mg/L (Escandón & Cáceres 2022; Quispe, 2017).

pH

Expresa la concentración de iones de Hidrógeno [H⁺] o la actividad de este ion. Su escala de medición es de 1 a 14 (7 neutro). Las aguas que superan los niveles de pH >7, indica estado alcalino y cuando el pH está entre 6.5 y 8.5 es favorable para la vida acuática en su hábitat (López 2021). Según la NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano, el valor recomendado para consumo humano debe

estar de 6.5 a 8.5, pero cuando el pH es ácido indica contaminación por vertidos mineros o industriales (López 2021).

CE

Capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica indicando presencia de iones disueltos; tiene un límite guía de [3000] $\mu\text{S}/\text{cm}$, en concentraciones superiores a los límites permitidos condiciona el crecimiento de cultivos y disminuye el rendimiento de las plantas. (López; 2021). El aumento de la CE puede indicar un aumento de SDT y de salinidad (Matas, 2000).

2.1.6 Parámetros estudiados mediante percepción remota

Los principales parámetros determinados mediante teledetección con una precisión razonable (Giardino et al., 2010) son: clorofila-a (chl-a), sólidos suspendidos totales (SST), turbidez y materia orgánica disuelta coloreada [MODC] (Bhavsar 1984; Büttner et al., 1987). Sin embargo, existen otros estudios que han estimado otros parámetros ópticamente no activos, esto, dependerá principalmente del nivel de correlación que tenga cada uno de los parámetros con los valores de reflectancia satelital, ya que, considerando la literatura consultada, es preferible realizar la correlación entre datos in situ y valores de reflectancia para precisar que parámetros tienen una respuesta espectral, y con ello, realizar el modelo de regresión que permita mediante el coeficiente determinar qué tan apto es el modelo para poder predecir la concentración del parámetro.

2.1.7 Conceptos: Plataforma satelital y Sensor remoto

Los sensores y plataformas forman una parte esencial de la percepción remota, sin embargo, ambos elementos son diferentes (Franco, 2013). ya que el primero hace referencia a sistemas o instrumentos para captar información de un objeto a distancia [sensor remoto] (López, 2021; Torrez, 2024); mientras que el segundo, es el dispositivo en el cual se instala el sensor para protegerlo y garantizar el buen funcionamiento de éste (Franco, 2013), por ejemplo, los satélites (LANDSAT, METEOSAT, NOAA, SPOT) o aviones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia (Torrez, 2024).

Según, Franco (2013) los sensores se clasifican en dos grandes categorías:

a) Sensores activos: son aquellos que pueden emitir su propia energía electromagnética, la cual, es transmitida al objeto en estudio para posteriormente ser reflejada al sensor, con la ventaja de no importar si es de día o noche, el sensor puede obtener la información del cuerpo en estudio. Un ejemplo de este tipo de sensores es el Radar el cual puede trabajar bajo cualquier condición atmosférica pero su resolución espacial es muy pobre.

b) Sensores pasivos: son aquellos que necesitan de la energía emitida por el sol para la adquisición de la información, a la vez este tipo de sensores se divide en sensores de barrido y sensores de empuje. La diferencia principal entre esta clase de sensores es que el primero usa espejos oscilatorios que se mueven perpendicularmente a la dirección del satélite, permitiendo explorar una franja de terreno a ambos lados, mientras que los de empuje disponen de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor, eliminando de esta manera el espejo oscilante. En la actualidad la mayoría de los sensores son pasivos.

También se pueden clasificar por su resolución espectral, resolución espacial, resolución temporal y resolución radiométrica:

Resolución espectral: Número y amplitud de bandas espectrales que un sensor puede detectar. Mientras mayor sea el número de bandas que proporcione un sensor será más fácil la caracterización espectral de los tipos de cubierta. Por otra parte, es preferible tener bandas estrechas, ya que bandas anchas registran un valor promedio, lo que dificulta la diferenciación espectral de las cubiertas de interés (Franco, 2013).

Resolución espacial: Se refiere al objeto más pequeño que puede ser detectado por el sensor. El área superficial que abarca un píxel (unidad mínima de información espacial) depende de la plataforma y sensor utilizado (Franco, 2013).

Resolución temporal: Intervalo de tiempo en que el sensor tarda en adquirir una imagen de una misma escena terrestre, dicho intervalo de tiempo depende de las características de la órbita del satélite (Franco, 2013).

Resolución radiométrica: Capacidad del sensor para detectar variaciones de la radiancia espectral. Mientras mayor resolución radiométrica se tenga se contará con más información en una imagen, por lo general los sistemas ofrecen imágenes de 8 bits, es decir, una variación de 256 niveles por píxel que varían de 0 a 255 (Franco, 2013). La interpretación de la imagen será mejor mientras mayor sea la resolución radiométrica (Sepúlveda, 2011).

El sensor detecta la radiancia media procedente de una parcela del terreno equivalente al tamaño del píxel, se traduce a un valor numérico en cada banda del espectro llamado Nivel Digital (ND). Éste es un número entero que varía en función de la resolución radiométrica con la que trabaje el sensor. Por ejemplo, para 8 bits, el ND en cada píxel puede variar de 0 a 255, completando los 256 posibles valores (Sepúlveda, 2011).

Respecto a las plataformas, actualmente existen un gran número de plataformas disponibles para la adquisición de imágenes satelitales, cada una de ellas tienen características que la hacen única, de ahí radica la importancia de elegir adecuadamente la plataforma a utilizar, ya que, cada proyecto puede exigir propiedades diferentes. En este apartado se mencionarán las plataformas más utilizadas y las de interés para esta investigación (Franco, 2013).

En el presente estudio se utilizarán los satélites más actuales como Landsat 8-9 y Sentinel 2.

2.1.8 Características de Landsat 8

Landsat 8, fue lanzado el 11 de febrero de 2013 por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), con el objetivo de brindar disponibilidad de imágenes multiespectrales de la cobertura global, sinóptica y repetitiva de la superficie de la Tierra gratuitas que permitan el estudio con relación a la diferenciación, análisis, caracterización y monitoreo de los cambios que se presentan en la cobertura y uso de la Tierra durante periodos prolongados que puedan abarcar décadas de estudio (Cruz & Durango, 2023).

El Satélite Landsat 8, cuenta con dos sensores capaces de medir los rangos de frecuencia del espectro electromagnético:

- 1) Sensor Operational Land Imager (OLI) con 9 bandas en el espectro de luz visible e infrarrojo cercano (Cruz & Durango, 2023), presenta una resolución radiométrica de 12 bits y una resolución espacial de 30 metros para las bandas del espectro visible (RGB) e infrarrojo cercano y de onda corta a excepción de la banda 8 pancromática, la cual posee 15 metros de resolución espacial (Ariza, 2013).
- 2) Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS) con dos bandas en un rango de 10–12.5 μm genera imágenes térmicas caracterizadas por poseer una resolución espacial de 100 m y medir en el espectro infrarrojo de onda larga con el fin de estudiar la variación de temperatura de la superficie, el proceso de transferencia de calor y humedad en el ámbito de la agricultura, la gestión del agua, etc., (Cruz & Durango, 2023).

Las imágenes de Landsat 8 están formadas por 10 bandas de trabajo y una banda pancromática cuyas resoluciones se encuentran en 15, 30 y 100 metros (Tabla 2.2). Aunque su máxima resolución se encuentra en 30 metros, la banda pancromática permite equiparar todas las bandas a una resolución de 15 metros a través de la técnica pansharpening, una particular forma de remuestrear sus bandas a un tamaño homogéneo de 15 metros más pequeños (Torrez, 2024).

Tabla 2.2 Características de resolución espacial y espectral de Landsat 8

Banda	Resolución (m)	Longitud de onda (μm)	Descripción
B1	30 m	0.43-0.45	Aerosol costero
B2	30 m	0.45-0.51	Azul
B3	30 m	0.53-0.59	Verde
B4	30 m	0.64-0.67	Roja
B5	30 m	0.85-0.88	Infrarrojo cercano (NIR)
B6	30 m	1.57-1.65	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1
B7	30 m	2.11-2.29	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2
B8	15 m	0.50-0.68	Pancromática
B9	30 m	1.36 -1.38	Cirrus
B10	100 m	10.60-11.19	Infrarrojo térmico (TIRS) 1
B11	100 m	11.50-12.51	Infrarrojo térmico (TIRS) 2

Fuente: Torrez, 2024

2.1.9 Características de Landsat 9

El satélite Landsat 9, es la última serie de satélites de observación de la Tierra lanzado el 27 de septiembre de 2021, sus datos están disponibles públicamente (Yang, et al. 2022). Es una réplica mejorada de Landsat 8. Lleva el sensor Operational Land Imager 2 (OLI-2), y el Sensor Infrarrojo Térmico 2 (TIRS-2) (Sayler, 2022).

Landsat 9 OLI-2 proporciona imágenes consistentes con las cualidades espectrales, espaciales, geométricas y radiométricas del Landsat 8. Tiene nueve bandas espectrales en una franja de 185 km con resoluciones de 30 m para todas las bandas excepto la banda pancromática, que es de 15 m (Tabla 2.3). Landsat 9 ofrece una cobertura terrestre de revisita de 16 días y un desplazamiento de 8 días con respecto a Landsat 8. Adquiere más de 700 escenas por día. El sensor se lanzó para continuar con la recopilación, distribución y archivo de imágenes multiespectrales que ofrecen a los usuarios la cobertura sinóptica, global y repetitiva

de la superficie de la Tierra para la detección de cambios naturales e inducidos por el hombre en una escala espaciotemporal (Sayler, 2022).

Landsat 9 posee una mayor resolución radiométrica, con 14 bits frente a los 12 bits de su antecesor, lo que permite detectar diferencias sutiles en zonas más oscuras, como bosques densos y aguas costeras, y con las mejoras en el sensor TIRS-2, permite una mejor corrección atmosférica y una medición más precisa de la temperatura de la superficie (García, 2022).

Tabla 2.3 Características de resolución espacial y espectral de Landsat 9 OLI 2 / TIRS 2

Banda	Resolución (m)	Longitud de onda (μm)	Descripción
B1	30 m	0.435-0.451	Aerosol costero
B2	30 m	0.452-0.512	Azul
B3	30 m	0.533-0.590	Verde
B4	30 m	0.636-0.673	Roja
B5	30 m	0.851-0.879	Infrarrojo cercano (NIR)
B6	30 m	1.566-1.651	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1
B7	30 m	2.107-2.294	Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2
B8	15 m	0.503-0.676	Pancromática
B9	30 m	1.363-1.384	Cirrus
B10	100 m	10.60-11.19	Infrarrojo térmico (TIRS) 1
B11	100 m	11.50-12.51	Infrarrojo térmico (TIRS) 2

Fuente: GIS & Beers, 2022

2.1.10 Características de Sentinel 2

Sentinel 2, comprende una constelación de dos satélites en órbita polar colocados en la misma órbita sincrónica del sol. El tiempo de revisita es de 10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones sin nubes, lo que da como resultado 2-3 días en latitudes medias (Torrez, 2024).

Es un satélite de observación terrestre desarrollado por la Agencia Espacial Europea (AEE) para el programa Copernicus de la Unión Europea lanzado el 23 de junio de 2015, desde el puerto espacial en Kourou, Guayana Francesa. Cuenta con una resolución espacial de 10 a 60 metros, lo que le permite capturar imágenes de alta resolución de la Tierra en diferentes bandas espectrales (Abanto, 2023). Cuenta con 12 bandas espectrales, desde el visible y el infrarrojo cercano hasta el infrarrojo de onda corta en diferentes resoluciones espaciales que van desde 10 a 60 metros en el suelo (Tabla 2.4). Las cuatro bandas con una resolución de 10 metros aseguran la continuidad con misiones como SPOT-5 o Landsat-8 y abordan los requisitos del usuario, en particular, para la clasificación básica de la cubierta terrestre. Las seis bandas a una resolución de 20 metros satisfacen los requisitos para una clasificación mejorada de la cobertura del suelo y para la recuperación de parámetros geofísicos. Las bandas a 60 metros están dedicadas principalmente a correcciones atmosféricas y cribado de nubes cirrus. Incluye tres bandas en el 'borde rojo', que proporcionan información clave sobre el estado de la vegetación. Se pueden ver cambios tempranos en la salud de las plantas debido a su alta resolución espacial y temporal y 3 bandas de borde rojo. Esto es particularmente útil para los usuarios finales y los formuladores de políticas para aplicaciones agrícolas y para detectar signos tempranos de escasez de alimentos en los países en desarrollo (López, 2021).

Tabla 2.4 Características de resolución espacial y espectral de Sentinel 2

Banda	Resolución (m)	Longitud de onda (μm)	Descripción
B1	60	0.43 – 0.45	Aerosol
B2	10	0.45 – 0.52	Azul
B3	10	0.54 – 0.57	Verde
B4	10	0.65 – 0.68	Rojo
B5	20	0.69 – 0.71	Borde rojo 1
B6	20	0.73 – 0.74	Borde rojo 2
B7	20	0.77 – 0.79	Borde rojo 3
B8	10	0.78 – 0.90	Infrarrojo cercano (NIR) 1
B8A	20	0.85 – 0.87	Infrarrojo cercano (NIR) 2
B9	60	0.93 – 0.95	Vapor de agua
B10	60	1.36 – 1.39	Cirrus
B11	20	1.56 – 1.65	SWIR 1
B12	20	2.10 – 2.28	SWIR 2

Fuente: Torrez, 2024

2.1.11 Imagen satelital y su preprocesamiento

Una imagen de satélite está compuesta por una matriz de píxeles, igual a una fotografía digital. Cada píxel tiene asociado un número denominado Nivel Digital (ND), que representa la intensidad o brillo de un área mínima relativa dentro de la escena, por lo general, el rango va de 0 a 255. Estas imágenes se diferencian por el número de bandas, la región del espectro electromagnético que registra cada banda, el tamaño de la escena, su resolución espacial y su resolución temporal (López, 2021).

Para poder hacer un uso correcto de la información que proporcionan las imágenes satelitales es necesario que éstas sean preprocesadas para corregir errores radiométricos, geométricos y atmosféricos. Los errores radiométricos se deben a fallas en los sensores, generando píxeles incorrectos. Los errores geométricos son debido a alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación en

los sensores, generando distorsiones en la imagen y los errores atmosféricos se producen por la interferencia de partículas presentes en la atmósfera, alterando los valores de radiancia que captan los sensores (Franco, 2013).

Por ello, los datos capturados por sensores remotos deben ser procesados previamente para incorporarse en un Sistema de Información Geográfica (SIG) o software de percepción remota para su análisis y modelación (Sepúlveda, 2011). Puesto que, como lo menciona Hernández, (2017), los ND son valores crudos que, no representan de manera directa ninguna variable biofísica y, por tanto, no es conveniente trabajar con estos tal cual se presentan. Los "índices espectrales" fueron desarrollados para trabajar con valores de reflectancia espectral de la superficie terrestre, esto debido a que se ha reportado que los valores de ND son proporcionales a la reflectancia y reflectividad para el proceso estadístico de regresión y los ND no proporcionan dicha información. Por lo que, es necesario convertir dichos valores ND en valores de reflectancia. Este proceso se realiza en dos etapas:

- 1) Conversión de ND a Radiancia (esta etapa se conoce como calibración radiométrica)
- 2) Conversión de Radiancia a Reflectancia Aparente (es decir, el cálculo de la reflectancia en el sensor).

Actualmente Landsat 8-9 cuentan con dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS), por lo que la calidad de los datos (relación de la señal en función del ruido) y la resolución radiométrica (12 bits) es más alta que los anteriores instrumentos de Landsat, mejorando significativamente en la capacidad de detectar cambios en la superficie terrestre (Hernández, 2017).

2.1.12 Descarga de imágenes

Las imágenes Landsat 8, se obtienen desde la plataforma GloVis Home (<https://glovis.usgs.gov/>), o bien, desde la plataforma Earth Explorer USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Estos sitios, permiten la descarga de imágenes de satélite en formato de Número Digitales (ND), por este motivo se debe realizar la conversión de ND a de valores de reflectancia al Tope de la Atmosfera [TOA] (Torrez, 2024).

En la actualidad, las imágenes satelitales de Landsat 8 con nivel 2 de procesamiento (L2SR), las cuales, presentan datos de reflectancia al tope de la atmósfera (TOA), son generados a partir de las imágenes de colección nivel 1 (L1C), Esto, debido a que, el proceso llevado a cabo por el algoritmo de Land Surface Reflectance Code (LaSRC) para el satélite Landsat 8, corrige directamente los efectos de dispersión y absorción de gases atmosféricos, aerosoles y vapor de agua, permitiendo que en los estudios ambientales actuales no sea necesario aplicar una metodología de preprocesamiento de las imágenes de nivel 1 de correcciones radiométricas y atmosféricas (Cruz & Durango, 2023).

Por otra parte, las imágenes Sentinel 2, se obtienen desde la plataforma Copernicus Open Access Hub (<https://dataspace.copernicus.eu/>). Este sitio, permite descargar imágenes con nivel de procesado L1C y L2A, las imágenes de nivel L2A, a diferencia de las imágenes de nivel L1C con resolución de 10 y 20 metros, corresponden a imágenes corregidas atmosféricamente que te ofrecerán datos de reflectancia más próximos a la realidad, por lo tanto, con niveles de color más realistas, pueden diferenciarse visualmente, ya que, las imágenes de nivel L2A son más nítidas, con mayor brillo, contraste y no presentan la textura blanquecina producida por el efecto de la presencia de la atmósfera con resoluciones de 10 y 20 m (Torrez, 2024).

Las imágenes S2-MSI de nivel L2A (Bottom Of Atmosphere - BOA) están listas para ser usadas por el usuario. Sin embargo, el producto L2A es corregido del efecto atmosférico con el algoritmo oficial de la ESA Sentinel 2 Correction (Sen2Cor). El método de corrección de Sen2Cor se basa en el enfoque *Dark dense vegetation*

considerando una superficie lambertiana, mientras que la interfaz aire-agua tiene un reflejo especular por lo que su aplicabilidad en las aguas continentales debe ser cuidadosamente evaluada (Pereira, 2023).

Para trabajar en estos tipos de análisis, las imágenes con nivel de procesamiento L2A de Reflectancia del Fondo de la Atmosfera (BOA) [Valores de reflectancia georreferenciados a nivel del suelo] en rango de 400 – 2,278 nm son mejores, ya que, no se le aplica ningún preprocesamiento (Torrez, 2024).

2.1.13 Modelo de Regresión Lineal Múltiple (MRLM)

Conforme a Cruz & Durango (2023), la regresión lineal múltiple es una extensión de la regresión lineal simple con la diferencia de que en este caso se asumen más de una variable explicativa y es lineal porque posee inicialmente una intercepción y por cada término predictor, coeficientes estimados que permiten una relación lineal con la variable estimada, de tal manera que el modelo de regresión lineal múltiple (MRLM) está definido por la siguiente ecuación:

Ecuación 1: Modelo de regresión lineal múltiple

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p$$

Donde:

$\hat{Y}$ = Valor estimado de la variable dependiente

$X_1 - X_p$ = Variables explicativas o predictoras e independientes.

b_0 es el valor de $\hat{Y}$ cuando las variables predictoras son igual a cero.

$b_1 - b_p$ son los coeficientes de regresión estimados.

Los modelos de regresión lineal múltiple deben cumplir con las siguientes condiciones:

- ☒ No colinealidad o multicolinealidad. Los predictores deben ser independientes; es decir, no debe haber relación lineal o colinealidad entre ellos.
- ☒ No autocorrelación (Independencia). Los valores de cada variable deben ser independientes entre sí, los residuos no se relacionan.

- ☑ Parsimonia. Entre menor sea el número de predictores de un modelo, menos asunciones y mayor precisión para explicar la variable respuesta Y.
- ☑ Relación lineal entre los predictores numéricos y la variable respuesta.
- ☑ Distribución normal de los residuos: Los residuos se deben distribuir de forma normal con media cero.
- ☑ Homocedasticidad: La varianza de los residuos debe de ser constante.
- ☑ No debe haber valores atípicos.

Esta metodología aprovecha la reflectancia de la superficie y las propiedades ópticas de los objetos en la superficie que pueden ser aplicados para el monitoreo de calidad del agua en conjunto con la aplicación de métodos estadísticos de regresión lineal múltiple, que correlacionan los datos de parámetros de calidad con los respectivos valores de reflectividad extraído de imágenes multiespectrales (Cruz & Durango, 2023).

3 CAPÍTULO III

3.1 METODOLOGÍA

En la presente investigación se implementó una metodología (Figura 3.1) de carácter cualitativo y cuantitativo, donde, se considera la importancia de la calidad del agua como recurso humano/hábitat bajo el estudio de los parámetros: clorofila (chl-a), sólidos disueltos totales (SDT) y turbidez, muestreo en campo, trabajo de gabinete y la aplicación de encuestas a informantes locales para conocer la situación ambiental de la Laguna.

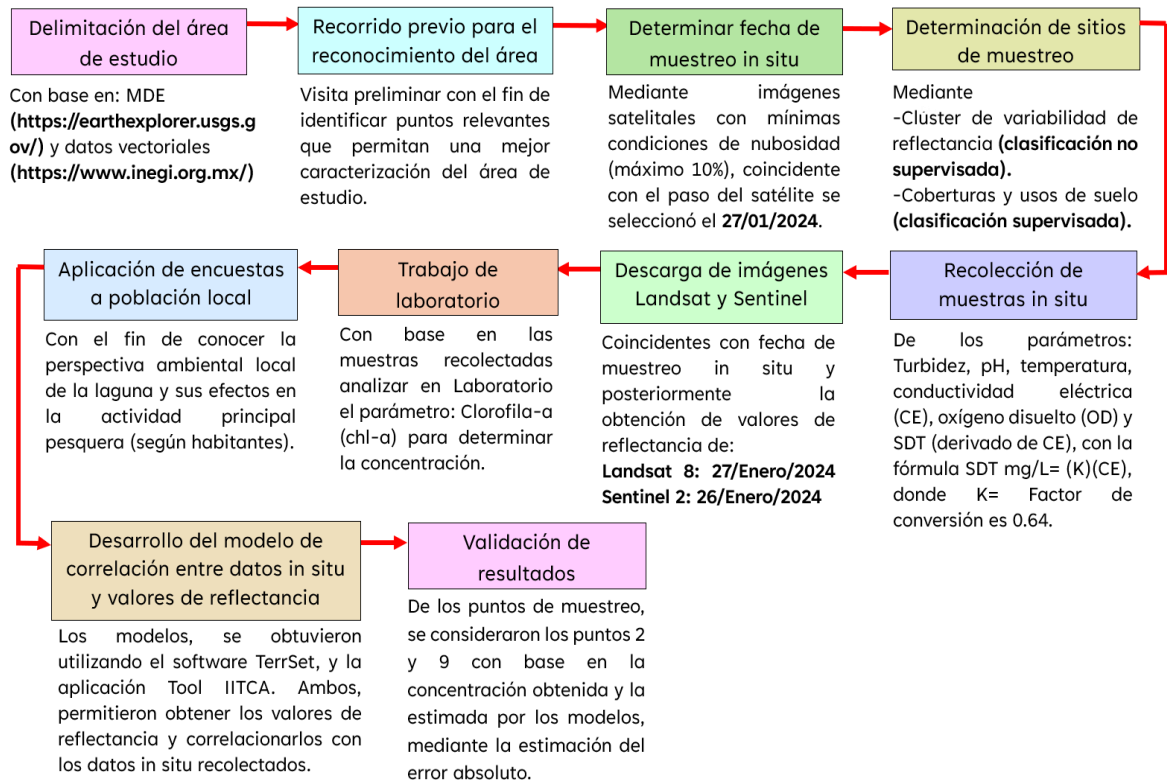


Figura 3.1 Diagrama metodológico para el desarrollo de la investigación

3.2 Área de estudio

El área de estudio corresponde a la “Laguna Tuxpan” (Figura 3.2), localizada en el municipio de Iguala de la Independencia del estado de Guerrero entre los paralelos 18° 21’ 43.96” y 18° 21’ 22.31” de latitud Norte y 99° 30’ 9.97” y 99°28’ 45.12” de longitud Oeste. Tiene una longitud de aproximadamente 2.75 km y un ancho máximo de 2.23 km (Mijangos & González, 2016). En su vecindad se encuentra la localidad de Tuxpan con una población de 2,349 individuos (INEGI, 2020).

En general, la vegetación que se presenta es selva baja caducifolia (35.85%) bosque de encino, pastizal inducido (29.88%), nopalera, palmar, agricultura de riego y de temporal (19.28%) e hidrófitas. Respecto a su edafología, en un mayor porcentaje cuenta con suelo vertisol, cambisol y en menor porcentaje feozem y luvisol (INEGI, 2013).

La temperatura máxima que se presenta es de 28.07 °C en el mes de mayo, y la mínima de 22.64 °C en diciembre. La precipitación máxima ocurre en agosto con 207.76 mm y la mínima en diciembre. Los climas que se destacan son: tropical lluvioso y semicálido (Mijangos & González 2016).

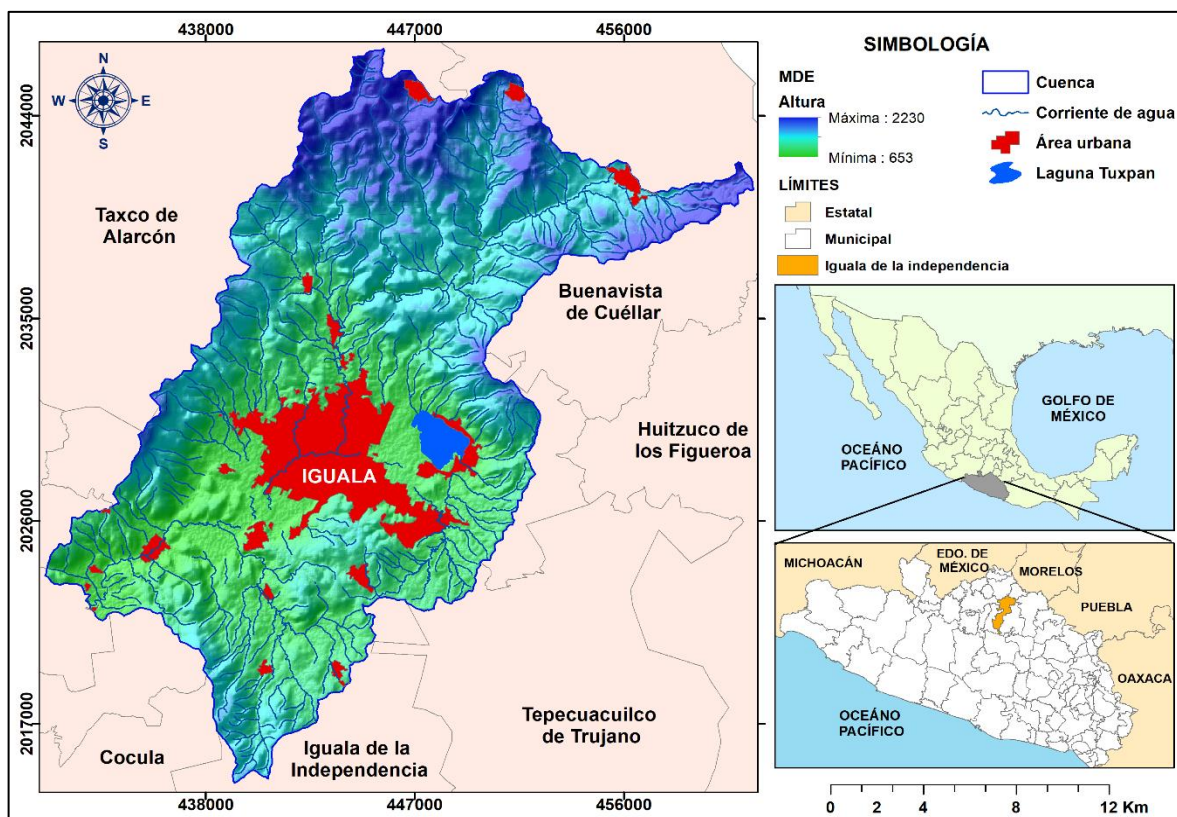


Figura 3.2 Mapa de ubicación del área de estudio

3.2.1 Importancia

La laguna, es uno de los principales cuerpos de agua representativos de la zona con destino turístico recreativo, visitado por municipios y localidades vecinos o aledaños al lugar. Es un atractivo nacional relevante en ciertos periodos, por ejemplo, cuando se programa algún evento como los vuelos en parapente, papalotes y exhibición náutica, actividades que representan ingresos para la población de Tuxpan. En época de lluvias funciona como vaso regulador para controlar el agua proveniente tanto de corrientes perennes, como corrientes intermitentes que conducen agua en mayor cantidad al cuerpo de agua (Ortega,

2015) y, además, representa hábitat y riqueza de aves, ya que, de acuerdo con Nova, et al., (2011) registraron un total de 105 especies de aves, de las cuales 67.6% son residentes y 32.3% son migratorias. Varias de estas aves se benefician de manera directa de la Laguna. Así mismo, la especie predominante es la mojarra tilapia; puesto que, los peces fueron afectados por la pesca y por la introducción del pez diablo (*Hypostomus sp.*) el cual compite con las especies nativas por alimento y hábitat (Ortega, 2015).

3.3 Recorrido previo para el reconocimiento del área

Se realizaron dos recorridos preliminares correspondiente a los días 05 de agosto y 03 de septiembre de 2023, con el fin de reconocer las características generales del área de estudio, como: formas del terreno, actividades sociales y económicas, accesos a áreas de interés, identificar habitantes locales informantes, observar las condiciones ambientales del cuerpo de agua e identificar posibles fuentes de contaminación influyentes en la calidad del agua.

En cada recorrido, se registraron las coordenadas de puntos característicos que proporcionaron información relevante, así como, la toma de evidencias fotográficas de los puntos de interés.

3.4 Determinación de fecha de muestreo in situ

Para determinar el día de muestreo en campo, se realizó la búsqueda y análisis temporal de imágenes satelitales Landsat 8 y 9 en el sitio: <https://earthexplorer.usgs.gov/> del 2010 al 2023, dichas imágenes debieron cumplir con un máximo de 10% de nubosidad, para ser consideradas. Para ello, se analizaron los años que resultaron con más fechas disponibles y con mejores condiciones atmosféricas, así como, los meses con más número de días apropiados, ya que, esto reflejó el mes con mejor disposición en cuanto a nivel de despeje atmosférico y posteriormente se analizó la fecha más frecuente dentro el mes. Sin embargo, aún determinado el mes y día apto, también fue importante considerar la fecha del paso del satélite para coincidir con el día de muestreo, por

otra parte, también fue necesario contemplar el tiempo determinado para la investigación para cumplir en tiempo y forma.

3.5 Determinación de sitios de muestreo

3.5.1 Clasificación no supervisada

Para determinar los sitios de muestreo mediante el software TerrSet, se realizaron clusters (clasificación no supervisada) del cuerpo de agua correspondiente a las fechas: 02 de noviembre de 2021, 07 de diciembre de 2022 y 19 de julio de 2023. Dichas fechas se eligieron con base en el análisis realizado para la determinación de la fecha de muestreo in situ definidas previamente, considerando la frecuencia de mes y día que cumplen con las características necesarias. Siendo noviembre y diciembre dos de los meses considerados aptos para llevar a cabo dicha actividad.

Los clusters obtenidos se unieron en el módulo “Overlay” para realizar un cluster general de las tres fechas y observar la variabilidad de reflectancia presente en la laguna durante los años 2021, 2022 y 2023 para identificar las zonas y a su vez los puntos de mayor variación.

3.5.2 Clasificación supervisada

Por otra parte, para identificar las coberturas y usos de suelo se realizó una clasificación supervisada mediante el software TerrSet, utilizando una imagen satelital Landsat 8 del 13 de marzo de 2023, considerada apropiada por la temporada de estiaje que permite una mejor discriminación de coberturas. La finalidad fue identificar el posible uso de suelo que afecta la calidad del agua de la laguna.

Para ello, con el recorte del área de estudio se identificaron las clases de coberturas y usos de suelo presentes en la cuenca asignándoles un orden y con ello digitalizar los sitios de entrenamiento desde “Digitize” para generar la capa con base a polígonos y agregar cada una de las clases identificadas. En IDRISI *Image Processing* se utilizó el módulo MAXLIKE para conocer la probabilidad máxima que se tiene respecto a la identificación y digitalización de cada una de las categorías.

3.6 Recolección de muestras in situ

La recolección de muestras in situ se realizó con base en la fecha 27 de enero de 2024 y hora acordada (9:30 AM), considerando el paso del satélite. Para dicho muestreo se utilizó un multiparamétrico marca HANNA, modelo HI 9829 (Figura 3.26). El cual, es un equipo especializado en la toma de información respecto a parámetros de calidad del agua como: pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y temperatura (°C). Mientras que el disco secchi (Figura 3.27) se utilizó para registrar los datos de transparencia del agua.



Figura 3.3 Multiparamétrico marca HANNA, modelo HI 9829
Fuente: HANNA instrument



Figura 3.4 Disco secchi para la toma de datos de transparencia del agua
Fuente: Amazon

Materiales:

- | | |
|---|----------------------------------|
| 1.- Multiparamétrico HANNA HI 9829 | 10.- 20 botellas chicas de 30 ml |
| 2.- Disco secchi | 11.- Pluma |
| 3.- Cuerda blanca | 12.- Plumón de aceite |
| 4.- Cinta métrica de 30 m | 13.- Libreta |
| 5.- Cono de acero | 14.- Guantes de látex |
| 6.- Cubeta chica | 15.- Agua destilada |
| 7.- Lazo | 16.- Conductímetro |
| 8.- Hielera | 17.- GPS (GPSMAP, modelo 64s) |
| 9.- 20 botellas plásticas blancas de 500 ml | |

El procedimiento de muestreo se realizó en 16 puntos diferentes de la laguna. En cada punto se recolectaron 2 muestras con base principalmente en:

- La confiabilidad de contar con un día despejado de nubosidad.
- Se marcaron enumerando del 1 al 20 cada una de las botellas, tanto las de 500 ml como las de 50 ml, ya que, en cada punto se recolectaron 2 muestras (Figura 3.5).
- A cada una de las botellas de 500 ml se le agregó 20 ml de formo como compuesto para conservar la calidad de dichas muestras.
- En cada punto se captó agua de la laguna bajando la cubeta con el lazo para llenar cada una de las botellas correspondientes (Figura 3.6)
- Las muestras se fueron almacenando en el contenedor (hielera) de forma vertical para evitar que se derramaran.
- Sen cada punto se tomó lectura de los distintos parámetros pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y temperatura (°C), mediante el multiparamétrico marca HANNA, modelo HI 9829 (Figura 3.7)
- En cada punto se esterilizaban los materiales como el téster, para registrar los nuevos datos paramétricos (Figura 3.8)
- Se midió y registró la transparencia del agua con el disco secchi (Figura 3.9)
- De cada punto de muestreo se registraron las coordenadas con el GPS (GPSMAP, modelo 64s).
- Entre las muestras de 500 ml y las de 50 ml recabadas fueron en total 32 muestras obtenidas.
- Al finalizar, las muestras fueron trasladadas al laboratorio del IITCA (Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua).



Figura 3.5 Enumeración de botellas para la recaudación de muestras

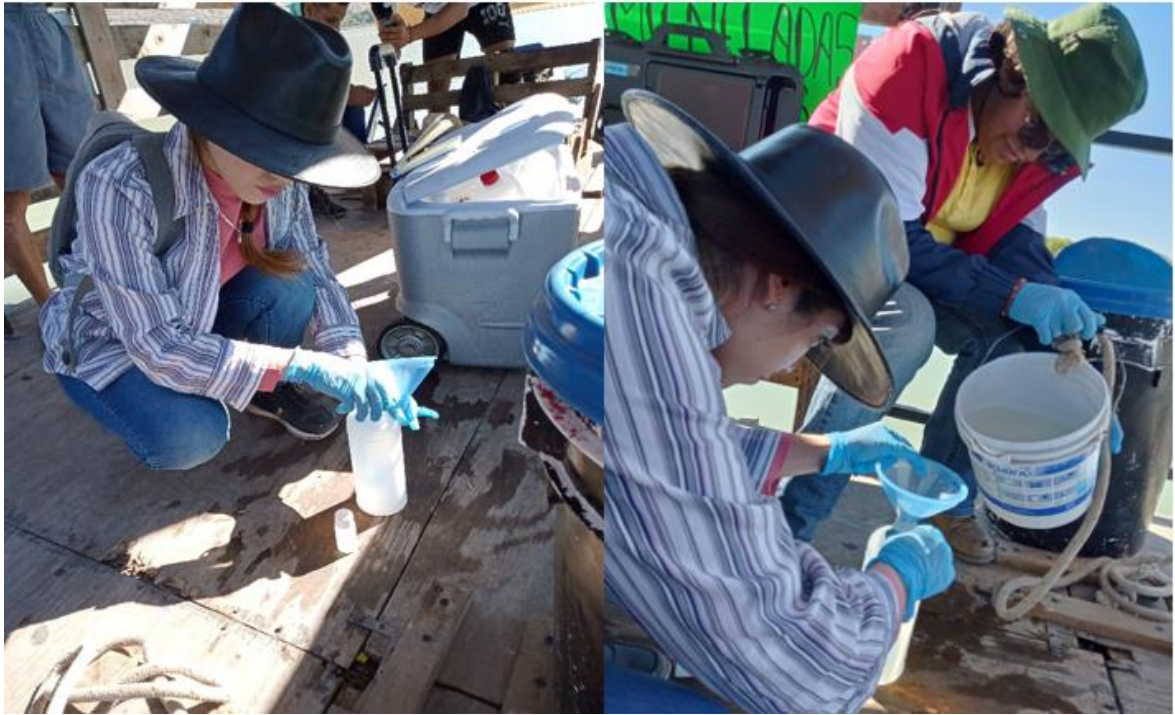


Figura 3.6 Toma de muestras de agua



Figura 3.7 Lectura de datos paramétricos de calidad del agua con multiparamétrico



Figura 3.8 Esterilización de téster, para el nuevo registro de datos paramétricos



Figura 3.9 Medición y registro de la transparencia con disco Secchi

3.7 Descarga de imágenes Landsat y Sentinel

Considerando la fecha de muestreo (27 de enero), la descarga de las imágenes Landsat 8 se efectuó mediante la plataforma GloVis (<https://glovis.usgs.gov/app>), mientras que las imágenes Sentinel 2 se obtuvieron de la plataforma Copernicus (<https://dataspace.copernicus.eu/>), con base al levantamiento de información en campo.

3.8 Trabajo de Laboratorio y de gabinete

En el caso de los parámetros: pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD) y transparencia el dato fue tomado en campo, sin embargo, para el análisis y concentración de los parámetros: clorofila-a (chl-a), sólidos disueltos totales (SDT) y turbidez se requirieron distintos procesos.

3.8.1 Determinación de Clorofila-a (chl-a)

Como primer paso, se utilizó el equipo de filtración por membrana, el cual, permite separar el material particulado que contiene la clorofila-a (chl-a). Para ello, el sistema de filtración estaba previamente montado en el laboratorio incluyendo la rampa de filtración y una trampa de vacío, la cual, prevé daños a la bomba.

Para obtener el material o pigmento de clorofila-a (chl-a), fue necesaria la filtración de la muestra utilizando un matraz kitasato para captar el agua de la muestra filtrada, un tamiz de filtrado y una membrana filtrante de celulosa de 47 mm de diámetro y 0.45 μm de tamaño de poro que se sujetó con una pinza de sujeción, colocándose un embudo magnético de filtración donde se agregó la muestra de agua mediante una probeta.

Al finalizar, se retiró cuidadosamente la membrana con una pinza de aluminio para después observarse en el microscopio.

3.8.2 Determinación de sólidos disueltos totales (SDT)

La concentración de sólidos disueltos totales (SDT) se obtuvo mediante conductimetría (Sarapura & Morales, 2019), que consiste en la conversión de la conductividad eléctrica (CE) en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a sólidos disueltos totales (SDT) ppm.

Comprendiendo que, cuanto mayor sea el valor de la conductividad eléctrica, mayor será la cantidad de sales disueltas en el agua y por ende de sólidos disueltos.

La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\text{SDT mg/L} = (K)(\text{CE})$$

Donde:

SDT= Sólidos Disueltos Totales

K= Factor de conversión

CE= Conductividad eléctrica $\mu\text{S/cm}$

De acuerdo con información consultada, el factor de conversión K está sujeto a muchos factores y varía de una región a otra. Por lo general, varía de 0.5 a 0.8 y a menudo se toma como 0.64 (Snowate, s.f.).

La conversión de CE a SDT se realizó por medio de Snowate un servidor o calculadora virtual que permite la automatización de procesos como las conversiones de unidades respectivamente relacionadas a concentraciones.

3.8.3 Determinación de turbidez

La transparencia del agua se obtuvo mediante el uso del disco secchi, el cual posee cuadrantes blancos y negros opuestos y una cuerda o cinta métrica con medidas en centímetros y metros (en este caso se realizaron las marcaciones de la cuerda cada 30 cm). Para realizar la medición, se bajó y sumergió el disco en el agua hasta donde no se pudieran distinguir los cuadrantes o hasta que se llegue al fondo y se registra la medida en centímetros o metros (según sea el caso), para tener el dato de transparencia, y así sucesivamente en cada punto de muestreo.

Contando con los datos de transparencia de los distintos puntos, se realizó la conversión o su equivalente de cm a unidades nefelométrica de turbidez (UNT) bajo una base de estándares de conversión (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Conversión de transparencia (cm) a unidades nefelométricas de turbidez (UNT)

cm	UNT	cm	UNT	cm	UNT	cm	UNT
<6	> 240	14 a 16	60	31 a 34	21	49 a 51	11
6 a 7	240	16 a 19	48	34 a 36	19	51 a 54	10
7 a 8	185	19 a 21	40	36 a 39	17	54 a 57	9
8 a 9	150	21 a 24	35	39 a 41	15	57 a 60	8
9 a 10	120	24 a 26	30	41 a 44	14	60 a 70	7
10 a 12	100	26 a 29	27	44 a 46	13	70 a 85	6
12 a 14	84	29 a 31	24	46 a 49	12	> 85	< 5

Fuente: Análisis in situ protocolos <http://www.qdm.fq.edu.uy/agua/guia-agua.pdf>

3.9 Aplicación de encuestas a la población local

Para tener más información acerca de la situación de la “Laguna Tuxpan”, respecto a posibles fuentes de contaminación, se aplicó una encuesta a los habitantes locales, la cual, constó de preguntas abiertas, para obtener un margen de opinión más amplio y preguntas de opción múltiple, ya que, también es importante considerar la experiencia y conocimiento de quienes radican cerca y presencian las condiciones ambientales precedentes de la laguna, así como, el impacto a la actividad pesquera.

El análisis de la encuesta aplicada se realizó bajo un esquema gráfico, ya que, esto permite una mejor observación y manejo de la información.

Como medio de contraste, se utilizaron los Criterios Ecológicos de calidad del Agua CE-CCA-001/89 (Tablas 3.2 y 3.3) que faculta la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; los cuales, califican a los cuerpos de agua, en este caso como aptos para riego agrícola, para uso pecuario, para uso en la acuicultura, o bien, para el desarrollo y la conservación de la vida acuática. Estos criterios permiten precisar los niveles permisibles de las sustancias que se encuentran en el agua (DOF, 2021).

Cabe señalar, que cada criterio consta de otros parámetros para analizarse y determinarse como un cuerpo de agua apto o no apto para cada actividad. Sin embargo, para este estudio se comparan con respecto a los parámetros estudiados.

Tabla 3.2 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA)

	Turb UNT	pH	CE μS/cm	OD mg/L	Temp °C	SDT mg/L
CECA para Riego Agrícola (RA)		4.5 a 9	1000			1000
CECA para Protección a la vida acuática (PVA)				5.0	23-27	
CECA para Uso Pecuário (UP)						1000

Tabla 3.3 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA) para la Acuicultura

	Permisible				
	Turb UNT	pH	OD mg/L	Temp °C	SD mg/L
Mojarra tilapia	13	7-8	2.1	24-30	
Carpa	11-24	7-8.5	5	20-30	
Bagre	13	6.5-8	4	20-30	
Trucha Arco- iris	13	6.5-8	7.8	10-15	400
Langostino	15-25	7-8.5	8.1	18-34	
Camarón	15	7.5-8.8	6	26-30	
Moluscos bivalcos				15-30	

Tanto en el Criterio de Protección a la Vida Acuática (Tabla 3.2), como en este último Criterio de Acuicultura (Tabla 3.3), se sugiere una investigación más profunda para la comparación con los datos paramétricos obtenidos, ya que, para el desarrollo, supervivencia y producción de organismos se requiere un nivel de profundidad y condiciones de OD distinto, sin embargo, en esta investigación la toma de información se realizó de manera superficial. Pero tomando en cuenta que, el oxígeno disuelto (OD) disminuye conforme la profundidad aumenta, en conjunto con la información obtenida mediante las encuestas se hace una premisa o idea general de las posibles condiciones que estarían afectando el ecosistema acuático,

contemplando, además, estudios realizados por otros autores que permiten también comparar la información obtenida.

3.10 Desarrollo del modelo de correlación (Datos in situ y valores de reflectancia)

Para desarrollar los modelos de predicción se utilizó la mayor parte de los datos obtenidos y el resto se utilizó como referencia para realizar la validación de resultados.

En la construcción del modelo Landsat 8, se utilizó la aplicación Tool_IITCA (Estrada, 2019), donde se ingresaron las primeras siete bandas satelitales y en el proceso se obtuvo la conversión de los números digitales (ND) de las imágenes a valores de reflectancia (variable independiente) para relacionarse con los datos obtenidos en campo (variable dependiente) y con ello elegir las bandas o longitudes de onda mejor correlacionadas, con valores de 0.4 o > 0.4 , puesto que estas son clave para obtener el mejor modelo de predicción.

En el caso de Sentinel-2, se utilizó el software TerrSet, para ello, se ingresaron las primeras 8 bandas y 8A del satélite, al importarse los números digitales (ND) se convirtieron a valores de reflectancia, y con el módulo PCA se obtuvo la matriz de correlación entre valores de reflectancia (variable independiente) y datos in situ (variable dependiente). Se consideró el mismo criterio de correlaciones con valores de 0.4 o > 0.4 .

Así, con base en las relaciones importantes entre parámetros in situ y valores de reflectancia, se introdujeron en el módulo MultiReg las variables independientes (bandas de reflectancia) y como variables dependientes los parámetros. Este procedimiento permitió obtener la ecuación de regresión (modelo) y conocer la factibilidad del coeficiente.

Para el caso, de los modelos de una sola banda (de mejor correlación) se utilizó el módulo Regress de TerrSet, que permite la inserción de una sola banda (variable independiente) y el parámetro a analizar (variable dependiente).

3.11 Validación de resultados

Una vez obtenidos los modelos óptimos por parámetro, tanto de Landsat 8 como de Sentinel 2, se realizó la validación de resultados con relación a los modelos de predicción, considerando los puntos que se dejaron de reserva para este proceso. Para ello, se utilizó el método de estimación de error relativo considerando rangos (Tabla 3.4) en comparación con el valor real de campo.

Para obtener estadísticamente la estimación del error entre datos de concentración in situ y valores de concentración estimados por los modelos se utilizó la siguiente fórmula:

Tabla 3.4 Error estimado, considerando rangos

Concentración real	Concentración estimada (rango)	Marca de clase	Error absoluto	Error relativo%
Valor real obtenido en campo	Valor estimado por el modelo	Del rango, Límite inferior + Límite superior/2	Concentración in situ – Marca de clase	Concentración in situ – Marca de clase /concentración real *100

4 CAPÍTULO IV

4.1 RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos del análisis de la información recolectada y los procesos realizados. Permitiendo conocer la magnitud e importancia de la problemática, así como, la corroboración o descarte de la hipótesis planteada.

Los resultados en una investigación son parte fundamental para la continuidad en la construcción y desarrollo del conocimiento sobre un determinado objeto de estudio, ya sea, bajo una misma premisa y metodología o a partir de nuevos criterios en el método.

4.2 Recorrido previo para el reconocimiento del área

Las coordenadas registradas en la Tabla 4.1 e imágenes que se muestran continuación, corresponden al primer recorrido realizado el día 05 de agosto.

Tabla 4.1 Puntos de visita correspondientes al 05 de agosto

No	X	Y	Descripción	Figura
1	-99.4941063	18.3485327	Muelle principal	4.2
2	-99.4824531	18.3551336	Bomba extractora de agua	4.3
3	-99.489199	-18.362264	Zona de lavaderos y presencia de residuos detergentes	4.4
4	-99.4897396	18.3629483		
5	-99.4982171	18.3676516	Actividad recreativa y desechos sólidos cerca de la laguna	4.5
6	-99.5004544	18.3678202		
7	-99.4998821	18.3579989	Cultivo de limón	4.6
8	-99.4994167	18.3576539	Cultivo de maíz y cultivo de limón	4.7
9	-99.5028013	18.3561297		
10	-99.4993262	18.3576953	Desazolve de la laguna	4.8

En la Figura (4.1) se puede observar el conocido a) Muelle principal de la localidad de Tuxpan, el cual es un espacio usualmente concurrido por habitantes y visitantes con fines de ocio y apreciación paisajística.



Figura 4.1 Muelle principal de la laguna Tuxpan y área de ocio / zona de manantiales.

En el recorrido se observó el uso de bombas extractoras de agua, la cual, transportaba el recurso a las áreas restauranteras, lo que evidencia el uso del agua para actividades del hogar o negocios de alimentos.

Por otro lado, se apreciaron los conocidos peces diablo (*Hypostomus sp*) a orillas del cuerpo de agua (Figura 4.2), los cuales, son especies invasoras que habitan en aguas dulces poco profundas y que compiten por alimento con especies nativas (Marenco, 2010), representando alteración y amenaza para la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos (Ayala, et al., 2015) e impacto al sistema ecológico y económico (Marenco, 2010).



Figura 4.2 Pez diablo (*Hypostomus sp*) a orillas de la Laguna y presencia de bomba extractora de agua, de uso restaurantero.

En la Figura (4.3), se observan algunos de los lavaderos artesanales, realizados y colocados dentro el cuerpo de agua para el lavado de ropa. Siendo esta, una de las principales actividades antropogénicas evidentes que se llevan a cabo directamente en la laguna, afectando el paisaje y calidad del recurso mediante el uso de detergentes y desechos sólidos.



Figura 4.3 Zona de lavaderos artesanales y residuos detergentes

La recreación por habitantes y visitantes, es una de las principales actividades realizadas que benefician económicamente a ciudadanos licatarios, sin embargo, es también una de las actividades que tiene como consecuencia la generación de desechos sólidos tanto fuera como dentro de la laguna (Figura 4.4). Propiciando efectos desgordables en el paisaje y contaminación del agua.



Figura 4.4 La recreación por visitantes y habitantes genera desechos sólidos cerca de la laguna

En el trayecto, aproximadamente quince metros del contorno de la laguna, también se identificaron diversas áreas de cultivo, principalmente de: limón, mango y maíz (Figuras 4.5 y 4.6). Predominando en áreas más extensas los cultivos de maíz y mango.



Figura 4.5 Cultivo de limón



Figura 4.6 Cultivo de maíz

El área de desazolve fue otros de los aspectos identificados durante el recorrido. Esta actividad se realizó mediante dragas, como consecuencia de peticiones ciudadanas, gestión de instituciones y asociaciones de gobierno con el fin de limpiar el lago de excesos de sedimentos, lodo y residuos, esto, principalmente a los costados u orillas (Figura 4.7).



Figura 4.7 Zona de desazolve de la laguna Tuxpan

En general, se detectaron diversas perturbaciones ambientales respecto a las actividades que se desarrollan, tales como: emisiones de residuos detergentes como resultado del lavado de ropa, extensas áreas de agricultura, desechos sólidos, remoción de sedimentos por desazolve, actividades recreativas (paseo en lancha, duchas) y actividades económicas (pesca, actividad restaurantera).

Bajo las coordenadas registradas, se georreferenciaron los puntos característicos identificados durante el recorrido (Figura 4.8).



Figura 4.8 Georreferenciación de puntos característicos identificados durante el recorrido

La Tabla 4.2, presenta el registro de coordenadas correspondiente al segundo recorrido realizado.

Tabla 4.2 Coordenadas correspondientes al recorrido del 03 de septiembre

No.	X	Y	Descripción	No.	X	Y	Descripción
1	447785	2028809	Muelle principal	18	446743	2030187	Cultivo de maíz
2	449295	2029713	Lavaderos	19	447000	2030014	
3	449110	2029800		20	446985	2029996	
4	449007	2029946		21	447096	2029980	
5	448951	2029973		22	447056	2029897	
6	448932	2029975		23	446890	2029686	
7	448658	2030104		24	446902	2029682	
8	448600	2030127		25	446859	2029590	
9	448568	2030146		26	446839	2029598	
10	448548	2030156		27	446838	2029567	
11	448501	2030183		28	446815	2029520	
12	448493	2030196		29	446786	2029452	
13	448381	2030276		30	447203	2030948	

14	448308	2030354		31	446779	2030254	Cultivo de mango
15	447387	2030903	Residuos sólidos	32	447082	2029875	Cultivo de limón
16	447256	2030920	Cultivo de maíz	33	446942	2029782	
17	446948	2029775		34	446832	2030322	Cultivo de forraje

En la segunda visita para el reconocimiento del área, se observaron algunos de los puntos de interés anteriormente registrados: muelle principal, zona de lavaderos, residuos sólidos y actividades recreativas. Sin embargo, también se identificaron más áreas de cultivo. Los cultivos que predominan en mayor extensión son: cultivos de maíz (Figura 4.9 y 4.10), cultivo de mango (Figura 4.11), cultivos de limón (Figura 4.12) y en menor porción cultivo de forraje (Figura 4.13).



Figura 4.9 Cultivo de maíz identificado en el área de estudio



Figura 4.10 Diferentes puntos con agricultura de maíz



Figura 4.11 Diferentes puntos identificados con cultivo de mango



Figura 4.12 Distintos puntos de cultivo de limón



Figura 4.13 Cultivo de forraje

Así como el recorrido anterior, también se realizó la georreferenciación de los puntos de vista del área, los cuales, quedaron distribuidos espacialmente de la siguiente manera (Figura 4.14).



Figura 4.14 Georreferenciación de segundo recorrido realizado en el área de estudio

4.3 Determinación de fecha de muestreo in situ

La Tabla 4.3, muestra las fechas con mejores condiciones de nubosidad del periodo 2010-2023, para realizar la recolección de muestras en campo.

Tabla 4.3 Fechas de imágenes Landsat con mejor condición de nubosidad

2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
01/03	31/01	03/02	18/03	31/01	02/01	21/01	23/01	10/01	29/01	17/02	02/01	05/01	08/01
17/03	16/02	19/02	20/05	16/02	19/02	06/02	08/02	27/02	14/02	04/03	03/02	29/01	16/01
18/04	04/03	06/03	28/11	20/03	13/07	22/02	24/02	15/03	02/03	20/03	19/02	06/02	24/01
04/05	20/03	22/03	14/12	05/04	04/11	25/03	28/03	31/03	03/04	05/04	07/03	14/02	01/02
20/05	05/04	07/04		26/07	04/12	10/04	13/04	16/04	21/05	23/05	23/03	22/02	09/02
05/06	21/04	23/04		27/08	20/12	14/05	29/04	18/05	13/11	10/07	08/04	02/03	17/02
12/11	07/05	16/10		30/10		06/12	23/11	03/06	29/11	14/10	24/04	10/03	25/02
14/12	30/10	17/11		01/12		22/12	09/12	05/07	15/12	15/11	13/07	03/04	05/03
30/12	15/11	03/12		03/12			25/12	21/07	31/12		02/11	11/04	13/03
											06/11	19/04	21/03
											04/12	27/04	29/03
											12/12	05/05	06/04
												21/05	14/04
												07/12	30/04
												15/12	08/05
													09/06
													11/07
													19/07

Analizando la temporalidad por año con mejores condiciones de nubosidad, se observa que los años 2021, 2022 y 2023 son los que poseen más disposición de días con las características requeridas.

Sin embargo, también se consideraron las fechas obtenidas en todo el periodo, analizando la disponibilidad de días por mes para la determinación de los meses y días óptimos (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Días disponibles por mes

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Noviembre	Diciembre
31/01	16/02	01/03	18/04	12/11	14/12
31/01	03/02	17/03	05/04	15/11	30/12
02/01	19/02	04/03	21/04	17/11	01/12
21/01	16/02	20/03	07/04	28/11	03/12
23/01	19/02	06/03	23/04	04/11	14/12
10/01	06/02	22/03	18/04	23/11	01/12
29/01	22/02	20/03	05/04	13/11	03/12
02/01	08/02	25/03	10/04	29/11	04/12
05/01	24/02	28/03	13/04	15/11	20/12
29/01	27/02	15/03	29/04	02/11	06/12
08/01	14/02	31/03	16/04	06/11	22/12
16/01	17/02	02/03	03/04		09/12
24/01	03/02	04/03	05/04		25/12
	19/02	20/03	08/04		15/12
	06/02	07/03	24/04		31/12
	14/02	23/03	03/04		04/12
	22/02	02/03	11/04		12/12
	01/02	10-/03	19/04		07/12
	09/02	05/03	27/04		15/12
	17/02	13/03	06/04		
	25/02	21/03	14/04		
		29/03	30/04		
13	21	22	22	11	19

DISPONIBILIDAD TOTAL DE DÍAS POR MES

Con base en las fechas con mejor condición atmosférica registradas se identificaron los meses con más días de disponibilidad para realizar el muestreo de campo, omitiendo aquellos meses que por cuestiones de tiempo del proyecto no podría realizarse la actividad.

A continuación, se muestran los gráficos obtenidos de la revisión y análisis temporal del periodo 2010-2023 para la elección del día y mes óptimo para la realización del muestreo in situ.

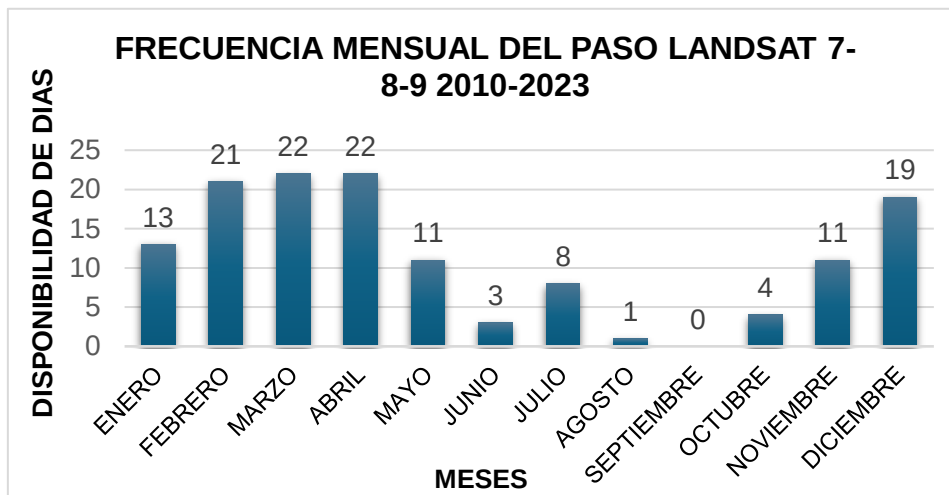


Figura 4.15 Meses con mayor frecuencia para muestreo in situ

En el gráfico de la Figura 4.15, se observan los meses más apropiados para realizar la actividad en campo, con base en el número de días disponibles por mes y con mejores condiciones de nubosidad. De acuerdo, con el grafico, los principales meses son: enero (13 días), febrero (21 días), marzo (22 días), abril (22 días), noviembre (11 días) y diciembre (19 días).

Sin embargo, considerando el tiempo determinado del proyecto para cumplir en tiempo y forma; los meses que mejor se ajustan a esta condición son: noviembre, diciembre y enero. Por lo cual, para acordar una fecha, se hizo énfasis especialmente en estos meses

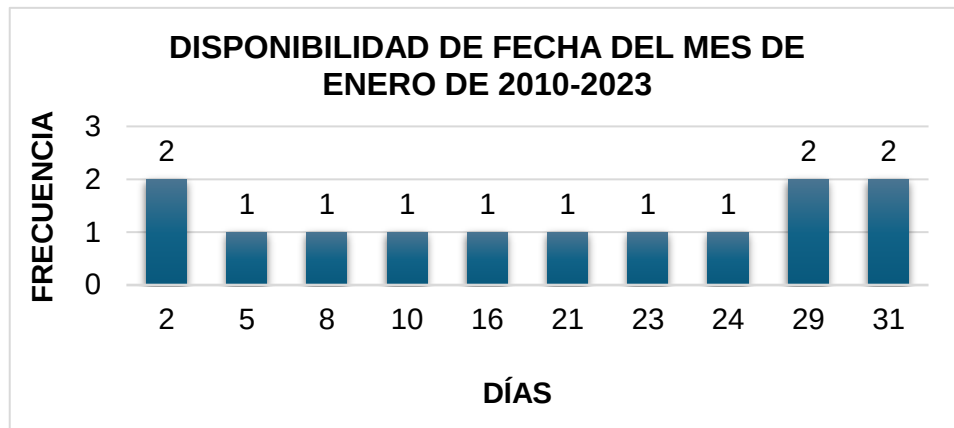


Figura 4.16 Días con mejor disponibilidad para muestreo in situ del mes de enero

En la gráfica de la Figura 4.16, se muestra que los días 02, 29 Y 31 de enero son los días más frecuentes y recomendables para realizar el trabajo de campo.

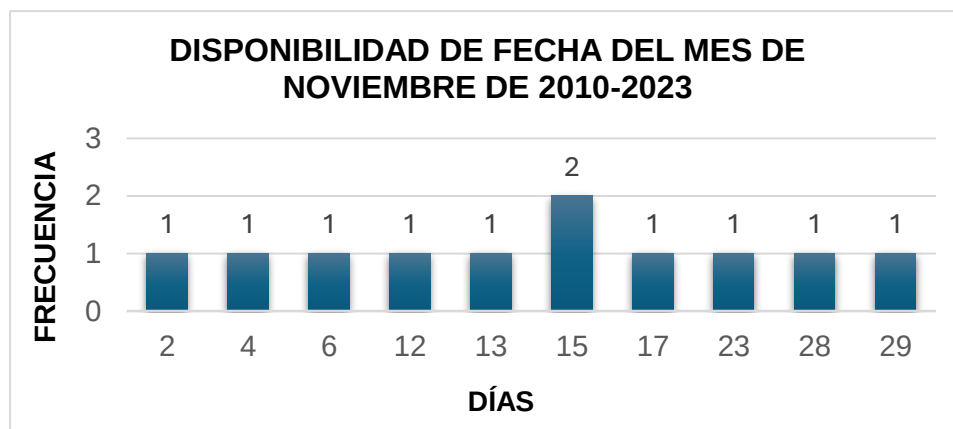


Figura 4.17 Días con mejor disponibilidad para muestreo in situ del mes de noviembre

Noviembre presenta el día 15 como fecha adecuada para llevar a cabo el muestreo en campo (Figura 4.17).

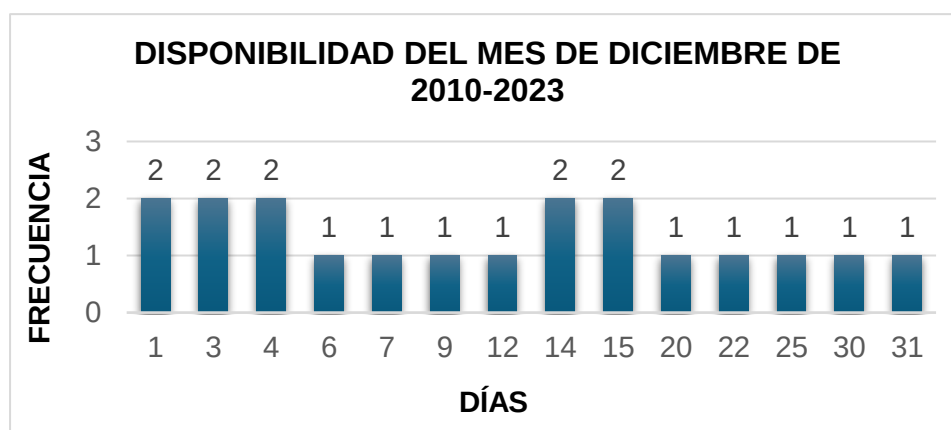


Figura 4.18 Días con mejor disponibilidad para muestreo in situ del mes de diciembre

Mientras que el mes de diciembre (Figura 4.18) presenta los días 01, 03, 04, 14 y 15 como fechas disponibles con las características deseables para realizar el muestreo.

Diagnosticando los meses y días aptos para el muestreo, se analizaron también las fechas del paso Landsat; considerando su transcurso cada 16 días y la diferencia entre Landsat 8 y 9 de 8 días (Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Fechas estimadas de paso Landsat 8-9 de los meses contemplados para muestreo

Noviembre	8/NOV LC08	16/NOV LC09	24/NOV LC08	
Diciembre	02/DIC LC09	10/DIC LC08	18/DIC LC09	26/DIC LC08
Enero	03/ENE LC09	11/ENE LC08	19/ENE LC09	27/ENE LC08

Las fechas que se muestran, corresponden a los días en los que se estima el paso Landsat 8-9, y por ende los días idóneos para llevar a cabo el muestreo, sin embargo, por las condiciones de lluvia y nubosidad que aún se presentaban en los meses de noviembre y diciembre y contemplando el tiempo para el término de la investigación, se optó por el día 27 de enero de 2024 para llevar a cabo el trabajo de campo en la localidad de Tuxpan a las 9:30 AM.

4.4 Descarga de imágenes Landsat y Sentinel

Las imágenes Landsat 8, descargadas respecto a la fecha de muestreo presentaron las siguientes características (Tabla 4.6).

Tabla 4.6 Características de imagen satelital Landsat 8

Características	
Identificador de producto Landsat	LC08_L1TP_026047_20240127_20240207_02_T1
Identificador de escena Landsat	LC80260472024027LGN00
Fecha de adquisición	2024/01/27
Categoría de colección	T1 (nivel de procesamiento y calidad de la imagen más alto disponible)
Resolución	15, 30 y 100 m
Ruta WRS	026
Fila WRS	047
Cubierta de nubes terrestres	0.10
Tipo de datos L1	OLI_TIRS_L1TP

Fuente: Información de escena satelital descargada de <https://glovis.usgs.gov/app>

Mientras, que las imágenes Sentinel 2 descargadas presentaron las siguientes características (Tabla 4.7).

Tabla 4.7 Características de escena Sentinel 2

Características	
Hora de toma	2024-01-26T17:05:59.024Z
Cobertura de nubes	0
Nivel de procesamiento	S2MSI2C
Nombre del producto	S2B_MSIL1C_20240126T170559_N0510_R069_T14 QMF_20240126T200922.SAFE
Nombre abreviado plataforma	Sentinel-2
Resolución	10,20 y 60 m
Plataforma satelital	B

Fuente: Información de escena satelital descargada de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

4.5 Determinación de sitios de muestreo

Mediante los recorridos previos de campo, se identificaron sitios o puntos emisores de contaminación existentes, como: áreas de lavado de ropa, cúmulo de desechos sólidos, espacios concurridos con efectos de turismo, áreas de cultivo y áreas restauranteras cerca la laguna. Sin embargo, también se realizaron los siguientes procesos con el fin de visualizar las variaciones en la laguna respecto al tiempo.

4.5.1 Clasificación no supervisada

En el cluster del 02 de noviembre de 2021 (Figura 4.19), se observaron tres clases respecto a la variación de reflectancia, diferenciándose especialmente por su dimensión y distribución en el cuerpo de agua.

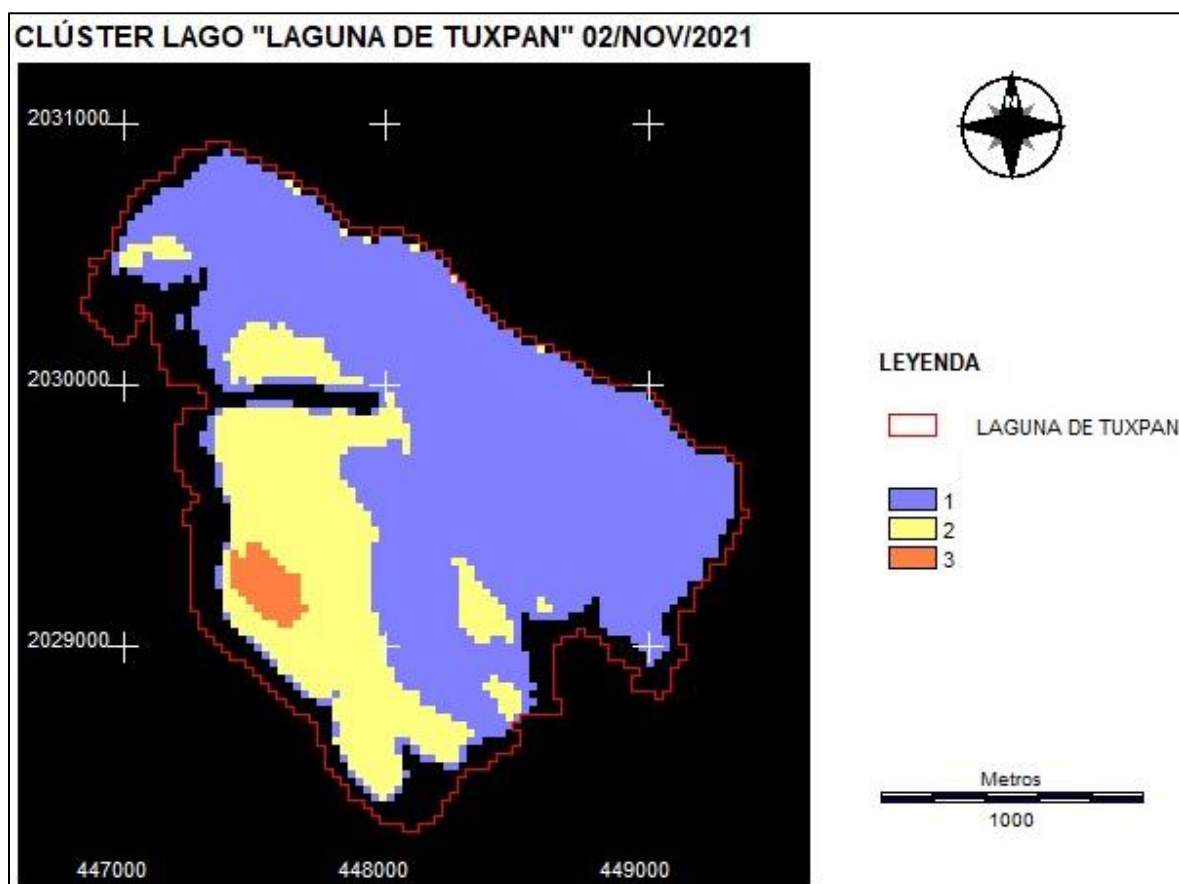


Figura 4.19 Cluster de variación de reflectancia del año 2021 en la “Laguna Tuxpan”

En el cluster correspondiente al 07 de diciembre de 2022 (Figura 4.20), se observó una variación en dimensión y distribución de reflectancia diferente en comparación con el clúster de noviembre de 2021, lo que evidencia cambios respecto al tiempo.

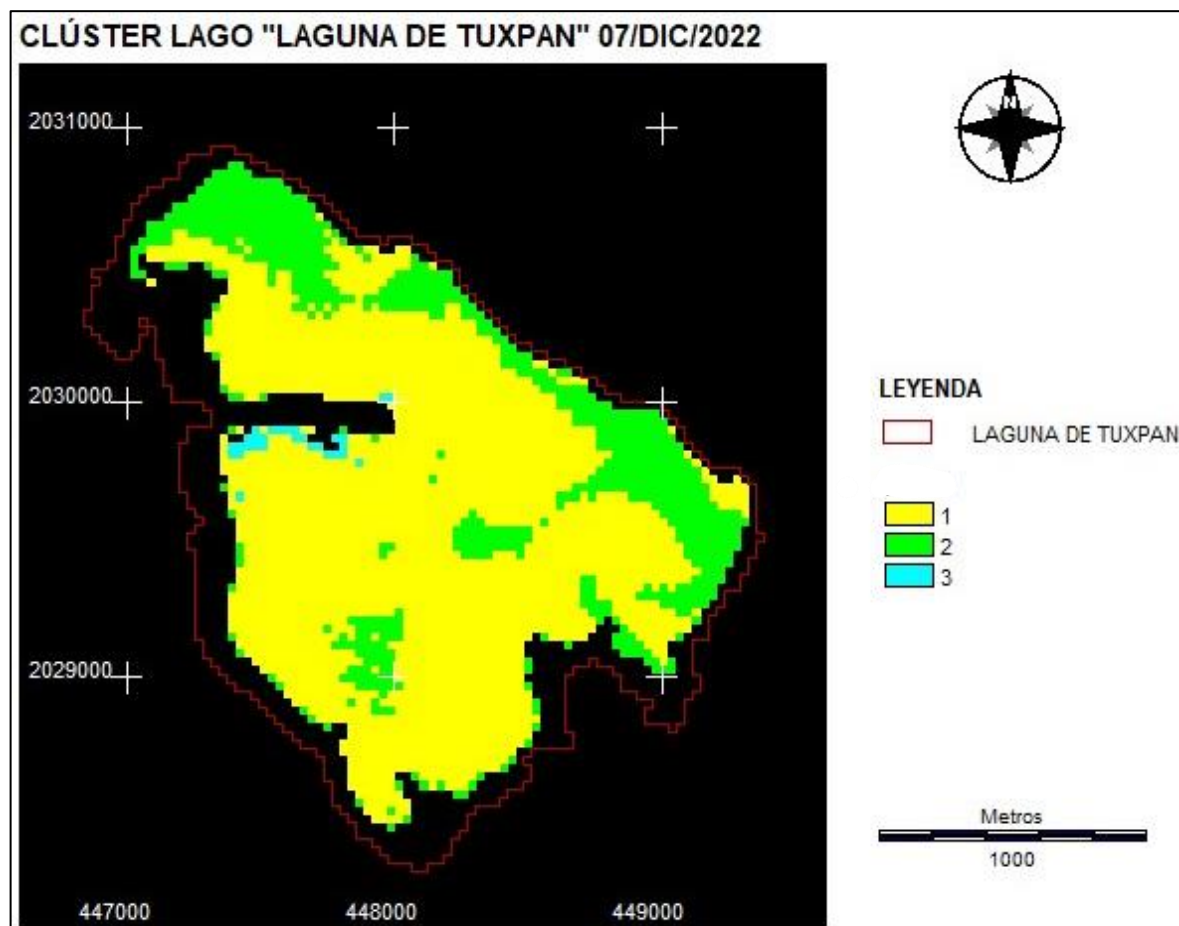


Figura 4.20 Cluster de variación de reflectancia del año 2022 en la "Laguna Tuxpan"

Por otra parte, el cluster del 19 de julio de 2023 (Figura 4.21), presentó una variabilidad diferente respecto a los anteriores años, por lo que, es más evidente la variación existente en la laguna en solo tres años de análisis.

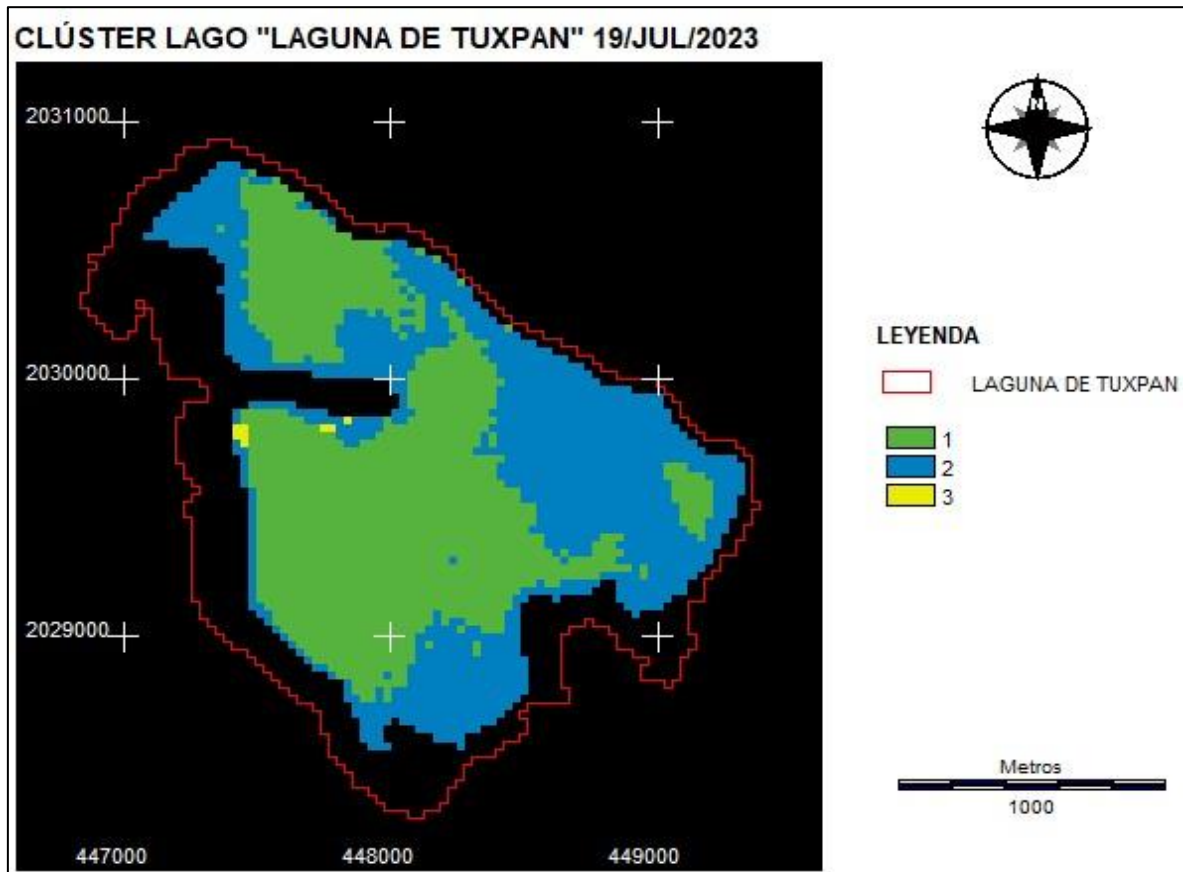


Figura 4.21 Cluster de variabilidad de reflectancia del año 2023 en la “Laguna Tuxpan”

Obteniendo la variabilidad de reflectancia de los tres años considerados, se realizó un cluster general o global de las tres fechas para la determinación de la variación de reflectividad actual en la laguna, por lo que, mediante el resultado obtenido se definió la ruta del muestreo, ya que, considerando el tamaño de píxel, el margen de error y el nivel de confiabilidad estimada resultaba un tamaño de muestra respectivamente elevado y tomando en cuenta que visiblemente no existe tanta variación, no era óptimo realizarse de esta manera.

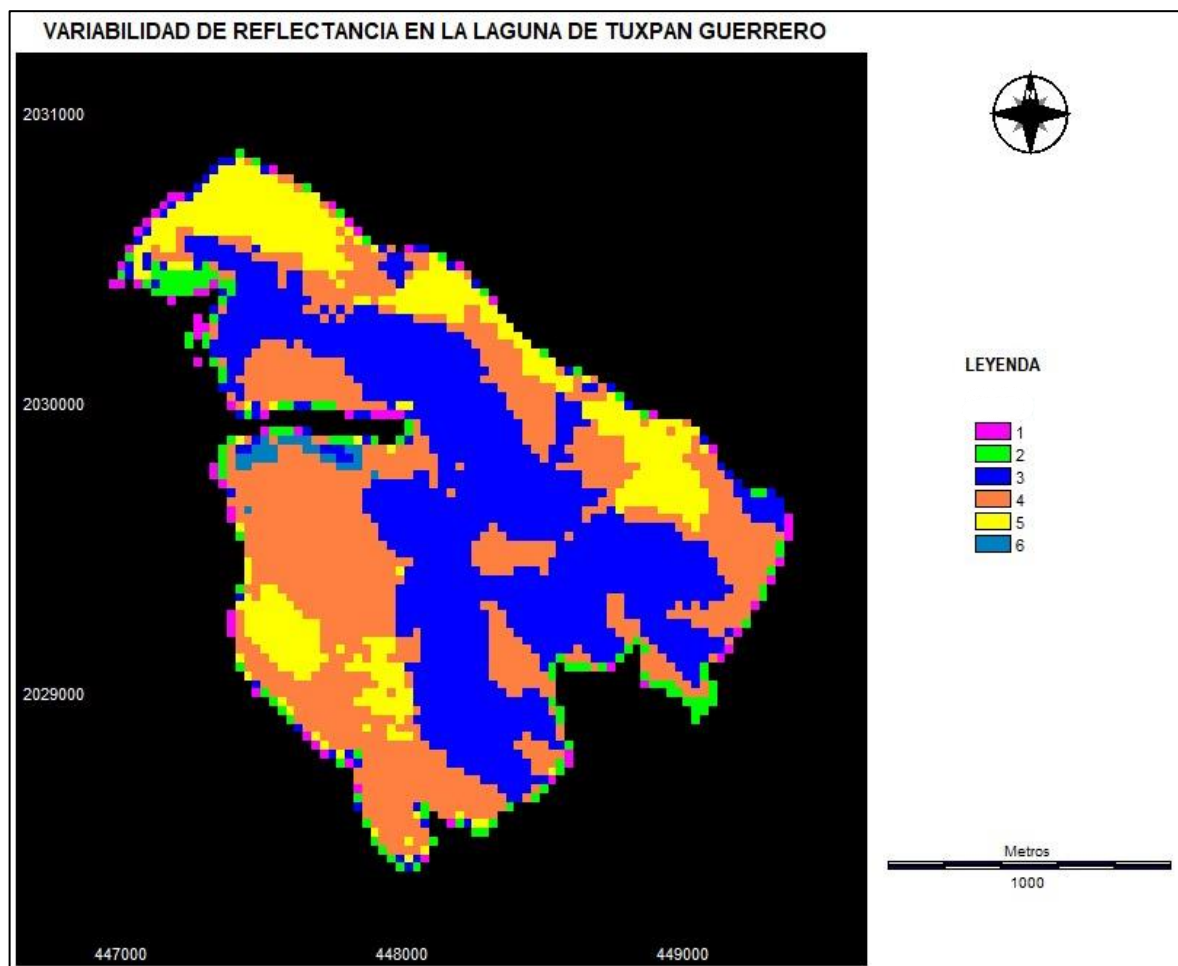


Figura 4.22 Cluster general de variabilidad de reflectancia, considerando las tres fechas

En el clúster de la Figura 4.22, se observa la diversidad de reflectancias presente en los tres años. Esto permite un muestreo representativo de la variación actual presente en el cuerpo de agua.

De manera general, los procesos cluster exponen una variación de reflectancia notable, es decir, que la distribución de sustancias en el cuerpo de agua no siempre se comporta del mismo modo, sino que, se modifica respecto al tiempo, abarcando en algunos casos mayor o menor dimensión en diferentes partes de la laguna.

Entre la variación obtenida y criterios de habitantes locales se obtuvieron 16 muestras representativas de la laguna, ya que, los ciudadanos fueron quienes dirigieron a las áreas de la laguna con alguna influencia importante como; áreas de

mayor profundidad, manantiales y posibles zonas de contaminación como: áreas de lavado de ropa y áreas restauranteras.

Es importante recalcar, la recolección de muestras de agua se tomó a una cierta distancia de las orillas de la laguna, puesto que, la interferencia de cobertura terrestre podría alterar la información capturada por el satélite (valores de reflectancia).

4.5.2 Clasificación supervisada

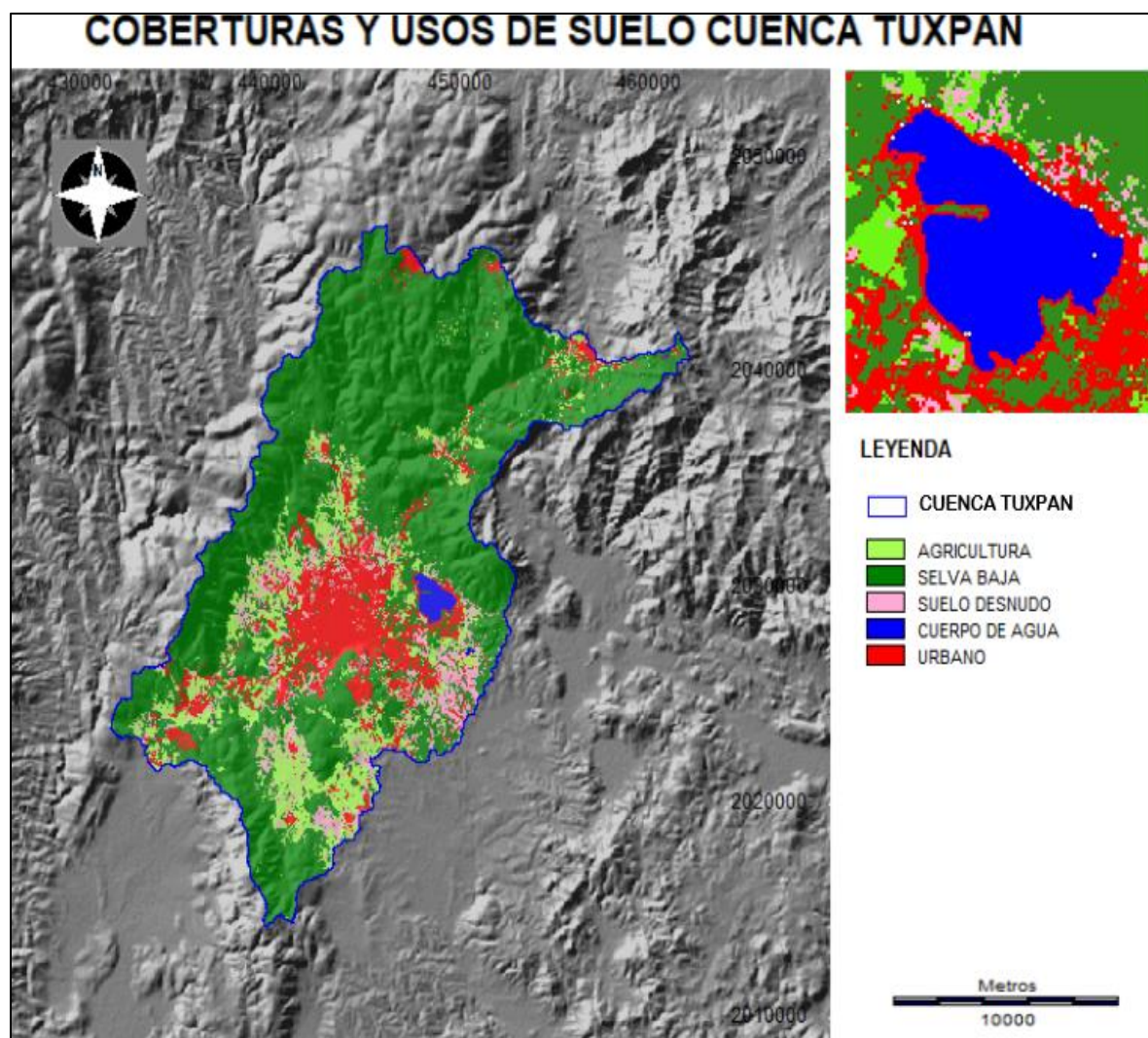


Figura 4.23 Clasificación supervisada de coberturas y usos de suelo en la cuenca Tuxpan

La clasificación supervisada de coberturas y usos de suelo (Figura 4.23) muestra como principal fuente de contaminación del agua los asentamientos humanos (área urbana) esto se puede relacionar con áreas restauranteras presentes en las orillas del cuerpo de agua, así como, las diferentes actividades antrópicas que se llevan a cabo cerca y dentro de la laguna, como: lavado de ropa, actividades recreativas y efectos del turismo.

4.6 Recolección de muestras in situ

Del muestreo realizado, se obtuvieron en total 16 muestras de agua. En la Tabla 4.8 se muestran los datos paramétricos recolectados durante el proceso de muestreo.

Tabla 4.8 Puntos de muestreo

27 DE ENERO DE 2024 LAGUNA TUXPAN, IGUALA GUERRERO Multiparamétrico Marca HANNA Modelo HI9829								
No de muestra	Localización		T	pH	CE	OD		DS
	X	Y	°C		µS/cm	%	mg/L	cm
1	-99.48018	18.356122	25.8	7.88	658	68	5.24	45
2	-99.480313	18.355206	25.4	8.30	639	61	4.60	51
3	-99.481177	18.353492	25.7	8.41	614	68	5.23	55
4	-99.48295	18.351592	24.5	8.36	598	64	4.91	48
5	-99.485117	18.35275	24.7	8.45	582	71	5.42	60
6	-99.487473	18.35261	21.5	8.37	570	65	4.98	51
7	-99.489429	18.347316	24.8	8.43	564	76	5.77	46
8	-99.493633	18.348532	25.0	8.45	564	78	5.94	34
9	-99.496435	18.351447	25.7	8.43	569	67	5.08	41
10	-99.494438	18.354674	24.8	8.46	557	69	5.28	49
11	-99.492592	18.359953	25.2	8.46	558	69	5.28	45
12	-99.496485	18.360906	25.6	8.45	563	73	5.47	47
13	-99.49309	18.362055	25.3	8.47	556	76	5.76	56
14	-99.490713	18.361685	25.0	8.48	555	77	5.86	59
15	-99.487987	18.35837	25.1	8.44	554	63	4.79	56
16	-99.486257	18.3566	28.8	8.48	553	83	6.30	57
17	-99.496052	18.351934	Punto somero					
18	-99.5006	18.36	Exutorio					

Las siguientes imágenes (Figuras 4.24, 4.25 y 4.26) muestran un panorama más amplio del área de estudio y del recorrido realizado, así como algunas de sus características paisajísticas que se pudieron observar.



Figura 4.24 Panorama del área de estudio
Fotografía: Jhonn Nájera



Figura 4.25 Capturas durante el trayecto en el área de estudio
Fotografía: Jhonn Nájera



Figura 4.26 Entorno laguna de Tuxpan
Fotografía: Jhonn Nájera

Durante el trayecto realizado, se observaron distintas particularidades importantes como el lavado de ropa, personas tomando ducha (Figura 4.27 y 4.28) y algunos desechos sólidos flotantes en el cuerpo de agua (Figura 4.29), lo cual, también fue registrado como parte de las condiciones del entorno.



Figura 4.27 Actividades de lavado de ropa dentro el cuerpo de agua
Fotografía: Jhonn Nájera



Figura 4.28 Presencia de actividad humana en la laguna
Fotografía: Jhonn Nájera



Figura 4.29 Presencia de desechos sólidos dentro el cuerpo de agua

Otra de las características importantes registradas y evidenciadas mediante fotografías fue la presencia de manantiales (Figura 4.30) dentro la laguna. Información que corrobora al área de estudio como una cuenca endorreica, alimentada no solo por agua superficial procedente de escurrimientos de lluvia, sino, también por corrientes subterráneas, como lo señala Mijangos & González (2016).



Figura 4.30 Zona de manantiales dentro de la laguna

En la siguiente Figura 4.31, se muestra la georreferenciación y distribución de cada uno de los puntos muestreados.

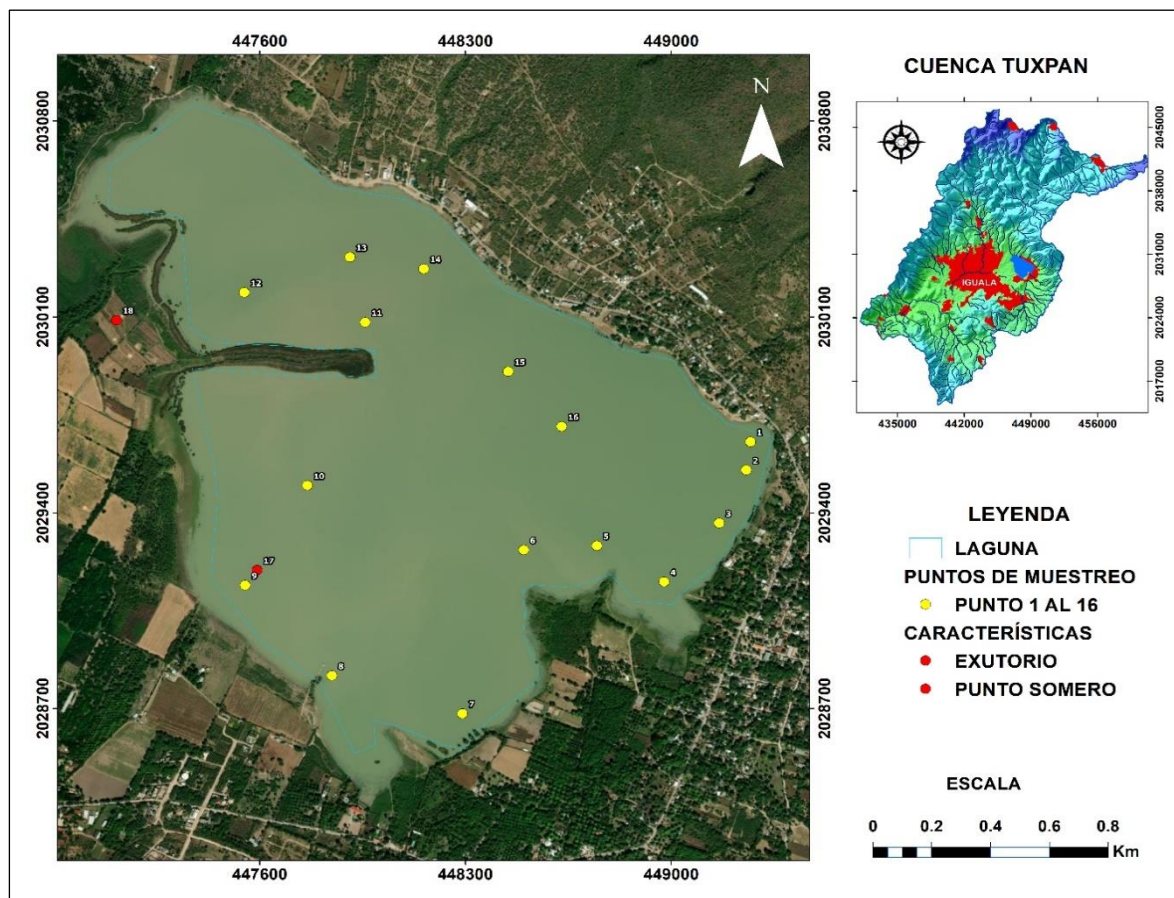


Figura 4.31 Georreferenciación y distribución de puntos de muestreo

4.7 Trabajo de Laboratorio y de gabinete

4.7.1 Determinación de Clorofila-a (chl-a)

En la Figura 4.32, se observa el equipo de filtración por membrana para la obtención del material o pigmento de clorofila-a (chl-a).



Figura 4.32 Equipo de filtración por membrana

En el proceso de filtración de la muestra, conforme se acumulaba sedimento en la membrana no se observó ninguna característica que mostrara la existencia de clorofila-a [chl-a] (Figura 4.33).



Figura 4.33 Membrana sin presencia de clorofila-a (chl-a)

La muestra obtenida (Figura 4.34), se analizó en el microscopio comprobándose la inexistencia de clorofila-a (chl-a), solo se observaron residuos de sólidos disueltos (Figura 4.35).



Figura 4.34 Muestra de clorofila-a (chl-a) obtenida

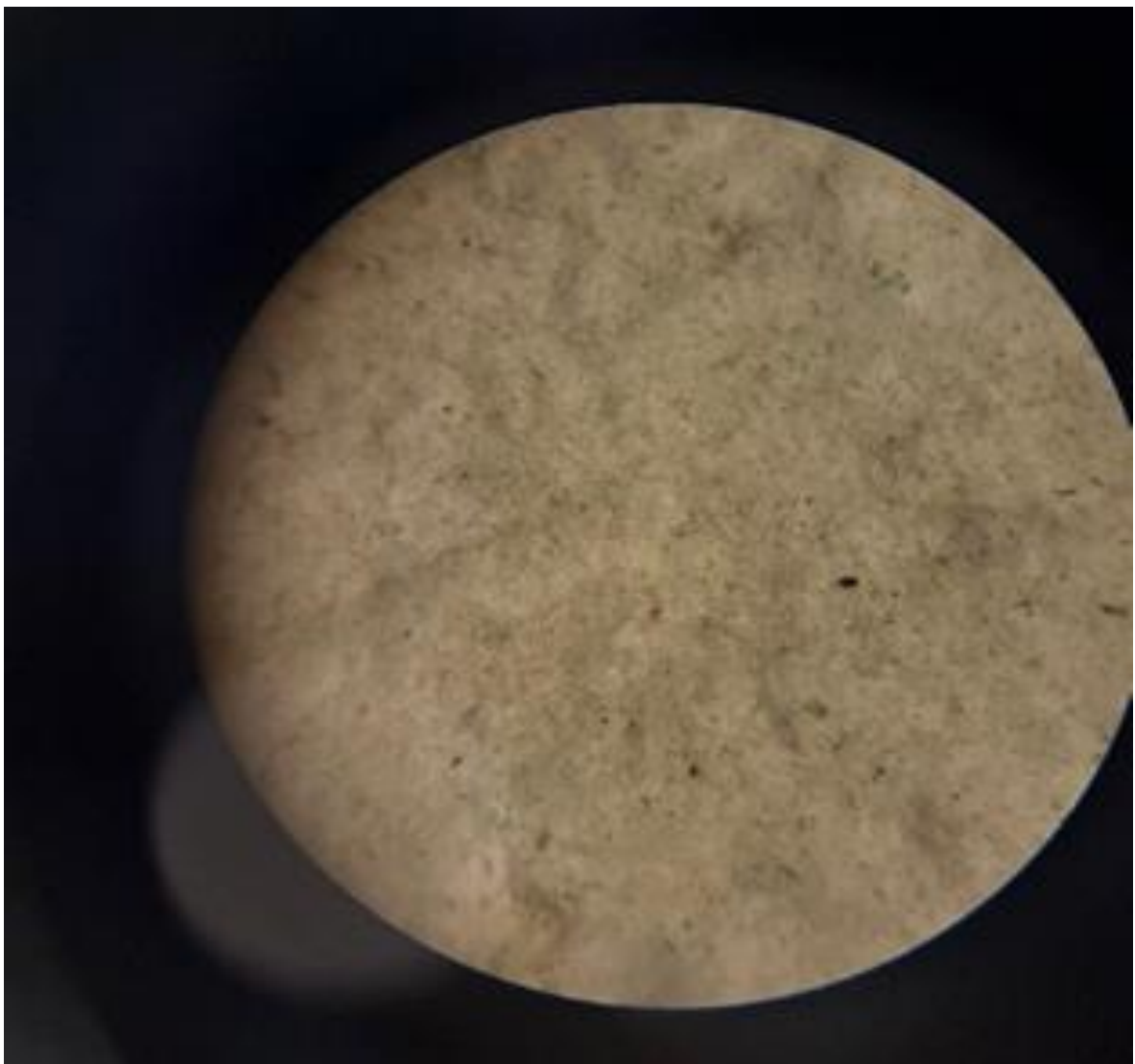


Figura 4.35 Observación de muestra en microscopio

4.7.2 Determinación de sólidos disueltos totales (SDT)

La Tabla 4.9, muestra la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) obtenida mediante conductimetría (Sarapura & Morales, 2019).

Tabla 4.9 Concentración de sólidos disueltos totales (SDT)

No. De muestra	Conductividad Eléctrica (CE) $\mu\text{S/cm}$	Concentración de sólidos disueltos totales mg/L
1	658	421.12
2	639	408.96
3	614	392.96
4	598	382.72
5	582	372.48
6	570	364.8
7	564	360.96
8	564	360.96
9	569	364.16
10	557	356.48
11	558	357.12
12	563	360.32
13	556	355.84
14	555	355.2
15	554	354.56
16	553	353.92

Los resultados obtenidos, de acuerdo con la actual Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua, refieren que la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) se encuentra por debajo de los 1000 mg/L del límite permisible.

4.7.3 Determinación de turbidez

En la siguiente Tabla 4.10, se observan las concentraciones obtenidas de turbidez en unidades nefelométricas (UNT) respecto a los datos de transparencia obtenidos en campo.

Tabla 4.10 Concentración de turbidez en unidades nefelométricas (UNT)

Número de muestra	Disco de Secchi (cm)	Valor en UNT
1	45	13
2	51	10
3	55	9
4	48	12
5	60	7
6	51	10
7	46	13
8	34	21
9	41	20
10	49	12
11	45	13
12	47	12
13	56	9
14	59	8
15	56	9
16	57	9

Los resultados de turbidez, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano, muestra valores elevados respecto al límite permisible (4.0 UNT), puesto que, se encontraron valores mínimos de 7 UNT y un máximo de 21 UNT.

4.7.4 Concentración de parámetros estudiados y límites permisibles

La Tabla 4.11, muestra la concentración obtenida de los parámetros: sólidos disueltos totales (SDT), turbidez, pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE), y oxígeno disuelto (OD), en relación con los límites permisibles o valores considerados normales, de acuerdo con algunos autores.

Tabla 4.11 Concentración paramétrica obtenida en relación con límites permisibles

	CONCENTRACIÓN PARAMÉTRICA		
Parámetro	Obtenida	Permisible	
SDT (mg/L)	353.92 a 421.12	1000	NOM-127-SSA1-2021 Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
Turbidez (UNT)	7 a 21	4.0	
pH	7.8 a 8.4	6.5 a 8.5	
Temperatura (°C)	21.5 a 28.8	0 a 30	Según Beita & Barahona, (2011) en condiciones naturales del agua fluyente, la temperatura varía de 0°C a 30°C. Dependiendo hora del día, época del año, condiciones del tiempo, flujo y profundidad de la corriente.
CE (µS/cm)	553 a 658		La elevada concentración de SDT puede indicar el aumento de la CE (Matas, 2000).
OD mg/L	4.60 a 6.30	5.0 a 12 De 8-12 mg/L o de 5-10 mg/L	El límite permisible de OD normal, tiene una variación entre los 5.0 y 12 mg/L (Escandón & Cáceres, 2022; Quispe, 2017). Un cuerpo de agua bien oxigenado se considera de 8-12 mg/L o para vida acuática de 5-10 mg/L (Vilasó, et al., 2017). El pH muy elevado indica sobresaturación de oxígeno (Matas, 2000).

4.8 Análisis de la encuesta aplicada

Los resultados obtenidos, respecto a la encuesta aplicada son lo que se muestran en los siguientes gráficos.

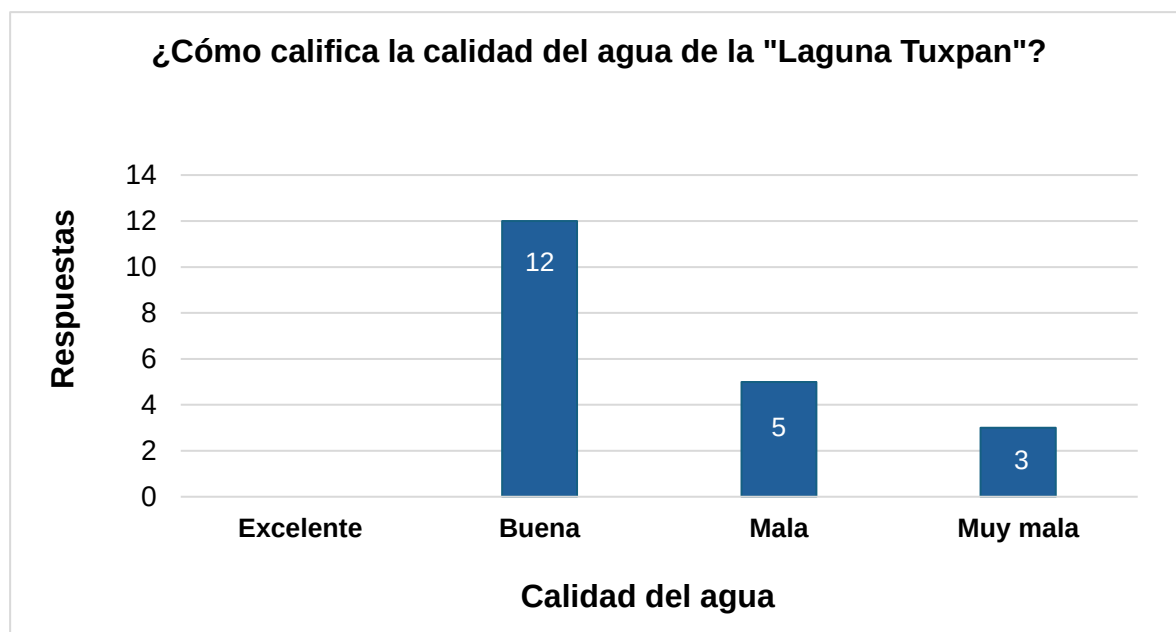


Figura 4.36 Valoración de la población local acerca la calidad del agua en la “Laguna Tuxpan”

Considerando los habitantes locales, su experiencia y conocimiento, de 20 personas encuestadas, el 60% considera que la laguna posee buena calidad de agua, mientras que el 25% cree tener una mala calidad, basando sus respuestas en las malas prácticas que se realizan, principalmente por el lavado de ropa y efectos de la actividad turística y el resto de las respuestas (15%) consideraron muy mala calidad del recurso (Figura 4.36).

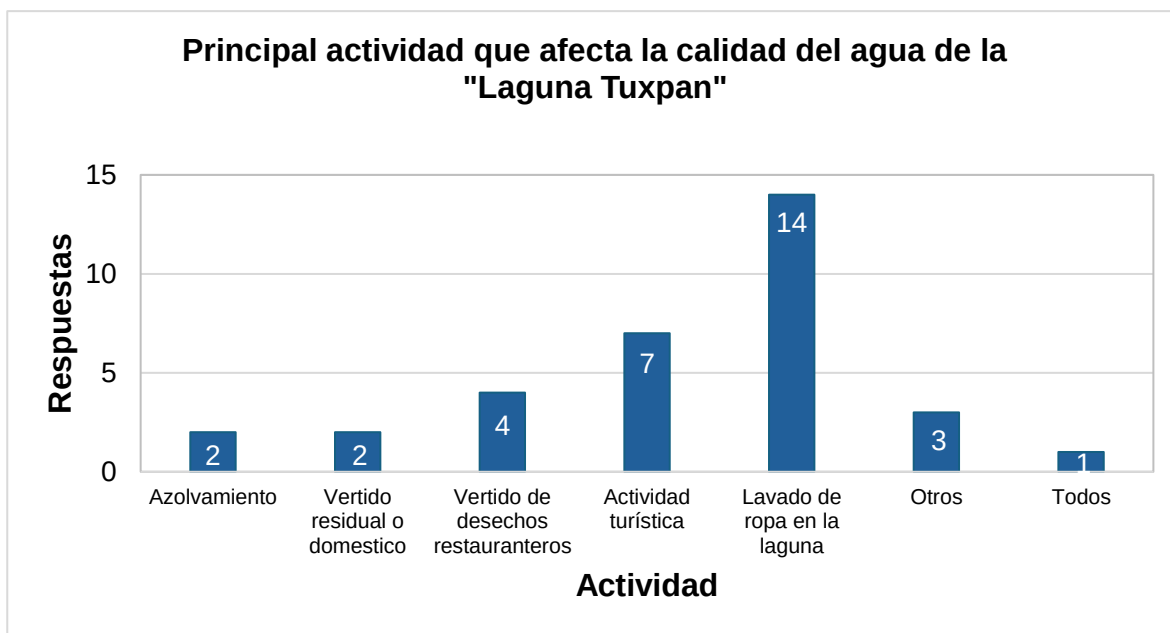


Figura 4.37 Principal actividad que afecta la calidad del agua de la Laguna

Según el análisis de respuestas, las principales actividades que afectan la calidad del agua corresponden al lavado de ropa [42.42%], seguida por la actividad turística [21.21%] (Figura 4.37), pues, son las prácticas cotidianas que principalmente se llevan a cabo.

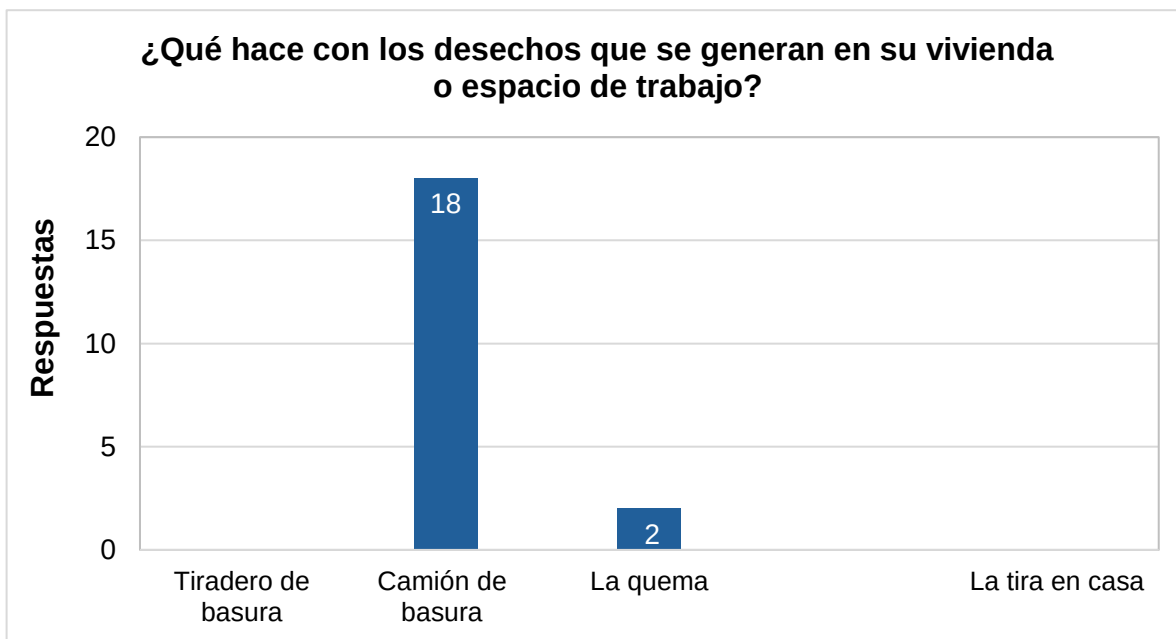


Figura 4.38 Desecho de basura generada en vivienda o espacio de trabajo

De acuerdo con el gráfico, el principal servicio que se utiliza para deshacerse de la basura refiere al uso del camión de basura [90%], el cual, pasa tres veces por semana y mientras que el 10% de los ciudadanos la quema (Figura 4.38).

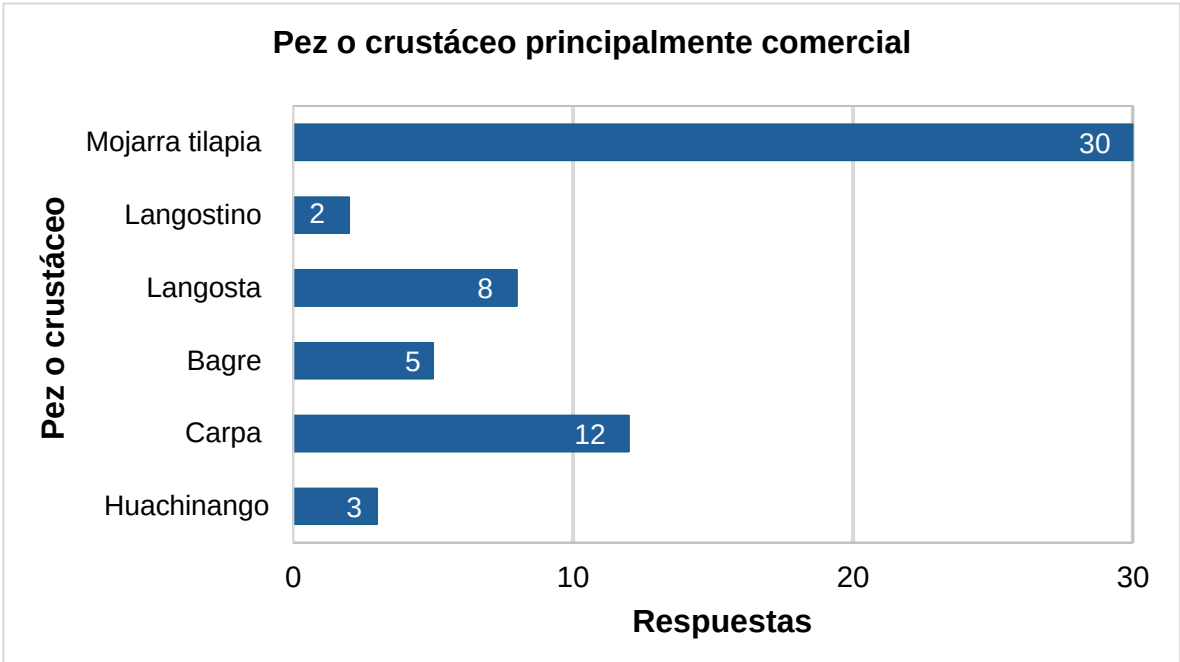


Figura 4.39 Especies mayormente comercializadas

De acuerdo con información de habitantes y labores observadas, la principal actividad económica de Tuxpan es la pesca, la cual, es la fuente de sustento para los ciudadanos, sin embargo, según informantes, ha disminuido en gran medida la producción y tamaño de algunas especies e inclusive la presencia de algunas es casi nula.

Considerando las respuestas obtenidas, las principales especies que a lo largo del tiempo han presentado mayor índice de comercialización son: mojarra tilapia [50%], carpa [20%] y la langosta [13.33%] (Figura 4.39), en tanto, que otras especies han disminuido su presencia y por ende su comercio.



Figura 4.40 Otras especies acuáticas presentes en la Laguna

La diversidad biológica del área es amplia, pues, el 47.82 % de los encuestados indica principalmente la presencia del pez diablo (localmente conocido como pez sapo), el 21.73% señala el avistamiento de charales, el 13.04% patos pijije y el 17.39% de tortugas y pez quesadilla (Figura 4.40).

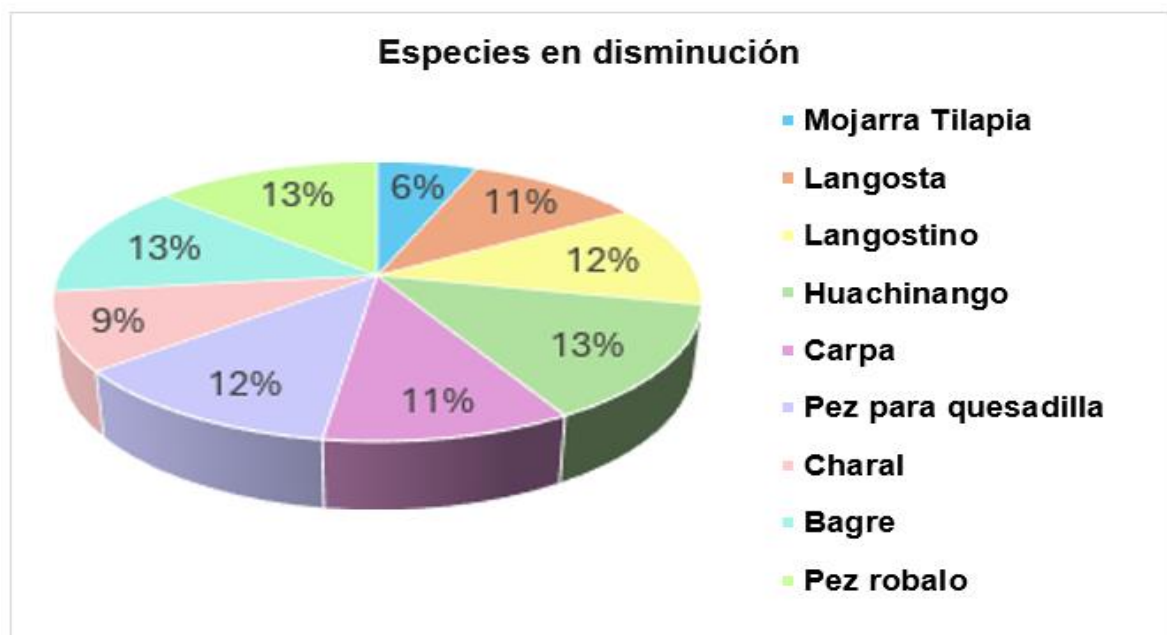


Figura 4.41 Disminución de presencia de especies en la Laguna

Analizando la información del gráfico (Figura 4.41), se muestra el porcentaje de las especies que mayormente han disminuido en la laguna, algunas con casi nula presencia; según informantes.

Con base en percepción de encuestados, las principales especies que han disminuido son: pez robalo con un 13%, huachinango (13%), Bagre (13%), pez para quesadilla (12%), langostino (12%), carpa (11%) y la langosta en un 11%. El 6% de habitantes encuestados, señalan la mojarra tilapia y el charal como las especies que menos han disminuido.

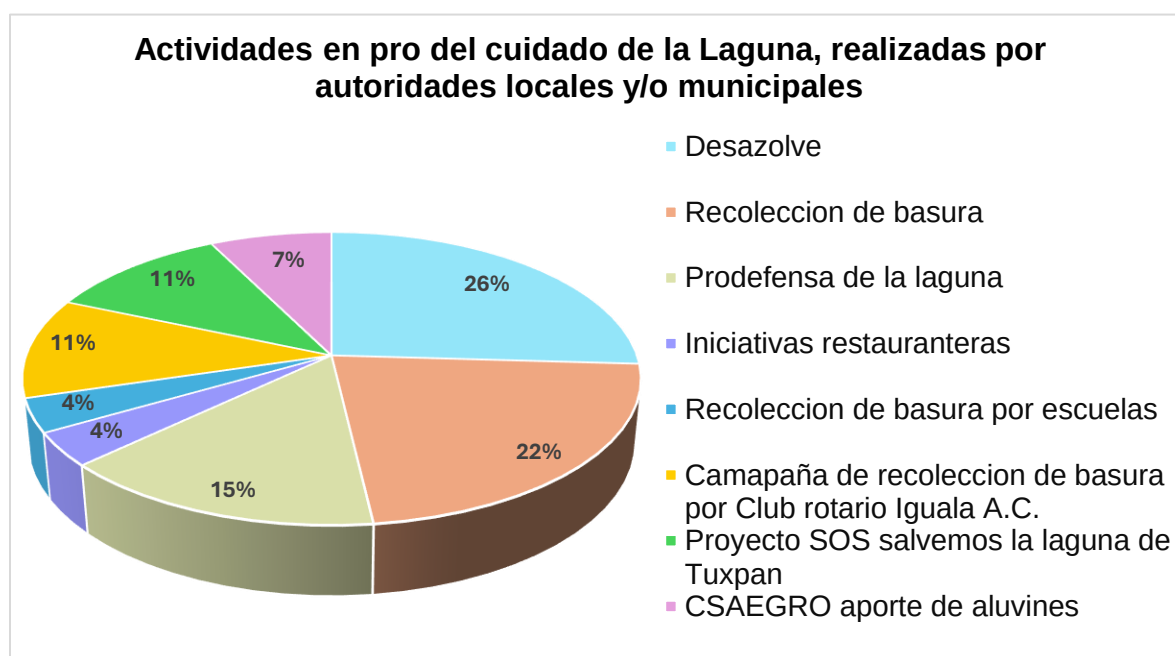


Figura 4.42 Iniciativas institucionales o locales en pro del cuidado del agua de la “Laguna Tuxpan”

Conforme al grafico (Figura 4.42), hay algunas iniciativas comunitarias e institucionales vigentes que se han implementado para la prevención y restauración ambiental de la laguna. Dentro de las principalmente mencionadas se encuentran: El 26% de los encuestados señala como parte importante el desazolve, ya que, evita el cúmulo de sedimentos que limitan el almacenamiento o la purificación del agua mediante los manantiales, el 22% menciona la recolección de basura, además, de algunas instituciones conocidas como “Proyecto SOS salvemos la laguna de

Tuxpan” y “Prodefensa de la laguna” que se han encargado de llevar a cabo convenios con el municipio en pro del cuidado y restauración del cuerpo de agua.

Como resultado de la encuesta aplicada, la información recabada señala la reducción de tamaño y disminución de especies en la laguna. Según el Blog Hanna intruments (2020), la cantidad de OD en el agua que necesita un organismo depende de la especie de éste, su estado físico, la temperatura del agua y los contaminantes presentes. La insuficiencia de OD en el agua puede causar: muerte de adultos y jóvenes, reducción en el crecimiento de huevecillos y larvas malogrados cambios que se presentan en las especies en diversas masas de agua (Hanna intruments, 2020).

4.8.1 Análisis comparativo con relación a los Criterios Ecológicos de calidad del Agua CE-CCA-001/89

Contrastando la concentración in situ obtenida de los parámetros: pH, CE, OD, temperatura y SDT, respecto a los límites establecidos en los Criterios ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89, se encontró que:

Para el Criterio de Riego Agrícola (RA), el pH obtenido, varía entre 7.8 a 8.4 unidades, indicando que este parámetro cumple con el nivel permisible del criterio (4.5 a 9), la CE consistió en valores que van de 553 a 658 $\mu\text{S/cm}$, cumpliendo el límite determinado (1000 $\mu\text{S/cm}$) y los SDT varían de 353.92 a 421.12 mg/L, estando dentro el valor permitido (1000 mg/L).

Comparando con el Criterio de Protección a la vida acuática (PVA), el oxígeno disuelto (OD) obtenido varía de 4.60 a 6.30 mg/L, es decir, la mayoría de las concentraciones rebasan el límite permisible del criterio (5.0 mg/L) y considerando que el OD disminuye conforme aumenta la profundidad, este parámetro, es un estado de alerta para la vida acuática y, el cual, puede estar relacionado con el desarrollo en cuanto a crecimiento y disminución de algunas especies de peces. Sin embargo, esta premisa vale la pena estudiarla a detalle en otra investigación, puesto que en este presente estudio no se consideró la variable “profundidad” y la toma de datos fue de manera superficial. Por otra parte, la temperatura registrada varía de

21.5 a 28.8 °C, cumpliéndose en todos los puntos de muestreo, excepto en el punto 6 (21.5 °C) y 16 (28.8 °C), ya que, estos se encuentran por debajo o por encima del valor permitido del criterio (23 a 27 °C). Por lo que, al existir algunos puntos de variación en cuanto a temperatura podría también influir en el desarrollo de la vida acuática dependiendo de las condiciones óptimas de cada especie.

Para el Criterio de Uso Pecuario (UP), las concentraciones obtenidas de sólidos disueltos totales (SDT) varían de 353.92 a 421.12 mg/L, cumpliéndose con el límite permisible del criterio (1000 mg/L). Lo cual indica, que al menos este parámetro cumple con el límite permitido del criterio para consumo del ganado.

Para producir organismos acuáticos en agua dulce con fines de desarrollo, producción y comercialización es importante considerar todos los parámetros que conforman el Criterio Ecológico de Calidad del Agua (CECA) para la Acuicultura (Tabla 4.12), sin embargo, contemplando la información obtenida de la encuesta, datos in situ y el límite permisible de los parámetros: pH, turbidez, OD y temperatura tomados en cuenta tanto en el criterio para las distintas especies y en esta investigación y de manera premisa la temperatura obtenida de 21.5 a 28.8 °C, se encuentra dentro del límite permisible para el desarrollo de: la Mojarra tilapia (24-30 °C), Langostino (8-34 °C), Carpa (20-30 °C) y Bagre (20-30 °C), el pH (7.8 a 8.4) se encuentra con variaciones para la mojarra tilapia (pH de 7-8) y para el Bagre (pH de 6-5.8), mientras que la turbidez (7-21 UNT) rebasa el límite tolerable para la Mojarra tilapia (13 UNT) y el Bagre (13 UNT) y el OD (4.60 a 6.30 mg/L) no cumple con el límite permisible principalmente para el Langostino (8.1 mg/L). Cabe mencionar, que de manera general se realiza este análisis y se sugiere realizar un estudio a fondo para determinar si los parámetros del Criterio: Acuicultura y condiciones fisicoquímicas de la laguna permiten la producción y desarrollo de organismos acuáticos relacionados.

Tabla 4.12 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA) para la Acuicultura

	Permisible				Obtenida			
	Turb UNT	pH	OD mg/L	Temp °C	Turb UNT	pH	OD mg/L	Temp °C
Mojarra tilapia	13	7-8	2.1	24-30	7-21	7.8 a 8.4	De 4.60 a 6.30 con una media de 5.0	De 21.5 a 28.8 con una media de 25.1
Langosta								
Langostino	15-25	7-8.5	8.1	18-34				
Huachinango								
Carpa	11-24	7-8.5	5	20-30				
Bagre	13	6.5-8	4	20-30				
Pez robalo								

En este aspecto, es importante considerar la investigación realizada por Bravo, et al., (2016), ya que, de acuerdo con los parámetros estudiados por el autor, la “Laguna Tuxpan” en algún punto, no cumple con todos los límites establecidos por los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001-1989) para la Protección de la Vida Acuática (PVA), pues, los fosfatos totales, nitrógeno amoniacal y coliformes fecales son los parámetros que no cumplen con el límite permisible del criterio. Por otra parte, también están las grasas y aceites encontradas en la laguna, las cuales, afectan el intercambio de oxígeno en las branquias, sofocando a los peces y causando su muerte, estas sustancias presentaron valores bajos en septiembre y en enero (estiaje) tres puntos presentaron 42.2, 39.3 y 33.4 mg/L. Por lo que, en estiaje puede haber estrés para el desarrollo de la vida acuática.

La Tabla 4.13, muestra las concentraciones de los parámetros: turbidez, OD, pH, CE y temperatura obtenidas en la presente investigación y las obtenidas por Bravo, et al., (2016).

Tabla 4.13 Comparación de concentraciones obtenidas

Parámetros	Concentración obtenida en el estudio de Bravo et al., (2016)	Concentración superficial obtenida en el presente estudio
Turbidez	Varía de 5.6 a 24.9, promedio 12.3 UNT, es 8.4 veces mayor en la profundidad promediando 104 UNT.	Varia de 7 a 21 UNT
OD	En enero 7.41 mg/L, y en agosto de lo profundo 0.44 mg/L.	De 4.60 a 6.30 mg/L
pH	De 7.94, en el fondo (septiembre), máximo de 8.40 (enero), con 8.2 la mayor parte de la superficie, promedio de 8.05.	De 7.88 a 8.48
CE	Entre 421 y 445	De 553 a 658 $\mu\text{S/cm}$
Temperatura	Superficial de 22.3 a 31.05 °C.	De 21.5 a 28.8 °C

Explicando la tabla anterior, a mayor profundidad, mayor turbidez, sin embargo, en la superficie, Bravo et al., (2016) encontraron una variación de 5.6 a 24.9 UNT con promedio de 12.3 UNT y actualmente se presenta una variación de 7 a 21 UNT lo cual, comparando las concentraciones mínimas obtenidas en ambos estudios de: 5.6 y 7, evidencia un aumento de turbidez de 1.4 UNT y una disminución en la concentración máxima de 24.9 a 21 UNT, con una variación de 3.9 UNT. Sin embargo, en ambos casos no se cumple con el límite establecido por la NOM-127-SSA1-2021.

En enero (época de estiaje), Bravo, et al., (2016), encontraron una concentración superficial de OD de 7.41 mg/L, mientras que, en el presente estudio, también en enero (diferente año), se detectó una variación de 4.60 a 6.30 mg/L, indiciando un decremento de OD. Lo cual, es preocupante, puesto que, la vida acuática se ve afectada en desarrollo, reproducción, crecimiento y supervivencia.

El pH encontrado en la mayor parte de la superficie de la laguna es de 8.2 y en el presente estudio se encontró una variación superficial de 7.88 a 8.48, donde la

mayor parte de la laguna posee un pH de 8.4. Sin embargo, si se considera el pH de 8.2 y 8.4, existe una variación mínima de 0.2. Lo que significa que el pH se mantiene dentro los límites permisibles, tanto de la NOM-127-SSA1-2021 (6.5 a 8.5) como del Criterio Ecológico de calidad del Agua CE-CCA-001/89 para Riego Agrícola [4.5 a 9] (Bravo, et al., 2016).

Con respecto a la CE, se encontró una variación de 421 a 445 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Bravo, et al., 2016) y actualmente se identificó una variación de 553 a 658 $\mu\text{S}/\text{cm}$, demostrándose un aumento de 132 a 213 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pero, en ambos casos manteniéndose dentro el límite permisible del CECA para Riego Agrícola [RA] (1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Mientras que la temperatura tuvo una ligera variación, sin embargo, en el registro actual se mantiene dentro el límite del criterio para la Acuacultura.

Es importante, tomar en cuenta, que no solo estos parámetros podrían estar afectando la producción, crecimiento y supervivencia de la vida acuática, pues, como lo señalan Tomasini, et al., (2017) y Bravo, et al., (2016), la calidad del agua se encuentra dentro de los máximos límites permisibles para el desarrollo de la vida acuática. Además, Tomasini, et al., (2017), encontraron presencia de seis tipos de ftalatos, incidencia de herbicida atrazina en la laguna, contaminación por presencia de coliformes fecales y sólidos suspendidos totales de origen humano y natural en la cuenca, señalando también como fuente de contaminación a los basurales de la zona y a la actividad agrícola que existe.

Además, las características fisicoquímicas y biológicas de la laguna indican que el cuerpo de agua experimenta una creciente influencia antropogénica, caracterizada por el vertido de aguas residuales, aporte de detergentes por lavaderos ubicados dentro del cuerpo de agua, deforestación, erosión de la subcuenca, entrada de sólidos y nutrientes por escorrentías en época de lluvias y por actividades de los restaurantes a la orilla de la laguna, presentando condiciones de estrés ambiental en algunos puntos para el oxígeno disuelto (Bravo, et al., 2016).

4.9 Análisis del modelo de regresión

La Tabla 4.14, muestra las correlaciones entre valores de reflectancia Landsat 8 y datos in situ: SDT, turbidez, temperatura, pH, CE y OD.

Tabla 4.14 Matriz de correlación entre valores de reflectancia (Landsat 8) y datos in situ

T-MODE COR.	SDT	Turb	Temp	pH	CE	OD
SDT	1	0.056832	0.003315	-0.871547	1.000000	-0.346739
Turb	0.056832	1	-0.059698	-0.158229	0.056832	0.149078
Temp	0.003315	-0.059698	1	0.018660	0.003315	0.578795
pH	-0.871547	-0.158229	0.018660	1	-0.871547	0.291368
CE	1.000000	0.056832	0.003315	-0.871547	1	-0.346739
OD	-0.346739	0.149078	0.578795	0.291368	-0.346739	1
B1	-0.585592	0.308606	0.269043	0.386734	-0.585592	0.345222
B2	-0.517961	0.462897	0.087286	0.268084	-0.517961	0.214236
B3	-0.604840	0.378279	0.136513	0.387629	-0.604840	0.272664
B4	-0.443306	0.735238	0.097344	0.286829	-0.443306	0.312299
B5	0.107412	0.915499	-0.019103	-0.126013	0.107412	0.273195
B6	0.503416	0.772288	0.011869	-0.524202	0.503417	0.103557
B7	0.533541	0.750866	-0.001050	-0.513632	0.533541	0.114293

Los parámetros que resultaron mejor correlacionados con Landsat 8 fueron: SDT, turbidez, CE y pH. Mientras que la temperatura y OD no mostraron correlaciones significativas. En este caso también se probó con las bandas 10 (Infrarrojo térmico TIRS 1) y banda 11 (Infrarrojo térmico TIRS 2), sin embargo, tampoco presentó correlación importante. Como lo señalan Pizani et al., (2020) esto puede atribuirse a la calibración, problemas del sensor o bien al tiempo en el que tardó la campaña de campo, en este caso duró cuatro horas, lo que probablemente causó problemas para la temperatura de la superficie que responde muy rápidamente a la elevación del sol. Los parámetros restantes se consideran más estables, sin embargo, todavía se ven afectados por las condiciones cambiantes de temperatura e iluminación.

Significa que mejorar el tiempo de muestreo podría mejorar estos modelos (Pizani, et al., 2020).

La Tabla 4.15, presenta los modelos de regresión múltiple obtenidos para cada uno de los parámetros correlacionados.

Tabla 4.15 Modelos de regresión Landsat 8

Parámetro	Bandas	Modelo	R ²
SDT	B3	Y= 1058.292354 - 4315.300737*B3	-0.604840
	B1, B2, B3, B4, B6, B7	Y= 335.139215 -7405.225390*B1 + 328.683112*B2 + 6713.703995*B3 - 4213.068588*B4 + 10089.403582*B6 - 3019.232292*B7	0.864607
	B5	Y= -21.134446 +1404.323881*B5	0.915499
	B2, B4, B5, B6, B7	Y= -60.997715 - 333.995907*B2 + 403.069107*B4 + 225.737966*B5 - 574.825486*B6 + 1851.040514*B7	0.948717
pH	B6	Y= 9.032348 - 34.766607*B6	-0.524201
	B6, B7	Y= 8.731646 - 43.136644*B6 + 12.426617*B7	0.524624
CE	B3	Y= 1653.581941 - 6742.658265*B3	-0.604840
	B1, B2, B3, B4, B6, B7	Y= 523.656624 - 11570.685433*B1 + 513.587393*B2 + 10490.155932*B3 - 6582.917438*B4 + 15764.705216*B6 - 4717.569985*B7	0.864608

El modelo que mejor representa los SDT, está relacionado con las bandas B1 (Aerosol costero), B2 (Azul), B3 (Verde), B4 (Roja), B6 (Infrarrojo de onda corta 1) y B7 (Infrarrojo de onda corta 2) con un coeficiente de determinación de R²= 0.86, seguido el de turbidez con las bandas B2 (Azul), B4 (Roja), B5 (Infrarrojo cercano), B6 (Infrarrojo de onda corta 1), B7 (Infrarrojo de onda corta 2), obteniendo un R² de 0.94, por su parte, el pH guarda una mejor correlación con las bandas B6 (Infrarrojo de onda corta 1), B7 (Infrarrojo de onda corta 2) con un R² de 0.52, mientras que la CE obtuvo una mejor relación con las bandas B1 (Aerosol costero), B2 (Azul), B3

(Verde), B4 (Roja), B6 (Infrarrojo de onda corta 1), B7 (Infrarrojo de onda corta 2) obteniendo un coeficiente de 0.86.

A continuación, se muestra la matriz obtenida de datos in situ y valores de reflectancia del producto Sentinel 2 (Tabla 4.16).

Tabla 4.16 Matriz de correlación Sentinel 2

T-MODE COR.	SDT	Turb	Temp	pH	CE	OD
SDT	1	0.056832	0.003315	-0.871547	1.000000	-0.346739
Turb	0.056832	1	-0.059698	-0.158229	0.056832	0.149078
Temp	0.003315	-0.059698	1	0.018660	0.003315	0.578795
pH	-0.871547	-0.158229	0.018660	1	-0.871547	0.291368
CE	1.000000	0.056832	0.003315	-0.871547	1	-0.346739
OD	-0.346739	0.149078	0.578795	0.291368	-0.346739	1
B1	-0.050882	0.227545	0.287723	-0.234599	-0.050882	0.055978
B2	-0.575773	0.264049	0.066205	0.369571	-0.575773	0.042201
B3	-0.421705	0.497191	0.160057	0.208273	-0.421705	0.166340
B4	-0.339131	0.659886	-0.025370	0.174302	-0.339131	0.168335
B5	-0.184050	0.658382	-0.029215	0.047531	-0.184050	0.136924
B6	0.283931	0.869221	-0.053918	-0.333271	0.283931	0.164250
B7	0.189992	0.811013	-0.066761	-0.234223	0.189992	0.014514
B8	0.359732	0.788665	0.014356	-0.356424	0.359732	0.071106
B8A	0.611218	0.517912	0.012578	-0.492848	0.611218	-0.075051

La matriz muestra las diferentes correlaciones obtenidas de Sentinel 2, y con ello, las relaciones más significativas para: SDT, turbidez y CE. Mientras que, el pH obtuvo una correlación débil y los parámetros temperatura y oxígeno disuelto (OD) no presentaron correlación. Esto puede ser debido a la diferencia del paso del satélite y tiempo de muestreo para el caso de la temperatura.

En la Tabla 4.17, se encuentran los modelos de regresión múltiple significativos para cada uno de los parámetros correlacionados.

Tabla 4.17 Modelos de regresión Sentinel 2

Parámetro	Bandas	Modelo	R ²
SDT	B8A	$Y = 142.244130 + 5404.795871 \cdot B8A$	0.611218
	B2, B3, B8A	$Y = 394.807633 + 2482.148631 \cdot B2 - 5497.593665 \cdot B3 + 6241.302159 \cdot B8A$	0.770456
Turbidez	B6	$Y = -74.616365 + 1448.618590 \cdot B6$	0.869221
	B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A	$Y = -81.805863 - 1.768707 \cdot B3 - 80.917593 \cdot B4 - 182.623828 \cdot B5 + 1566.497972 \cdot B6 + 874.208664 \cdot B7 + 486.367392 \cdot B8 - 1375.819418 \cdot B8A$	0.931973
CE	B8A	$Y = 222.256387 + 8444.995103 \cdot B8A$	- 0.611218
	B2, B3, B4, B8A	$Y = 105.711677 + 5340.783269 \cdot B2 - 5458.934931 \cdot B3 - 1919.811135 \cdot B4 + 10701.835734 \cdot B8A$	0.781050

Los parámetros con mejor coeficiente de determinación son: SDT conformado por las bandas B2 (Azul), B3 (Verde), B8A (Infrarrojo cercano 2) con coeficiente de determinación de $R^2 = 0.77$, por su parte, la turbidez obtuvo una mejor correlación con las bandas B3 (Verde), B4 (Roja), B5 (Borde rojo 1)), B6 (Borde rojo 2), B7 (Borde rojo 3), B8 (Infrarrojo cercano 1), B8A (Infrarrojo cercano 2) con un $R^2 = 0.93$, y la CE obtuvo un coeficiente de 0.78 con las bandas B2 (Azul), B3 (Verde), B4 (Roja) y B8A (Infrarrojo cercano 2).

Tanto, en Landsat 8 como en Sentinel 2 se consideró el modelo con mejor coeficiente [R^2] (Tabla 4.18), ya que, mediante la representación gráfica de concentración y distribución se permite contrastar los resultados en cuanto a la variación o similitud de R^2 con ambos satélites, además, de la validación de resultados.

Tabla 4.18 Modelos Landsat-8 y Sentinel-2 considerados para la representación gráfica de concentración y distribución de parámetros

Parámetros	Bandas	Modelos óptimos (Landsat 8)	R ²
SDT	B1, B2, B3, B4 B6, B7	Y= 335.139215 -7405.225390*B1 + 328.683112*B2 + 6713.703995*B3 - 4213.068588*B4 + 10089.403582*B6 - 3019.232292*B7	0.86
Turbidez	B2, B4, B5, B6, B7	Y= -60.997715 - 333.995907*B2 + 403.069107*B4 + 225.737966*B5 - 574.825486*B6 + 1851.040514*B7	0.94
pH	B6, B7	Y= 8.731646 - 43.136644*B6 + 12.426617*B7	0.52
CE	B1, B2, B3, B4, B6, B7	Y= 523.656624 - 11570.685433*B1 + 513.587393*B2 + 10490.155932*B3 - 6582.917438*B4 + 15764.705216*B6 - 4717.569985*B7	0.86
Parámetros	Bandas	Modelos óptimos (Sentinel 2)	R ²
SDT	B3, B8A	Y= 394.807633 + 2482.148631*B2 - 5497.593665*B3 + 6241.302159*B8A	0.77
Turbidez	B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A	Y=81.805863 - 1.768707*B3 - 80.917593*B4 - 182.623828*B5 + 1566.497972*B6 + 874.208664*B7 + 486.367392*B8 - 1375.819418*B8A	0.93
CE	B2, B3, B4, B8A	Y= 105.711677 + 5340.783269*B2 - 5458.934931*B3 - 1919.811135*B4 + 10701.835734*B8A	0.78

Conforme al coeficiente de determinación (R²) obtenido por Landsat 8 y Sentinel 2 para cada uno de los parámetros, se observa que, las ecuaciones estadísticas con una mejor respuesta corresponden al satélite Landsat 8. Esto puede deberse al desfase de tiempo entre satélites, puesto que, Landsat 8 corresponde al día de muestreo (27 de enero) y Sentinel 2 corresponde a un día anterior al día de muestreo, lo que puede influir en los resultados.

4.9.1 Representación gráfica de modelos

Landsat 8

CONCENTRACIÓN DE SDT

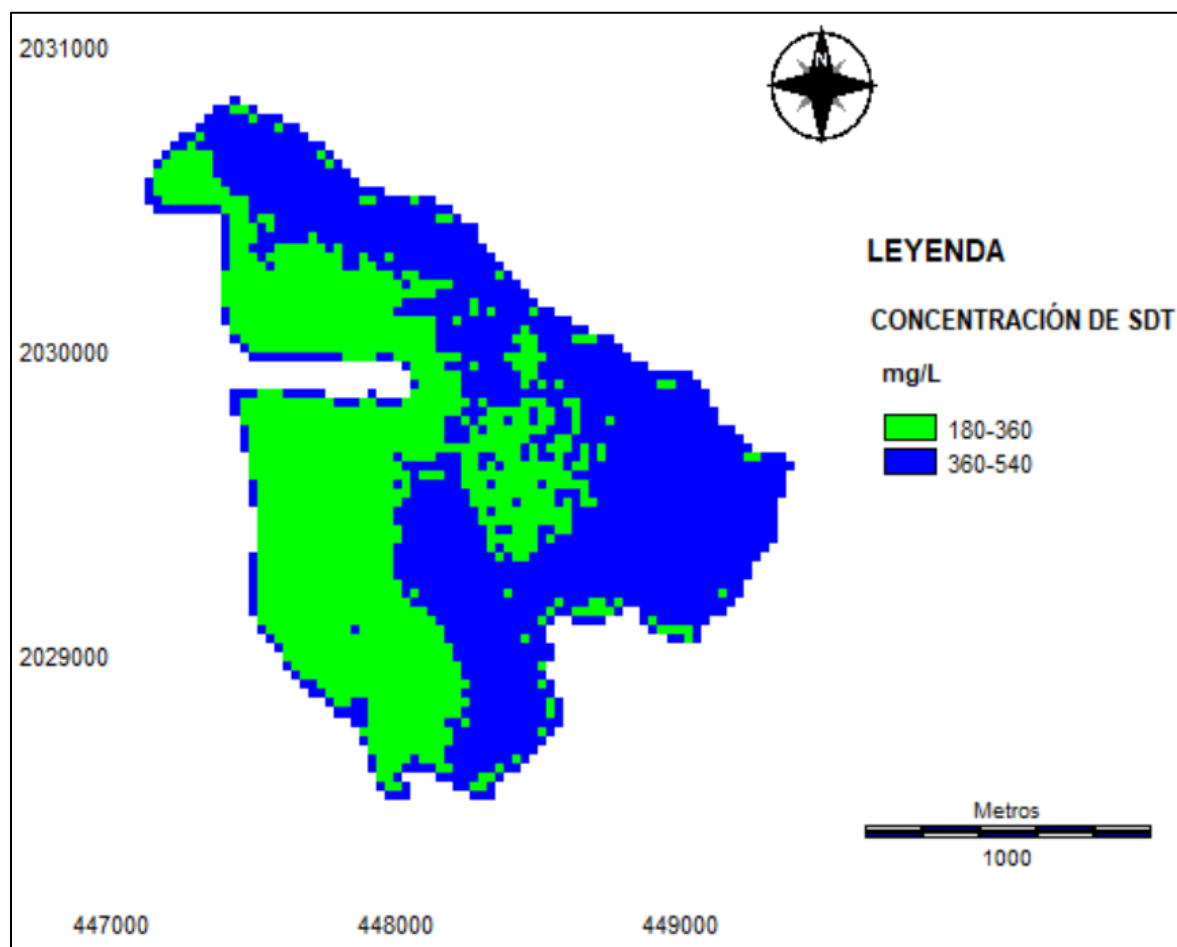


Figura 4.43 Concentración de SDT

El modelo de SDT (Figura 4.43), muestra principalmente concentraciones que van de 180 a 360 mg/L y de 360 a 540 mg/L en la laguna. Los valores de mayor concentración refieren de 360 a 540 en la parte norte, centro, noreste y noroeste del cuerpo de agua. Esta concentración indica valores menores a 1000 mg/L, respetándose el límite permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano.

CONCENTRACIÓN DE TURBIDEZ

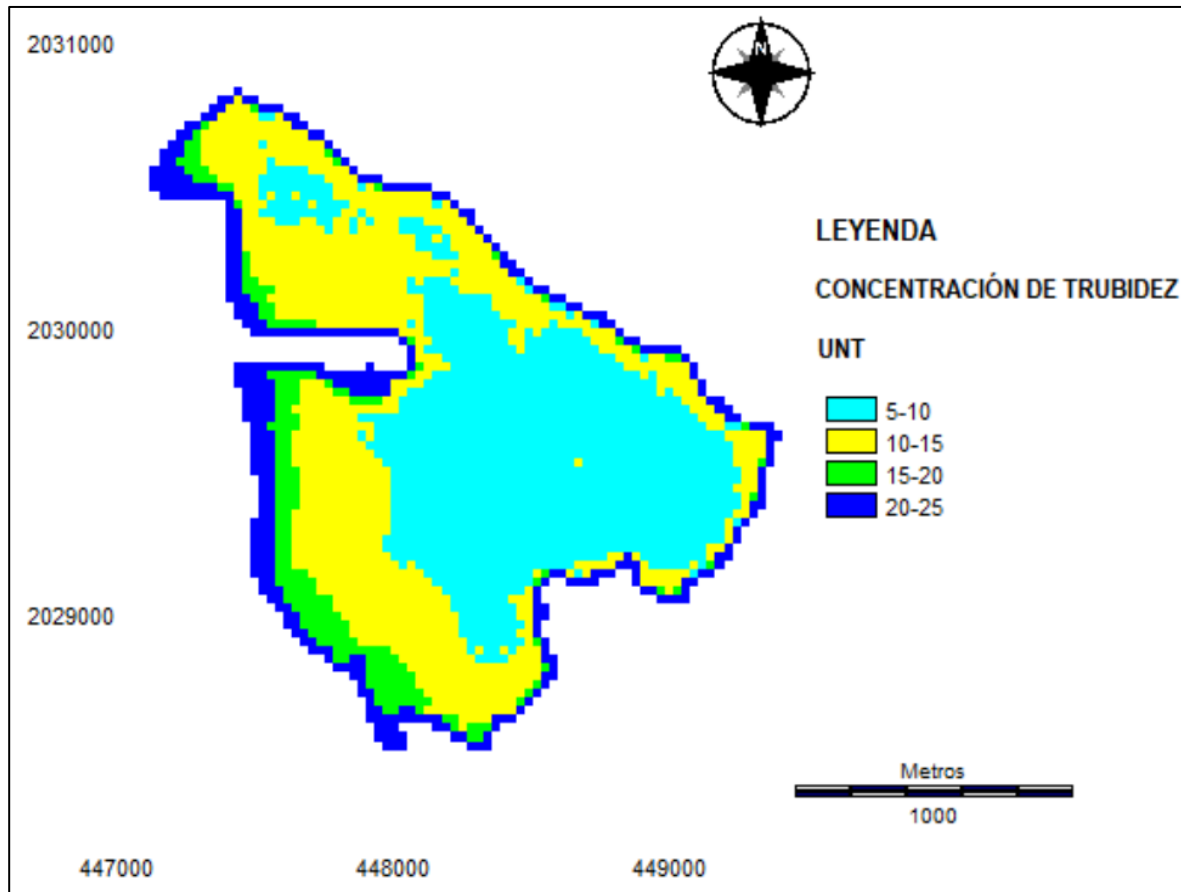


Figura 4.44 Concentración de Turbidez

En general, el modelo de turbidez (Figura 4.44), presenta excesivos niveles de turbiedad en todo el cuerpo de agua. El área donde existe la concentración de 5-10 UNT se relaciona con la zona de lavado de ropa, azolvamiento y la zona de manantiales que posiblemente al verse cubiertos por sedimentos fluctúan, causando mayor turbidez del agua.

Este parámetro no cumple con el límite permitido (4.0 UNT) de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano.

GRADO DE pH

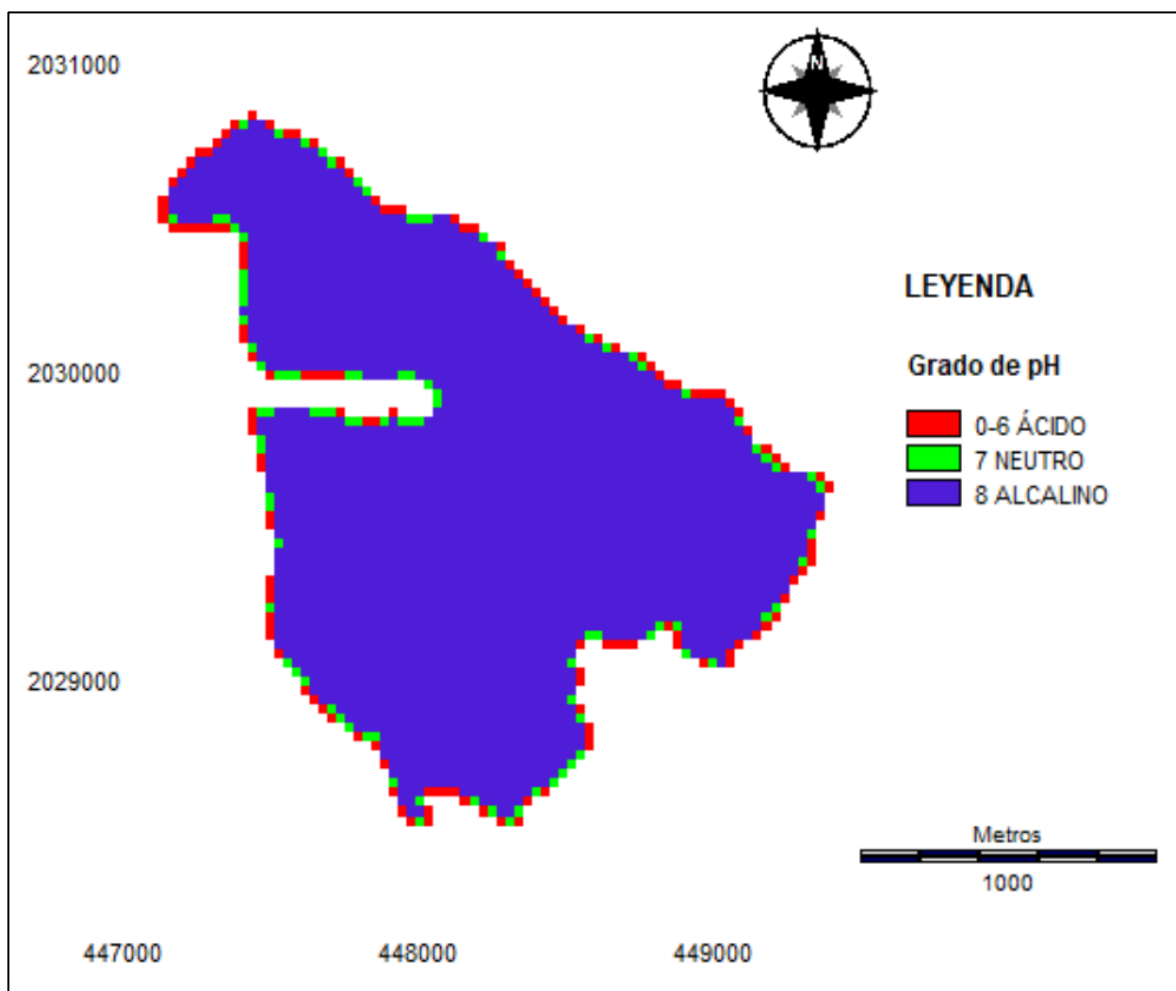


Figura 4.45 Grado de pH

El grado de pH representado en la Figura 4.45, indica que el cuerpo de agua posee un pH alcalino. De acuerdo, con el límite permitido (6.5 a 8.5) por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano, este parámetro cumple con la misma.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

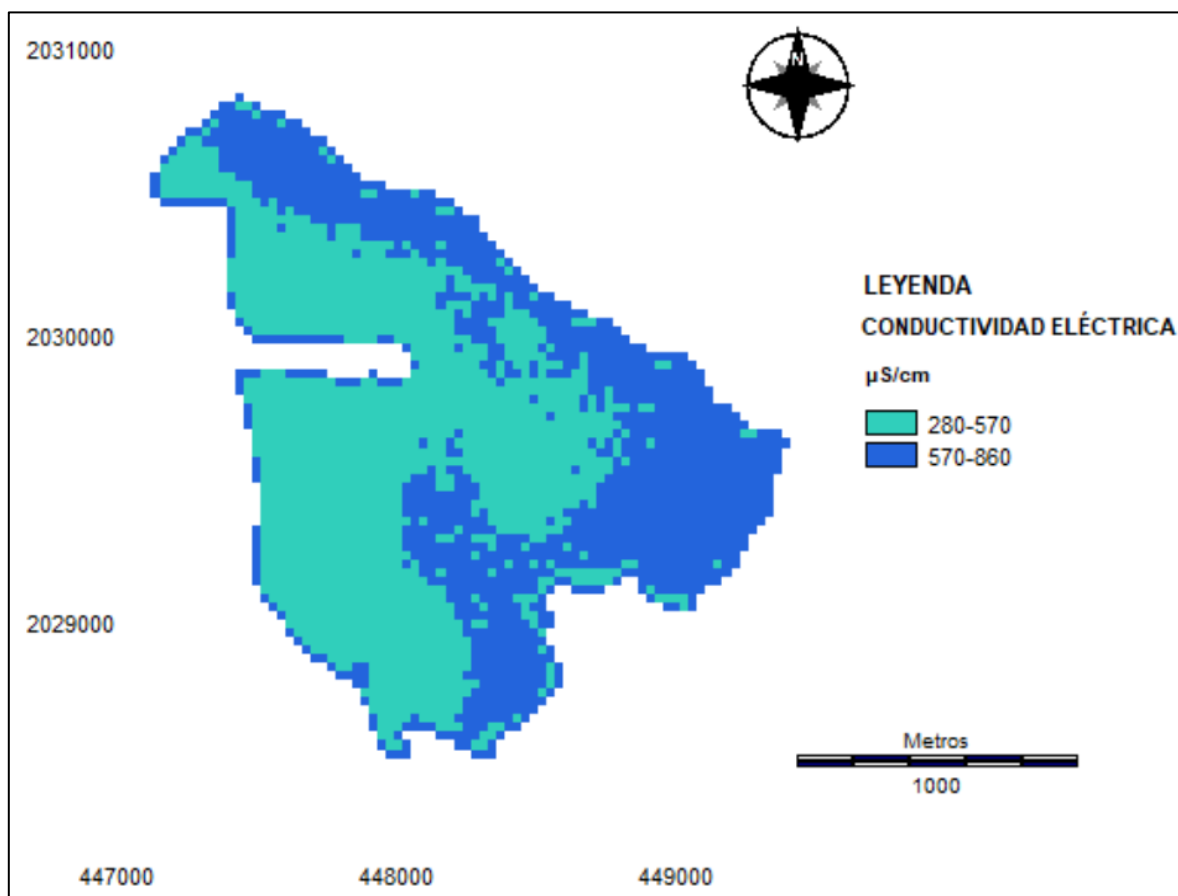


Figura 4.46 Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es importante para estimar el nivel de sales disueltas en el agua (Alania, et al., 2023), por lo que, el modelo de CE estimado (Figura 4.46), muestra una distribución representativa del rango 280 a 570 $\mu\text{S/cm}$ en el centro, sur, suroeste y noroeste seguido de la distribución de 570 a 860 $\mu\text{S/cm}$ al norte, noreste, noroeste y sureste de la laguna.

Este parámetro se considera en equilibrio, dado que, los SDT se encuentran dentro el límite permisible y fueron derivados de este parámetro.

Sentinel 2

CONCENTRACIÓN DE SDT

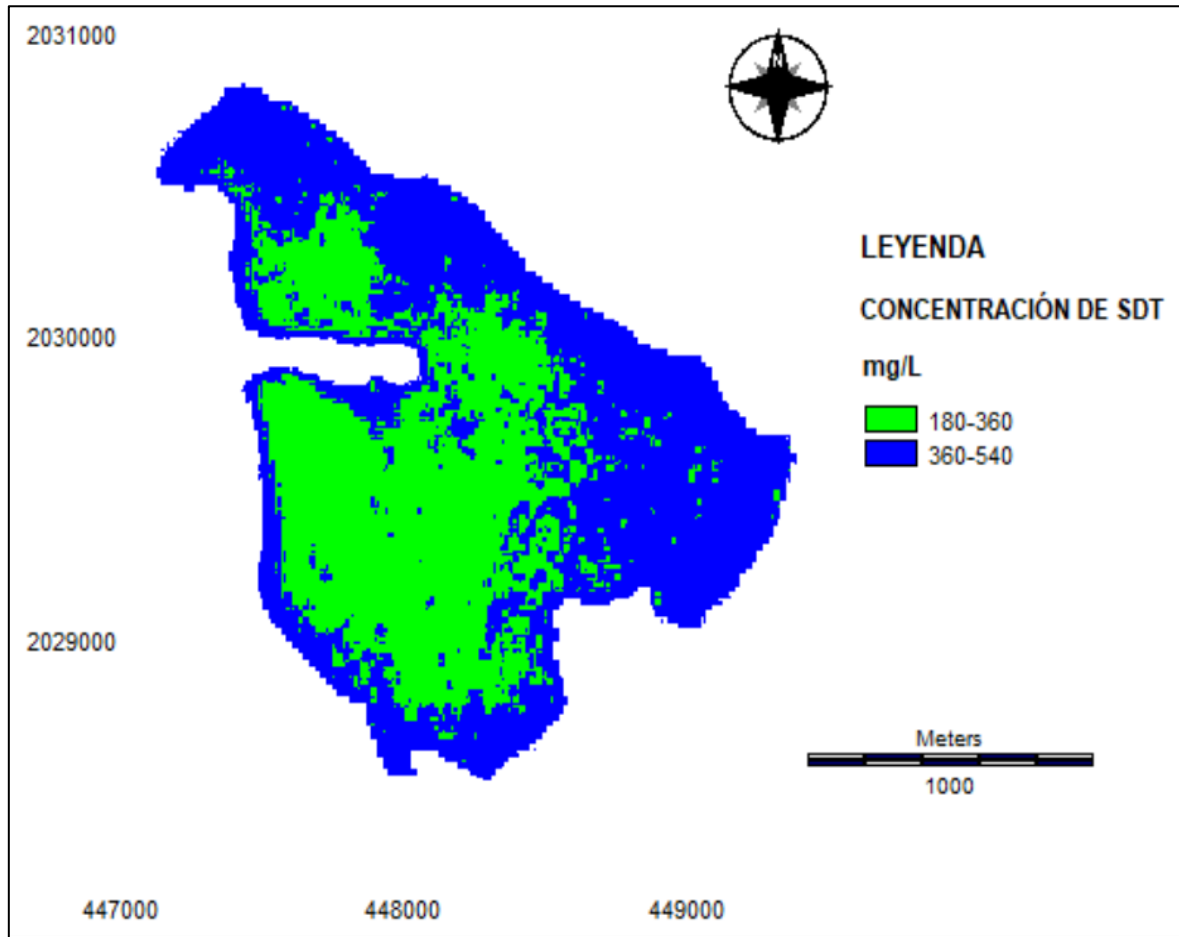


Figura 4.47 Concentración de SDT

De acuerdo con la Figura 4.47, correspondiente a la concentración y distribución de SDT señala los valores del parámetro dentro del límite permisible (1000 mg/L) de la NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano.

La diferencia entre las representaciones entre Landsat 8 y Sentinel 2, radica principalmente en una mejor discriminación de clases con Landsat 8.

CONCENTRACIÓN DE TURBIDEZ

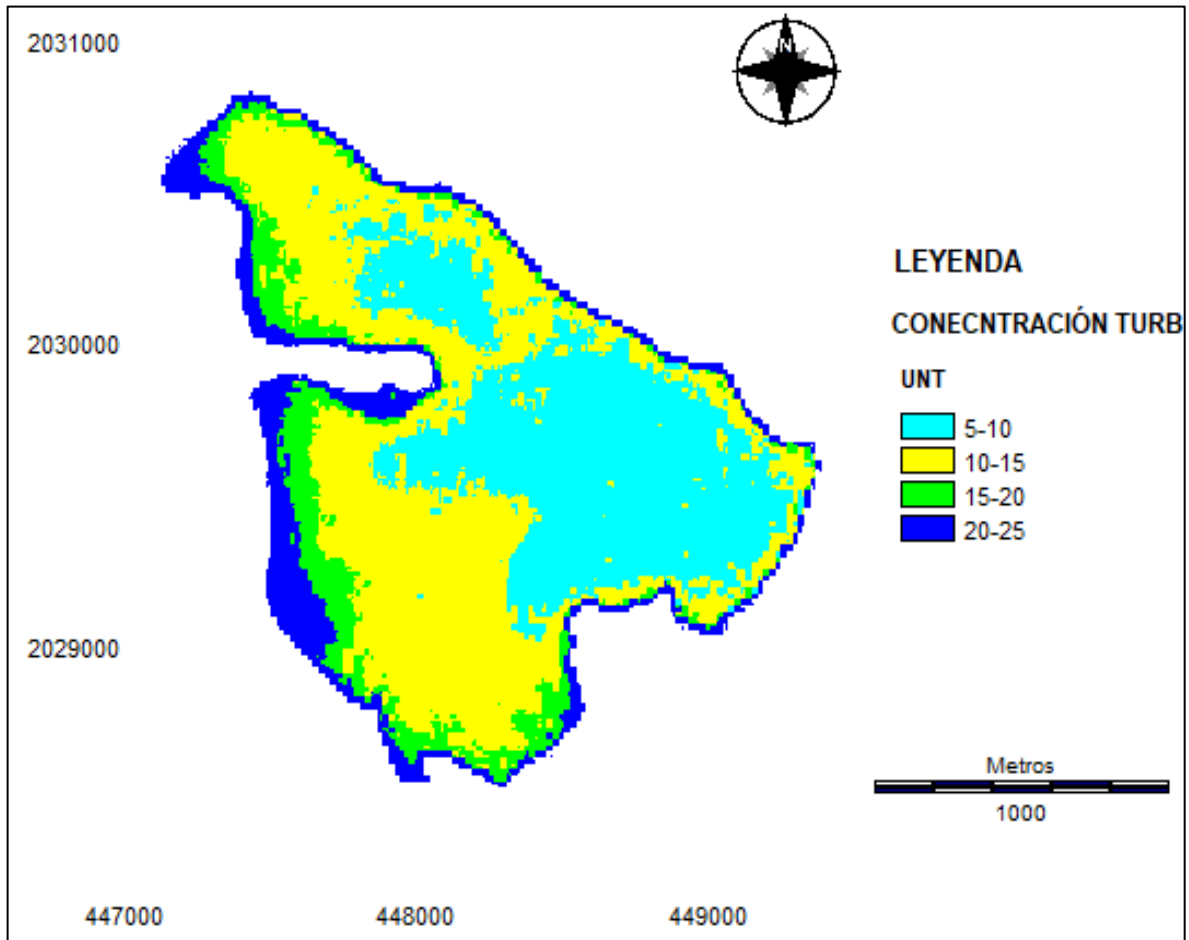


Figura 4.48 Concentración de turbidez

La Figura 4.48, destaca los altos valores en concentración de turbidez en toda la laguna, dado que, los rangos exceden el límite permisible (4.0 UNT) establecido por la NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Congregándose, valores más altos principalmente al sur, sureste, suroeste y noroeste del cuerpo de agua.

Considerando la representación Landsat 8, se puede observar una clasificación y discriminación de clases más clara.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

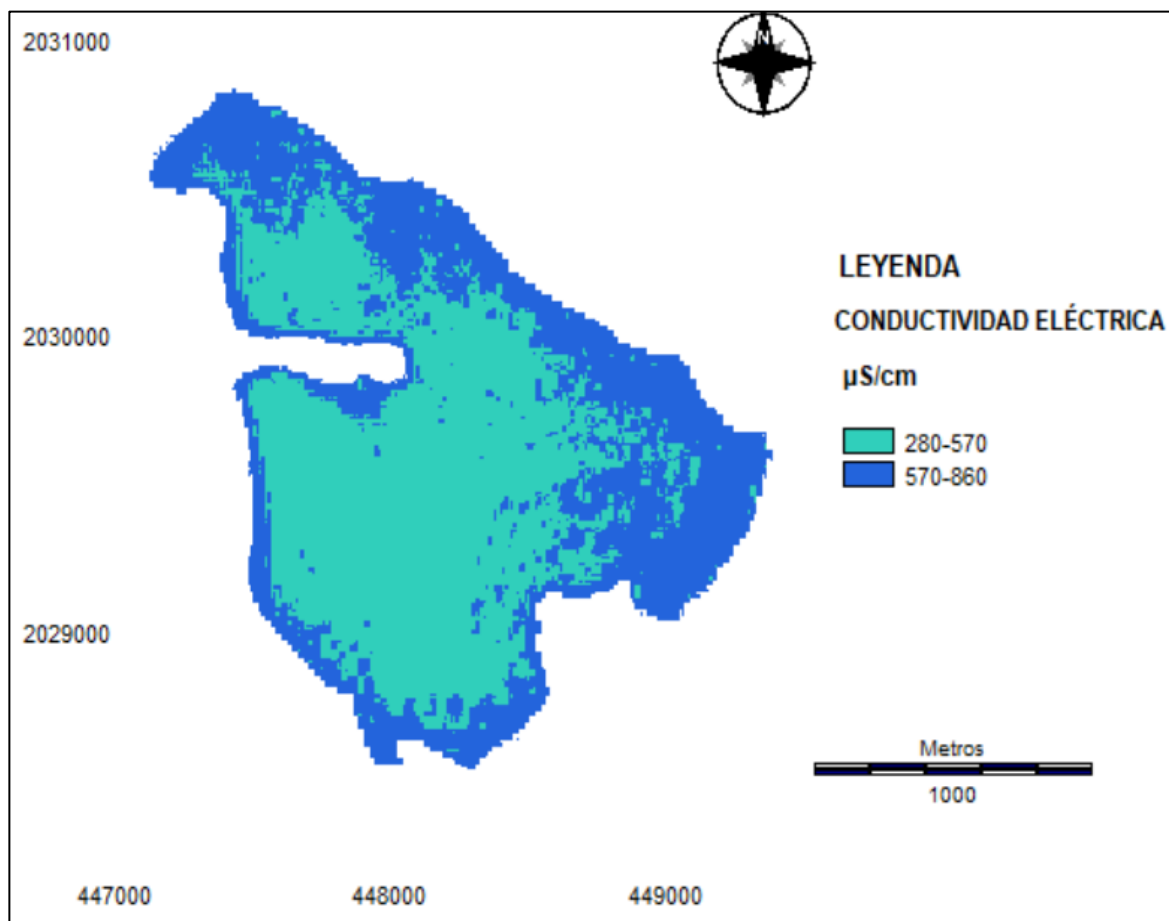


Figura 4.49 Conductividad eléctrica (CE)

El modelo de conductividad eléctrica (Figura 4.49), resalta una mayor distribución principalmente en los rangos de 280 a 570 $\mu\text{S/cm}$ (centro, suroeste y noreste y noroeste) y de 570 a 860 $\mu\text{S/cm}$ (norte, noreste, noroeste y sureste, suroeste).

Considerando que los SDT cumplen con el límite permisible de la NOM-127-SSA1-2021, y la relación que guardan con este parámetro (CE), se determinó una concentración adecuada.

4.10 Validación de resultados

De los 16 puntos muestreados, se utilizaron los puntos 2 y 9 para validar resultados mediante la estimación del error relativo por rangos.

A continuación, se presenta la validación de resultados de Landsat 8 (Tabla 4.19) y Sentinel 2 (Tabla 4.20).

Tabla 4.19 Estimación de error relativo entre la concentración real (in situ) y la concentración estimada (por rangos), Landsat 8.

LANDSAT 8					
PUNTO 2					
PARÁMETRO	CONCENT REAL	CONCENT ESTIMADA	MARCA DE CLASE	ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO (%)
SDT (mg/L)	408.96	360-540	450	-41.04	10%
Turbidez (UNT)	10	10-15	12.5	-2.5	25%
pH	8.30	>8			
CE (µS/cm)	639	570-860	715	-76	12%
PUNTO 9					
PARÁMETRO	CONCENT REAL	CONCENT ESTIMADA	MARCA DE CLASE	ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO (%)
SDT (mg/L)	364.16	360-540	450	-85.84	24%
Turbidez (UNT)	20	15-20	17.5	2.5	13%
pH	8.43	>8			
CE (µS/cm)	569	280-570	425	144	25%

En la Tabla 4.19, se observa el error relativo obtenido, de acuerdo, al valor real de campo y el valor estimado por los modelos de regresión. Tomando en cuenta el porcentaje de error que se obtuvo, se considera aceptable, ya que, en este caso al ser rangos no se especifica el valor puntual, por ello, aumenta el nivel de error.

Tabla 4.20 Estimación de error relativo entre la concentración real (in situ) y la concentración estimada (por rangos), Sentinel 2

SENTINEL 2					
PUNTO 2					
PARÁMETRO	CONCENT REAL	CONCENT ESTIMADA	MARCA DE CLASE	ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO (%)
SDT (mg/L)	408.96	360-540	450	-41.04	10%
Turbidez (UNT)	10	10-15	12.5	-2.5	25%
CE (μS/cm)	639	570-860	715	-76	12%
PUNTO 9					
PARÁMETRO	CONCENT REAL	CONCENT ESTIMADA	MARCA DE CLASE	ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO (%)
SDT (mg/L)	364.16	360-540	450	-85.84	24%
Turbidez (UNT)	20	20-25	22.5	-2.5	13%
CE (μS/cm)	569	570-860	715	-146	26%

Por otra parte, en Sentinel 2 (Tabla 4.20), todos los parámetros obtuvieron el mismo error relativo que en Landsat 8, excepto la CE con 26 %, esto se debe principalmente a que al ser rangos, el valor no es específico pero considerando los rangos, se sabe cuándo el valor está fuera o dentro del mismo, sin embargo, en la CE el valor real es de 569 μS/cm y el estimado no es específico pero está indicado mediante el rango 570-860 μS/cm (lo cual, indica que el valor real se encuentra dentro del rango estimado), pero en Landsat 8 el rango estimado fue de 280-570 μS/cm, por ello, cambia el error obtenido.

Considerando la validación de resultados por ambos satélites, Landsat 8 presentó un menor error relativo, corroborándose la eficiencia de predicción de parámetros por este mismo satélite. Esto puede atribuirse principalmente al desfase del día de obtención de imágenes, donde, Landsat 8 corresponde al día de muestreo y Sentinel 2 a un día anterior.

4.11 CONCLUSIONES

Según Mijangos & González (2016), la “Laguna Tuxpan” es un cuerpo de agua dulce, clasificado como cálido tropical somero, de origen tectónico formado en una depresión que permite almacenar agua debido a la baja porosidad de los sedimentos, las fuentes principales que la alimentan son corrientes de agua subterránea y escorrentías.

Considerando los análisis realizados y resultados obtenidos con base en los objetivos, algunas de las conclusiones respecto a la presente investigación desarrollada son:

Mediante la clasificación supervisada de coberturas y usos de suelo, se diagnosticaron las posibles fuentes emisoras de contaminación, encontrándose principalmente: el área urbana (lavado de ropa, turismo, azolvamiento de la laguna) y la agricultura (**Objetivo 1**)

El resultado de las concentraciones de SDT muestra variaciones que van 353.92 a 491.12 mg/L, en pH con valores de 7.8 a 8.4, la temperatura que se presenta en el cuerpo de agua varía de 21.5 a 28.8°C, de OD se encontraron valores de 4.60 a 6.30 mg/, la CE varía de 553 a 658 $\mu\text{S/cm}$ y la turbidez de 7 a 21 UNT [unidades nefelométricas de turbidez] (**Objetivo 2**).

El análisis de concentración de clorofila-a en el Laboratorio, dio como resultado la nula presencia de pigmentos del parámetro, por lo que se omitió y se descartó el análisis de eutrofización en la Laguna (**Objetivo 3**).

Las correlaciones y coeficientes (R^2) obtenidos por los modelos de Landsat 8 y Sentinel 2, concluyen que ambos sensores tuvieron una mejor correlación con el parámetro turbidez, sin embargo, se obtuvo un mejor coeficiente (R^2) con Landsat 8, principalmente para los parámetros: turbidez, sólidos disueltos totales [SDT] y conductividad eléctrica [CE] (**Objetivo 4**).

El modelo estimado de SDT presentó un mejor coeficiente ($R^2=0.86$) bajo la plataforma Landsat 8, pues, la respuesta espectral permitió una mejor predicción de la concentración y distribución del parámetro, corroborándose con la validación de puntos de muestreo **(Objetivo 5)**.

En este estudio, los modelos de predicción obtenidos por Landsat 8 y Sentinel 2 demuestran la factibilidad y confianza para el monitoreo y predicción de parámetros de calidad del agua, especialmente para: SDT, turbidez y CE. Sin embargo, se precisa una mejor respuesta bajo Landsat 8, esto posiblemente se deba más a la resolución espectral que a la espacial. Puesto que, los modelos no utilizan las mismas longitudes de onda, cada uno posee características espectrales propias para la captación de información **(Objetivo 6)**.

Las concentraciones obtenidas con relación a los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano indican que los parámetros que cumplen con los límites permisibles son: SDT con valores de 353.92 a 491.12 mg/L (1000 mg/L), pH de 7.8 a 8.4 (6.5 a 8.5), excepto la turbidez con valores de 7 a 21 UNT (4.0 UNT). El cual, puede verse alterado principalmente por actividades antropogénicas como: lavado de ropa dentro del cuerpo de agua y a actividades de azolvamiento en la laguna y considerando que los SDT están dentro el límite permisible y se obtuvieron a partir de la CE, esta última también se precisa en un nivel de concentración permitido.

Los parámetros que cumplen con los Criterios Ecológicos de Calidad de las Aguas CE-CCA-001/89 para Riego Agrícola (RA) son: pH con valores de 7.8 a 8.4 (4.5 a 9), CE con una variación de 553 a 658 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dentro el límite permisible (1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y los SDT de 353.92 a 421.12 mg/L, dentro el valor permitido (1000 mg/L). Mientras que en el Criterio de Protección a la vida acuática [PVA] el parámetro que cumple en la mayoría de los puntos con el límite permisible es la temperatura con variación de 21.5 a 28.8 °C, dentro del límite permisible (23 a 27 °C), exceptuando el punto de muestreo 16 con 28.8 °C y por debajo de 23 °C el punto 6 con 21.5 °C, sin embargo, el OD con valores de 4.60 a 6.30 mg/L, rebasa el límite permisible (5

mg/L) en todos los puntos. Por otro lado, en el Criterio para Uso Pecuario (UP) los SDT varían de 353.92 a 421.12 mg/L, cumpliendo con el límite permisible (1000 mg/L). De esta manera, los parámetros que presentan variación en todos y algunos de los puntos generan alerta, pues, este tipo de cambios genera presión en la vida de organismos, influyendo en la pérdida de algunas especies, que requieren más o menos concentraciones de OD, que las obtenidas en este estudio, o bien, la proliferación de otros organismos que sobreviven a ambientes con bajas concentraciones de OD y altas concentraciones de turbidez.

El Criterio: Uso para la Acuicultura, considera el pH, turbidez, OD y temperatura como los parámetros indispensables para la supervivencia de organismos acuáticos como: la Mojarra tilapia, Langostino, Carpa y Bagre. Tomando en cuenta el límite permisible establecido para cada especie, y las concentraciones obtenidas, se deduce que algunas especies que habitan en la laguna y que se consideran en este criterio, son afectadas en su desarrollo, crecimiento y producción, por la alteración fisicoquímica del agua, principalmente por la variación e incumplimiento del OD principalmente para el langostino, el pH y turbidez para: la Mojarra tilapia y el Bagre y la variación de temperatura para: el Langostino.

Sin embargo, es importante realizar un estudio más a fondo para determinar si los parámetros fisicoquímicos y otros parámetros considerados en los Criterios de Acuicultura y de Protección a la vida Acuática son aptos para desarrollo, crecimiento y producción de las especies en la laguna, además, de analizar los resultados obtenidos por otros estudios previos realizados.

Considerando estas variaciones e incumplimiento del límite permisible de fosfatos totales, nitrógeno amoniacal y coliformes fecales en algún punto de la “Laguna Tuxpan” en el Criterio para Protección de la Vida Acuática (PVA), y la presencia de grasas y aceites; la calidad del agua de la laguna se encuentra dentro de los límites máximos permisibles para el desarrollo de la vida acuática (Bravo, et al., 2016). Por su parte, Tomasini, et al., (2017), también corroboran la incidencia de contaminación por herbicida atrazina, coliformes fecales y sólidos suspendidos totales de origen humano y natural en la cuenca. Además, Bravo, et al., (2016), señalan que las

características fisicoquímicas y biológicas de la Laguna, indican que el cuerpo de agua experimenta una creciente influencia antropogénica, caracterizada por el vertido de aguas residuales, aporte de detergentes por lavaderos ubicados dentro del cuerpo de agua, deforestación, erosión de la subcuenca, entrada de sólidos y nutrientes por escorrentías en época de lluvias y por actividades de los restaurantes a la orilla de la laguna, presentando condiciones de estrés ambiental en algunos puntos para el oxígeno disuelto. Lo cual, coincide con resultados obtenidos en esta investigación.

4.12 OBSERVACIONES

En esta investigación, las principales bandas relacionadas para la estimación de parámetros son: B2 (Azul), B3 (Verde), B4 (Rojo), B6 (Infrarrojo de onda corta 1, Landsat 8 y Borde rojo 2 de Sentinel 2) y B7 (Infrarrojo de onda corta 2 Landsat 8 y Borde rojo 3 Sentinel 2).

A pesar de haber tenido correlaciones el parámetro pH en Landsat 8; el coeficiente no fue tan significativo, ya que, el este nivel de coeficiente es considerado hasta cierto punto como un nivel de consistencia bajo (Sent et al., 2021). La literatura considera correlaciones fuertes a partir de $R^2 > 0.7$ (López, 2021), por lo que, las representaciones graficas con estos valores de R^2 muestran diferencias notorias en cuanto a la distribución de parámetros.

Algunos estudios han coincidido en el uso de longitudes de onda como B2 (Azul), B3 (Verde), B4 (Roja) de sentinel-2 para la determinación del modelo de correlación de turbidez (Tham et al., 2022; Hossain et al., 2021) y Elhag et al., (2019) con las bandas B3 (Verde), B4 (Roja) y con las bandas B6 (Borde rojo 2) y B7 (Borde rojo 3) (Bielski & Toś, 2022; Sent et al., 2021; Elhag et al., 2019).

Hossain et al., (2021) en su estudio del río Tennessee, Chattanooga, utilizó las bandas B2 (Azul) y B4 (Roja) de Landsat 8 para el parámetro turbidez, las cuales también se utilizaron en el presente estudio para la correlación del modelo.

A lo largo de la investigación se asignó el término “Laguna” al cuerpo de agua, sin embargo, en razón a literatura consultada, práctica de campo, aplicación de encuestas locales y a los recorridos realizados para el reconocimiento y caracterización del área, considero el término correcto refiere a “Lago”, ya que, es alimentado por agua superficial procedente de escorrentías en tiempos de lluvia y manantiales.

4.13 RECOMENDACIONES

1. Investigar el área de estudio: Realizar un análisis preliminar del entorno y características para una mejor comprensión del contexto.
2. Definir con precisión la fecha de muestreo: Seleccionar fechas específicas que maximicen la representatividad de los datos recolectados.
3. Incrementar puntos de muestreo: Ampliar la cantidad de puntos de muestreo para mejorar la precisión y confiabilidad de los resultados.
4. Explorar la teledetección: Continuar investigando y aplicando innovaciones en teledetección para abordar problemáticas de calidad del agua y otros desafíos ambientales.
5. Utilizar encuestas efectivas: Implementar encuestas como herramienta clave para recopilar información relevante sobre condiciones ambientales y percepciones comunitarias.
6. Se sugiere mediante otro estudio, analizar a detalle los parámetros fisicoquímicos y parámetros contemplados en los Criterios de Acuicultura y de Protección a la Vida Acuática para determinar, si el cuerpo de agua es apto para desarrollo, crecimiento y producción de las especies acuáticas que se encuentran en la laguna.

Estas recomendaciones están orientadas a mejorar la calidad y efectividad de los resultados obtenidos.

5 CAPÍTULO V

5.1 BIBLIOGRAFÍA

- Abanto, E., L., M. (2023). Análisis del comportamiento espacial de la concentración de Clorofila-a, solidos suspendidos totales y transparencia en la laguna de Yarinacocha con imágenes satelitales, Ucayali 2022. [Disertación ingeniería, Universidad Nacional de Ucayali, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales]. Recuperado de: file:///C:/Users/garyo/Downloads/B7_2023_UNU_AMBIENTAL_2023_T_LUIS-ESTRADA_DEYCI-MACAHUACHI_V1.pdf
- Abdelmalik, K.W. (2018). Role of statistical remote sensing for Inland water quality parameters prediction. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 21(2), 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.002>
- Adjovu, G. E., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023a). Overview of the Application of Remote Sensing in Effective Monitoring of Water Quality Parameters. *Remote Sensing*, 15(7), 1938.
- Adjovu, G. E., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023d). Measurement of total dissolved solids and total suspended solids in water systems: a review of the issues, conventional, and remote sensing techniques. *Remote Sensing*, 15(14), 3534.
- Ariza A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Centro de Investigación Y Desarrollo En Información Geográfica Del IGAC -CIAF, 46. <https://doi.org/10.5751/ES-06710-190329>
- Ayala, L., Vega, B., Terán, G. & Martínez, G. (2015). Recuperado de: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://simec.conanp.gob.mx/Publicaciones2020/Publicaciones%20CONANP/Parte%202/Guias/2015%20Guia%20Pez%20diablo.pdf>

- Baeza, G. E. (2016). Calidad del Agua. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/BCN. Recuperado de: <https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/23747/2/Calidad%20del%20Agua%20Final.pdf>
- Beita, W., & Barahona, M. (2011). Fisico-química de las aguas superficiales de la Cuenca del río Rincón, Península de Osa, Costa Rica. Cuad. Inv. UNED, 2 (2): 157–179.
- Bhavsar P. D. (1984). Review of remote sensing applications in hydrology and water resources management in India. *Advances in Space Research*, 4(11), 193-200. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(84\)90411-3](https://doi.org/10.1016/0273-1177(84)90411-3)
- Bielski A. y Toś C. (2022). Remote Sensing of the Water Quality Parameters for a Shallow Dam Reservoir. *Applied Sciences*, 12(13), 6734. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12136734>
- Bravo, I. L. A., Sánchez, C. J. J., Aguilar, C. A. & Itzurieta, D. J. (2016). Limnología de la Laguna de Tuxpan. Aproximación Holística En el manejo integrado de las cuencas, para la conservación y recuperación de cuerpos de agua superficiales. “caso de estudio” p. 173.
- Bonansea M, Ledesma M, Bazán R, Ferral A, German A, O’Mill P, Pinotti L (2019a) Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 imagery for water clarity assessment in a reservoir. *J S Am Earth Sci*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102265>
- Bonansea M, Ledesma M, Rodríguez C, Pinotti L (2019b) Using new remote sensing satellites for assessing water quality in a reservoir. *Hydrol Sci J*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1552001>
- Büttner G., Korándi M., Gyömörei A., Köte Z. y Szabó, G. (1987). Satellite remote sensing of inland waters: Lake Balaton and reservoir Kisköre. *Acta Astronautica*, 15(6-7), 305-311. DOI: [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(87\)90165-2](https://doi.org/10.1016/0094-5765(87)90165-2)

- CAPRE, N. (1994): Normas de calidad del agua para consumo humano. Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centro América Panamá y República Dominicana. Primera edición revisada de, 20-21. Recuperado el día 13 de junio del 2024 de http://biblioteca.enacal.com.ni/bibliotec/Libros/pdf/CAPRE_Normas_Regional.pdf
- CE-CCA-001/89. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT.
- Chen, Q., Zhang, Y., & Hallikainen, M. (2007). Water quality monitoring using remote sensing in support of the EU water framework directive (WFD): A case study in the Gulf of Finland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 124(1-3), 157-166. doi:10.1007/s10661-006-9215-8
- Cruz Montes, E. C., & Durango Banquett, M. M. (2023). Evaluación de la calidad de agua de las ciénagas Guartinaja, Momil y Sapal–Córdoba mediante modelos estadísticos y percepción remota.
- Dirección de Desarrollo Académico, Dirección General de Asuntos del Personal Académico [DGAPA] (2014). Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota, Proyectos Universitarios PAPIIT (PAPIIT). En Portal de datos abiertos UNAM (en línea), México, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://datosabiertos.unam.mx/DGAPA:PAPIIT:IN107710>
- Deutsch, E. S., Alameddine, I., & El-Fadel, M. (2018). Monitoring water quality in a hypereutrophic reservoir using Landsat ETM+ and OLI sensors: how transferable are the water quality algorithms?. *Environmental monitoring and assessment*, 190, 1-19.
- Elhag M., Gitas I., Othman A., Bahrawi J. y Gikas P. (2019). Assessment of water quality parameters using temporal remote sensing spectral reflectance in arid

environments, Saudi Arabia. Water, 11(3), 556.
DOI: <https://doi.org/10.3390/w11030556>

- Escandón, G. C. G. & Cáceres V. M. E. (2022). Análisis de la calidad del agua mediante parámetros físicos químicos y macroinvertebrados bentónicos, presentes en la microcuenca del río San Francisco Gualaceo. [Trabajo de titulación previo Ingeniería ambiental, Universidad Salesiana Sede Cuenca]. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21649/1/UPS-CT009509.pdf>
- Ferdous, J., Rahman, M. T. U., & Ghosh, S. K. (2019, June). Detection of total dissolved solids from Landsat 8 OLI image in coastal Bangladesh. In The Proceedings of The International Conference on Climate Change (Vol. 3, No. 1, pp. 35-44).
- Franco R. J. (2013). Obtención de modelos de calidad del agua para el embalse Villa Victoria, estado de México, aplicando técnicas de percepción remota. [Disertación doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México]. Biblioteca Institucional
- Franco Suárez, P. V., & Rodríguez Bravo, M. B. (2016). Formulación de líneas estratégicas para un proyecto participativo de conservación de un ojo de agua de la parroquia el Condado, barrio Colinas del Norte, sector el Manantial y sector Rancho Bajo (Master's thesis, PUCE).
- García, A., G., A. (2022). Programa de Ingeniería Ambiental. Recuperado de: <https://www.ucentral.edu.co/noticentral/landsat-primeras-imagenes> (consultado 10 de septiembre de 2023).
- German, A. (2017). Alerta de explosiones algales en el Embalse San Roque a partir de datos satelitales diarios y mediciones de campo (Master's thesis).
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. (2016). A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. Sensors, 16(8), 1298.

- Giardino C., Bresciani, M., Villa, P. y Martinelli, A. (2010). Application of Remote Sensing in Water Resource Management: The Case Study of Lake Trasimeno, Italy. *Water Resour Manage* 24, 3885–3899 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9639-3>
- GIS & Beers (13 de enero 2022). Características de las imágenes Landsat 9. Recuperado el 06 de junio de 2024 de: <https://www.gisandbeers.com/caracteristicas-las-imagenes-satelite-landsat-9/>
- Gökçe, D. (2016). Algae as an Indicator of Water Quality. *Algae – Organisms for Imminent Biotechnology*. <https://doi.org/10.5772/62916>
- Gómez Díaz, J. L., & Dalence Martinic, J. S. (2014). Determinación del parámetro sólidos suspendidos totales (SST) mediante imágenes de sensores ópticos en un tramo de la cuenca media del río Bogotá (Colombia). *UD y la geomática*, (9).
- González M. L. C., Torres B. F. M., Rodríguez C.C. Torregroza E. A. C. y Sandoval R. J. A. (2018). Estimation of water quality parameters using Landsat 8 images: application to Playa Colorada Bay, Sinaloa, Mexico. *Applied Geomatics*, 10, 147-158. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0211-9>
- González-Márquez LC, Torres-Bejarano FM, Rodríguez-Cuevas C, Torregroza-Espinosa AC, Sandoval-Romero JA (2018a) Estimation of water quality parameters using Landsat 8 images: application to Playa Colorada Bay, Sinaloa, Mexico. *Appl Geomat*. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0211-9>
- Hanna instruments, (2020). ¿Por qué es importante el oxígeno disuelto en el agua?. Recuperado de: <https://www.hannacolombia.com/aqua/blog/item/por-que-es-importante-el-oxigeno-disuelto-en-el-agua>

- Hernández J. L. (2017). Evaluación de la calidad del agua en las Ciénagas de Lerma mediante percepción remota. [Disertación doctoral, Centro Interamericano De Recursos Del Agua]. Biblioteca Institucional
- Hossain A. A., Mathias C. y Blanton R. (2021). Remote sensing of turbidity in the Tennessee River using Landsat 8 satellite. *Remote Sensing*, 13(18), 3785. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13183785>
- Hossain, M. S., Akter, S. A., & Sarker, S. (2022). Environmental controls of plankton community dynamics in a sub-tropical river system of Bangladesh. *Aquatic Ecology*, 56(4), 1271-1286.
- IDEAM. (2019, enero 28). Metodología de Análisis. [ideam.gov.co. http://www.ideam.gov.co/web/agua/metodos-analiticos](http://www.ideam.gov.co/web/agua/metodos-analiticos)
- INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/>
- INEGI, Censo de Población y Vivienda 2013. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/>.
- Khan Academy (2024). La luz: ondas electromagnéticas, espectro electromagnético y fotones. Recuperado de: <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
- Kalele, A. S. (2019). Estimation and mapping of turbidity in the lower Charles River Using Landsat 8 OLI satellite imagery (Doctoral dissertation, Northeastern University).
- Karakaya, N., Evrendilek, F., Aslan, G., Gungor, K., & Karakas, D. (2011). Monitoring of lake water quality along with trophic gradient using landsat data.
- Kulkarni, A. (2011). Water quality retrieval from Landsat TM imagery. *Procedia Computer Science*, 6, 475-480.

- Landero, G. S. A. (2019). Evaluación de la calidad del agua de la laguna la Pólvora en Villahermosa, Tabasco. [Disertación de maestría en ingeniería, Instituto Tecnológico de Villahermosa]. Recuperado de: https://villahermosa.tecnm.mx/docs/departamentos/tesis/repositorio_de_tesis_2014_2020/Tesis%20Samuel%20Andres%20Landero%20Garcia.pdf
- López, L. W. J., A. (2021). Evaluación de la utilidad del sensor Sentinel-2 para la cartografía de cinco parámetros físicos-químicos de calidad de agua en la Laguna de Moyúa, Ciudad Darío, Matagalpa, febrero y julio 2020. [Disertación Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional Agraria, Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente] Recuperado de: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repositorio.una.edu.ni/4300/1/tnp10l864e.pdf>
- Lotfi, G., Ahmadi Nadoushan, M., & Abolhasani, M. (2019). The feasibility of using Landsat OLI images for water turbidity estimation in Gandoman wetland, Iran. *Journal of Radar and Optical Remote Sensing and GIS*, 2(3.4), 49-62.
- Ma Y, Xu N, Sun J, Wang XH, Yang F, Li S (2019) Estimating water levels and volumes of lakes dated back to the 1980s using Landsat imagery and photon-counting lidar datasets. *Remote Sens Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111287>
- Marenco, Y. (2010). El pez diablo: una especie exótica invasora. *Biocenosis*, 23(2). Recuperado de: <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/biocenosis/article/download/1239/1306/2776>
- Martínez, S. A.G. (2022). Propuesta de índice de percepción de calidad del agua costera (CAC): un caso de estudio en Ensenada, Baja California, México. [Disertación de Posgrado en Manejo de Ecosistemas de Zonas Áridas, Universidad Autónoma de Baja California]. Recuperado de:

<https://repositorioinstitucional.uabc.mx/server/api/core/bitstreams/7109baad-bbfb-41a8-a349-01292b37dcb3/content>

Masocha M, Dube T, Makore M, Shekede MD, Funani J (2018) Surface water bodies mapping in Zimbabwe using landsat 8 OLI multispectral imagery: a comparison of multiple water indices. *Phys Chem Earth*. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.05.005>

Matas P., J. (2000). Libro blanco del agua en España (Centro de Publicaciones Secretaría general Técnica Ministerio de Medio Ambi).

Mijangos, C. M. y González V. R. (2016). Área de Estudio. Laguna de Tuxpan, Gro. En R. G. Villela & A. G. B. Tarabay (Eds.). *Aproximación Holística En el manejo integrado de las cuencas, para la conservación y recuperación de cuerpos de agua superficiales. "caso de estudio".* (1ra ed., pp. 16-35). <http://hdl.handle.net/20.500.12013/2176>

Moore, F., Keshavarzi, B., & Ebrahimi, P. (2015). A GIS-based approach for detecting pollution sources and bioavailability of metals in coastal and marine sediments of Chabahar Bay, SE Iran. *Chemie der Erde*, 75, 185-195. Doi: 10.1016/j.chemer.2014.11.003

Ogashawara, I., Mishra, D. & Gitelson, A. (2017). Remote sensing of inland waters: background and State-of-the-Art. *Bio-optical modeling and remote sensing of inland waters*.

Oliveros O. J. (2014). Aplicación de percepción remota para la detección de florecimientos de algas en valle de bravo. [Disertación maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Biblioteca Institucional. URL: <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/147355/3/vnoronozTFM0123memoria.pdf>

Omondi, A. N., Ouma, Y., Kosgei, J. R., Kongo, V., Kemboi, E. J., Njoroge, S. M., ... & Kipkorir, E. C. (2023). Estimation and mapping of water quality parameters

using satellite images: a case study of Two Rivers Dam, Kenya. *Water Practice & Technology*, 18(2), 428-443.

Ordoñez, J. L. (2017). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. Recuperado de: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf

Ortega L. S. (2015). Retos para la gestión integrada del agua en la cuenca Laguna de Tuxpan, Gro. [Disertación maestría, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua]. Recuperado de: http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1334/T_051_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Page BP, Olmanson LG, Mishra DR (2019) A harmonized image processing workflow using Sentinel-2/MSI and Landsat-8/OLI for mapping water clarity in optically variable lake systems. *Remote Sens Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111284>

Papoutsas, C., & Hidjimitsis, G. (2013). Remote Sensing for Water Quality Surveillance in Inland Waters: The Case Study of Asprokremmos Dam in Cyprus. *Remote Sensing of Environment – Integrated Approaches*. <https://doi.org/10.5772/39308>

Pereira, M. A. (2023). Desafíos y oportunidades de Sentinel-2 en la monitorización de la calidad de las aguas continentales. [Disertación doctorado en Teledetección, Universidad de Valencia, Facultad de Física]. Recuperado de: <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=k6qbxepVFIU%3D>

Pizani, F. M., Maillard, P., Ferreira, A. F., & de Amorim, C. C. (2020). Estimation of water quality in a reservoir from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI sensors.

- ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 3, 401-408.
- Quispe Lujano, M. S. (2017). Estudio del comportamiento del oxígeno disuelto y parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la Bahía Interior de Puno.
- Radiación electromagnética (s.f). Universidad de Valencia. Recuperado de: <https://www.uv.es/DSSQA/documentacion/castellano/PDF/14%20RADIACIONES.pdf>
- Rivera, R. D.C. (2020). Estimación de parámetros de calidad de agua en la Laguna Santa Elena usando imágenes satelitales. [Disertación de maestría en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos, Universidad de Concepción]. Recuperado de: Repositorio de la Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/89106>
- Rodríguez, I. (01 de agosto de 2022). Contaminada, 59.1% del agua superficial de México. Recuperado de <https://www.eleconomista.com.mx/politica/Contaminada-59.1-del-agua-superficial-de-Mexico-20220801-0005.html>
- Sarapura C., R. & Morales A., R. (2019). “ESTUDIO “In Situ” DEL ESTADO FLUJOMÉTRICO Y FISICOQUÍMICO DEL RÍO LLUTA”. [Disertación de ingeniería, Universidad de Tarapacá, Facultad de Ciencias]. Recuperado de: <http://sb.uta.cl/CargadorTesis/TesisDigitalesARI/78653-Sarapura%20Rodrigo.pdf>
- Sayler, K. (2022). Manual del usuario de datos de Landsat 9 Versión 1.0. pág. 107. Disponible en línea: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-2082_L9-Data-Users-Handbook_v1.pdf (consultado el 10 de septiembre de 2023).
- Schmidt, C., Kuss, A., Mehta, A., Blevins, B. & Prados, A. (s.f.) Fundamentos de la percepción remota. Recuperado de:

https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Fundamentals_Session1_Spanish.pdf

Secretaría de Salud (SSA). NOM-127-SSA1-2021: Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

Sent, G., Biguino, B., Favareto, L., Cruz, J., Sá, C., Dogliotti, A. I., ... & Brito, A. C. (2021). Deriving water quality parameters using sentinel-2 imagery: A case study in the Sado Estuary, Portugal. *Remote sensing*, 13(5), 1043.

Snowate (s.f). Recuperado de: <https://www.snowate.com/es/knowledge-calculator/calculator/tds-ec-conversion.html>

Sepúlveda H. R.T. (2011). Diseño de modelos de calidad del agua mediante el uso de la percepción remota. [Disertación de maestría en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México]. Recuperado de: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/4562>

Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Peña, R., & Moreno, J. (2014). Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat-8. *UD y la geomática*, (9), 37-46. Recuperado de: <https://selper.org.co/papers-XVI-Simposio/Fotogrametria-PDI-Fusion-de-datos/FP11-Determinacion-de-componentes-opticamente-activos-Landsat.pdf>

Tham T. T., Hung T. L., Thuy T. T., Mai V. T., Trinh L. T., Hai C. V. y Minh T. B. (2022). Assessment of some water quality parameters in the Red River downstream, Vietnam by combining field monitoring and remote sensing method. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16730-0>

- Tomasini, C., Ruíz, P. R., Morales, G. M., & Tarabay, A. G. B (2017). Holistic Approach to Watershed Management and Freshwater Conservation and Rehabilitation: A Case Study.
- Torres, B., F., Arteaga-Hernández, F., Rodríguez-Ibarra, D., Mejía-Ávila, D., & González-Márquez, L. C. (2021). Water quality assessment in a wetland complex using Sentinel 2 satellite images. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(8), 2345-2356.
- Torrez A. J. A. (2024). Evaluación de la utilidad de los sensores remotos Landsat- 8 y Sentinel-2 para el monitoreo de calidad de agua en la Laguna de Apoyo, 2021. [Disertación de Ingeniería en Recursos Naturales con mención Gestión Ambiental, Universidad Nacional Agraria, Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente]. Recuperado de: <https://repositorio.una.edu.ni/4726/1/tnp10t694.pdf.pdf>
- Transformado Guerrero, gobierno del estado (2023). Apoya SEMAR en limpieza y desazolve de la Laguna de Tuxpan de Iguala. Recuperado de: <https://www.guerrero.gob.mx/2023/02/apoya-semar-en-limpieza-y-desazolve-de-la-laguna-de-tuxpan-de-iguala/> (Consultado el 12 de septiembre de 2023).
- Uribe O. (2022). Revisión de métodos de monitoreo de la calidad de agua por medio de herramientas de percepción remota y sistemas de información geográfica –(SIG) para Colombia [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. DOI: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/32324/5/UribeDaniela_2022_Metodolog%C3%ADasCalidadAgua.pdf
- Usali N. y Ismail M. H. (2010). Use of remote sensing and GIS in monitoring water quality. *Journal of sustainable development*, 3(3), 228.
- Vilasó C., J. E., C. G., S., & Pérez P. N. (2017). Algunos parámetros químico-físicos de las aguas del " Lago Azul" del poblado " El Cobre". *Revista Cubana de Química*, 29(3), 456-465.

- Wang, C., Li, W., Chen, S., Li, D., Wang, D., & Liu, J. (2018). The spatial and temporal variation of total suspended solid concentration in Pearl River Estuary during 1987–2015 based on remote sensing. *Science of the Total Environment*, 618, 1125-1138.
- Wetzel, R.G. (2001). *Limnology. Lake and River Ecosystems*. 3ra Edición. Academic Press. USA.
- Yang, H., Kong, J., Hu, H., Du, Y., Gao, M., & Chen, F. (2022). A review of remote sensing for water quality retrieval: progress and challenges. *Remote Sensing*, 14(8), 1770.
- Zhang, H., Yao, B., Wang, S., & Wang, G. (2021). Remote sensing estimation of the concentration and sources of coloured dissolved organic matter based on MODIS: A case study of Erhai lake. *Ecological Indicators*, 131, 108180.

5.2 ANEXOS

5.2.1 Acrónimos y abreviaturas

Acrónimos y abreviaturas	Significado
Chl-a	Clorofila-a
SST	Sólidos suspendidos totales
SS	Sólidos suspendidos
SDT	Sólidos disueltos totales
SD	Sólidos disueltos
pH	Potencial de hidrógeno
OD	Oxígeno disuelto
DO	Demanda de oxígeno
MODC	Materia orgánica disuelta coloreada
R ²	Coefficiente de determinación
MSI (Multispectral Instrument)	Sensor Instrumento multiespectral
NIR (Near Infrared spectroscopy)	Infrarrojo cercano
MSS (Sensor Multispectral Scanner)	Escáner multiespectral con sensor
TM (Thematic Mapper)	Mapeador temático
CE	Conductividad eléctrica
VNIR	Infrarrojo cercano
SWIR	Infrarrojo de onda corta
TIRS (Thermal Infrared Sensor)	Sensor infrarrojo térmico
IET	Índice de Estado Trófico
DS	Disco secchi
mg	Miligramos
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
SEMARNAT	Secretaría de Medioambiente y Recursos Naturales
S.f.	Sin fecha
NT	Nitrógeno total
PT	Fósforo total
DQO	Demanda química de oxígeno
NOM	Norma Oficial Mexicana
UNT por sus siglas en inglés NTU (Nephelometric Turbidity Unit)	Unidades nefelométricas de turbidez
Nm	Nanómetros
et al.	Abreviatura que se utiliza para acortar las citas en el texto que incluyen a tres o más autores.
λ	Longitud de onda
OLI (Operational Land Imager)	Generador de imágenes terrestres operativo
TIRS (Thermal Infrared Sensor)	Sensor infrarrojo térmico
USGS (United States Geological Survey)	Servicio Geológico de los Estados Unidos

AEE o por sus siglas en inglés ESA (European Space Agency)	Agencia Espacial Europea
ND	Número Digital
TOA (Top of Atmosphere Reflectance)	Reflectancia superior de la atmósfera
MDE	Modelo Digital de Elevación
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
GPS (Global Positioning System)	Sistema de Posicionamiento Global
GloVis (Global Visualization Viewer)	Visor de visualización global
°C	Grados centígrados
mm	Milímetros
T	Temperatura
mg/L	Miligramo por litro
%	Porcentaje
cm	Centímetro
μS/cm	MicroSiemens por centímetro
μm	Micrómetro
K	Factor de conversión

5.2.2 Encuesta aplicada



ENCUESTA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
Instituto Interamericano de Tecnologías y Ciencias del Agua



Nombre: _____

Sexo: _____

Edad: _____

Ocupación: _____

1. ¿CÓMO CALIFICA LA CALIDAD DEL AGUA DE LA “LAGUNA TUXPAN”?

- a) Excelente b) Buena c) Mala d) Muy mala

2. DE LAS ACTIVIDADES QUE SE REALIZAN O SE HAN REALIZADO ¿CUÁL CONSIDERA ES LA PRINCIPAL QUE AFECTA LA CALIDAD DEL AGUA EN LA LAGUNA?

- a) Azolvamiento
b) Vertido de aguas residuales/domesticas
c) Vertido de desechos restauraneros
d) Actividad turística
e) Lavado de ropa en la laguna
f) Otros _____

3. ¿CONOCE ALGÚN VERTEDERO DE AGUAS RESIDUALES, DOMÉSTICAS O RESTAURANTERAS A LA LAGUNA?

- a) SI
b) NO
c) Cuál (es) _____

4. EN SU CASO ¿QUÉ HACE CON LOS DESECHOS QUE SE GENERAN EN SU VIVIENDA O ESPACIO DE TRABAJO?

- a) Hay un tiradero de basura y ahí la coloco
- b) Lo recolecta el camión de basura
- c) La tiro en mi casa

5. ¿QUÉ PEZ O CRUSTÁCEO SE COMERCIALIZA PRINCIPALMENTE?

6. ¿QUÉ OTRAS ESPECIES CONOCE QUE HABITAN EN LA “LAGUNA TUXPAN”?

7. ¿HA NOTADO QUE ALGUNA ESPECIE HA DISMINUIDO O HA DESAPARECIDO?

8. ¿CONOCE ALGUNA INICIATIVA O ACTIVIDAD REALIZADA POR AUTORIDADES LOCALES O MUNICIPALES EN PRO DEL CUIDADO DE LA LAGUNA?