



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Estimación de la distribución espacial del estado trófico de la presa Miguel Alemán mediante el uso de imágenes OLI (L8/9)

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Janeth Arciga Navarrete

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

A Dios, por la sabiduría, fortaleza y ventura otorgadas.

A mis padres, Gabriel y Bertha. Por su amor, apoyo y paciencia incondicionales a lo largo de mi vida. Por sus sacrificios y por siempre creer en mí. No hay palabras suficientes para expresar mi gratitud por todo lo que han hecho por mí. Este logro es tanto mío como suyo.

A mi director de tesis, M.I. Rodrigo Sepúlveda, por su guía y apoyo incondicional, y por creer en mí en este proceso. Por la oportunidad que me brindó para expandir mis límites y desafiarme a mí misma.

A mis amigos, con quienes compartí este viaje académico. Por su constante aliento, sus motivaciones y los buenos momentos que compartimos juntos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por la posibilidad de formar parte de su prestigiosa comunidad académica, por mi desarrollo personal y académico durante mi estancia.

A todos los que han sido parte de este proceso, por su apoyo y consejos.

¡Gracias!

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	7
JUSTIFICACIÓN	9
OBJETIVO GENERAL.....	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
ALCANCES Y LIMITACIONES	12
I. ANTECEDENTES.....	13
II. MARCO TEÓRICO	16
2.1. CONTAMINACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA.....	16
2.2. TURBIEDAD	18
2.3. DISCO DE SECCHI.....	19
2.4. LIMNOLOGÍA: CALIDAD DEL AGUA EN LAGOS Y EMBALSES	21
2.5. RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA	22
2.6. FIRMA ESPECTRAL.....	25
2.7. PERCEPCIÓN REMOTA.....	27
2.8. MODELACIÓN MULTIVARIABLE	31
III. METODOLOGÍA	36
3.1. SITIO DE ESTUDIO	36
3.2. MEDICIONES EN CAMPO.....	44
3.3. ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO O ÍNDICE DE CARLSON.....	46
3.4. PLATAFORMA LANDSAT	47
3.5. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS BANDAS.....	51
IV. RESULTADOS	56
4.1. TRABAJO DE CAMPO	56
4.2. MODELOS.....	59
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	68
VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70
GLOSARIO.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema Cutzamala y elementos que lo conforman (CONAGUA, 2017).	10
Figura 2. Línea del tiempo del desarrollo de observación de la Tierra (Suárez, 2013).	14
Figura 3. Disco de Secchi (Manzoli y Paiva, 2011).	20
Figura 4. Descripción de la radiación electromagnética con campos eléctricos y magnéticos (Hernández y Montaner, 2009).	23
Figura 5. Partes de una onda (Elaboración propia).	23
Figura 6. Tipos de energía electromagnética en función de la longitud de onda (basado en: Hernández y Montaner, 2009 y Ordóñez., 2012).	24
Figura 7. Firmas espectrales características de diversas superficies (Sepúlveda, 2011).	26
Figura 8. Firmas espectrales en diferentes materiales a través de sensores remotos (Escamilla Canales, 2010).	27
Figura 9. Procedimiento para la obtención de datos a través de la percepción remota (Geomatik sin fronteras, s.f.).	28
Figura 10. Configuración de bandas espectrales (Ruiz, 2002, como citado en Sepúlveda, 2011).	30
Figura 11. Niveles Digitales de una banda o imagen satelital (Ingeoexpert, s.f.).	30
Figura 12. Ejemplo de plataformas: terrestre, aerotransportado y espacial, respectivamente. (basado en Universidad Nacional de Quilmes, s.f. y Universidad de Sonora, 2021).	31
Figura 13. Ejemplo de coeficientes de correlación negativo, positivo y nulo (Academia Balderix, 2024).	34
Figura 14. Ubicación del municipio de Valle de Bravo en el Estado de México	36
Figura 15. Orografía del municipio Valle de Bravo (mun. de Valle de Bravo, 2022).	37
Figura 16. Relieve del Municipio Valle de Bravo (mun. de Valle de Bravo, 2022).	38
Figura 17. Regiones Hidrológicas de México (Semarnat, 2014).	40
Figura 18. Regiones Hidrológicas Administrativas de México (Semarnat, 20214).	41
Figura 19. Presa “Miguel Alemán” en Valle de Bravo (Google maps, 2024).	42
Figura 20. Porcentaje de almacenamiento de la presa Valle de Bravo en el periodo 2001-2021 (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM., 2021).	43
Figura 21. Coordenadas donde se realizaron las mediciones (Earth Explorer, 2024).	45
Figura 22. Niveles tróficos de los cuerpos de agua (basado en Urrutia, 2009, como citado en Figueroa, 2016).	47
Figura 23. Landsat 9 y 8 en órbita para la toma de fotografías de la Tierra (Earth Resources Observation and Science Center, 2021).	48
Figura 24. Instrumentos OLI-2 (a) y TIRS-2 (b) de Landsat 9 (NASA, s.f.).	50
Figura 25. Ubicación de las bandas de Landsat 9 en las diferentes longitudes de onda (NASA, s.f.)... ..	50
Figura 26. Imagen satelital descargada de USGS el 6 de octubre del 2023	52

Figura 27. Recorte de la zona de estudio en color natural: Combinación de bandas 2,3,4 (Elaboración propia).....	52
Figura 28. Polígono del embalse (Elaboración propia).....	53
Figura 29. Polígono creado a partir de las nubes que se encuentran dentro del cuerpo de agua (Elaboración propia).....	53
Figura 30. Penetración luminosa en la presa Miguel Alemán en Valle de Bravo medida con DS (Elaboración propia).....	57
Figura 31. Índice de Estado Tráfico de la presa Miguel Alemán en Valle de Bravo obtenido a partir de la penetración luminosa (Elaboración propia).....	58
Figura 32. Penetración luminosa en el embalse de la presa “Miguel Alemán” ubicada en Valle de Bravo el 06 de octubre del 2023 (Elaboración propia).....	60
Figura 33. Índice de Estado Tráfico en el embalse de la presa “Miguel Alemán” ubicada en Valle de Bravo el 06 de octubre del 2023 (Elaboración propia).....	61
Figura 34. Penetración luminosa en el embalse de la presa “Miguel Alemán” ubicada en Valle de Bravo el 14 de octubre del 2023 (Elaboración propia).....	64
Figura 35. Índice de Estado Tráfico en el embalse de la presa “Miguel Alemán” ubicada en Valle de Bravo el 14 de octubre del 2023 (Elaboración propia).....	65
Figura 36. Penetración luminosa en el embalse de la presa “Miguel Alemán” ubicada en Valle de Bravo el 30 de octubre del 2023 (Elaboración propia).....	66
Figura 37. Índice de Estado Tráfico en el embalse de la presa “Miguel Alemán” ubicada en Valle de Bravo el 30 de octubre del 2023 (Elaboración propia).....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo de factores bióticos y abióticos presentes en los ecosistemas acuáticos (basado en Pérez y Restrepo., 2008).	21
Tabla 2. Regiones del espectro electromagnético (Fontal et al, 2005).	25
Tabla 3. Clasificación de los sensores remotos (basado en Lira, 1987 y Pérez, 2007).	29
Tabla 4. Tipos de suelo en Valle de Bravo (basado en mun. de Valle de Bravo, 2022).	37
Tabla 5. Clasificación del territorio de Valle de Bravo por ocupación del suelo (mun. de Valle de Bravo, 2022).	38
Tabla 6. Población económicamente activa por año según el sector de actividad económica 2020 (mun. de Valle de Bravo, 2022).	39
Tabla 7. Fuentes de alimentación del embalse en 1991 (Bandeas y Gonzales, s.f.).	43
Tabla 8. Coordenadas UTM donde se realizaron las mediciones de penetración luminosa con el DS (Elaboración propia).	44
Tabla 9. Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua (basado en Modificado de Carlson, 1977;1980, como citado en Orquera y Cabrera, 2020).	46
Tabla 10. Bandas espectrales OLI y TIRS pertenecientes a Landsat 9 (USGS, 2022).	49
Tabla 11. Características principales de Landsat 9 (basado en NASA, s.f.).	51
Tabla 12. Porcentajes de reflectancias de las siete bandas obtenidos en cada coordenada (Elaboración propia).	54
Tabla 13. Mediciones de profundidad de penetración luminosa medidos con el DS e IET (Elaboración propia).	56
Tabla 14. Porcentaje de error existente entre los datos obtenidos en campo y los modelos generados (Elaboración propia).	62

INTRODUCCIÓN

El planeta está compuesto en un 70% de agua, y este recurso natural es uno de los más importantes, ya que no solo sostiene la vida humana, sino también la de los animales y la vegetación, manteniendo un equilibrio en los ecosistemas. Existen dos tipos principales de agua: superficial y subterránea. Las aguas superficiales incluyen ríos, lagos, de transición y costeras. Mientras que las aguas suspendidas, freáticas, confinadas y artesianas forman parte de las aguas subterráneas.

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), el agua destinada para usos y consumo en México proviene en un 64% de aguas superficiales, mientras que el 36% proviene de aguas subterráneas. A diferencia de las aguas subterráneas, las aguas superficiales son de fácil acceso, pero también son más propensas a contaminarse.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), dentro de los usos no consuntivos en México, se tienen enlistadas las hidroeléctricas y la conservación ecológica. Para los usos consuntivos, se tienen enlistadas las siguientes actividades: usos agrícolas, donde se incluye la acuicultura, pecuaria, entre otros; uso industrial integrado, que abarca los sectores agroindustriales, de servicios, industrial y comercial; las termoeléctricas; y el abastecimiento público, que incluye el uso doméstico y el público urbano.

Cuando la calidad del agua no es la adecuada, especialmente en el rubro del abastecimiento público, la población puede contraer enfermedades diarreicas como el cólera, la tifoidea y la disentería. Dichas enfermedades son de las principales causas de muerte en niños, no obstante, la tasa de mortalidad ha disminuido con el tiempo gracias a diversas campañas gubernamentales.

El monitoreo de la calidad en las masas de agua destinadas al abastecimiento de agua potable es otra medida a considerar para prevenir las enfermedades. El monitoreo de la calidad del agua se puede realizar mediante el muestreo en el sitio de estudio que analizan diferentes parámetros establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas y que son importantes para definir el nivel de contaminación y por consiguiente, su calidad.

Además, este muestreo tradicional puede complementarse con tecnologías como la percepción remota. Esta tecnología utiliza satélites y drones para recolectar datos sin tener que estar en contacto directo con el objeto estudiado y utilizar la información en el desarrollo de modelos matemáticos. La combinación de estos dos métodos nos proporciona resultados integrales, favoreciendo la toma de decisiones y protegiendo la salud pública.

En esta tesis se desarrollan dos modelos para la presa Miguel Alemán, ubicada en Valle de Bravo. Este embalse es importante debido a su contribución al Sistema Cutzamala, que abastece de agua potable a la Zona Metropolitana del Valle de México. Los modelos nos permiten estimar la penetración luminosa en el agua, así como su índice de estado trófico.

En el capítulo I, se detalla acerca de los muestreos en campo y la percepción remota, así como la aplicación en distintos proyectos de estas técnicas para monitoreo de calidad del agua. En el capítulo II, se desarrolla todo el marco teórico conveniente para comprender los fundamentos científicos de la percepción remota. En el capítulo III se describe el procedimiento que se llevó a cabo, tanto en el sitio de estudio, como los cálculos realizados posteriormente para llegar a los resultados, los cuales se muestran en el capítulo IV. Finalmente, se discuten los resultados y se presentan las conclusiones en los capítulos V y VI, respectivamente.

JUSTIFICACIÓN

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es una de las áreas urbanas e industriales más extensas y pobladas del mundo, ubicada dentro de la cuenca del Valle de México. Esta región comprende, no solo la Ciudad de México sino sus alrededores, y está experimentando un crecimiento continuo, por lo que diversos aspectos relacionados con el suministro y distribución de agua potable se han convertido en desafíos de gran importancia para esta área (Comisión Nacional del Agua, 2005).

El agua renovable per cápita se refiere a la cantidad media anual de agua natural disponible por persona en una región específica. Según la Comisión Nacional del Agua (2022), en la ZMVM el agua renovable per cápita es de 145 m³/hab/año. Esta situación indica un nivel de estrés hídrico preocupante y una escasez absoluta de agua en la región, esperando que para el 2030, el estrés hídrico sea de 126.2%.

Para poder satisfacer la demanda creciente de agua en esta región, se requiere de diversas fuentes de suministro. Actualmente, aproximadamente el 54.07% del agua proviene de pozos de extracción de agua subterránea, con un estimado entre 400 y 600 pozos distribuidos en varias alcaldías de la Ciudad de México. Además, aproximadamente el 2.93% del agua proviene de manantiales, mientras que el Sistema Lerma contribuye con un 13.68%. Uno de los principales proveedores de agua para la ZMVM es el Sistema Cutzamala, que representa cerca del 29,32 % del suministro total (SACMEX, 2019).

El Sistema Cutzamala, es una infraestructura hidráulica ubicada en varios estados de la República Mexicana como Michoacán, Estado de México y Ciudad de México, diseñada para proporcionar el abastecimiento de agua potable. Este sistema incluye siete presas que actúan como derivadoras y de almacenamiento. Trabajan en conjunto con seis plantas de bombeo que elevan el agua a 1,100 metros aproximadamente, para una distribución eficiente a lo largo de una extensa red de tuberías y canales (Arredondo, 2002 y Comisión Nacional del Agua, 2017). A continuación, se ilustra en la figura 1 el Sistema Cutzamala y las presas que lo conforman.



Figura 1. Sistema Cutzamala y elementos que lo conforman (CONAGUA, 2017).

En México, en los últimos años se ha enfrentado una crisis hídrica debido al cambio climático que ha provocado alteraciones en el régimen de precipitaciones. En junio de 2023, se observó una reducción de lluvia a nivel nacional, con 39.2 mm registrados. Esta cifra contrasta significativamente con el promedio, el cual se sitúa en 99.8 mm, evidenciando un déficit a nivel nacional de 60.6 mm, marcando escasez de precipitaciones (Centro de Investigación en Política Pública, 2023 y CONAGUA, 2023).

Entre las siete presas que integran el Sistema Cutzamala, tres sobresalen por su importante contribución al suministro de agua, siendo la Presa Valle de Bravo la de mayor capacidad de almacenamiento. Sin embargo, debido a las condiciones climáticas mencionadas, estas presas se ven afectadas. El 31 de mayo del 2024, la presa “El Bosque” registró el 30.46% de su capacidad, mientras que la presa “Villa Victoria” y la presa “Valle de Bravo” registraron el 24.61% y 27.88% de su capacidad, respectivamente (CONAGUA, 2024).

Por los porcentajes de almacenamiento mencionados antes, y de acuerdo con CONAGUA (2024), en mayo del 2024 la suma del almacenamiento de las tres presas principales con respecto al almacenamiento total fue del 27.77%.

El hecho de tener una disminución de los niveles de agua en las presas que son destinadas para el abastecimiento de la población, trae repercusiones en la calidad. Cuando el volumen del agua es bajo, los contaminantes que generalmente se encuentran presentes tienen una mayor concentración, arriesgando la salud pública e incrementando la dificultad en los procesos de potabilización.

Además de la problemática hídrica que atraviesa la presa Valle de Bravo, con el paso del tiempo se ha registrado un aumento en los niveles de contaminación derivados de diferentes factores como la descarga de aguas residuales de las poblaciones aledañas, descarga de contaminantes provenientes de las granjas y actividades de la agricultura (Observatorio Ciudadano de la subcuenca de Valle de Bravo-Almanaco, s.f.).

Existen otros factores presentes como la erosión del suelo y las actividades recreativas que contribuyen a la contaminación del cuerpo de agua, por lo que el monitoreo de la calidad del agua en la Presa Valle de Bravo es crucial debido a su papel central como el principal proveedor de agua del Sistema Cutzamala.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo predictivo que estime la penetración luminosa y el índice de estado trófico en las aguas de la presa Miguel Alemán ubicada en Valle de Bravo, para monitorear la calidad del agua a través de la aplicación de técnicas de percepción remota, análisis estadístico detallado y datos obtenidos en campo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una campaña de muestreo en distintas coordenadas del embalse para recopilar datos en el sitio sobre la profundidad del disco de Secchi, con el fin de validar y calibrar el modelo predictivo desarrollado a partir de datos de percepción remota y análisis estadístico.
- Adquirir imágenes satelitales de alta resolución temporal y espacial de la presa Miguel Alemán en Valle de Bravo mediante el Servicio Geológico de los Estados Unidos, para su posterior procesamiento en un Sistema de Información Geográfica.
- Determinar la técnica del modelado estadístico que presente mejor ajuste para predecir la penetración luminosa y el índice de estado trófico a través de comparativas entre diversas técnicas.
- Comparar las predicciones del modelo con datos de campo obtenidos mediante mediciones directas de la profundidad del disco de Secchi para evaluar la precisión y confiabilidad del modelo.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Esta tesis está enfocada exclusivamente al desarrollo de modelos para determinar la reflectancia del agua y el estado de eutrofia en la presa Miguel Alemán en Valle de Bravo. Este desarrollo incluye la visita del sitio de estudio para la recolección de mediciones de la penetración luminosa en el cuerpo de agua utilizando el disco de Secchi, así como la descarga de imágenes satelitales, el procesamiento de datos y el análisis estadístico de estos.

No se analizarán los parámetros establecidos en la NOM-127-SSA1-2021, ni se sugerirán tratamientos para potabilizar el agua.

I. ANTECEDENTES

El monitoreo de la calidad del agua se define como el proceso para identificar si las aguas cumplen con los usos para los que se destinan, y vincular las fuentes de contaminación con un problema de calidad de agua. Además, el monitoreo ayuda a determinar tendencias de contaminantes que se monitorean de forma regular (United States Environmental Protection Agency, 2012).

El muestreo en campo y análisis constituyen procedimientos fundamentales en el monitoreo de la calidad del agua. Esta práctica implica la recolección de muestras de agua en varios puntos del cuerpo de agua para su análisis posterior en laboratorio, donde se evalúan diversos parámetros. Este análisis se complementa con las observaciones realizadas en campo, que incluyen la evaluación visual del color del agua, entre otros aspectos.

Desde 1974, en el país se inició un programa de monitoreo de la calidad del agua en los principales cuerpos de agua afectados por la contaminación, esto a causa de la descarga de aguas residuales en casi todos los cuerpos de agua superficiales, lo que generó diversos niveles de contaminación (Semarnat, 2000).

El sistema creado para evaluar la calidad del agua se denominó Índice de Calidad del Agua (ICA), y ayuda a comparar cuánta contaminación hay en distintas zonas. El ICA mide cuánta contaminación hay en el agua cuando se toma una muestra. Se expresa como un porcentaje, donde el 0% significa que el agua está muy contaminada y el 100% que está perfectamente limpia. Este proceso se realiza a partir del cálculo de 18 parámetros fisicoquímicos (Semarnat, 2013).

Aunque los métodos tradicionales de muestreo en campo, análisis y observación han sido fundamentales para el monitoreo de la calidad del agua, con el avance tecnológico han surgido nuevas herramientas y métodos que complementan a los ya existentes. Una de las tecnologías más significativas en este sentido es la percepción remota.

La percepción remota ha evolucionado rápidamente gracias al desarrollo de la tecnología satelital, sus orígenes se remontan al inicio de las actividades aeronáuticas en el siglo XX, cuando se comenzaron a desarrollar técnicas para observar la Tierra

desde el espacio, permitiendo una observación más detallada y precisa (Secretaría de Marina, 2009).

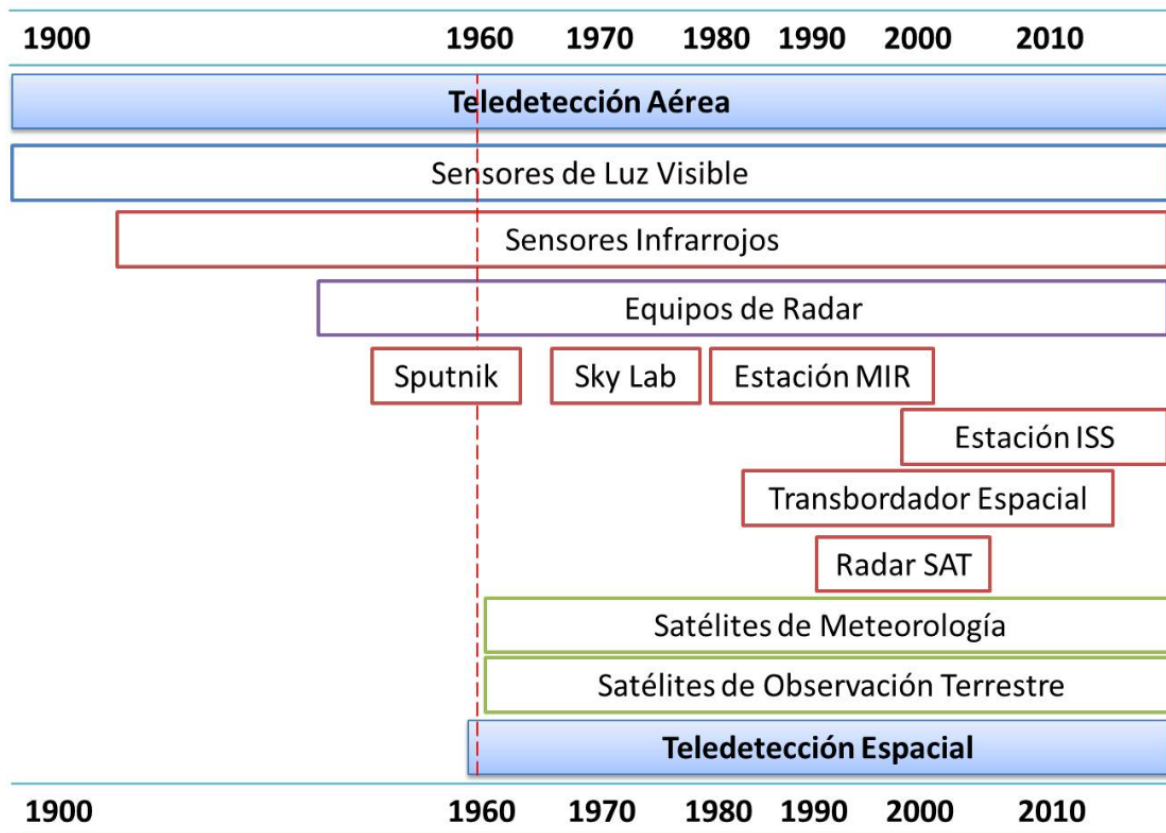


Figura 2. Línea del tiempo del desarrollo de observación de la Tierra (Suárez, 2013).

Ejemplos de aplicación de la percepción remota son los siguientes:

Álvarez, et al (2014), menciona un modelo predictivo para la calidad del agua en la presa las Vírgenes, el lago Colina y la presa Boquilla, todos ubicados en el estado de Chihuahua. El procedimiento realizado consistió en la toma de muestras en los tres cuerpos de agua para obtener el ICA, seguido de una regresión múltiple con los parámetros y el ICA, concluyendo que los tres sitios de estudio presentan buena calidad del agua.

En cuanto a los datos de percepción remota, se requirió realizar correcciones a las imágenes satelitales y cortarlas para delimitar la zona de interés. Se estableció un modelo predictivo de turbidez utilizando la reflectancia de las bandas B1 a B5 y B7, así como los cocientes entre las siguientes bandas: B1/B2, B2/B3, B3/B4. Además, también se consideró el cociente entre las bandas del visible y el infrarrojo cercano $(B1+B2+B3)/B4$.

Posteriormente, se determinó la relación entre los valores obtenidos en campo y la reflectancia de las bandas mediante la correlación lineal de Pearson, destacando que el mejor modelo predictivo fue el cociente B2/B3 con un ajuste de $R^2=0.698$. Se concluye que el lago Colina presenta valores medios de turbidez altos, mientras que la presa las Vírgenes y Boquilla, tienen valores medios más bajos.

Por otra parte, Ayala y Díaz (2019), hablan sobre el monitoreo de la calidad del agua del lago Chinchaycocha, Perú, utilizando técnicas de percepción remota. En campo se recopilaban muestras para medir parámetros como clorofila alfa, transparencia del agua y concentración de sólidos suspendidos totales (SST). Se usaron imágenes satelitales de Landsat 8, calibradas radiométricamente y corregidas atmosféricamente. Después se hicieron regresiones lineales con ecuaciones aplicadas a las bandas y ecuaciones propuestas por otros autores para cada parámetro.

En el caso de los SST, se encontró una correlación $R^2=0.69$, para la transparencia $R^2=0.81$ y para clorofila alfa $R^2=0.77$. En resumen, los algoritmos demostraron resultados aceptables en clorofila alfa y SST, pero se observó un margen de error considerable en la medición del agua, atribuible a las condiciones climáticas donde se realizaron las mediciones.

Los autores Membrillo et al (2016), por su parte comentan la estimación del Índice de Estado Trófico del lago de Chapala en México mediante sensores remotos. El cálculo se basó en mediciones de clorofila alfa y la profundidad con disco de Secchi, utilizando el mismo procedimiento que en ejemplos anteriores con imágenes satelitales, ecuaciones propuestas y las regresiones lineales. Su conclusión fue que el IET calculado varió de oligotrófico a mesotrófico.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. CONTAMINACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA

Entre las principales causas de la contaminación de las aguas por la actividad humana están la liberación de aguas residuales urbanas, el vertido de aguas provenientes de granjas, la liberación de aguas residuales, industriales, entre otras (Rodríguez, 2010).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define la contaminación del agua como cualquier alteración en la composición o estado natural del agua que resulta en la pérdida de sus características adecuadas para los fines previstos (Rodríguez, 2010).

Una vez alteradas sus características, su calidad cambia, pues la calidad del agua se refiere a las condiciones físicas, químicas y biológicas, ya sea en su estado original sin intervención humana o después de haber experimentado modificaciones como resultado de la actividad humana (Baeza, 2016).

El objetivo del tratamiento de agua potable es garantizar que el agua sea segura para el consumo de la población, por eso en la NOM-127-SSA1-2021 se establecen los límites permitidos de las características para la calidad del agua destinada al consumo humano. Dentro de estos límites establecidos encontramos las características biológicas, químicas y físicas. Algunos ejemplos de parámetros de calidad del agua son:

- pH

El potencial hidrógeno es un parámetro para medir la acidez o alcalinidad de una sustancia o solución. Esta evaluación se realiza en una escala que va desde el 0 hasta el 14, donde el 7 pertenece a un estado neutro. Los valores inferiores a 7 indican un estado ácido de las sustancias, mientras que los valores superiores a 7 indican un estado alcalino. En el agua, la variabilidad del pH va dependiendo de factores como la presencia de compuestos químicos, la actividad biológica que se presenta en los cuerpos de agua, la descarga de contaminantes, etc.

- Oxígeno disuelto (OD)

Se refiere a la cantidad de oxígeno presente en estado gaseoso en el agua y desempeña un papel importante en la vida acuática. Es medido comúnmente en miligramos por litro (mg/l) o en partes por millón (ppm). El oxígeno disuelto en el agua

resulta de varios procesos como el intercambio atmosférico, la fotosíntesis de las plantas acuáticas y la aireación.

- Conductividad eléctrica

Es la habilidad de un medio para conducir corriente eléctrica, esta propiedad está directamente influenciada con la concentración de sales (sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruro, etc.) disueltas en dicho medio. La medida de la conductividad eléctrica se expresa comúnmente en unidades de Siemens por metro (S/m) o microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La conductividad eléctrica puede ser medida mediante dispositivos portátiles o en laboratorios.

- Dureza del agua

Se refiere a la composición mineral en un determinado volumen de agua de elementos como magnesio, calcio y sílice. La concentración de estos minerales está determinada por las formaciones geológicas que el agua atraviesa antes de ser captada. Esas formaciones geológicas actúan como filtro natural, modificando la composición química del agua y otorgándole características específicas en cuanto al contenido mineral.

- Metales pesados

Son un grupo de elementos químicos que se caracterizan por su alta densidad. Estas sustancias son tóxicas para los seres humanos y, con frecuencia, se encuentran presentes en el agua elementos como el mercurio, níquel, cobre, plomo y cromo. Su peligrosidad radica en la incapacidad de degradarse, lo que propicia su acumulación en los organismos vivos. En el cuerpo humano, provoca efectos físicos y psicológicos.

- Coliformes totales

Son un grupo de bacterias con características bioquímicas compartidas presentes en el suelo, agua y vegetación. Se utilizan como indicadores bacterianos de la calidad de los alimentos y el agua. Una estrategia común para tratar los coliformes es mediante la cloración.

- Coliformes fecales

Son pertenecientes a la familia de coliformes que se encuentran específicamente en el intestino y, por lo tanto, se extraen en las heces de los animales. Estos microorganismos bacterianos son la principal causa de contaminación de aguas como ríos, pozos y lagos. Aunque no suelen provocar enfermedades, se utilizan como indicadores clave de la calidad del agua.

- Fitoplancton

Son organismos microscópicos de origen vegetal que habitan en la capa más superficial de las columnas de agua. La diversidad de especies de fitoplancton presente en un área depende de las condiciones naturales del entorno y la disponibilidad de nutrientes.

- Sólidos disueltos totales (SDT)

Comprenden partículas solubles presentes en una solución acuosa, compuestas por minerales, sales y metales. La medición de los SDT se realiza en unidades de mg/l o en ppm. Son originados por procesos naturales y actividades humanas.

- Turbiedad

Es una medida óptica que evalúa la cantidad de partículas que se encuentran en suspensión en el agua.

2.2. TURBIEDAD

Entrando en más detalles, la turbidez es una característica óptica que ocasiona que la luz se disperse y se absorba en vez de pasar a través del medio (Ghione, 2021). Es de suma relevancia en términos de salud, dado que proporciona una estimación de la presencia de sustancias coloidales, minerales u orgánicas en el agua, lo que la convierte en un posible indicador de contaminación (Espigares y Fernández, 1999).

Esta puede ser generada por la presencia excesiva de fitoplancton, que provoca un color verde en el agua limitando la visibilidad. La erosión del suelo es otro factor que altera la claridad del agua al haber sedimentos en suspensión, las partículas usualmente pueden ser desprendidas en temporadas de lluvias y ser arrastradas por pequeños cuerpos de agua que desembocan en otros más grandes, o pueden también ser producto de actividades humanas como la tala de árboles. Las descargas

de aguas residuales y descomposición de materia orgánica son otros factores que ocasionan la turbidez en el agua.

Existen algunos métodos disponibles para medir la turbidez, siendo uno de ellos el turbidímetro; medidor a gran escala para su cuantificación. Este usa la técnica nefelométrica, basada en ver cuánta luz se refleja desde una muestra de agua en un ángulo específico. Esta es comparada con la cantidad de luz que rebota en una muestra de referencia con las mismas condiciones (Ghione, 2021). Se considera que el agua es segura si la turbidez es menor a 3 Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), eso de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021.

2.3. DISCO DE SECCHI

Junto con los medidores a gran escala, se tienen métodos visuales para evaluar la turbidez del agua. Un ejemplo de este enfoque es el Disco de Secchi (DS), que puede medir la turbidez de forma indirecta a través de la claridad del agua. Fue ideado por el sacerdote Ángel Secchi en 1865 y usado por primera vez para evaluar la transparencia del agua en el Mar Mediterráneo (Manzoli y Paiva, 2011).

El DS convencional tiene un diámetro de 20 cm y presenta cuadrantes alternados en blanco y negro. Está unido a una línea calibrada y tiene un peso que facilita su rápida inmersión (ver figura 3). La medida de la visibilidad del DS se expresa típicamente en centímetros, y en ambientes acuáticos naturales, este valor puede oscilar desde algunos centímetros hasta varios metros (Claude, 2004).

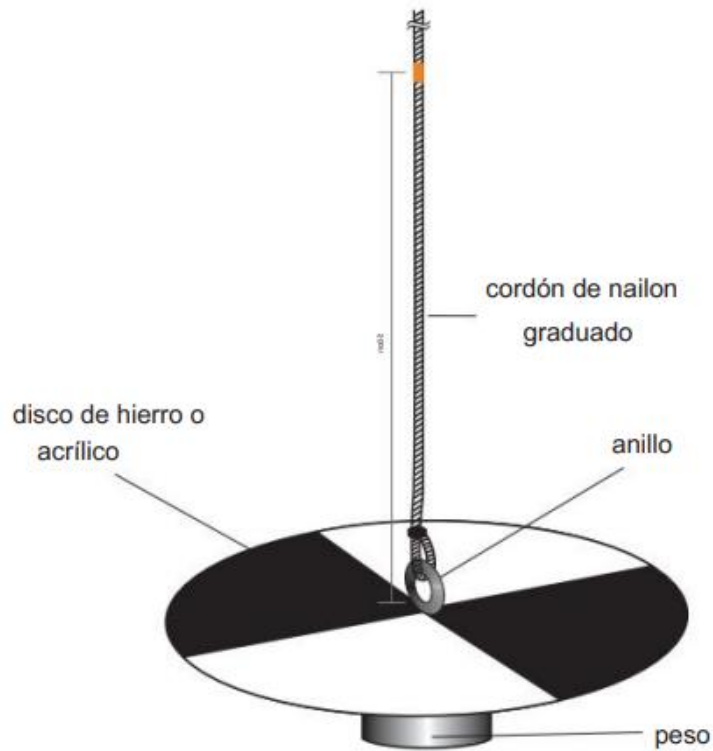


Figura 3. Disco de Secchi (Manzolini y Paiva, 2011).

Manzolini y Paiva, (2011), mencionan que las ventajas asociadas al disco de Secchi incluyen la simplicidad para operarlo, lo cual hace mucho más fácil las mediciones y se puede generar una mayor cantidad de datos. Es fácil de transportar, su costo es accesible y permite hacer comparaciones entre los datos recopilados. Además, el tener una medida internacional, hace que la comparación de datos entre diferentes regiones sea más fácil y exista coherencia con los resultados, así como compatibilidad con los avances tecnológicos.

De acuerdo con Claude (2004), en su texto "*Secchi disk visibility: Correct measurement, interpretation*", deben tomarse algunas consideraciones para garantizar una correcta interpretación y una buena medición, estas se enuncian a continuación:

- El descenso del disco debe ser gradual hasta que ya no sea visible y luego elevarlo hasta su reaparición. Se debe emplear el promedio de ambas mediciones como la visibilidad del disco de Secchi.
- Se recomienda llevar a cabo las mediciones en días claros o parcialmente nublados, cuando el sol no esté oculto por las nubes.

- La cara del observador debe encontrarse a una distancia de 25 a 50 cm de la superficie del agua durante la lectura, y se aconseja que el observador no utilice gafas de sol durante la medición.

La turbidez del agua es inversamente proporcional con la transparencia del agua, mientras que, con la reflectancia de la luz, se tiene una relación directamente proporcional. Estas relaciones nos permiten realizar un análisis de la calidad del agua gracias a la radiación solar y percepción remota.

2.4. LIMNOLOGÍA: CALIDAD DEL AGUA EN LAGOS Y EMBALSES

La palabra limnología proviene de las palabras griegas “limné” y “logos”, que significan estanque o lago y discurso o estudio, respectivamente (Cole, 2022). La limnología es el estudio de las conexiones estructurales y funcionales entre los organismos que habitan en aguas continentales, considerando las influencias de sus entornos físicos, químicos y bióticos en constante cambio (Wetzel, 2001).

Uno de los propósitos fundamentales de la limnología consiste en proporcionar un entendimiento detallado de los diversos componentes presentes en el agua, con el fin de identificar aplicaciones prácticas para su aprovechamiento en diversos sectores y áreas de explotación (Obregón, 2006).

De acuerdo con los autores Pérez y Restrepo, (2008), en su libro “*Fundamentos de limnología neotropical*”, se dice que la limnología aborda temas relacionados con factores bióticos y abióticos, ejemplo de ellos se enuncian en la tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de factores bióticos y abióticos presentes en los ecosistemas acuáticos (basado en Pérez y Restrepo., 2008).

FACTORES BIÓTICOS	FACTORES ABIÓTICOS
• Algas	• Gases disueltos
• Bacterias	• Sólidos disueltos
• Protozoos	• Temperatura
• Fauna acuática	• pH
• Hongos	• Turbidez
• Plancton	• Concentración de nutrientes
• Zooplancton	

Los factores enlistados se relacionan con la calidad del agua y la limnología los tiene presentes, por ello, realiza monitoreos de varios parámetros. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas-Agua (2017), en la guía para el monitoreo integrado de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la supervisión continua comprende tres aspectos distintos: incremento en la cantidad de muestras recolectadas, expansión de la variedad de parámetros al abarcar sustancias tóxicas y enfoques biológicos, y mejora en la sofisticación del método empleado para calcular el indicador.

Una vez que se han identificado las fuentes de contaminación mediante el estudio limnológico, se abre la puerta a la implementación de estrategias destinadas a minimizar estos impactos y a restaurar la salud de los ecosistemas acuáticos. En este proceso, la limnología proporciona información crítica que respalda la toma de decisiones en la planificación para el uso y distribución del agua (ONU-Agua, 2017).

Al basar estas decisiones en datos de la calidad del agua, la biodiversidad y los procesos ecológicos, la limnología tiene una aportación considerable en el control sostenible del recurso del agua. La aplicación de los conocimientos de la limnología no solo busca conservar la calidad del agua, sino también garantizar la justa distribución y el uso adecuado del recurso, promoviendo así una administración integral y responsable de los cuerpos de agua.

2.5 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

El Sol nos suministra la energía que necesitamos como seres vivos en la Tierra, llegándonos en forma de luz o radiación (Fontal et al, 2005). Esta energía es radiación electromagnética que proviene de reacciones de hidrógeno en su núcleo, causadas por fusión nuclear (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, s.f.).

La transmisión de energía electromagnética se da mediante la propagación de ondas en el espacio (Muñoz, 2012), conformadas por campos eléctricos y magnéticos en constante oscilación y son mutuamente perpendiculares (Fontal et al, 2005).

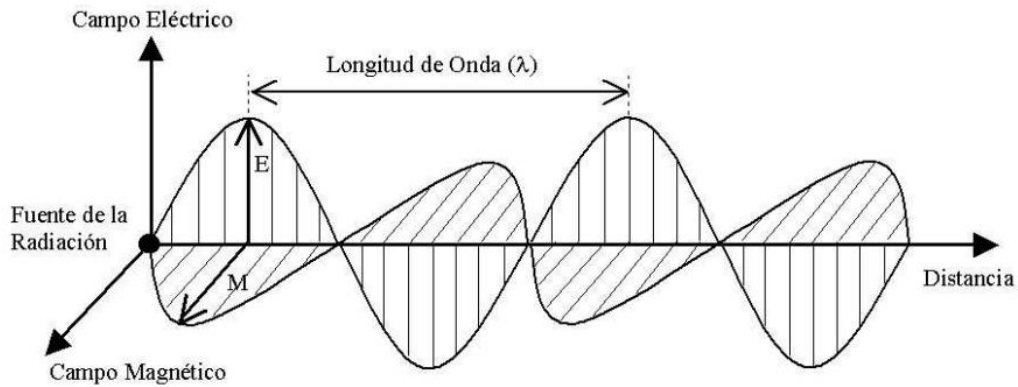


Figura 4. Descripción de la radiación electromagnética con campos eléctricos y magnéticos (Hernández y Montaner, 2009).

Estos campos eléctricos y magnéticos se desplazan con una velocidad de 300,000 kilómetros por segundo, conocida como la velocidad de la luz. Las ondas en el espacio conforman un espectro electromagnético, y es una representación gráfica que organiza las diferentes ondas electromagnéticas según sean las características de longitud de onda y frecuencia.

El autor Muñoz (2012), en su escrito “*Propagación de ondas electromagnéticas*” define a la longitud de onda como la distancia que se encuentra a lo largo de la dirección de propagación entre dos crestas. Mientras que la frecuencia se define como el número de veces que una onda completa sus periodos en una unidad de tiempo.

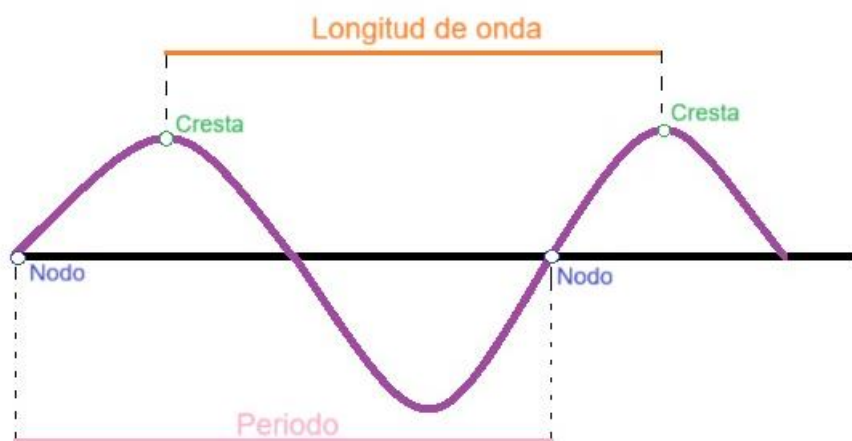


Figura 5. Partes de una onda (Elaboración propia).

La longitud de onda (ecuación 1) y frecuencia (ecuación 2) pueden ser calculadas de forma siguiente:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

Ecuación 1

Donde:

λ : Longitud de onda

k: constante de onda

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Ecuación 2

Donde:

f: Frecuencia

ω : Frecuencia angular

Las ondas electromagnéticas del espectro dan origen a distintos tipos de energía. Existen longitudes de onda muy cortas, como los rayos gamma, rayos X y ultravioleta, hasta aquellas muy largas, como las de microondas y comunicaciones (Hernández y Montaner, 2009).

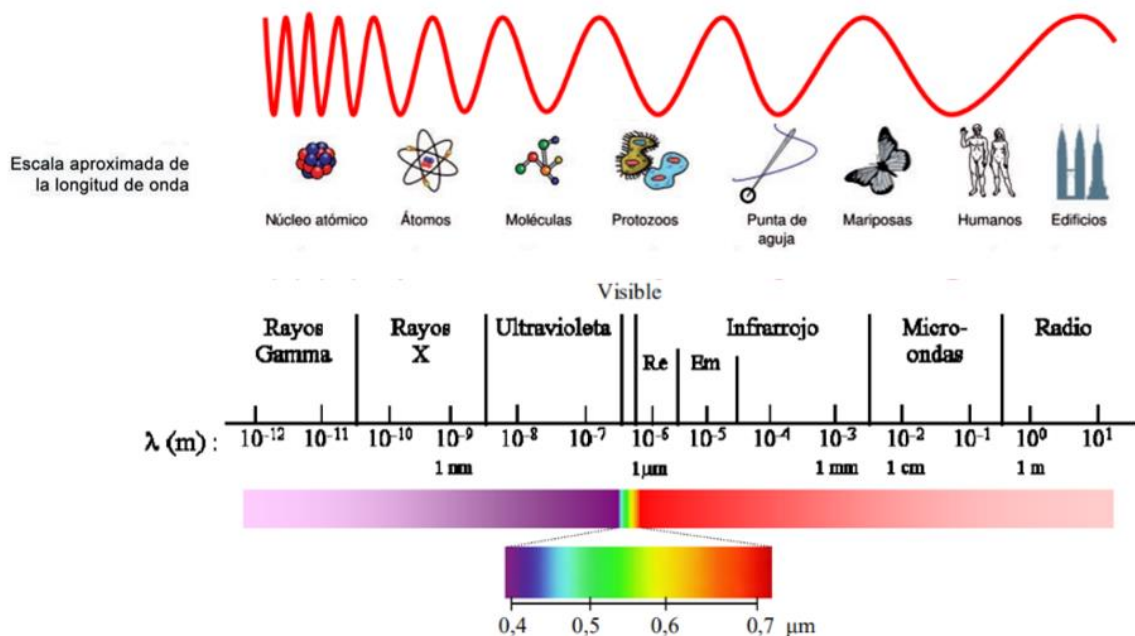


Figura 6. Tipos de energía electromagnética en función de la longitud de onda (basado en: Hernández y Montaner, 2009 y Ordóñez., 2012).

Tabla 2. Regiones del espectro electromagnético (Fontal et al, 2005).

Región	Frecuencia [Hz o ciclos/s]	Longitud de onda [m]	Energía del fotón [eV _{promedio}]
Rayos Gamma	10^{22} - 10^{19}	10^{-11} - 10^{-14}	10^{10}
Rayos X	10^{17} - 10^{20}	10^{-8} - 10^{-11}	10^5
Ultravioleta	10^{15} - 10^{17}	10^{-6} - 10^{-8}	10^3
Visible	10^{14} - 10^{15}	4×10^{-6} - 7×10^{-6}	1
Infrarrojo	10^{11} - 10^{14}	10^{-3} - 10^{-5}	10^{-3}
Microondas	10^9 - 10^{11}	10^{-1} - 10^{-3}	10^{-5}
Ondas de radio	10^3 - 10^9	10^5 - 10^{-1}	10^{-10}
Corriente alterna	10^2 - 10^3	10^7 - 10^5	10^{-15}

El espectro de radiación electromagnética es un flujo constante de energía que atraviesa el espacio y la atmósfera (Hernández y Montaner, 2009), cada parte de él expone comportamientos distintos al propagarse a través del medio de transmisión. Hay numerosos factores a considerar para clasificar el espectro electromagnético y emplear diversas frecuencias con propósitos específicos (Ordóñez, 2012).

2.6. FIRMA ESPECTRAL

Después de atravesar la atmósfera, la radiación electromagnética se involucra con la superficie terrestre, encontrando una variedad de materiales. Cada tipo de superficie responde de manera única a la radiación, absorbiendo longitudes de onda específicas y reflejando otras en proporciones particulares (Guzmán, 2019).

La radiación que se refleja o emite desde superficies u objetos a lo largo de los distintos rangos del espectro electromagnético, es definida como firma espectral. Este fenómeno se representa de forma gráfica, que ilustra el porcentaje de luz reflejada del objeto o material en función de la longitud de onda (Hernández y Montaner, 2009).

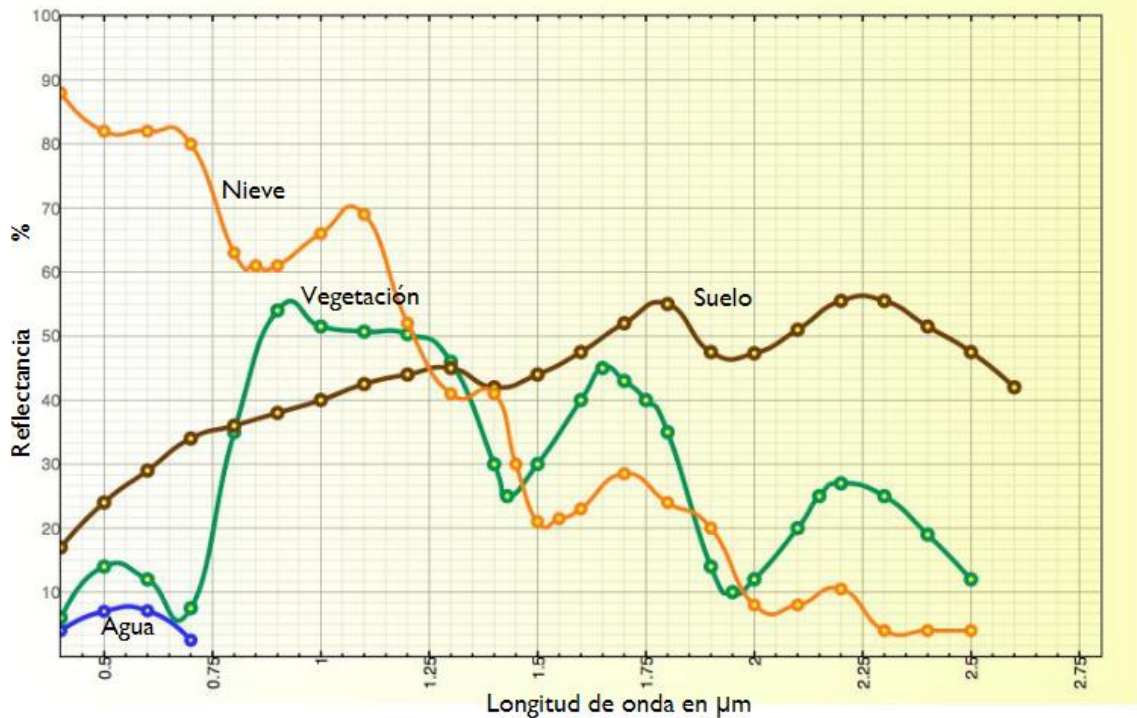


Figura 7. Firmas espectrales características de diversas superficies (Sepúlveda, 2011).

Las firmas espectrales se obtienen con diversos métodos y software especializado como: percepción remota, espectrorradiometría terrestre, muestreo y análisis en laboratorio, QGIS, Google Earth, etc.

Tener a disposición los patrones de reflectancia espectral resulta esencial para obtener resultados confiables al trabajar con imágenes multiespectrales e hiperespectrales procedentes de los sensores remotos. Estos datos pueden emplearse para diversos fines como son: Obtener la facilidad de interpretación y análisis de datos provenientes de sensores remotos, calibrar instrumentos de teledetección y confirmar la precisión de la información extraída de datos teledetectados (Hernández y Montaner, 2009).

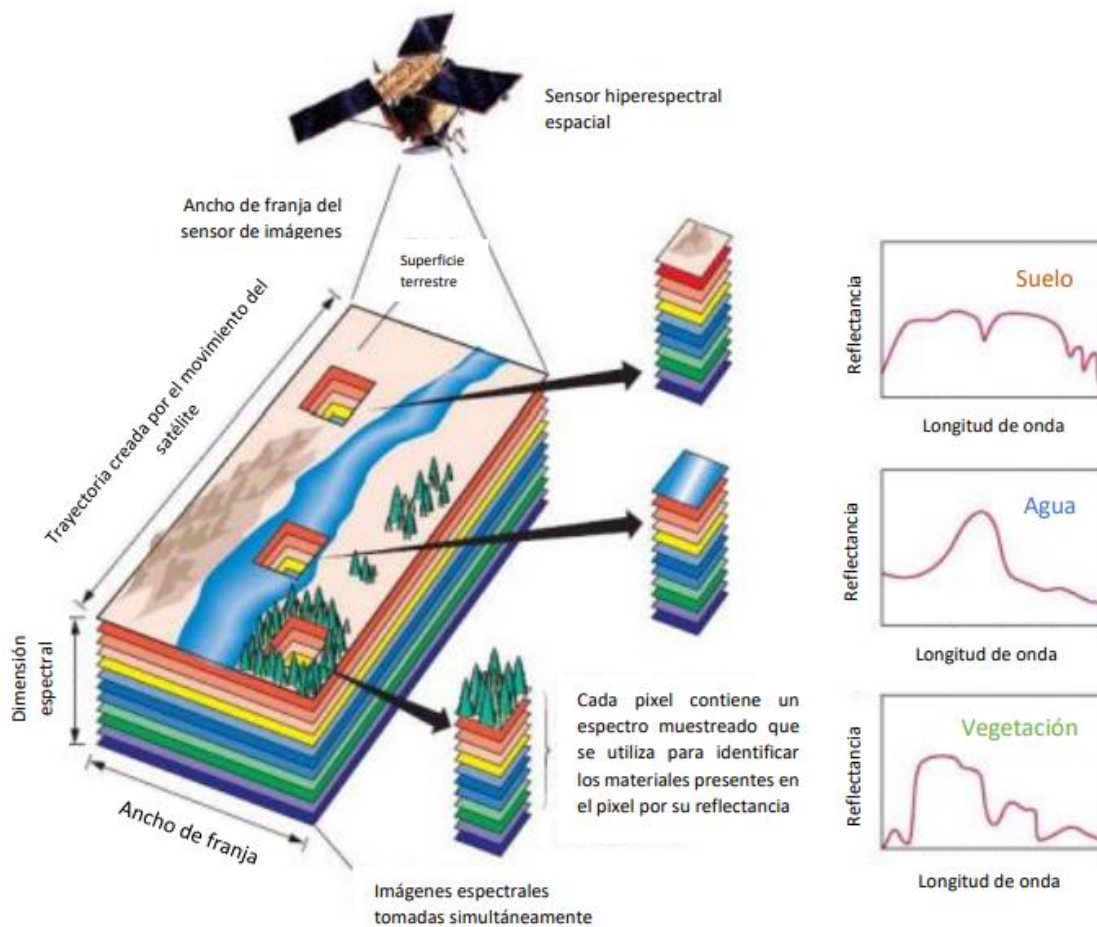


Figura 8. Firmas espectrales en diferentes materiales a través de sensores remotos (Escamilla Canales, 2010).

2.7. PERCEPCIÓN REMOTA

La percepción remota (también conocida como teledetección), según Torres et al (2015), está definida como la ciencia dedicada a obtener la información de objetos sin necesidad de un contacto directo con los mismos. Este proceso implica la captura de imágenes de una superficie terrestre de interés.

El objetivo final es extraer información valiosa que contribuya al estudio o monitoreo de un objeto o área específica. Este enfoque integral, desde la captura de imágenes hasta la interpretación de datos, destaca la importancia que tiene la percepción remota como herramienta esencial en la adquisición de datos y conocimiento sobre nuestro entorno (Universidad Nacional de Colombia, 2012 como citado en Sáenz, 2014).

Para poder implementar la percepción remota, se deben considerar los siguientes elementos básicos: plataforma, objeto a observar, instrumento y sensor (Torres et al, 2015), considerando el siguiente procedimiento: La Tierra recibe energía electromagnética del Sol al atravesar la atmósfera e interactuar con objetos y/o materiales. Durante este proceso, parte de la radiación se absorbe, mientras que otra parte se refleja. Sensores ubicados en plataformas como satélites tienen la capacidad de medir la radiación reflejada, lo que permite realizar una interpretación, análisis y procesamiento de datos (NASA, 2023).

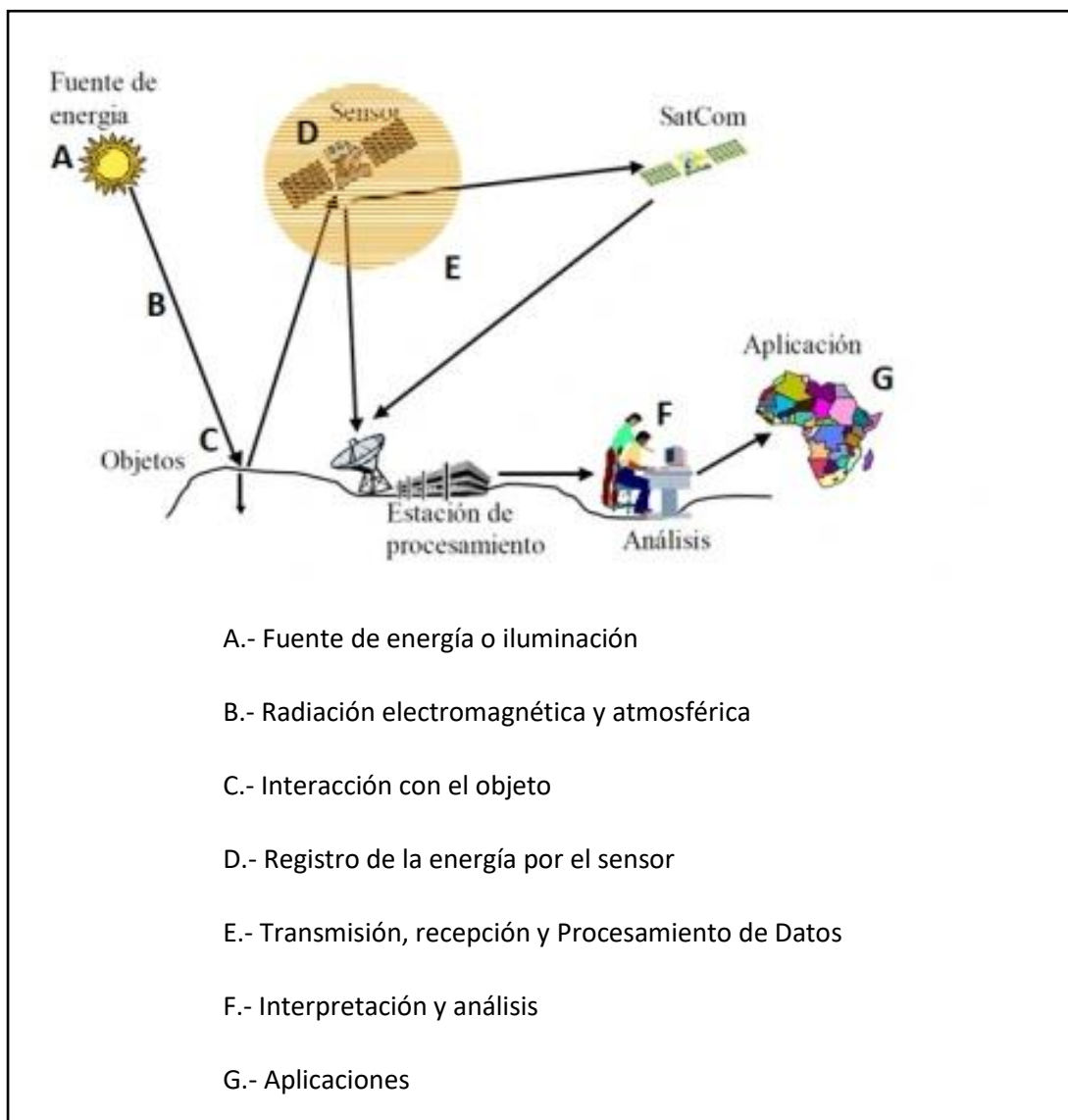


Figura 9. Procedimiento para la obtención de datos a través de la percepción remota (Geomatik sin fronteras, s.f.).

Un sensor remoto se define como un dispositivo que tiene la capacidad de registrar la energía electromagnética que un objeto emite, refleja o dispersa. Puede clasificar cada elemento según su comportamiento espectral y cómo interactúa con la luz (Stressors, 2010 como citado en Sáenz, 2014).

Se disponen de varias categorías para clasificar los sensores remotos, las cuales se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Clasificación de los sensores remotos (basado en Lira, 1987 y Pérez, 2007).

Clasificación	Tipo	Descripción
Origen o fuente de iluminación	Sensores activos	Cuentan con su propia fuente de radiación electromagnética, por lo tanto, no dependen de una fuente externa y se tiene un control de esta.
	Sensores pasivos	Capturan y cuantifican la radiación electromagnética reflejada y emitida por la superficie terrestre, la cual proviene de una fuente externa fuera de nuestro control. Estos sensores requieren condiciones óptimas de iluminación para llevar a cabo la observación adecuada de la escena.
Principio de funcionamiento	Sensores de no barradura	Capturan la luz reflejada de una zona de la tierra en un instante, dando resultados de forma gráfica o fotográfica.
	Sensores de barradura	Captura la luz reflejada en distintas áreas secuenciales de la superficie.
Tipo de producto	Fotográficos	Cuentan con un conjunto de lentes que registran el porcentaje de reflexión de la luz proveniente de la Tierra.
	No fotográficos	Mide la intensidad de la radiación que la Tierra refleja.

Los sensores remotos generan imágenes que se conocen como bandas, cada una de ellas contiene datos capturados en diferentes longitudes de onda del espectro

electromagnético. En los pixeles de estas imágenes, se asigna un byte o Nivel Digital (ND), al cual se le asigna un color en una escala de grises, variando desde negro para el valor mínimo hasta blanco para el valor máximo (Ingeoexpert, s.f.).

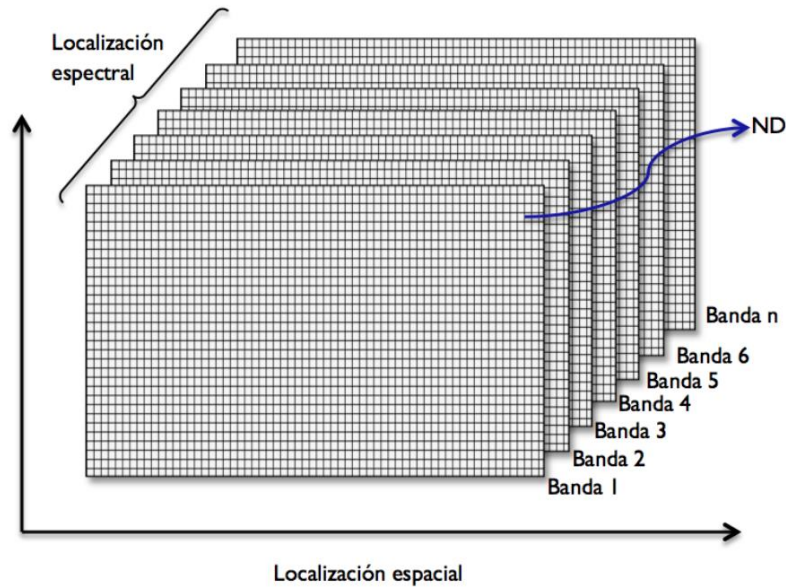


Figura 10. Configuración de bandas espectrales (Ruiz, 2002, como citado en Sepúlveda, 2011)

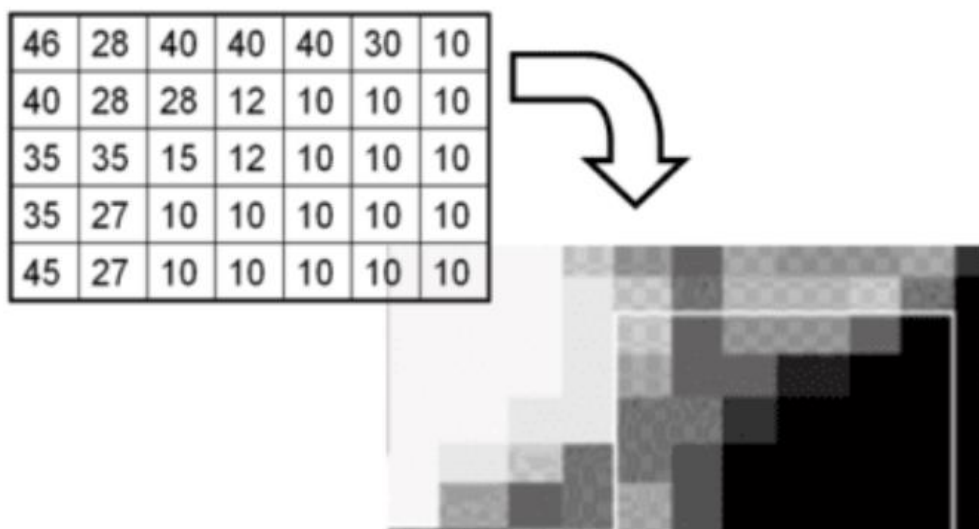


Figura 11. Niveles Digitales de una banda o imagen satelital (Ingeoexpert, s.f.).

Por otra parte, las plataformas constituyen los vehículos que alojan y transportan a los sensores remotos. Las plataformas se clasifican en tres categorías: Terrestres, aerotransportadas y espaciales.

Según la Universidad Nacional de Quilmes (s.f.), las plataformas terrestres más comunes, como dispositivos de mano, trípodes, torres o grúas, se utilizan habitualmente para vigilar fenómenos atmosféricos y características terrestres. En el caso de las plataformas de aerotransporte, los aviones y drones son los más utilizados. Existen aeronaves de baja, media y alta altitud, cada una con características particulares. Por otra parte, las plataformas espaciales se refieren a los satélites, especialmente estables para la percepción remota.

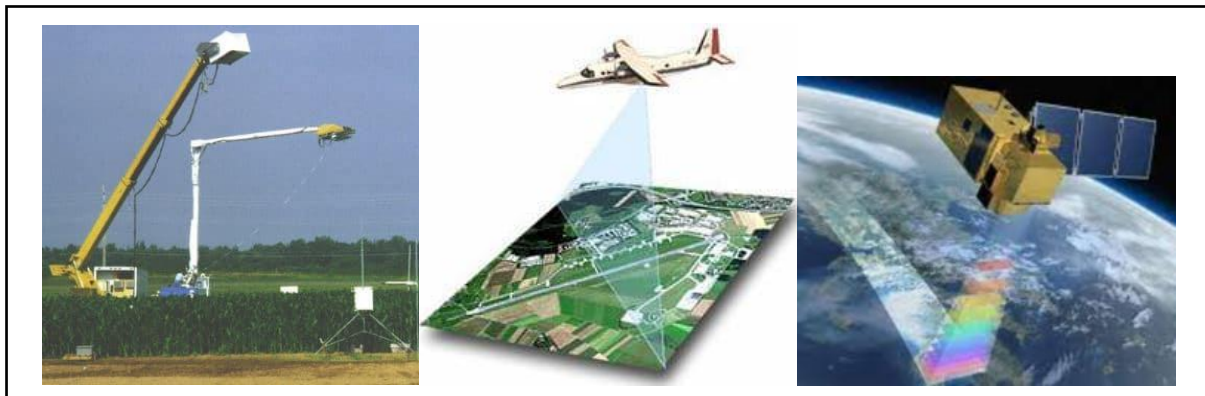


Figura 12. Ejemplo de plataformas: terrestre, aerotransportado y espacial, respectivamente. (basado en Universidad Nacional de Quilmes, s.f. y Universidad de Sonora, 2021).

La percepción remota es una herramienta útil en diversas disciplinas y ha demostrado ser invaluable en una amplia gama de aplicaciones, desde la cartografía y la gestión de recursos naturales hasta la vigilancia ambiental y la monitorización del cambio climático.

2.8. MODELACIÓN MULTIVARIABLE

La modelación multivariable hace referencia al análisis de datos para estudiar estadísticamente las características de un caso de estudio (denominadas variables) a través de diversos métodos. Este tipo de modelación se utiliza para analizar la relación entre distintas variables independientes y dependientes (Peña, 2002).

A lo largo de la historia, varios personajes han hecho importantes aportaciones a la modelación multivariante. Gauss mejoró el ajuste de las fórmulas de regresión simple y múltiple mediante el método de mínimos cuadrados. Pearson desarrolló el coeficiente de correlación en muestras. Fisher introdujo el concepto de análisis de varianza. Harold Hotelling, por su parte, creó los componentes principales para resumir conjuntos de variables, lo que dio origen al análisis factorial (basado en Llinás, 2024).

Los autores Jhonson y Whichern, (1982/2002), mencionan que los métodos de análisis multivariados tienen como objetivos los siguientes:

- Reducir los datos para representar el fenómeno analizado de una forma sencilla sin perder información importante y hacer su interpretación más fácil.
- Clasificar las variables para formar grupos de variables similares, tomando en cuenta sus características.
- Investigar la dependencia entre las variables para comprender la relación existente entre ellas.
- Predecir los valores de una o más variables mediante el análisis de sus relaciones.
- Comprobar hipótesis planteadas para validar y reafirmar suposiciones previas.

Uno de los métodos para el análisis multivariable es la regresión lineal múltiple. Este método tiene como objetivo ajustar modelos lineales que relacionan las variables independientes con la variable dependiente. La forma de estos modelos es la siguiente:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_k \cdot x_k \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

y: Es la variable dependiente o la variable de respuesta.

b_i: Son los coeficientes fijos que serán obtenidos con el análisis.

x_i: Son las variables independientes o explicativas

De forma general, el procedimiento para realizar una regresión lineal múltiple es el siguiente:

- A partir de una tabla de datos, donde las columnas contienen tanto las variables independientes como las dependientes, se crea una matriz X. Esta matriz está compuesta por las sumatorias de las variables independientes, como se muestra a continuación:

Ejemplo de la tabla de datos.

	y	X ₁	X ₂	...	X _k
1					
2					
⋮					
n					

Matriz de diseño X

$$X = \begin{bmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 & \dots & \sum X_k \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_{12} & \dots & \sum X_{1k} \\ \sum X_2 & \sum X_{12} & \sum X_2^2 & \dots & \sum X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum X_k & \sum X_{1k} & \sum X_{2k} & \dots & \sum X_k^2 \end{bmatrix}$$

- Se debe obtener la matriz inversa de la matriz X para después multiplicarla por la matriz Y, la cual está conformada por las sumatoria de los productos de la variable dependiente con las independientes, como se ilustra a continuación:

Matriz Y

$$Y = \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \\ \vdots \\ \sum X_k Y \end{bmatrix}$$

- El producto de la multiplicación de matrices tiene como resultado los coeficientes b_i del modelo de regresión lineal, por lo que la multiplicación de matrices adopta la forma:

$$[b] = [X^{-1}] * [Y]$$

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum X_1 & \sum X_2 & \dots & \sum X_k \\ \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_{12} & \dots & \sum X_{1k} \\ \sum X_2 & \sum X_{12} & \sum X_2^2 & \dots & \sum X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum X_k & \sum X_{1k} & \sum X_{2k} & \dots & \sum X_k^2 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \\ \vdots \\ \sum X_k Y \end{bmatrix}$$

- Es importante tener en cuenta que el modelo obtenido presentará errores al realizar predicciones. Este error se denomina error estándar de la estimación múltiple y se calcula mediante la ecuación 4.

$$S = \sqrt{\frac{SCE}{n - (k - 1)}}$$

Ecuación 4

Donde:

SCE: Es la sumatoria de los cuadrados del error (ver ecuación 5).

n: Es el número de muestras.

k: Es el número de variables independientes

$$SCE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Ecuación 5

Donde:

y_i : Es la variable dependiente.

\hat{y}_i : Predicciones estimadas por el modelo.

- El coeficiente de correlación es el porcentaje que indica que tan certera es la relación entre las variables. Oscila entre -1 y +1, siendo 0 una nula relación lineal, -1 una relación lineal negativa y +1 una relación lineal positiva. Su cálculo se obtiene mediante la ecuación 6.

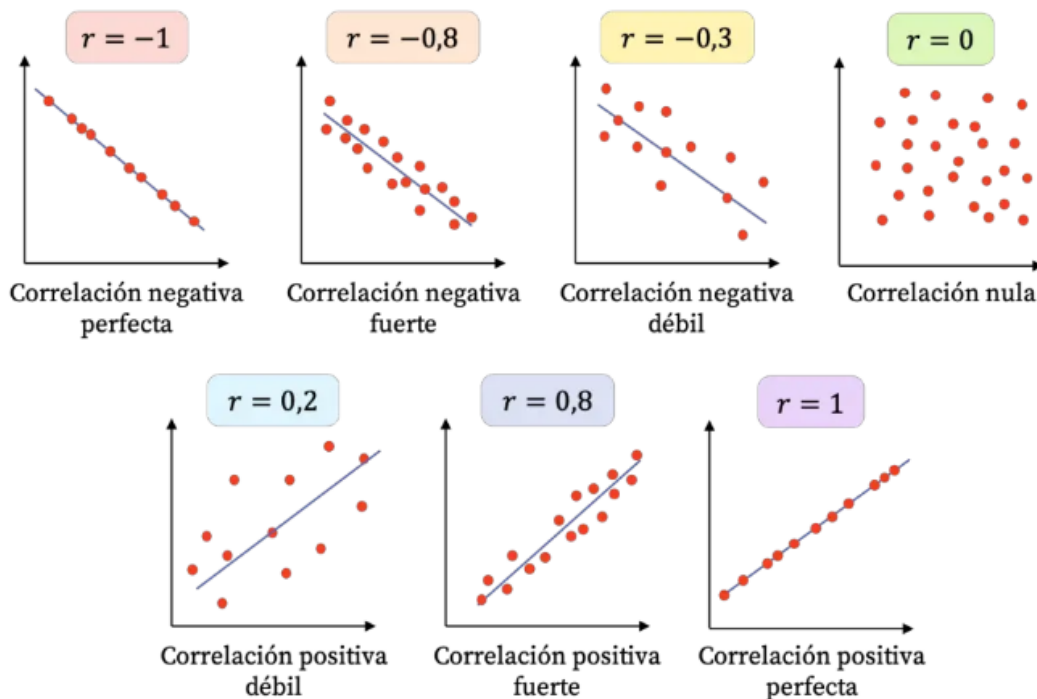


Figura 13. Ejemplo de coeficientes de correlación negativo, positivo y nulo (Academia Balderix, 2024).

$$R^2 = \frac{SCR}{STC}$$

Ecuación 6

Donde:

SCR: Es la suma de cuadrados de la regresión

$$SCR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Ecuación 7

STC: Es la suma total de cuadrados

$$STC = SCE + SCR$$

Ecuación 8

En sus inicios, el hacer estudios estadísticos complejos requería mucho tiempo y conocimientos especializados, sin embargo, los recientes avances de la tecnología informática han permitido el desarrollo de programas para realizar análisis estadísticos (Jhonson y Whichern, 1982/2002,). Algunos de los programas desarrollados como MATLAB, Python, R, STATA etc., permiten ingresar los datos necesarios y realizar el análisis.

Dadas las facilidades de la tecnología para construir modelos multivariados pese a la complejidad de los datos, han tenido un gran impacto en varias disciplinas, como ciencias de la salud, de la educación, de la computación, agricultura, economía y finanzas, geología, ingeniería, etc. (Peña, 2002).

Destacando la disciplina ingenieril, con ayuda del análisis multivariado es posible, por ejemplo, resolver problemas de cálculo en el diseño estructural, de sistemas físicos y geométricos para los proyectos de innovación e investigación científica (Dirección General del Área Académica Técnica de la Universidad Veracruzana, 2022), predicción de la calidad del aire y del agua, etc.

III. METODOLOGÍA

3.1. SITIO DE ESTUDIO

El área municipal de Valle de Bravo se encuentra en la parte occidental del Estado de México. Limita al norte con el municipio de Donato Guerra, al sur con el municipio de Temascaltepec, al este con los municipios de Amanalco y Temascaltepec, y al oeste con los municipios de Ixtapan del Oro, Santo Tomás de los Plátanos y Oztoloapan (Secretaría de Turismo, 2019).

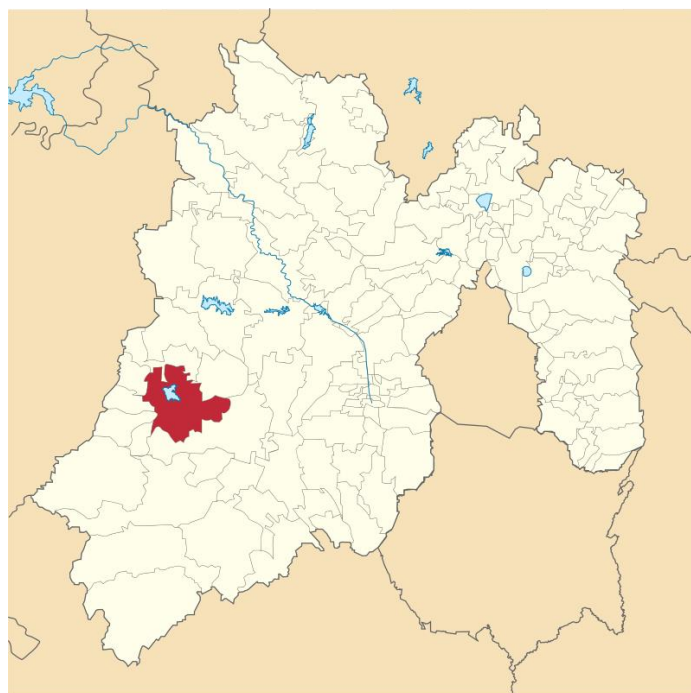


Figura 14. Ubicación del municipio de Valle de Bravo en el Estado de México

El municipio está rodeado por montañas que dan origen a tres distintos tipos de relieve: Terrenos accidentales que cubren aproximadamente el 50% de la superficie del municipio, constituidas por las Sierras de Temascaltepec, Tenayac, Valle de Bravo y faldas de sierras circundantes. Después están las zonas semiplanas o lomeríos, ubicadas en la región suroriente del municipio, éstas representan aproximadamente el 30% del terreno. Finalmente están las zonas planas, ocupando alrededor del 20% de la superficie total en localidades de Acatitlán, Rincón de Estradas, El Fresno y Cuadrilla de Dolores (H. Ayuntamiento, 2017 y municipio de Valle de Bravo, 2022).

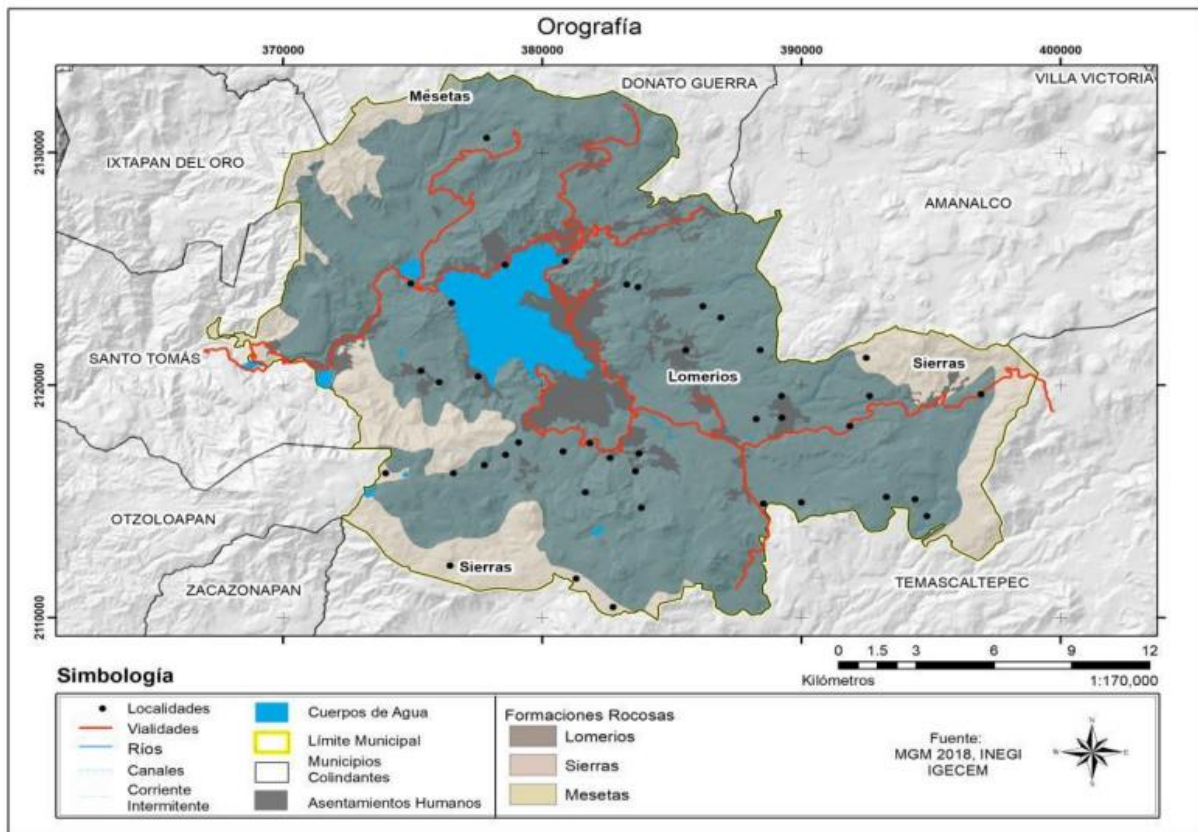


Figura 15. Orografía del municipio Valle de Bravo (mun. de Valle de Bravo, 2022).

Los tipos de suelo predominantes se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Tipos de suelo en Valle de Bravo (basado en mun. de Valle de Bravo, 2022).

TIPO DE SUELO	PORCENTAJE QUE ABARCA
Andosol	53%
Regosol	13%
Acrisol	12.7%
Vertisol	7%
Luvisol	3.5%
Otros	10.8%

La topografía del municipio se distingue por la presencia de cerros, mesetas, lomeríos y laderas que varían en altitud desde los 1,100 hasta los 3,000 m.s.n.m. (mun. de Valle de Bravo, 2022).

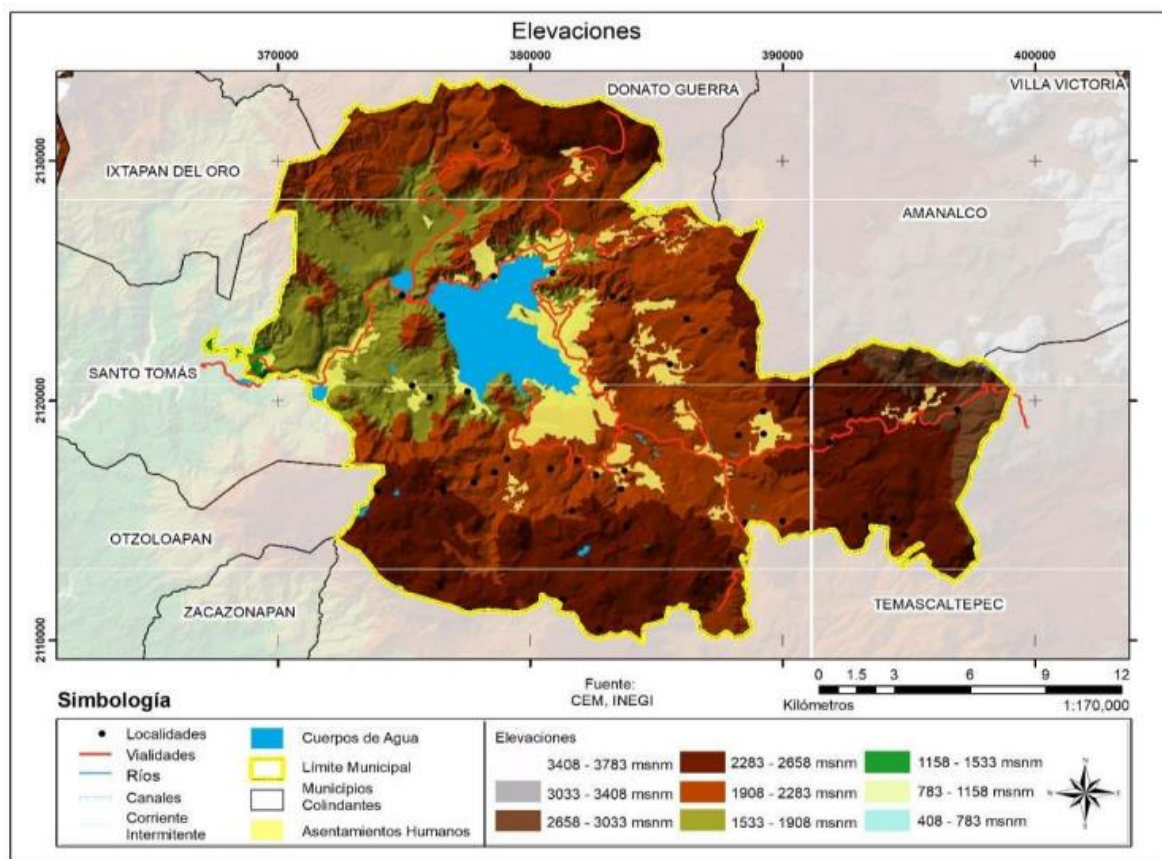


Figura 16. Relieve del Municipio Valle de Bravo (mun. de Valle de Bravo, 2022).

El territorio de Valle de Bravo está conformado por un área de 421.95 km², e incluye una variedad de recursos naturales, así como asentamientos urbanos que se dedican a diversas actividades (mun. de Valle de Bravo, 2022). En la tabla 5, se presentan los usos de suelo de Valle de Bravo.

Tabla 5. Clasificación del territorio de Valle de Bravo por ocupación del suelo (mun. de Valle de Bravo, 2022).

TIPO DE USO DE SUELO	SUPERFICIE (Hectáreas)	PORCENTAJE
Agricultura	10,033.68	23.8%
Bosques (Encino, Oyamel, Pino, Mesófilo)	24,515.20	58.2%
Pastizal inducido	751.75	4.5%

TIPO DE USO DE SUELO	SUPERFICIE (Hectáreas)	PORCENTAJE
Asentamientos urbanos	3,390.05	8.0%
Cuerpos de agua	1,900.14	4.5%
Vegetación de galería	126.22	0.3%
Selva baja	1,401.96	3.3%
Total de superficie	42,195 (421.195 km ²)	100%

Hasta el año 2020, la población total se situaba en 61,590 habitantes, con una tasa de crecimiento negativa del 1.3%. Dentro de esta cifra, 24,167 habitantes residían en áreas urbanas, lo equivalente a 39.2% del total. Por otro lado, en áreas rurales se registraron 29,367 habitantes, representando el 47.7% de la población total, mientras que en zonas mixtas se contabilizaron 8,056 habitantes, lo que corresponde al 13.1%. (mun. de Valle de Bravo, 2022).

Además, el municipio de Valle de Bravo (2022), registra en la siguiente tabla, la cantidad de habitantes que es económicamente activa, en cada sector de actividades.

Tabla 6. Población económicamente activa por año según el sector de actividad económica 2020 (mun. de Valle de Bravo, 2022).

Año	PEA	Ocupada					Población desocupada
		Total	Agropecuario, silvicultura, y pesca	Industria	Servicios	No especificado	
2020	30,185	29,714	1,914	6,560	21,109	131	471

Además, el H. Ayuntamiento (2017), menciona que el clima en este municipio se clasifica como templado subhúmedo y cálido subhúmedo, predominando las lluvias en la temporada de verano (junio-septiembre). La temperatura anual promedio se sitúa en torno a los 17.5°C, con registros máximos alcanzando los 32.0°C y mínimos descendiendo hasta 1.3°C. Se registra un promedio de 103 días lluviosos anuales,

mientras que se experimentan alrededor de 202 días despejados y aproximadamente 64 días nublados al año. La precipitación anual promedio se estima en 1,024.7 mm.

Dadas las características climáticas que se describieron previamente, los ecosistemas predominantes en la región son los bosques de oyamel, pino, pino-encino, encino y mesófilo de montaña. Además de los diversos bosques, se encuentran presentes los pastizales inducidos (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2019).

El territorio municipal forma parte de la Región Hidrológica (RH) 18, al sur del país, rodeada por diversas regiones que delimitan su geografía. Al norte, limita con las Regiones Hidrológicas 12 "Lerma-Santiago", 26 "Pánuco" y 27 "Norte de Veracruz". Hacia el sur, colinda con las RH 19 "Costa grande de Guerrero" y 20 "Costa chica de Guerrero". En dirección este, está junto a las RH 16 "Armería-Coahuayana" y 17 "Costa de Michoacán". Finalmente, en el lado oeste, su frontera está marcada por la RH 28 "Papaloapan".

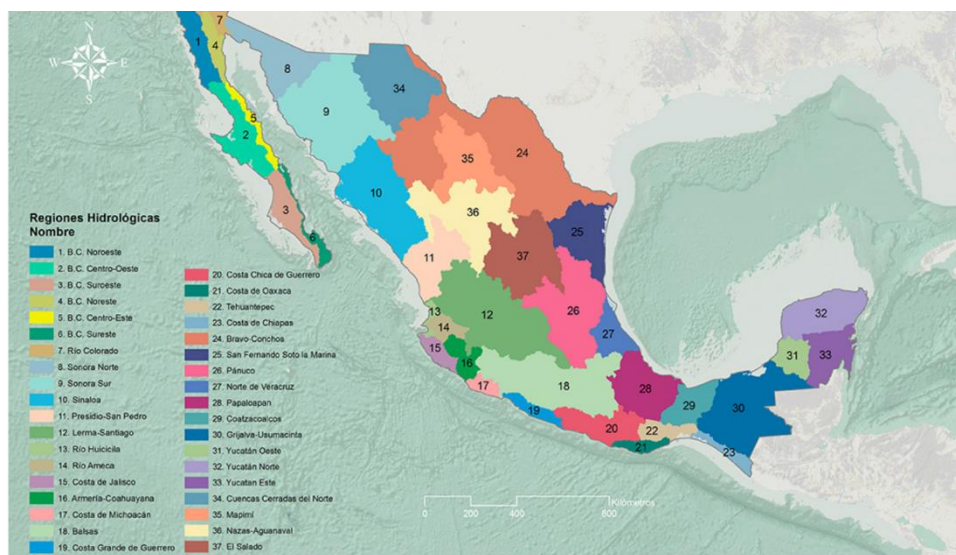


Figura 17. Regiones Hidrológicas de México (Semarnat, 2014).

La evaluación del flujo de agua en la RH 18 Balsas se incorpora en quince cuencas hidrológicas. La clasificación de las cuencas se basa en la consideración de las condiciones físicas, específicamente, los divisores de aguas que las definen, así como las estructuras de control existentes, ya sean presas o estaciones hidrométricas (Valencia, 2015).

Dentro de la Cuenca Hidrológica Río Cutzamala se encuentra la presa Miguel Alemán. Esta cuenca abarca desde el punto de origen de los escurrimientos del Río Zitácuaro, que desciende del eje volcánico en la vertiente Occidental de las sierras de Angangueo y Zitácuaro en el Estado de Michoacán, hasta el Río Tilostoc, que tiene su origen en el Estado de México. La extensión de esta cuenca se extiende hasta la estación hidrométrica "El Gallo" y abarca una superficie de aportación de 10,619.14 km² (DOF, 2011).

Para gestionar eficientemente los recursos hídricos a nivel nacional, se ha implementado la división de las Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), que considera los límites geográficos de los estados. Esta estructura proporciona un marco organizativo que facilita la coordinación y gestión de los recursos hídricos, considerando las particularidades climáticas, geográficas y de demanda de cada región.

En el conjunto existente de las 13 RHA, la Presa Miguel Alemán se encuentra en la RHA IV, conocida como "Balsas". La delimitación geográfica de la RHA VI está determinada al Noreste por la región VIII denominada "Lerma-Santiago-pacífico", al norte por la región XIII llamada "Aguas del Valle de México", al este por la región X nombrada como "Golfo centro y al sur por la región V denominada "Pacífico Sur".

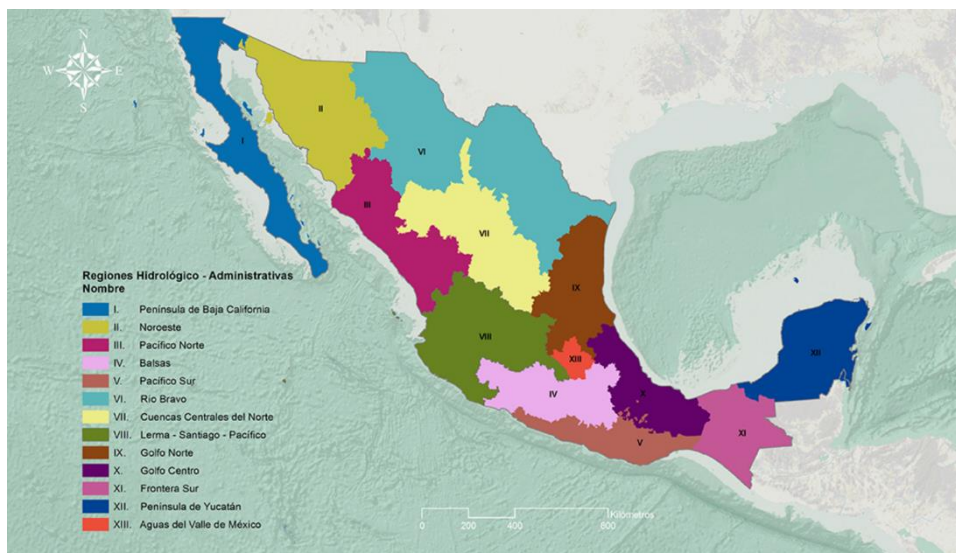


Figura 18. Regiones Hidrológicas Administrativas de México (Semarnat, 20214).

Las aguas superficiales dentro de la RHA IV generan un escurrimiento medio anual de 18,574.815 hm³, no obstante, por las malas condiciones de la mayoría de las cuencas, la disponibilidad real se reduce a 10,632.38 hm³. En esta región se

identifican 45 acuíferos, de los cuales 38 están actualmente disponibles, contribuyendo con un aporte de 713.94 hm³ (Gobierno de México, 2021).

En la actualidad se ha concesionado un volumen de 8,050.31 hm³ para diversos usos de consumo en los que se incluyen la agricultura, la industria, la acuicultura, actividades pecuarias, doméstico, etc. (Gobierno de México, 2021).



Figura 19. Presa "Miguel Alemán" en Valle de Bravo (Google maps, 2024).

La Presa Miguel Alemán, es un cuerpo de agua importante, perteneciente a estas RH y RHA. Es también conocida como Presa Valle de Bravo y se ubica en las coordenadas 19°11'46"N 100°09'22"W.

Su construcción se llevó a cabo en 1947 por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para ser parte integral del Sistema Hidroeléctrico "Miguel Alemán" (Gobierno del Estado de México, s.f.), el cual tenía como objetivo suministrar energía eléctrica

a la industria nacional (Sierra et al, 2012).

En los años setenta, la capacidad del sistema hidroeléctrico Miguel Alemán era insuficiente para satisfacer la demanda de energía eléctrica en la Zona Metropolitana del Valle de México. Como resultado, se tomó la decisión de reorientar su función para suministrar agua potable a la misma región. Este cambio permitió que el sistema Cutzamala aprovechara las infraestructuras ya existentes en el proceso (Venancio y Bernal, 2019).

La presa se convirtió en una multipropósito, pues aparte de cumplir con la función de suministro de agua y derivadora, se practican actividades relacionadas con el turismo y representa un recurso importante para la economía de las comunidades del embalse. La actividad pesquera de carpa, tilapia y trucha, tanto en el aspecto deportivo como comercial, desempeñan un papel importante (Viascán, 1992).

De acuerdo con los autores Banderas y González (s.f.), en su estudio para determinar si el embalse de Valle de Bravo es sustentable como fuente de abastecimiento, se menciona que, en 1991, la presa tenía 335 hm³ y 1,730 hectáreas en el Nivel de

Aguas Máximo Ordinario (NAMO), con una longitud máxima alcanzaba los 7,3 km, un ancho máximo de 6,3 km y una profundidad máxima de 35 m. Las principales contribuciones provenían de diversas fuentes enlistadas en la tabla 7.

Tabla 7. Fuentes de alimentación del embalse en 1991 (Bandeas y Gonzales, s.f.).

Fuentes	hm³
Precipitaciones	14.5
Río Amanalco	90
Río el molino	58
Río Gonzáles	20.3
Río Carrizal	12.1
Río Santa Mónica	4.2

Entre los años 2020 y 2021, se observó una disminución gradual del nivel del embalse hasta alcanzar un mínimo histórico del 42.13% de su capacidad de almacenamiento. Desde el 5 de agosto del 2021, la CONAGUA informa sobre una recuperación progresiva, llegando a un 57.9%, gracias al aumento de la precipitación pluvial y mayores escurrimientos. No obstante, al comparar este proceso con años anteriores de almacenamiento mínimo, se evidencia que el año 2021 experimentó una recuperación más lenta, indicando que las prácticas de extracción aún persisten sin mayores modificaciones (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM., 2021).

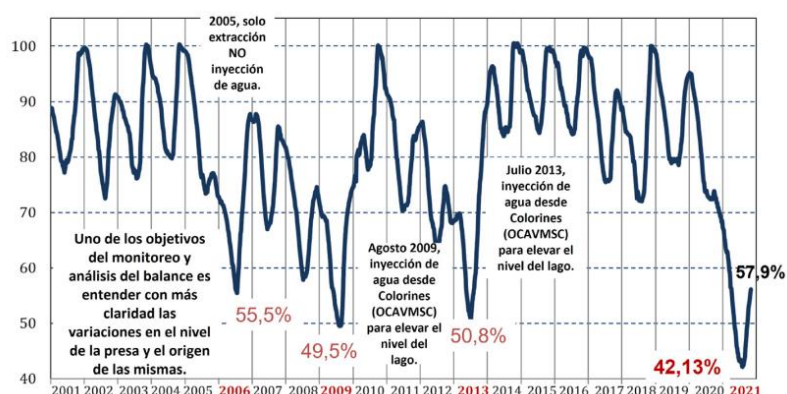


Figura 20. Porcentaje de almacenamiento de la presa Valle de Bravo en el periodo 2001-2021 (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM., 2021).

De acuerdo con los autores Ramírez et al (s.f.), en su artículo “Eutroficación de cuerpos de agua: Causas, consecuencias y soluciones basadas en la naturaleza”, la

eutroficación es el principal inconveniente en relación con la calidad del agua en la Presa Valle de Bravo y los afluentes que desembocan en este cuerpo de agua, pues aportan aguas residuales y domésticas, así como el uso desmedido de fertilizantes ligados a labores agropecuarias, aportando elementos contaminantes como fósforo y nitrógeno.

3.2. MEDICIONES EN CAMPO

Dentro del sitio de estudio, se llevaron a cabo mediciones de la penetración luminosa, utilizando el DS en la Presa Miguel Alemán. Se optó por este instrumento debido a su fácil acceso y a su sencillo modo de empleo.

Como actividad previa a las mediciones, se determinaron las coordenadas donde se realizarían las mediciones dentro del área del cuerpo de agua. Durante las mediciones en campo, se procuró ser precisos en la ubicación de estas coordenadas; sin embargo, surgieron limitaciones. Por razones de seguridad, no se permitió acercarse a la cortina de la presa, y debido al bajo nivel del agua, tampoco fue posible acercarse a las orillas. Los puntos en la presa se pueden apreciar en la figura 21 y sus coordenadas en la tabla 8.

Tabla 8. Coordenadas UTM donde se realizaron las mediciones de penetración luminosa con el DS (Elaboración propia).

Punto	Coordenada X	Coordenada Y
1	380706.7396	2121827.099
2	380810.1889	2121565.117
3	379885.6135	2121774.052
4	379556.8349	2121969.886
5	377373.0845	2124314.654
6	377299.8327	2124714.799
7	377282.943	2124373.669
8	377534.5717	2124006.147
9	377692.0763	2123537.808
10	377678.7978	2122861.561
11	377300.0156	2122562.817
12	377349.1518	2122049.087
13	377888.3173	2122306.798
14	377745.5058	2121477.703
15	378019.1268	2121334.465
16	379217.6027	2121464.87
17	379439.1139	2121835.394

Punto	Coordenada X	Coordenada Y
18	379849.9189	2121675.91
19	379594.9726	2121105.777
20	380133.2247	2121225.219
21	380794.1481	2120895.043
22	381417.7774	2120666.582
23	381236.3646	2121070.477
24	380922.9431	2121386.08
25	380475.6361	2121773.269
26	379903.4808	2121826.196
27	379618.5549	2122027.891
28	379025.2343	2122413.003
29	378939.9337	2123206.72
30	379177.1502	2123303.529
31	379523.6664	2123144.46
32	380064.843	2122827.337
33	380313.1459	2122386.099

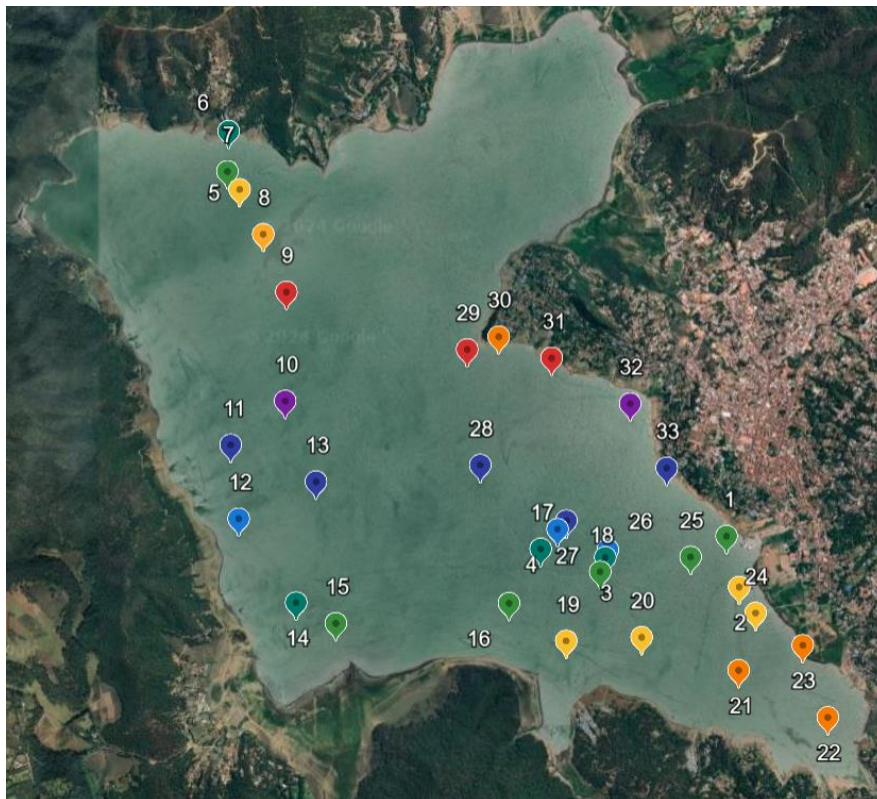


Figura 21. Coordenadas donde se realizaron las mediciones (Earth Explorer, 2024).

El procedimiento que se siguió para obtener las profundidades con el instrumento se describe a continuación:

- Una vez ubicados en las coordenadas de interés, por la orilla de la lancha se introdujo el DS en el agua.
- Se sumergió el disco hasta que no fue posible visualizarlo. Para asegurar la precisión de la medición de la profundidad, se tiró de la cadena del DS hasta que éste fuera visible de nuevo y posteriormente, se volvió a sumergir.
- Justo cuando desapareció en la profundidad del agua, se tomó la medición con ayuda de la cadena/cordón. La distancia va desde la ubicación del disco hasta la superficie del agua.

La fecha seleccionada para realizar las mediciones en campo se eligió estratégicamente para coincidir con el paso del satélite sobre el área de interés. Esta decisión se tomó para garantizar la sincronización entre los datos recopilados en el territorio y la información capturada por el satélite ese día, y así lograr resultados más precisos y confiables.

3.3. ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO O ÍNDICE DE CARLSON

En 1977 se propuso el Índice de Estado Trófico (IET), el cual se basa en la transparencia del agua a través del DS en un lago. Esta transparencia se relaciona con la cantidad de luz reflejada por la turbidez y el color del agua, que puede ser causado por sólidos o por la formación de sistemas coloidales (García et al, 2018).

El IET es una herramienta de evaluación utilizada para clasificar cuerpos de agua como lagos, estanques, y embalses, con base en la cantidad de actividad biológica y productividad que presentan (Instituto del Agua de la USF, s.f.). A continuación, se muestran las clasificaciones de los lagos de acuerdo con el IET en la tabla 9.

Tabla 9. Escala de valores del estado trófico en los cuerpos de agua (basado en Modificado de Carlson, 1977;1980, como citado en Orquera y Cabrera, 2020).

Estado de Eutrofia	IET	DS [m]
	0	64
Oligotrófico	10	32
IET < 30	20	16
	30	8
Mesotrófico	40	4
30 < IET < 60	50	2

Estado de Eutrofia	IET	DS [m]
	60	1
Eutrófico	70	0.5
60 < IET < 90	80	0.25
	90	0.12
Hipereutrófico	100	0.06
90 < IET < 100		

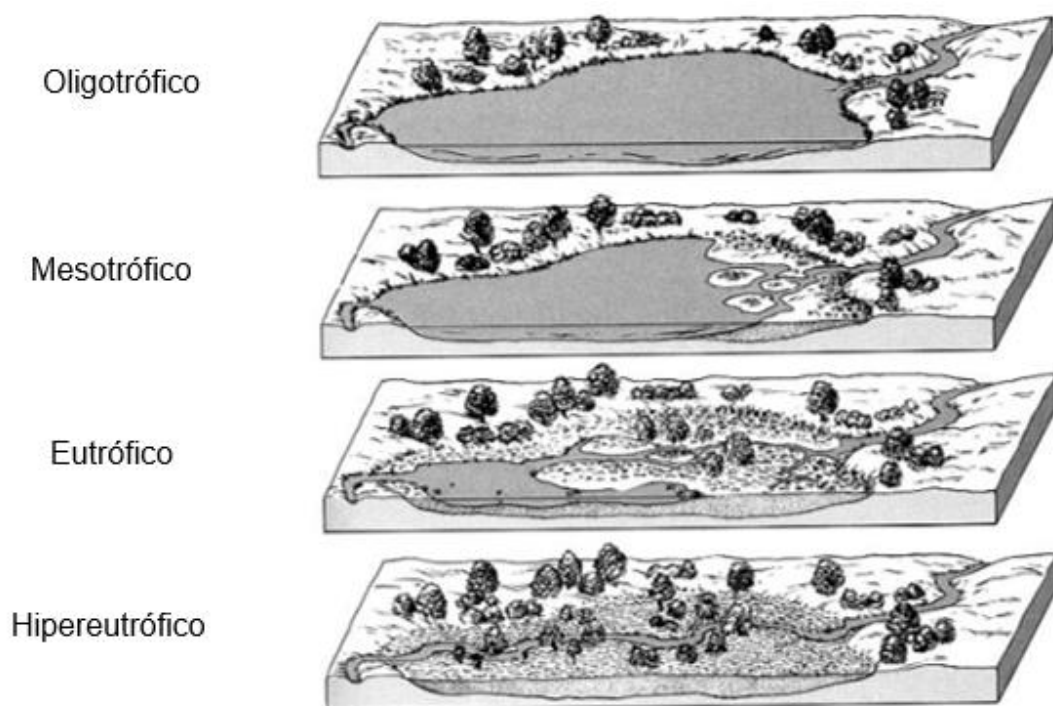


Figura 22. Niveles tróficos de los cuerpos de agua (basado en Urrutia, 2009, como citado en Figueroa, 2016).

Cuando se mide la transparencia con el DS, los datos de profundidad se ingresan en la ecuación 9 para obtener el IET de Carlson.

$$IET = 10 \left(6 - \frac{\ln(DS)}{\ln(2)} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

3.4. PLATAFORMA LANDSAT

El programa estadounidense Landsat, es el producto de la colaboración entre la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y el Servicio Geológico

de los Estados Unidos (USGS), que ofrece el catálogo más amplio de observaciones de la Tierra a nivel global (Instituto Geográfico Nacional, s.f.).

En este programa, la NASA tiene a su cargo los aspectos relacionados con el espacio, como son las naves espaciales, la coordinación de las misiones, el lanzamiento de los satélites y la verificación de su posición orbital. Mientras que la USGS asume la responsabilidad del sistema terrestre, las operaciones de vuelo, el procesamiento de datos y su distribución (USGS, 2022).

Desde el lanzamiento del primer satélite Landsat en 1972, su catálogo se ha vuelto fundamental, siendo utilizado por académicos, silvicultores, planificadores urbanos, administradores agrícolas y otros profesionales en una amplia variedad de aplicaciones. (Lulla et al., 2011, como citado en Lulla et al, 2021).

El satélite más reciente de la NASA es Landsat 9, y fue lanzado el 27 de septiembre de 2021 mediante el cohete Atlas V. Este satélite captura imágenes de la Tierra cada 16 días, lo que permite recopilar hasta 750 imágenes diarias (USGS, 2022).

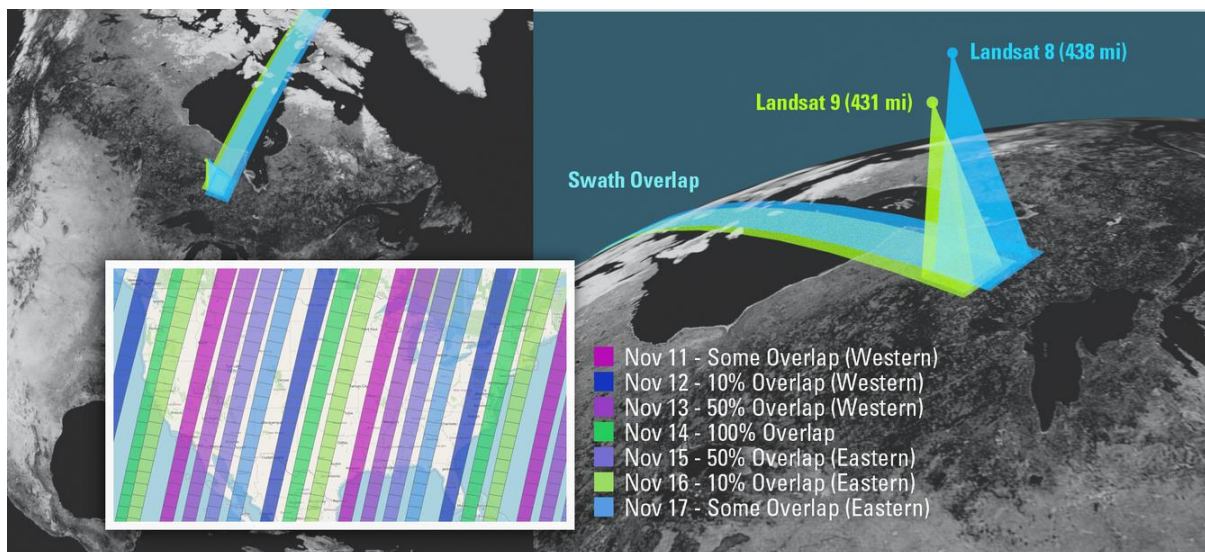


Figura 23. Landsat 9 y 8 en órbita para la toma de fotografías de la Tierra (Earth Resources Observation and Science Center, 2021).

Landsat 9 tiene una resolución radiométrica de 14 bits y está compuesto por once bandas espectrales, de las cuales nueve pertenecen al Operational Land Imager 2 (OLI-2) y dos al Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2) (NASA, s.f.). En la tabla 10 se muestran las bandas pertenecientes a Landsat 9, así como su longitud de onda y resolución.

Tabla 10. Bandas espectrales OLI y TIRS pertenecientes a Landsat 9 (USGS, 2022).

Banda espectral	Longitud de onda [μm]	Resolución [m]
Operational Land Imager (OLI)		
Banda 1: Ultra azul (costera/aerosol)	0.435 - 0.451	30
Banda 2: Azul	0.452 - 0.512	30
Banda 3: Verde	0.533 - 0.590	30
Banda 4: Rojo	0.636 - 0.673	30
Banda 5: Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	30
Banda 6: Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1	1.566 - 1.651	30
Banda 7: Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2	2.107 - 2.294	30
Banda 8: Pancromática	0.503 - 0.676	15
Banda 9: Cirrus	1.363 - 1.384	30
Thermal Infrared Sensor		
Banda 10: Infrarrojo térmico (TIR) 1	10.60 - 11.19	100*
Banda 11: Infrarrojo térmico (TIR) 2	11.50 - 12.51	100*
*Las bandas térmicas se adquieren con una resolución de 100 metros, pero se vuelven a muestrear a 30 metros.		

El OLI-2 y el TIRS-2 son instrumentos equipados con un tipo de sensor conocido como barredora. El OLI-2 utiliza la luz visible, la infrarroja cercana y la infrarroja de onda corta para capturar imágenes del planeta y obtener información de las bandas reflectantes. Por otro lado, el TIRS-2 captura imágenes térmicas para medir la temperatura de diversas áreas del planeta (NASA, sin fecha).

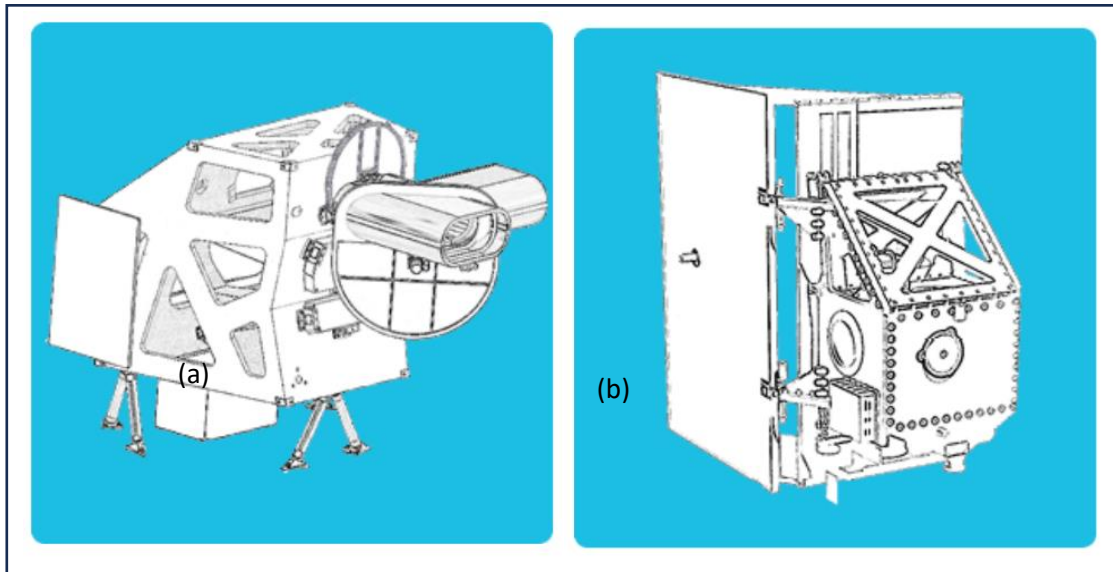


Figura 24. Instrumentos OLI-2 (a) y TIRS-2 (b) de Landsat 9 (NASA, s.f.).

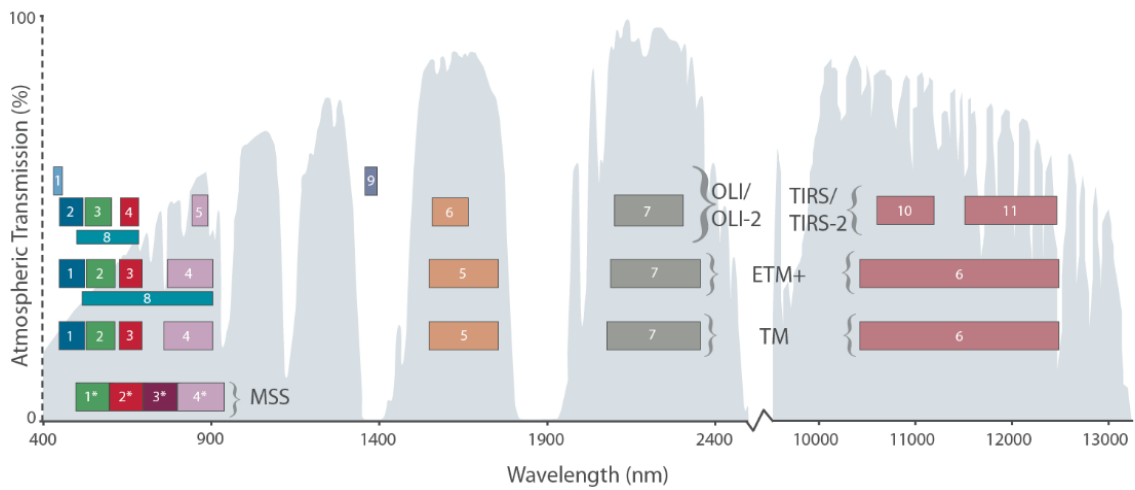


Figura 25. Ubicación de las bandas de Landsat 9 en las diferentes longitudes de onda (NASA, s.f.).

De forma general. La tabla 11 resume las características principales de Landsat 9.

Tabla 11. Características principales de Landsat 9 (basado en NASA, s.f.).

Instrumentos científicos	OLI-2 y TIRS-2
Construcción de OLI-2	Ball Aerospace y Technology Corp
Construcción de TIRS-2	Centro de vuelos espaciales Goddard de la NASA
Vida útil de diseño	5 años
Proveedor de naves espaciales	Northrop Grumman
Datos de imagen	> 700 escenas por día
Resolución radiométrica	14 bits
Fecha de lanzamiento	27 de septiembre de 2021
Vehículo de lanzamiento	Alianza de Lanzamiento Unida Atlas V 401
Órbita	Casi polar, sincrónica con el sol a una altitud de 704 km
Inclinación orbital	98.2°
Velocidad de la nave especial	26.972 km/h
Consumibles	10 años

De acuerdo con Sayler (2023), Landsat 9 ofrece productos científicos de reflectancia de la superficie que se generan por medio del Código de reflectancia de superficie terrestre (LaSCR) con parámetros de calibración de los metadatos y aplicando posteriormente rutinas de corrección atmosférica a los datos de reflectancia con ayuda de los datos auxiliares de vapor de agua, ozono y espesor óptico de aerosol.

3.5. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS BANDAS

Se descargaron imágenes satelitales pertenecientes a Landsat 9, accesibles a través de la página del USGS, donde se requirió crear un usuario y contraseña. Dentro del explorador de la tierra, se localizó el sitio de interés en la fecha de las mediciones de campo, el 6 de octubre del 2023, desafortunadamente las imágenes pertenecientes a ese día cuentan con un 37.7% de cobertura de nubes.

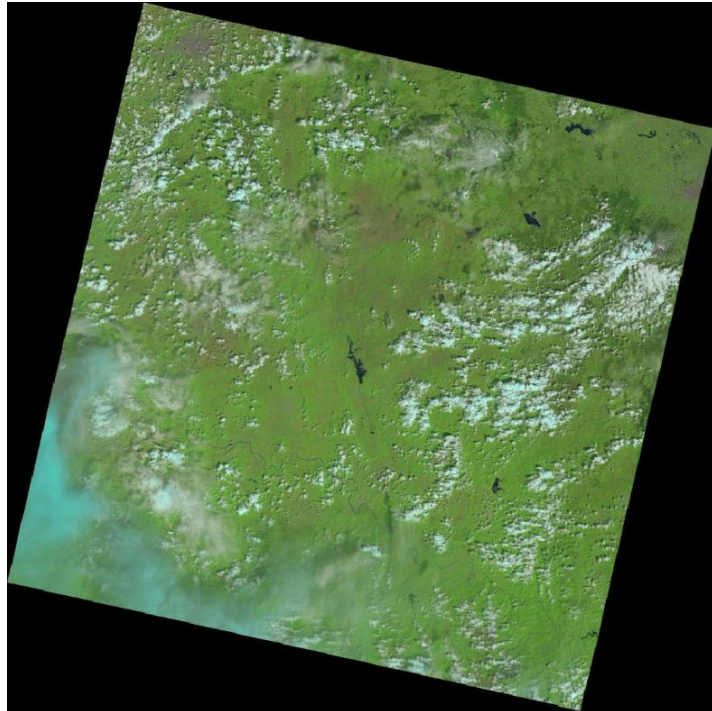


Figura 26. Imagen satelital descargada de USGS el 6 de octubre del 2023

Las imágenes se importaron al Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS, trabajando exclusivamente con las bandas de reflectancia OLI, es decir, de la 1 a la 7. En QGIS, se realizaron procedimientos como el recorte de las imágenes satelitales, enfocando únicamente a la zona de estudio, la creación del polígono del cuerpo de agua y la creación del polígono correspondiente a las nubes.

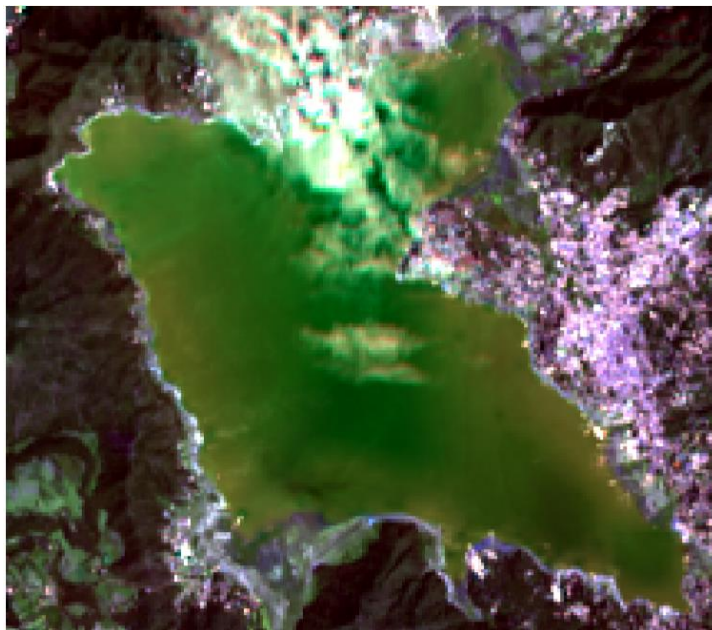


Figura 27. Recorte de la zona de estudio en color natural: Combinación de bandas 2,3,4 (Elaboración propia).

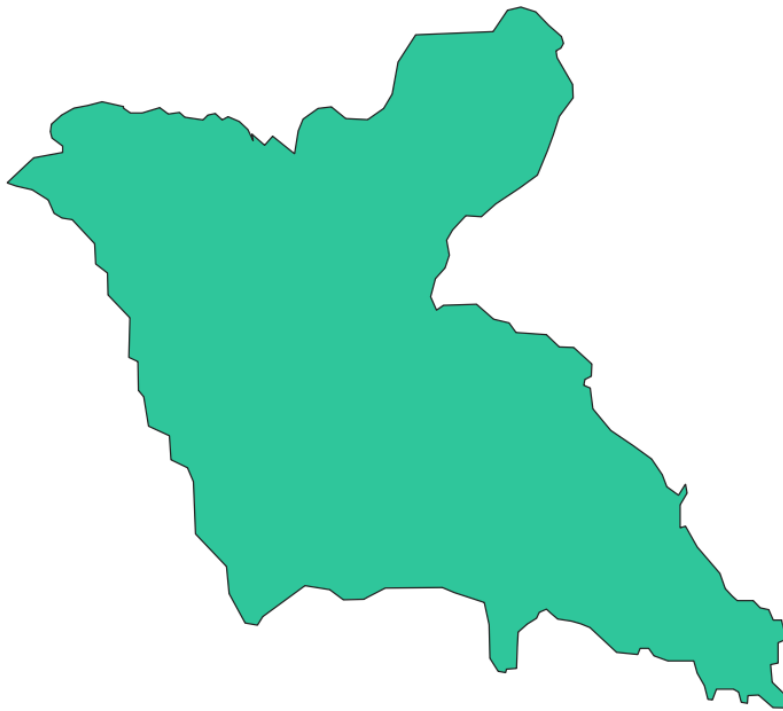


Figura 28. Polígono del embalse (Elaboración propia).



Figura 29. Polígono creado a partir de las nubes que se encuentran dentro del cuerpo de agua (Elaboración propia).

Además, según Sayler (2023), estas bandas tienen un factor de escala multiplicativo y un valor de compensación aditiva, los cuales se aplicaron para escalar las bandas en la calculadora ráster de QGIS mediante la ecuación 10, pasando los ND a reflectancia.

$$B_{decimal} = (Banda_i \cdot 0.0000275) + (-0.2) \quad \text{Ecuación 10}$$

Una vez que las bandas fueron escaladas, los datos de cada píxel quedaron en formato decimal, por lo que cada banda, además de ser escalada, se multiplicó por 100 para que los datos queden expresados en porcentajes de reflectancia. Tras realizar estos cálculos, se procedió a extraer los datos de cada banda correspondientes a las coordenadas de las mediciones. Los datos se registran en la tabla 12.

Tabla 12. Porcentajes de reflectancias de las siete bandas obtenidos en cada coordenada (Elaboración propia).

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Reflectancia en cada banda [%]						
			B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
1	380706.7396	2121827.09	1.659	2.6132	5.6657	2.9405	1.5765	0.49025	0.2977
2	380810.1889	2121565.11	1.5792	2.561	5.6492	2.8387	1.4885	0.438	0.2482
3	379885.6135	2121774.05	0.1822	1.5765	5.2395	2.3025	0.8477	0.23175	0.1877
4	379556.8349	2121969.88	0	1.4142	5.2835	2.2695	0.8972	0.27025	0.196
5	377373.0845	2124314.65	0	1.4335	6.3642	2.8415	2.363	0.60025	0.4435
6	377299.8327	2124714.79	0.8862	2.44	7.6292	4.1532	5.8362	2.72875	1.9285
7	377282.943	2124373.66	0	1.5545	6.411	2.9542	2.8057	0.67175	0.4655
8	377534.5717	2124006.14	0	1.439	6.1717	2.7452	1.9092	0.746	0.6992
9	377692.0763	2123537.80	0	1.2685	0.372	2.3822	1.1805	0.372	0.3335
10	377678.7978	2122861.56	0	1.4197	5.6135	2.3382	1.0127	0.3445	0.295
11	377300.0156	2122562.81	0.7322	2.1292	5.7262	2.6792	1.4445	0.49025	0.35
12	377349.1518	2122049.08	1.0265	2.3272	5.8582	2.9102	1.5077	0.42425	0.3032
13	377888.3173	2122306.79	0	1.395	5.6932	2.3905	1.0787	0.4765	0.405
14	377745.5058	2121477.70	0.7212	2.0605	5.7647	2.8415	1.351	0.30325	0.2317
15	378019.1268	2121334.46	0.9605	2.3547	6.213	3.2705	1.6975	0.3995	0.2372
16	379217.6027	2121464.87	0.2482	1.637	5.3	2.4345	1.0897	0.38025	0.2977
17	379439.1139	2121835.39	0	1.0787	5.2312	2.165	0.823	0.26475	0.1767
18	379849.9189	2121675.91	0.1272	1.5462	5.2147	2.286	0.8202	0.23175	0.185
19	379594.9726	2121105.77	0.7625	2.1072	5.5722	2.8497	1.5407	0.7185	0.5975
20	380133.2247	2121225.21	0.0365	1.3977	4.7252	2.1787	0.8725	0.2785	0.2042
21	380794.1481	2120895.04	0.559	1.8102	4.8957	2.5005	1.2905	0.56725	0.4325
22	381417.7774	2120666.58	0.2592	1.5985	4.8462	2.3327	1.1282	0.35	0.2262
23	381236.3646	2121070.47	0.1107	1.4885	5.058	2.2282	1.0732	0.35275	0.2565
24	380922.9431	2121386.08	1.2767	2.3465	5.4732	2.7535	1.384	0.427	0.2647
25	380475.6361	2121773.26	0.9137	2.165	5.4127	2.6242	1.23	0.3775	0.2345

Punto	Coordenada X	Coordenada Y	Reflectancia en cada banda [%]						
			B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
26	379903.4808	2121826.19	0.2372	1.6232	5.355	2.3245	0.9	0.25375	0.218
27	379618.5549	2122027.89	0	1.5242	5.3137	2.3327	0.9055	0.284	0.1712
28	379025.2343	2122413.00	0	0.4462	5.3825	2.143	1.0155	2.33275	1.2437
29	378939.9337	2123206.72	0	0.3555	5.5337	2.2255	1.2685	0.61125	0.46
30	379177.1502	2123303.52	0	0.6085	5.7207	2.5747	1.857	2.38225	1.4252
31	379523.6664	2123144.46	1.4775	2.671	6.0837	3.0862	1.8955	0.6195	0.372
32	380064.843	2122827.33	1.3262	2.5005	5.718	2.9735	1.615	0.54525	0.3445
33	380313.1459	2122386.09	1.5737	2.6682	5.828	3.1165	1.7827	0.636	0.427

Obtenidos esos datos, se requirió un análisis estadístico con la regresión lineal múltiple en el software MATLAB con la finalidad de encontrar un modelo predictivo para la penetración luminosa y para el IET.

Una vez definidos los modelos, se obtuvieron en QGIS los mapas del embalse de la presa donde se reflejan los datos de la penetración luminosa en el agua y el IET.

IV. RESULTADOS

4.1. TRABAJO DE CAMPO

Las mediciones realizadas en campo con el DS, junto con el IET calculado con la ecuación de Carlson (ecuación 9) se presentan en la tabla 13.

Tabla 13. Mediciones de profundidad de penetración luminosa medidos con el DS e IET (Elaboración propia).

Punto	Profundidad [m]	IET
1	0.86	62.17591435
2	0.83	62.68816758
3	1	60
4	1.03	59.57355663
5	0.54	68.88968688
6	0.55	68.62496476
7	0.5	70
8	0.56	68.36501268
9	0.81	63.04006187
10	0.85	62.34465254
11	0.87	62.00912694
12	0.81	63.04006187
13	0.96	60.58893689
14	0.64	66.4385619
15	0.47	70.89267338
16	1.04	59.43416472
17	0.88	61.84424571
18	1	60
19	0.79	63.40075442
20	0.88	61.84424571
21	0.9	61.52003093
22	0.9	61.52003093
23	1.05	59.29610672
24	1.05	59.29610672
25	0.9	61.52003093
26	0.89	61.68122759
27	1.04	59.43416472
28	0.9	61.52003093
29	0.84	62.51538767
30	0.82	62.86304185
31	0.79	63.40075442
32	0.79	63.40075442
33	0.72	64.73931188

En las figuras 30 y 31, se muestra gráficamente los resultados de la penetración luminosa medida en campo y el IET calculados a partir de las profundidades medidas.

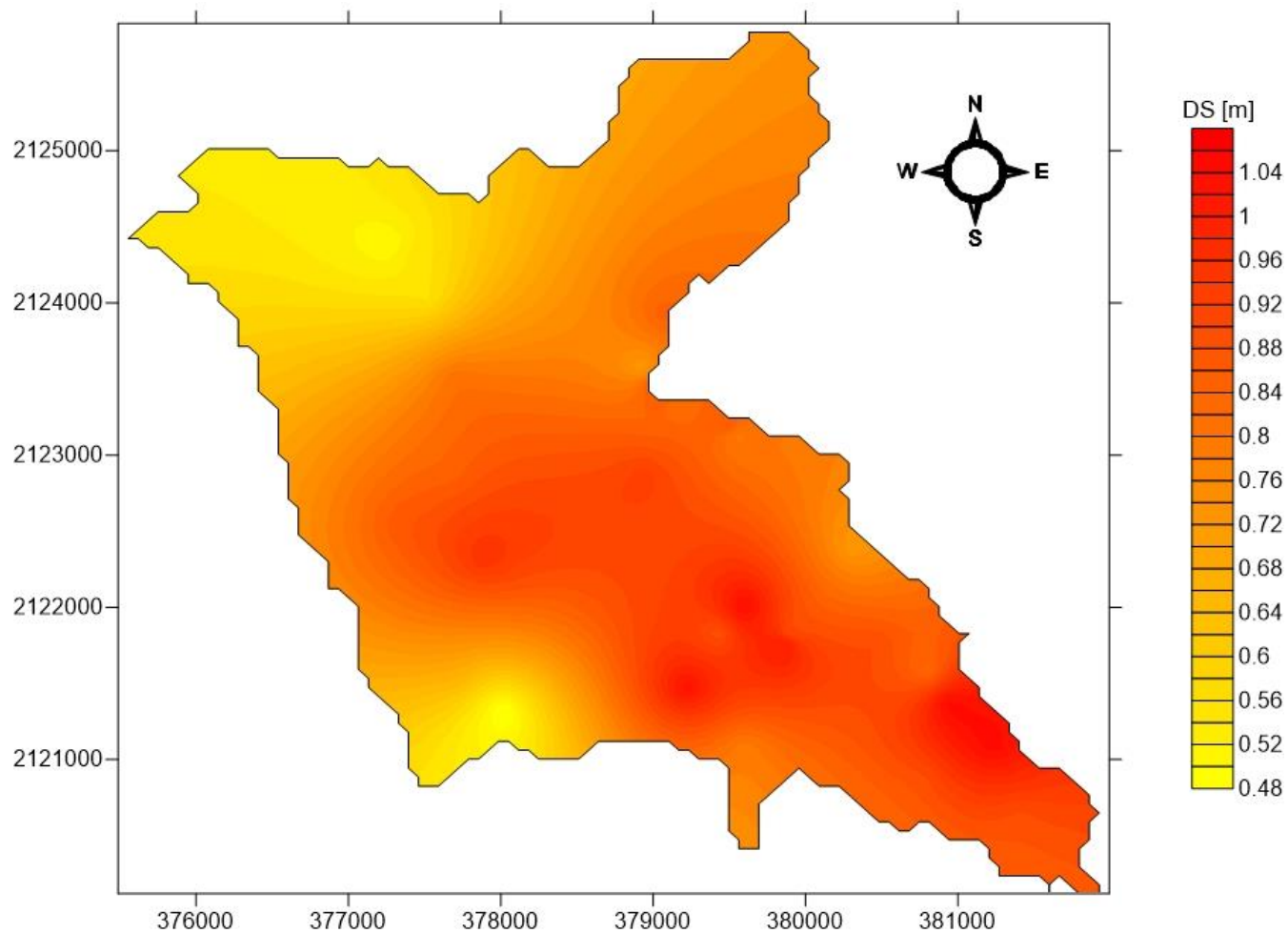


Figura 30. Penetración luminosa en la presa Miguel Alemán en Valle de Bravo medida con DS (Elaboración propia).

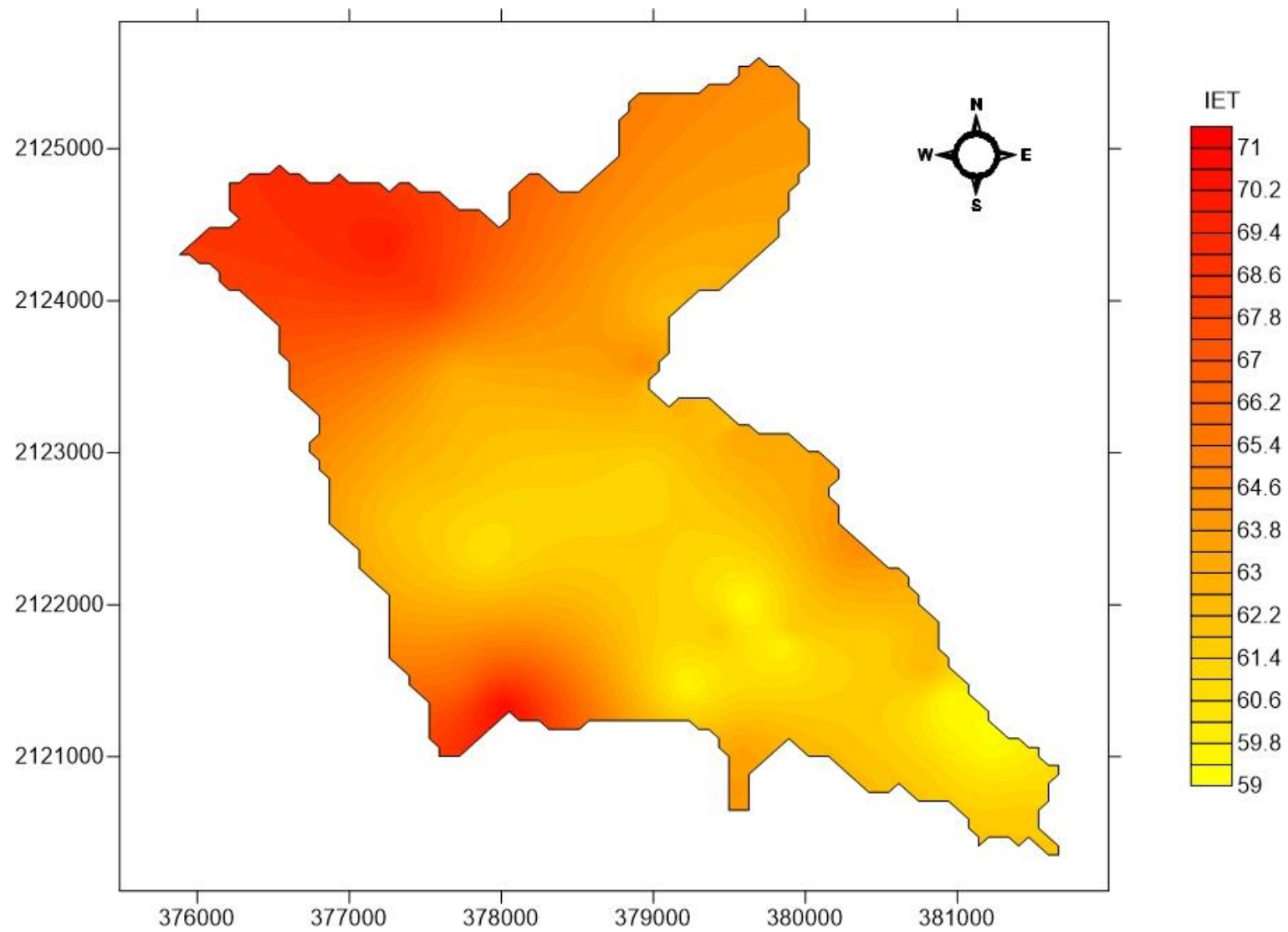


Figura 31. Índice de Estado Tráfico de la presa Miguel Alemán en Valle de Bravo obtenido a partir de la penetración luminosa (Elaboración propia).

4.2. MODELOS

Los modelos para la penetración luminosa y el IET obtenidos con MATLAB son los siguientes. Además, se presentan también su respectivo coeficiente de correlación y el error estándar:

- Modelo para obtener la penetración luminosa en la presa Miguel Alemán en Valle de Bravo.

$$DS = 2.4093 + 0.0689B_1 + 0.292B_2 + 0.0055B_3 - 0.9093B_4 + 0.0989B_5 - 0.0253B_6 + 0.263B_7$$

$$R^2 = 0.7647$$

$$R_{aj}^2 = 0.6988$$

$$Error = 0.0899 \text{ m}$$

- Modelo para obtener el IET en la presa Miguel Alemán en Valle de Bravo.

$$IET = 30.7317 - 2.1947B_1 - 5.2833B_2 - 0.0376B_3 + 18.0861B_4 - 1.8453B_5 + 1.709B_6 - 7.4833B_7$$

$$R^2 = 0.8043$$

$$R_{aj}^2 = 0.7495$$

$$Error = 1.5967$$

En la figura 32 y 33 se presentan los mapas generados en QGIS a partir de los modelos obtenidos con la regresión lineal múltiple.

Penetración luminosa en el embalse de la presa "Miguel Alemán"

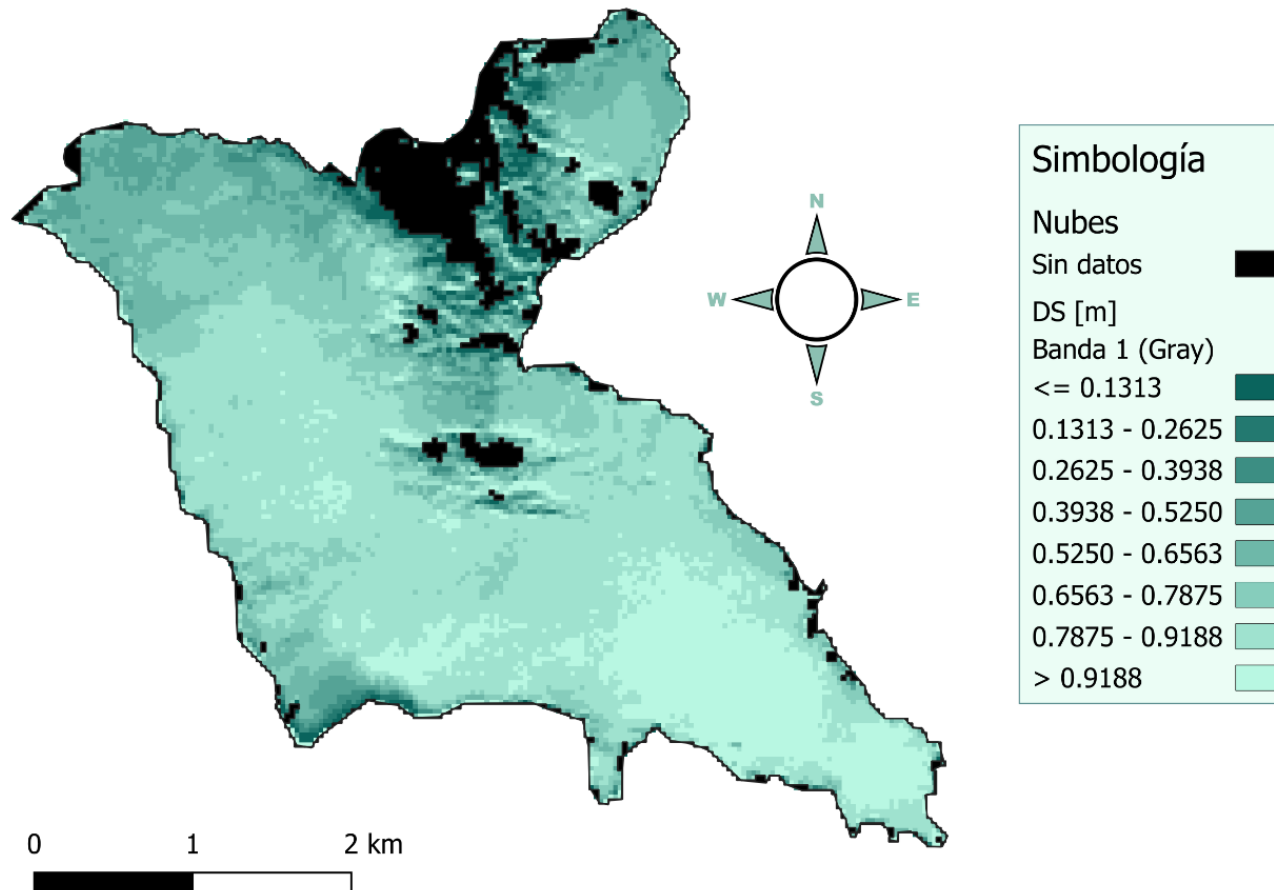


Figura 32. Penetración luminosa en el embalse de la presa "Miguel Alemán" ubicada en Valle de Bravo el 06 de octubre del 2023 (Elaboración propia).

Índice de Estado Tráfico (IET) en el embalse de la presa "Miguel Alemán"

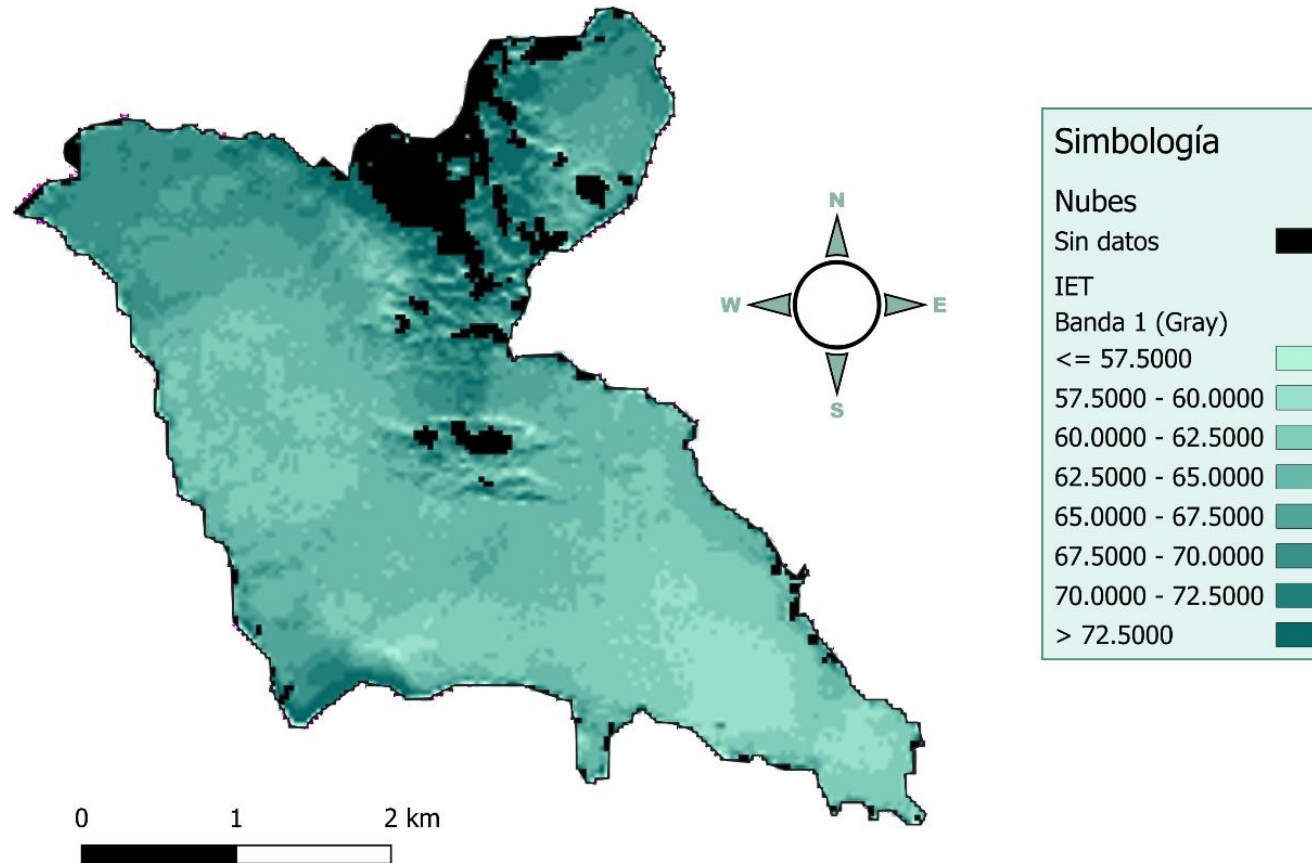


Figura 33. Índice de Estado Tráfico en el embalse de la presa "Miguel Alemán" ubicada en Valle de Bravo el 06 de octubre del 2023 (Elaboración propia).

De los mismos puntos donde se obtuvieron las mediciones en campo, se extrajeron los datos obtenidos con los modelos y se calculó el error entre los datos de campo y los del modelo.

Tabla 14. Porcentaje de error existente entre los datos obtenidos en campo y los modelos generados (Elaboración propia).

Punto	Campo		Modelo		Error	
	Profundidad [m]	IET	Profundidad [m]	IET	Profundidad [m]	IET
1	0.86	62.17591435	0.86586	61.953823	0.68%	0.36%
2	0.83	62.68816758	0.917139	61.008778	9.50%	2.75%
3	1	60	0.944706	60.875553	5.85%	1.44%
4	1.03	59.57355663	0.910743	61.777275	13.09%	3.57%
7	0.54	68.88968688	0.592337	68.35545	8.84%	0.78%
8	0.55	68.62496476	0.444089	70.74252	23.85%	2.99%
9	0.5	70	0.587567	68.435486	14.90%	2.29%
10	0.56	68.36501268	0.692282	65.98266	19.11%	3.61%
11	0.81	63.04006187	0.807847	63.896103	0.27%	1.34%
12	0.85	62.34465254	0.881737	62.327168	3.60%	0.03%
13	0.87	62.00912694	0.899253	61.670185	3.25%	0.55%
14	0.81	63.04006187	0.763651	64.27156	6.07%	1.92%
15	0.96	60.58893689	0.855007	62.825417	12.28%	3.56%
16	0.64	66.4385619	0.695482	56.72843	7.98%	17.1%
17	0.47	70.89267338	0.443543	70.874756	5.96%	0.03%
18	1.04	59.43416472	0.896332	61.780212	16.03%	3.80%
19	0.88	61.84424571	0.863792	62.935337	1.88%	1.73%
20	1	60	0.943508	60.929916	5.99%	1.53%
21	0.79	63.40075442	0.807868	63.169853	2.21%	0.37%
22	0.88	61.84424571	0.997771	59.83175	11.80%	3.36%
23	0.9	61.52003093	0.956657	60.332523	5.92%	1.97%
24	0.9	61.52003093	0.961642	60.54859	6.41%	1.60%
25	1.05	59.29610672	1.017923	59.43753	3.15%	0.24%
26	1.05	59.29610672	0.904495	61.32128	16.09%	3.30%
27	0.9	61.52003093	0.921747	61.16747	2.36%	0.58%
28	0.89	61.68122759	0.955344	60.616207	6.84%	1.76%
29	1.04	59.43416472	0.887623	62.27288	17.17%	4.56%
30	0.9	61.52003093	0.881719	63.156013	2.07%	2.59%
32	0.84	62.51538767	0.625294	68.15742	34.34%	8.28%
37	0.82	62.86304185	0.674515	67.0631	21.57%	6.26%
38	0.79	63.40075442	0.787793	63.743988	0.28%	0.54%
39	0.79	63.40075442	0.795002	63.547787	0.63%	0.23%
40	0.72	64.73931188	0.767605	63.92867	6.20%	1.27%

Porcentaje de error promedio de la profundidad de la penetración luminosa: **8.97%**

Porcentaje de error promedio del Índice de Estado Tráfico: **2.61%**

Aplicando los modelos al embalse en fechas distintas surgieron las siguientes figuras:

Penetración luminosa en el embalse de la presa "Miguel Alemán"

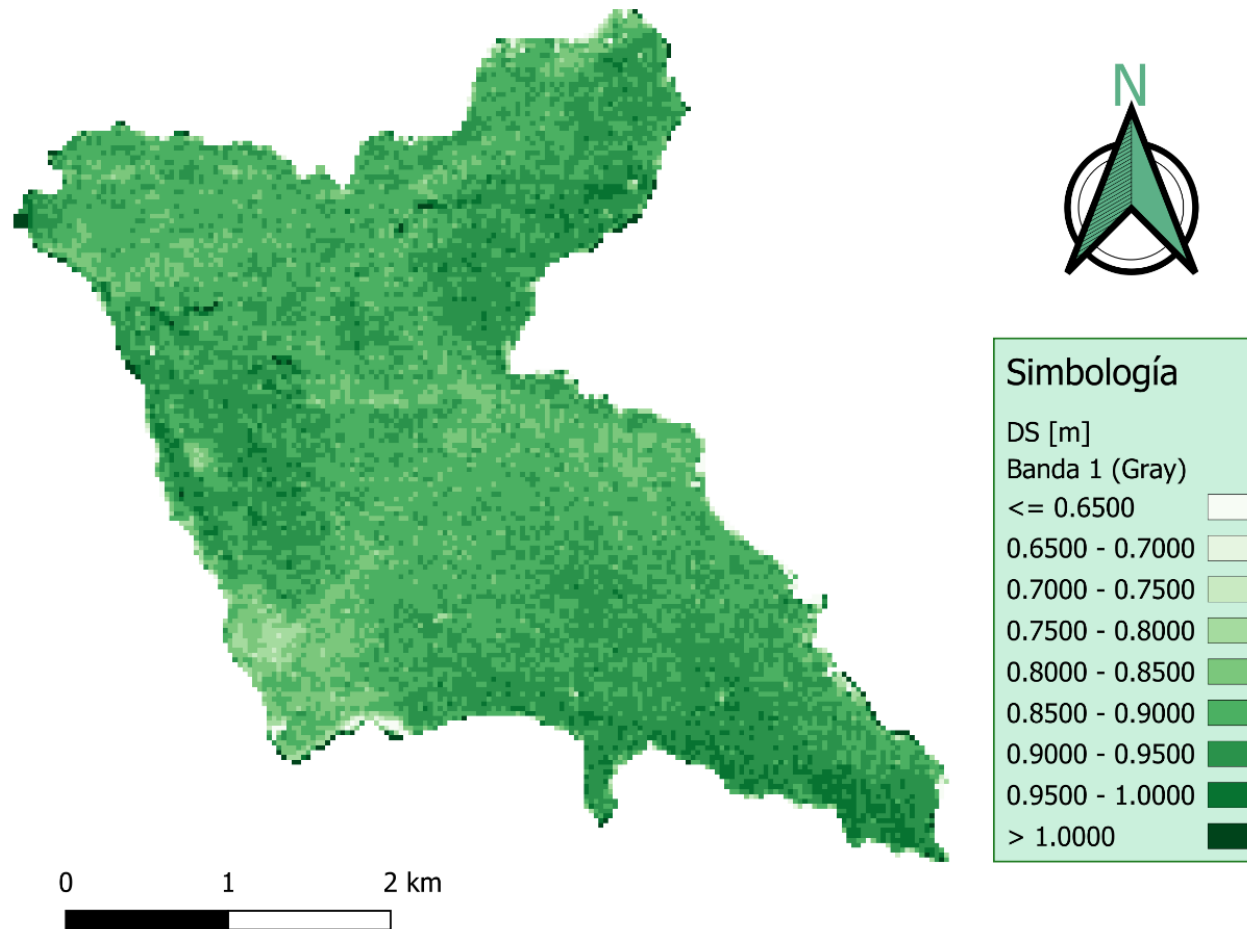


Figura 34. Penetración luminosa en el embalse de la presa "Miguel Alemán" ubicada en Valle de Bravo el 14 de octubre del 2023 (Elaboración propia).

Índice de Estado Trófico (IET) en el embalse de la presa "Miguel Alemán"

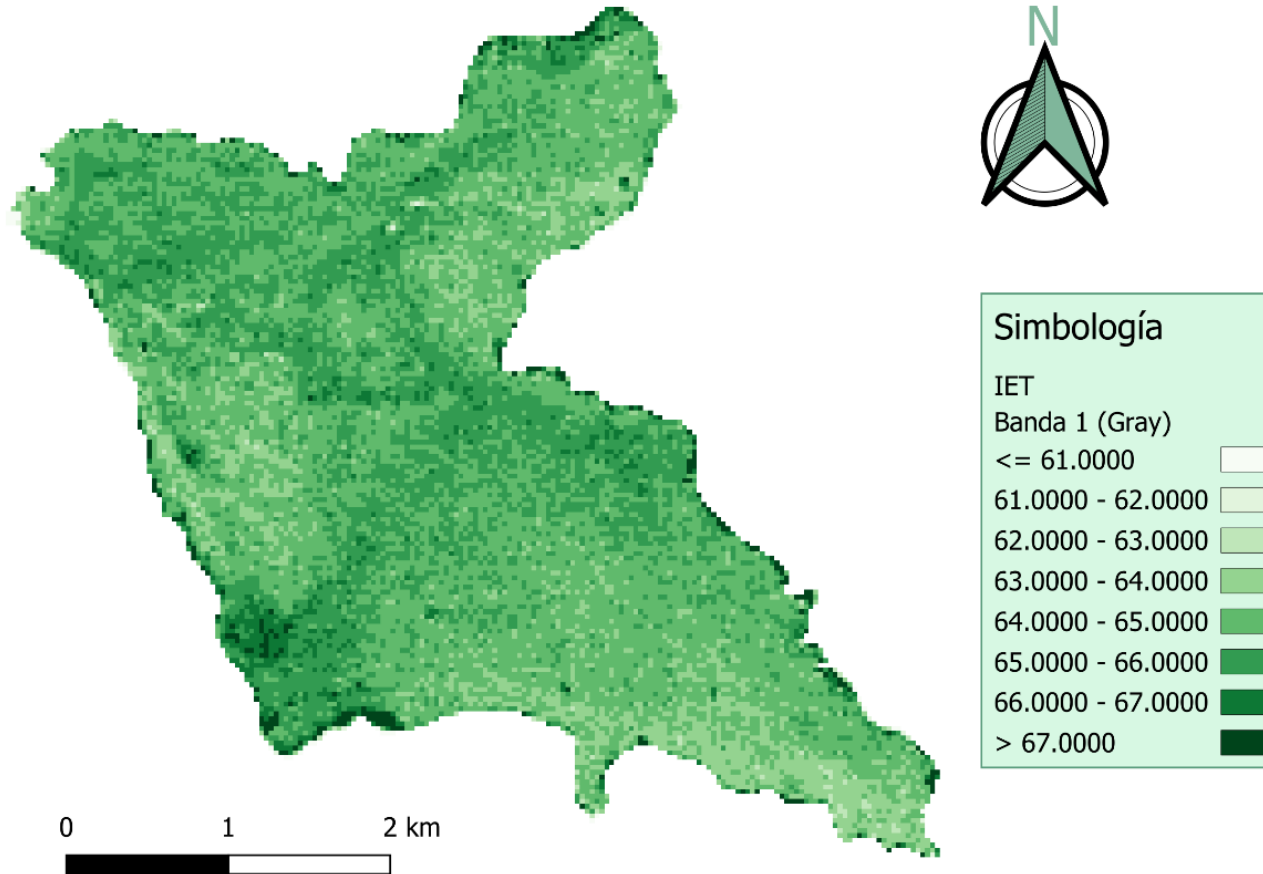


Figura 35. Índice de Estado Trófico en el embalse de la presa "Miguel Alemán" ubicada en Valle de Bravo el 14 de octubre del 2023 (Elaboración propia).

Penetración luminosa en el embalse de la presa "Miguel Alemán"

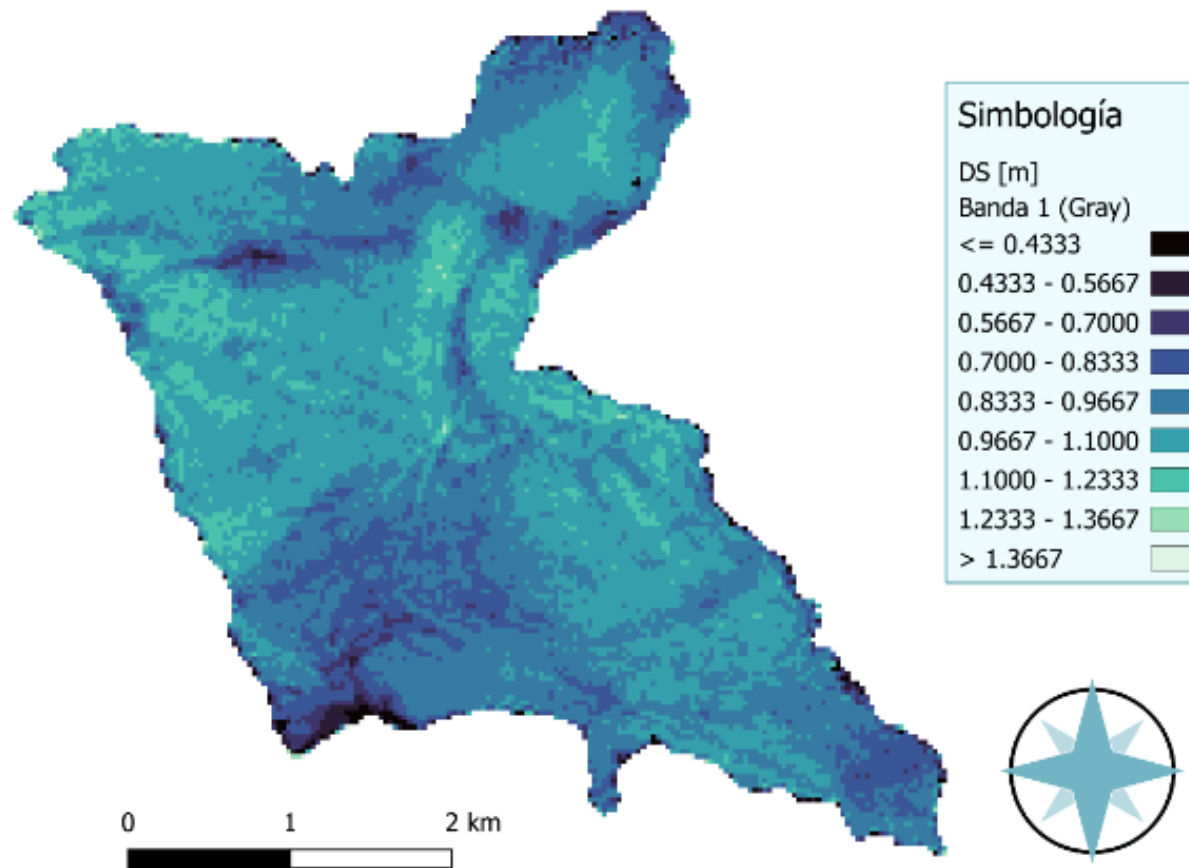


Figura 36. Penetración luminosa en el embalse de la presa "Miguel Alemán" ubicada en Valle de Bravo el 30 de octubre del 2023 (Elaboración propia).

Índice de Estado Trófico (IET) en el embalse de la presa "Miguel Alemán"

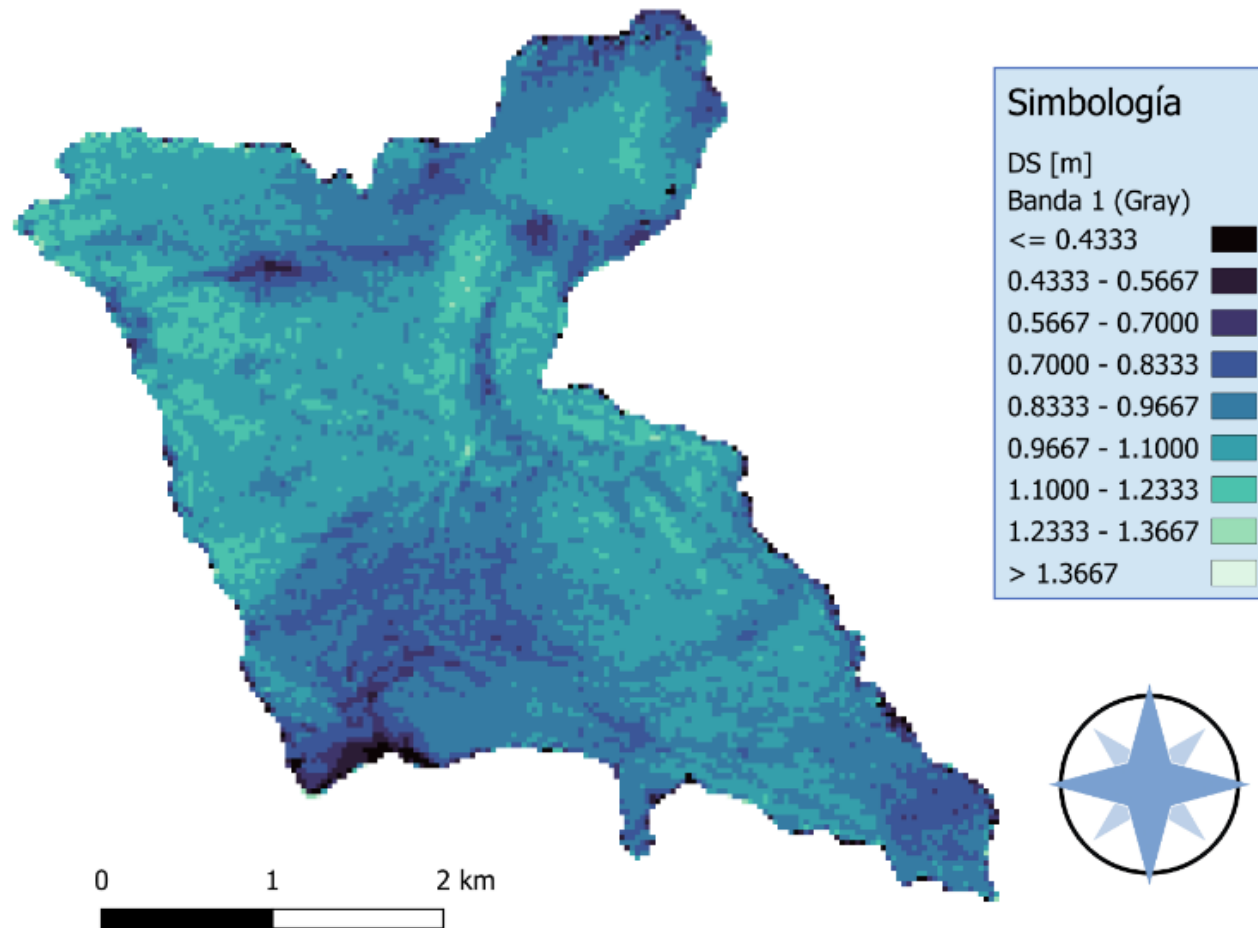


Figura 37. Índice de Estado Trófico en el embalse de la presa "Miguel Alemán" ubicada en Valle de Bravo el 30 de octubre del 2023 (Elaboración propia).

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los modelos obtenidos tienen ajustes que se consideran adecuados, ya que los coeficientes de correlación son de 0.76 para la penetración luminosa y 0.80 para el IET. Además, el porcentaje de error entre los datos de campo y los modelos es del 8.97% para la penetración luminosa y 2.61% para el IET. Las figuras 30 y 31 que muestran los resultados obtenidos de las 33 muestras, coinciden con las figuras 32 y 33 obtenidas con los modelos.

En la figura 32, podemos apreciar que en la zona sur y sureste se encuentran las penetraciones luminosas en el agua más profundas, cercanas a 1m. Conforme recorremos el mapa hacia el norte, estas profundidades disminuyen paulatinamente, llegando a distancias mínimas de 13 cm aproximadamente. Hay zonas marcadas con color negro que corresponden a las nubes presentes el día en que el satélite pasó por la zona de estudio, por lo que en esa área no se tienen datos.

De igual forma, en la figura 33 se aprecian las mismas zonas de nubes sin datos. Dado que la penetración luminosa en el agua es inversamente proporcional al IET, a diferencia de la figura 32, el mayor índice en el embalse se encuentra en la zona norte (mayor a 70), mientras que el menor (57 aproximadamente) se encuentra en la zona sureste del embalse. La mayoría del área del cuerpo de agua se encuentra en el rango de clasificación mesotrófico, lo cual indica que su estado de eutrofia es ese. Esto significa que el embalse tiene niveles moderados de nutrientes, lo que estimula el albergue de la vida acuática, tanto de plantas como animales.

En la figura 34 tenemos las profundidades más grandes (de 1 m aproximadamente) en el este, sureste y noreste del embalse, y en la zona centro y sur, las profundidades mínimas (de 70 cm aproximadamente). Por el contrario, en la figura 35, el índice más bajo (62 aproximadamente) se encuentra en el este, sureste y noreste, mientras que el más alto (67 aproximadamente) se encuentra en la zona centro y sur.

En la figura 36 las profundidades menores (40 cm aproximadamente) se encuentran en la periferia de las zonas sur, sureste y norte, mientras que las profundidades mayores (1.2 m aproximadamente) están en la zona centro, este, oeste y noroeste, contrario a lo sucedido en la figura 37 con el IET.

El embalse sigue clasificado como mesotrófico el 14 y 30 de octubre del 2023, como el 2023. La presencia de nutrientes reduce la claridad del agua, lo que causa turbidez, producción de toxinas, desoxigenación y cambios en el olor, color y sabor, lo que afecta la calidad del agua.

VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Se realizó una campaña de muestreo en distintas coordenadas del embalse y se recopilaron datos en el sitio sobre la profundidad del disco de Secchi, con el fin de validar y calibrar el modelo predictivo desarrollado a partir de datos de percepción remota y análisis estadístico.

Se adquirieron imágenes satelitales de alta resolución temporal y espacial de la presa Miguel Alemán en Valle de Bravo mediante el Servicio Geológico de los Estados Unidos, y se procesaron en un Sistema de Información geográfica.

Se determinó la técnica del modelado estadístico con mejor ajuste para predecir la penetración luminosa y el índice de estado trófico a través de comparativas entre diversas técnicas.

Se compararon las predicciones del modelo con datos de campo obtenidos mediante mediciones directas de la profundidad del disco de Secchi para evaluar la precisión y confiabilidad del modelo.

Se desarrolló un modelo predictivo que estima la penetración luminosa y el índice de estado trófico en las aguas de la presa Miguel Alemán, ubicada en Valle de Bravo, para monitorear la calidad del agua a través de la aplicación de técnicas de percepción remota, análisis estadístico detallado y datos obtenidos en campo.

Con la percepción remota y la reflectancia de la luz en los cuerpos de agua, no solo se puede obtener información del estado de eutrofización, además se pueden identificar parámetros que afectan la calidad del agua, tal como los SST, turbiedad, materia orgánica, temperatura, oxígeno disuelto, etc. Esto permite un análisis más íntegro que a su vez, permiten implementar mejores estrategias para la conservación de las masas de agua.

BIBLIOGRAFÍA

1. Academia Balderix. (2024). *Correlación. Probabilidad y Estadística*. Disponible el 29/07/2024 en: <https://www.probabilidadyestadistica.net/correlacion/>
2. Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), (sin fecha). *Landsat 9. Landsat Science. NASA*. Disponible el 23/04/2024 en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/>
3. Alfonso, B. T., & Rebeca, G. V. *¿ES SUSTENTABLE EL EMBALSE DE VALLE DE BRAVO COMO FUENTE DE ABASTECIMIENTO?*
4. Álvarez, J. P. A., Cejudo, L. C. A., Valle, O. R., Salazar-Sosa, E., Trejo-Escareño, H. I., & Lopez-Martínez, J. D. (2014). *Modelo predictivo de la calidad del agua en reservorios de Chihuahua-México usando la percepción remota*. AGROFAZ, 14(1).
5. Arredondo, H. W. (2002). *Sistema Cutzamala*. TecnoCultura, 6-6.
6. Baeza, E. (2016). *Calidad del Agua*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile-BCN.
7. Banderas, A., & González, R. (sin fecha). *¿Es sustentable el embalse de valle de bravo como fuente de abastecimiento?* Academia. Disponible el 29/05/2024 en: https://www.academia.edu/31753611/ES_SUSTENTABLE_EL_EMBALSE_DE_VALLE_DE_BRAVO_COMO_FUENTE_DE_ABASTECIMIENTO
8. Centro de Investigación en Política Pública. (2023, 7 de febrero). *Situación del agua en México - IMCO*. IMCO. Disponible el 09/02/204 en: <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>
9. Claude E. Boyd Ph.D. (2004, 1 de febrero). *Secchi disk visibility: Correct measurement, interpretation*. Global Seafood Alliance. Disponible el 10/01/2024 en: <https://www.globalseafood.org/advocate/secchi-disk-visibility-correct-measurement-interpretation/>
10. Comisión Nacional del Agua (México). *Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala*. (2005). Sistema Cutzamala: agua para millones de mexicanos. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala.
11. Comisión Nacional del Agua. (2017, 2 de mayo). *Sistema Cutzamala cumple 35 años de servicio*. gov.mx. Disponible el 07/02/2024 en:

<https://www.gob.mx/conagua/articulos/sistemacutzamala-cumple-35-anos-de-servicio?idiom=es>

12. Comisión Nacional del Agua. (2022, octubre). *Estadísticas del Agua en México 2021*. conagua.gob.mx. Disponible el 09/02/2024 en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>
13. Comisión Nacional del Agua. (2023). *Reporte del clima en México: Junio 2023*. smn.conagua.gob.mx. Disponible el 09/02/2024 en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Diagnóstico%20Atmosférico/Reporte%20del%20Clima%20en%20México/RC-Junio23.pdf>
14. Comisión Nacional del Agua. (2024, marzo). *Almacenamiento en presas del Sistema Cutzamala 2024*. Gobierno de México. Disponible el 19/08/2024 en: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/almacenamiento-en-presas-del-sistema-cutzamala>
15. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2019, 9 de diciembre). *Caso Valle de Bravo | Biodiversidad Mexicana. Biodiversidad Mexicana*. Disponible el 17/01/2024 en: https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/m_ecosistemas/ValleBravo
16. de la Federación, D. O. (2011). *Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Región Hidrológica número 18 Balsas*.
17. DE, S. D. A. Y. D., & MONTERREY, I. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-2021, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LÍMITES PERMISIBLES DE LA CALIDAD DEL AGUA PREFACIO.
18. Dirección General del Área Académica Técnica de la Universidad Veracruzana. (2022). *Programa de estudio de experiencia educativa. Universidad Veracruzana*. Disponible el 11/06/2024 en: <https://www.uv.mx/veracruz/fimcn/files/2022/03/Calculo-multivariable.pdf>
19. Earth Resources Observation and Science Center (EROS). (2021, 15 de noviembre). *Underfly Positions Landsat 9 below Landat 8 for simultaneous scenes*. USGS. Disponible el 19/04/2024 en: <https://www.usgs.gov/centers/eros/news/underfly-positions-landsat-9-below-landsat-8-simultaneous-scenes>

20. Escamilla Canales, R. (2010). *Modelo atmosférico y de radiación solar para reconocimiento de firmas espectrales*.
21. Espigares García M. y Fernández-Crehuet M. 1999. *Calidad del agua para consumo público: caracteres físico-químicos*. En Estudio sanitario del agua. Pérez López. J. A. y Espigares García M. (eds). Editorial Universidad de Granada, Granada.
22. Figueroa Encina, F. F. (2016). *Incidencia de la composición del medio granular de un humedal artificial sobre un cuerpo receptor de aguas tratadas*. Repositorio bibliográfico Universidad del Bío-Bío. Disponible el 09/05/2024 en: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2253/1/Figueroa_Encina_Felipe.pdf
23. Fontal, B., Suárez, T., & Reyes, M. (2005). *El espectro electromagnético y sus aplicaciones*. *Escuela de la Ingeniería*, 1, 24.
24. García Miranda, F. G., Miranda Rosales, V., & De la Rosa Gómez, I. (2018). *Evaluación del estado trófico de los lagos del nevado de Toluca mediante sistemas de información geográfica*.
25. *Geomatik sin Fronteras*. (s.f.). *Percepción Remota*. *Geomatik sin Fronteras*. Disponible el 21/08/2024 en: <https://geomatiksinfronteras.wordpress.com/percepcion-remota/>
26. Ghione, A. (2021). *Medición de turbidez en agua*.
27. Gobierno de México. (2021). *Programa Hídrico Regional 2021-2024. Región Hidrológico- Administrativa IV Balsas*. gob.mx. Disponible el 18/01/2024 en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/779165/PHR-Balsas_231122.pdf
28. Gobierno del Estado de México. (s.f.). *Presa Miguel Alemán, Valle de Bravo*. Gobierno del Estado de México. Disponible el 17/01 2024 en: https://experiencia.edomex.gob.mx/recursos_turisticos/mostrarDetalleRecursos/2321
29. Guzmán, A. P. A. (2019). *Análisis y clasificación de firmas espectrales utilizando técnicas de aprendizaje automático* (Doctoral dissertation, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica).
30. H. Ayuntamiento de Valle de Bravo. (2017, 19 de marzo). *Estado de México - Valle de Bravo*. Wayback Machine. Disponible el 17/01/2024 en:

- <https://web.archive.org/web/20170319230344/http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15110a.html>
31. Hernández, J., & Montaner, D. (2009). Patrones de respuesta espectral. *Tecnologías Geoespaciales: Experiencias Aplicadas al Estudio y Gestión del Territorio*. Carlos Mena (Ed.) ISBN, 978-956.
 32. Ingeoexpert. (sin fecha). *Configuración, estructura y características de las imágenes en teledetección*. Ingeoexpert. Disponible el 26/04/2024 en: <https://ingeoexpert.com/articulo/21969/>
 33. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. (2021). *Monitoreo hídrico permanente para la recuperación sustentable de la calidad y cantidad de agua en el embalse de Valle de Bravo*. Observatoriovalle.org.mx. Disponible el 23/01/2024 en: https://observatoriovalle.org.mx/wp-content/uploads/2022/08/ProValle-de-Bravo-UNAM_Monitoreo-del-Lago_noviembre2021.pdf
 34. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). *RADIACIÓN SOLAR*. IDEAM. Disponible el 14/11/2023 en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempoyclima/radiacionsolarultravioleta#:~:text=La%20energía%20procedente%20del%20Sol,de%20radiación%20de%20onda%20corta.>
 35. Instituto del Agua de la USF. (s.f.). Trophic State Index (TSI). Lake WaterAtlas.org. Disponible el 17/04/2024 en: https://lake.wateratlas.usf.edu/library/learn-more/learnmore.aspx?toolsection=lm_tsi
 36. Instituto Geográfico Nacional (IGN). (s.f.). *Plan Nacional de Teledetección*. Programa Landsat. Disponible el 18/04/2024 en: <https://pnt.ign.es/programa-landsat>
 37. International Business Machines (IBM). (2024, 29 de febrero). *Regresión lineal múltiple*. IBM - United States. Disponible el 12/06/2024 en: <https://www.ibm.com/docs/es/cognos-analytics/11.1.0?topic=tests-multiple-linear-regression>
 38. Ayala Jesús y Herrera Díaz (2019). *Monitoreo de la calidad del agua del lago Chinchaycocha, mediante técnicas de teledetección espacial*. Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad, 2(2), 23-31.

39. Jhonson, R. A., & Wichern, D. W. (2002). *Applied multivariate statistical analysis* (5a ed.). Prentice Hall. https://alimoradi.iut.ac.ir/sites/alimoradi.iut.ac.ir/files//file_basepage/richard_arnold_johnson_dean_w_wichern_applied_bookzz.org_.pdf (Obra original publicada en 1982)
40. Cole J. (2022). *Encyclopedia of Inland Waters* (3a ed.). Elsevier.
41. Cole J. (2022). *Encyclopedia of Inland Waters* (2nd ed)
42. Lira, J. (1987). *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio* (No. QE33. L57 1987.). SEP.
43. Llinás Solano, H. (2024, 2 de mayo). *Análisis Multivariado (Historia)*. RPubS. Disponible el 10/06/2024 en: https://rpubs.com/hllinas/R_Multivariado_Historia
44. Lulla, K., Nellis, MD, Rundquist, B., Srivastava, PK y Szabo, S. (2021). *Misión a la Tierra: LANDSAT 9 seguirá viendo el mundo*. Geocarto Internacional, 36 (20), 2261-2263.
45. Manzolli, R. P., Portz, L., & Paiva, M. (2011). Oceanografía química. *Calazans, D. Estudios oceanográficos: do instrumental ao práctico. Pelotas: Textos*, 130-155.
46. Membrillo-Abad, A. S., Torres-Vera, M. A., Alcocer, J., Prol-Ledesma, R. M., Oseguera, L. A., & Ruiz-Armenta, J. R. (2016). *Estimación de Índice de Estado Trófico del lago de Chapala mediante percepción remota*. Revista mexicana de ciencias geológicas, 33(2), 183-191.
47. Moncayo-Eraso, R. J. (2017). *Mapeo de la dinámica regional de la transparencia en aguas continentales usando productos de reflectancia MOD09GA*. *Entramado*, 13(2), 270-276.
48. Montejo, E. (2024, 8 de febrero). *Crisis hídrica en CDMX: Qué está pasando con el Sistema Cutzamala que abastece de agua al Valle de México* - National Geographic en Español. National Geographic en Español. Disponible el 09/02/2024 en: <https://www.ngenespanol.com/ecologia/que-esta-pasando-con-el-sistema-cutzamala-en-la-ciudad-de-mexico/>
49. Muñoz, J. B. (2012). *Propagación de ondas electromagnéticas*. Universitat Oberta de Catalunya, 9-21.
50. NASA. (2023). *Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota)*. appliedsciences.nasa.gov. Disponible el 25/01/2024 en:

https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-03/Fundamentals_of_RS_Span.pdf

51. Obregón, D. A. A. (2006). *Limnología aplicada a la acuicultura*. REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria, 7(11), 1-24.
52. Observatorio Ciudadano de la subcuenca de Valle de Bravo-Almanaco. (s.f.). *Por contaminación y escasez de agua, agoniza el lago de Valle de Bravo*. Observatorio Ciudadano. Disponible el 08/02/2024 en: <https://observatoriovalle.org.mx/por-contaminacion-y-escasez-de-agua-agoniza-el-lago-de-valle-de-bravo/>
53. Ordóñez, J. L. (2012). *Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico*. Manual formativo de ACTA, (62), 17-31.
54. Organización de las Naciones Unidas-Agua (ONU-Agua). (2017, 18 de enero). *Guía para el Monitoreo Integrado del ODS. Metodología de monitoreo paso a paso para el indicador 6.3.2*. UN-Water | Coordinating the UN's work on water and sanitation. Disponible el 16/01/2024 en: https://www.unwater.org/sites/default/files/app/uploads/2017/05/SP_Step-by-step-methodology-6-3-2_Revision-2017-01-18_Final.pdf
55. Orquera, E., & Cabrera, M. (2020). *Caracterización del estado trófico de la Laguna de Yambo mediante análisis de fósforo*. InfoANALÍTICA, 8(1), 99-111.
56. Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes*. Cambridge: McGraw-Hill España.
57. Pérez, D. J. (2007). *Introducción a los sensores remotos-Aplicaciones en Geología*. Laboratorio de Tectónica Andina, Ciudad Universitaria, Pabellón, 2, C1428EGA.
58. Pérez, G. R., & Restrepo, J. J. R. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical (Vol. 15)*. Universidad de Antioquia.
59. Gobierno de México. *Plan de Desarrollo Municipal 2022-2024*. Municipio de Valle de Bravo, Gobierno de México, [México], 2022, disponible el 02/02/2024 en: <https://www.valledebravo.gob.mx/documentos/plandedesarrollo/PLAN%20DE%20DESARROLLO%20MUNICIPAL%202022-2024.pdf>
60. Ramírez Zierold, J. A., Valdespino Castillo, P. M., Monroy Ríos, Emiliano., Barjau-Aguilar, Mariel., Gerardo-Nieto, Óscar, Merino Ibarra, Martín, & Sandoval, S. C. *Eutroficación de cuerpos de agua: Causas, consecuencias y*

soluciones basadas en la naturaleza. Experiencias en la restauración y Recuperación De Cuerpos De Agua, 23.

61. Ramírez, C. A. S. (2021). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Ediciones de la U.
62. Redacción jpg. (2019, 14 de junio). *¿De dónde viene el agua que usamos en la CDMX? chilango*. Disponible el 07/02/2024 en: <https://www.chilango.com/noticias/de-donde-viene-el-agua-potable/>
63. Rodríguez, J. P. (2010). *Contaminación del agua. Contaminación ambiental en Colombia* (págs. 255-300). Bogotá: Fundación en causa por el desarrollo humano.
64. SACMEX. (2019). *Sistema de Aguas de la Ciudad de México*. fondosdeagua.org. Disponible el 07/02/2024 en: <https://www.fondosdeagua.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/latin-america/aguas.pdf>
65. Sáenz Bohórquez, N. A. (2014). *Monitoreo de la calidad del agua en microcuencas utilizando drones y percepción remota*. Caso de estudio: Río Teusacá, La Calera, Colombia.
66. Sayler, K. (2023, marzo). Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide. USGS. Disponible el 22/04/2024 en: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-1619_Landsat8-9-Collection2-Level2-Science-Product-Guide-v5.pdf
67. Secretaría de Marina (SEMAR). (2009, 3 de mayo). Percepción remota. SEMAR- Secretaría de Marina Armada de México. Disponible el 06/05/2024 en: <https://2006-2012.semar.gob.mx/informacion-sector/ciencia/ermexs/temas-de-interes/384-percepcion-remota.html>
68. Secretaría de Turismo. (2019, 8 de julio). *Valle de Bravo, Estado de México*. gob.mx. Disponible el 17/01/2023 en: <https://www.gob.mx/sectur/articulos/valle-de-bravo-mexico>
69. Semarnat. (2000). *Calidad del agua*. Semarnat. Disponible el 02/05/2024 en: https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/04_Agua/4.6_Calidad/index.htm

70. Semarnat. (2013). *Indicadores de la calidad del agua*. Semarnat.gob.mx. Disponible el 03/05/2024 en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html
71. Sepúlveda Hirose, R.T. (2011). *Diseño de modelos de calidad del agua mediante el uso de la percepción remota*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México] <http://132.248.9.195/ptd2012/marzo/0677828/Index.html>
72. Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). (2022). *Landsat 9*. pubs.usgs.gov. Disponible el 18/04/2024 en: <https://pubs.usgs.gov/fs/2019/3008/fs20193008.pdf>
73. Sierra López, N., Romero Contreras, A. T., & Zizumbo Villarreal, L. (2012). *Desarrollo regional, electrificación y reorganización socioespacial en Valle de Bravo, México*. *Revista pueblos y fronteras digital*, 7(13), 243-269.
74. Suárez Villarreal, R. (2013, 7 de noviembre). *Percepción Remota, su historia y sus aplicaciones*. ALNNEWS. Disponible el 06/05/2024 en: <https://aerolatinnews.com/industria-aeronautica/percepcion-remota-su-historia-y-sus-aplicaciones/>
75. Torres, R. A. C., Campillo, L. M. G., & López, H. M. D. (2015). *Percepción remota: Elementos básicos*. *Kuxulkab'*, 21(40).
76. United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2012, 6 de marzo). *Chapter 5 water quality conditions*. Archives | US EPA. Disponible el 20/05/2024 en: <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/vms50.html>
77. Universidad Nacional de Quimes Virtual. (s.f.). *Introducción a la teledetección*. Sistemas espaciales de teledetección. Universidad Nacional de Quimes Virtual. Disponible el 26/01/2024 en: <https://static.uvq.edu.ar/mdm/teledeteccion/unidad-2.html>
78. Valencia-Vargas, J. C. (2015). *Desarrollo de la región hidrológica del Balsas mediante la modificación de su veda*. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 81-97.
79. Venancio Flores, A., & Bernal González, E. I. (2019). *Gobernanza del agua en la Cuenca Hidrosocial de Valle de Bravo-Amanalco, México*. *Revista del CESLA. International Latin American Studies Review*, (23), 167-196.

80. Viascán, V. O. (1992). *Estudio de eutroficación de la presa Valle de Bravo, México*. Tecnología y ciencias del agua, 148-161
81. Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems* (3a ed.). Academic Press.

GLOSARIO

- ◆ **Abiótico:** Elemento que carece de vida en un ecosistema.
- ◆ **Acrisol:** Tipo de suelo compuesto en su mayoría por arcillas, caracterizados por ser ácidos y poco fértiles.
- ◆ **Andosol:** Tipo de suelo fértil formado sobre material piroclástico.
- ◆ **Bandas:** Conjunto de datos obtenidos en determinados rangos del espectro electromagnético.
- ◆ **Bióticos:** Elementos vivos de un ecosistema.
- ◆ **Espectro:** Distribución de la radiación electromagnética en función de la longitud de onda.
- ◆ **Spectrorradiometría terrestre:** Medición de la radiación electromagnética que las superficies o materiales terrestres reflejan.
- ◆ **Eutrofización:** Incremento de sustancias nutritivas en cuerpos de agua que provoca el crecimiento de fitoplancton
- ◆ **Electronvoltio (eV):** Unidad de energía equivalente a la adquirida por un electrón al trasladarse entre dos puntos con una diferencia de potencial de 1 voltio.
- ◆ **Fusión nuclear:** Proceso mediante el cual dos núcleos atómicos ligeros se combinan para formar uno solo más pesado, liberando energía.
- ◆ **Hipereutrófico:** Clasificación de un cuerpo de agua característico por sus excesivos contenidos de nutrientes y bajo contenido de oxígeno disuelto.
- ◆ **Índice de Estado Trófico (IET):** Sistema que permite clasificar los cuerpos de agua de acuerdo con su productividad biológica.
- ◆ **Luvisol:** Tipo de suelo que se caracteriza por tener mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial, con fertilidad moderada-alta.
- ◆ **Mesotrófico:** Clasificación de un cuerpo de agua característico por tener una cantidad de nutrientes intermedia.
- ◆ **Nivel digital:** Valor que representa la intensidad de radiación electromagnética reflejada, medida por un sensor remoto y mostrado en una imagen satelital.

- ◆ **Unidades Nefelométrías de Turbidez (NTU):** Unidad de medida de la turbidez de un fluido.
- ◆ **Oligotrófico:** Clasificación de un cuerpo de agua característico por poseer poca cantidad nutrientes.
- ◆ **PEA:** Población Económicamente Activa
- ◆ **Penetración luminosa:** Profundidad que puede alcanzar la luz dentro de un cuerpo de agua.
- ◆ **Percepción remota:** Proceso que se realiza para obtener información de la tierra desde la distancia.
- ◆ **Presa derivadora:** Estructura utilizada en un cuerpo de agua para desviar un porcentaje de su flujo hacia otros usos.
- ◆ **Protozoo:** Organismo constituido por una sola célula o por una colonia de células iguales entre sí.
- ◆ **QGIS:** Sistema de Información Geográfica que hace posible la creación, visualización y análisis de información geoespacial.
- ◆ **Ráster:** Conjunto de datos estructurados y organizados por una matriz de píxeles, generando imágenes.
- ◆ **Regosol:** Suelos jóvenes formados por materiales erosionados.
- ◆ **Regresión lineal múltiple:** Procedimiento que tiene como finalidad ajustar modelos entre variables dependientes e independientes.
- ◆ **Región Hidrológica Administrativa (RHA):** Áreas territoriales formadas en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas.
- ◆ **Región Hidrológica (RH):** Agrupación de cuencas hidrológicas con niveles de escurrimiento superficial similar.
- ◆ **Sistema de Información Geográfica (SIG):** Software especializado que permite crear, analizar y representar información geográfica conectando mapas con bases de datos.
- ◆ **Siemens:** Unidad de conductividad eléctrica del sistema internacional equivalente a inversa de 1 ohm
- ◆ **Sustancias coloidales:** Partículas que se dispersan en un medio de forma homogénea.
- ◆ **Sensor remoto:** Instrumento que capta información de una zona u objeto a distancia, esto a través de la reflexión de la energía electromagnética proveniente de la tierra.

- ◆ **Turbidez:** Medida de la claridad del agua.
- ◆ **Turbidímetro:** Dispositivo que se utiliza para medir la turbidez de un líquido.
- ◆ **United States Geological Survey (USGS):** Agencia de investigación independiente que recopila, estudia, analiza y proporciona información sobre las condiciones de los recursos naturales, el paisaje y los peligros naturales.
- ◆ **Vegetación de galería:** Ecosistema que crece en los márgenes de los cuerpos de agua y forma una franja estrecha de flora.
- ◆ **Vertisol:** Tipo de suelo caracterizado por contener en su mayoría arcilla y presentan grietas debido a que se expanden y contraen frecuentemente con los cambios de humedad.