



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería Civil y Geomática

T E S I S

“OBTENCIÓN DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA PARA EL
EMBALSE VILLA VICTORIA, ESTADO DE MÉXICO, APLICANDO
TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA”

Para obtener el título de:

Ingeniero Civil

P R E S E N T A:

JAVIER RAMOS FRANCO

TUTOR

M. I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE

2013





UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/156/12

Señor
JAVIER RAMOS FRANCO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. RODRIGO TAKASHI SEPULVEDA HIROSE, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"OBTENCIÓN DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA PARA EL EMBALSE VILLA VICTORIA, ESTADO DE MÉXICO, APLICANDO TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. MARCO TEÓRICO
- III. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO
- IV. APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE LOS MODELOS
- V. RESULTADOS
- VI. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS
- VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 7 de febrero del 2013.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

DEDICATORIAS

A mis padres Irma y Octavio por ser las personas máspreciadas de mí vida, sus enseñanzas y consejos han permitido formarme como persona, cada uno de mis logros se los dedico a ustedes.

A mis hermanos Octavio y Miriam por su cariño y apoyo brindado todo este tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto de Colaboración Conjunta FI-II “Modelos de calidad del agua obtenidos a partir de percepción remota: presa Villa Victoria, Edo. de México (perteneciente al sistema Cutzamala)”.

Al Maestro Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose, por ser un ejemplo para todos los que hemos tenido la dicha de conocerte. Por todos los consejos, enseñanzas y confianza que me has brindado en todo momento y en especial por tu amistad.

A la Maestra Alba Beatriz Vázquez González por su confianza, amistad y consejos que siempre tendré presentes en mi vida.

Al Doctor Enrique César Valdéz, por motivarme a realizar la tesis y haber confiado en mí. Por todos los conocimientos impartidos, permitiéndome encontrar mi verdadera vocación.

A toda mi familia por todo su amor, confianza y apoyo que me han brindado incondicionalmente todo el tiempo.

A Carolina Alcalá, porque su amistad y consejos han sido un apoyo importante para alcanzar mis metas.

A Carlos Armenta por su amistad incondicional, confianza y apoyo que siempre me ha dado.

A Dios por haberme permitido alcanzar una meta más en mi vida y por proteger a mis seres queridos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. PERCEPCIÓN REMOTA Y SUS ELEMENTOS.....	7
2.1.1. SENSORES Y PLATAFORMAS.....	8
2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	11
2.2.1. Histograma.....	13
2.2.2. Composición a color	14
2.2.3. Clasificación digital	14
2.3. TRATAMIENTO DE LA IMAGEN.....	15
2.3.1. Corrección atmosférica.....	20
2.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA PERCEPCIÓN REMOTA.....	21
2.5. PRINCIPIOS FÍSICOS	21
2.6. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA SUJETOS A SER EVALUADOS MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA	27
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	29
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE LOS MODELOS	32
4.1. REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN Y EXPERIENCIAS PREVIAS	32
4.2. SELECCIÓN DE LA PLATAFORMA ADECUADA.....	32
4.3. PLANEACIÓN DE LAS FECHAS DE MUESTREO Y ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.....	33
4.4. PRE-PROCESAMIENTO, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES	33
4.4.1. DETERMINACIÓN DE SITIOS DE MUESTREO.....	33
4.4.2. ANÁLISIS DIGITAL.....	47
4.5. CAMPAÑAS DE MUESTREO	48
4.6. VARIACIÓN DE CALIDAD MEDIANTE DETECCIÓN DE BORDES	52
4.7. COMPARACIÓN MEDIANTE CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA.....	54
4.8. GENERACIÓN DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA	57
RESULTADOS.....	67

COMPROBACIÓN DE RESULTADOS	69
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	78

INTRODUCCIÓN

La superficie de nuestro planeta se encuentra cubierta en casi el 70% por agua, dejando solamente el 30% cubierta por tierra. Tiene aproximadamente un volumen total de agua de 1,360,000,000 km³ de los cuales el 97.24% se encuentra en los océanos, el 2.14 % en Capas de hielo (Glaciares) y el 0.62% en la superficie terrestre (USGS & EPA, La Ciencia del Agua, 2011).

El agua es un elemento importante para que haya vida en nuestro planeta, ya que muchas de las especies requieren el consumo de este líquido para poder subsistir e incluso una gran variedad de organismos habitan en ella desarrollando grandes ecosistemas. En particular, el ser humano utiliza agua para muchas de sus actividades diarias. Al año se extraen alrededor de 4,430 km³, siendo la agricultura a la que más agua se le destina (70 %) y se cree que la demanda de agua para esta actividad seguirá aumentando debido al crecimiento de la población que demandará una mayor producción de alimentos (UNESCO-WWAP, 2012).

Uno de los principales usos del agua es para consumo humano, lo que implica que los cuerpos de agua deban cumplir con ciertas características para que estos sean considerados como una posible fuente de abastecimiento.

En la actualidad, más de 780 millones de personas utilizan fuentes de abastecimiento no aptas para su consumo, lo que provoca un gran número de enfermedades e incluso la muerte, afectando principalmente a niños y ancianos (UNICEF). Con base en estos hechos, se ha visto la necesidad de realizar estudios de calidad del agua que permitan conocer las características en la que se encuentra la fuente de abastecimiento.

Los muestreos tradicionales que consisten en ir a campo a tomar las muestras para después procesarlas en un laboratorio, requieren de que se les destinen una gran cantidad de recursos económicos y de personal, dificultando que se tenga un monitoreo continuo de las fuentes de abastecimiento.

Gracias al desarrollo de tecnologías espaciales, en los últimos años, ha sido posible estudiar a la Tierra a partir de imágenes adquiridas por sensores localizados en satélites. Estas imágenes cuentan con información abundante sobre los diferentes elementos de la Tierra. Esta información ha sido utilizada para estudios medioambientales.

Los estudios de factores ambientales que se han empleado utilizando las tecnologías mencionadas han sido principalmente para suelo, agua, clima, vegetación, etc. En lo que respecta al agua, se han generado modelos para evaluar de manera casi instantánea diferentes parámetros de calidad del agua mediante percepción remota, dando una idea globalizada de la condición en la que se encuentra el cuerpo de agua.

En México hay un gran número de cuerpos de agua destinados como fuentes de abastecimiento, llevar a cabo muestreos tradicionales periódicos para conocer el estado de cada uno de ellos resultaría poco viable; una de las alternativas es la aplicación de técnicas de percepción remota, de las cuales ya existen antecedentes.

En este trabajo de tesis se generarán modelos que permitan evaluar ciertos parámetros de calidad del agua a partir del uso de imágenes satelitales, aplicadas a un cuerpo de gran importancia en México.

En el capítulo 1 se hace una breve reseña del surgimiento de la percepción remota y la evolución que ha tenido a lo largo de la historia. En el capítulo 2 se expone cuáles son los componentes principales de la percepción remota, las principales plataformas satelitales y los diferentes tratamientos que puede recibir una imagen satelital. En el capítulo 3 se describe el sitio de estudio. Y por último en el capítulo 4 se hace uso de la metodología desarrollada durante el proyecto “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota” con la finalidad de obtener los modelos de calidad del agua para el embalse de la presa Villa Victoria.

OBJETIVO GENERAL

- Obtener modelos de calidad del agua a partir de imágenes satelitales, que permitan monitorear el estado de la calidad del agua del vaso de la presa Villa Victoria.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Explicar los fundamentos de la percepción remota en estudios de calidad del agua.
- Aplicar una metodología probada para generar los modelos de calidad del agua

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

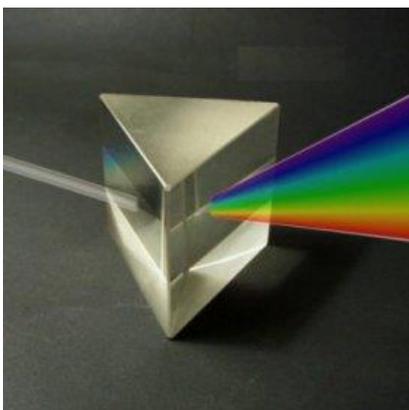


Figura 1. Descomposición de la luz a través de un prisma.

El origen de la percepción remota está ligado a los experimentos de la descomposición de la luz realizados por Isaac Newton en el año de 1667. Los experimentos consistían en hacer pasar un rayo de luz solar a través de un prisma de vidrio en un cuarto totalmente oscuro, obteniendo un espectro de colores (Figura 1).

Lo científicos de esa época quedaron maravillados con el experimento de Newton, por lo que siguieron los estudios en esta materia, logrando descubrir que cada color descompuesto en el espectro correspondía a una temperatura diferente.

Posteriormente a principios del siglo XIX, el científico inglés Michael Faraday logró un avance significativo en la comprensión del electromagnetismo, al descubrir que un cuerpo podía ser cargado eléctricamente al estar en medio de un campo magnético en movimiento.

En el mismo siglo el físico James Clerk Maxwell establece las leyes del electromagnetismo, en donde unifica los fenómenos de electricidad y electromagnetismo, descubiertos por Coulomb, Faraday y Ampere en un conjunto de fórmulas que relacionan matemáticamente las distribuciones de cargas y corrientes con las fuerzas eléctricas magnéticas que se generan en cada punto del espacio. Maxwell demostró, a partir de sus ecuaciones matemáticas, que la luz es una onda electromagnética que consiste en oscilaciones del campo electromagnético.

La invención de los globos de aire caliente permitió que los seres humanos observaran por primera vez a la Tierra desde las alturas. En este mismo siglo se inventaron las cámaras fotográficas, con lo que se obtuvieron las primeras fotografías aéreas desde globos, papalotes, y palomas. Una foto especialmente particular fue la tomada en el año de 1906 durante el terremoto en San Francisco, California, para lo cual se utilizaron 17 papalotes atados a un bote anclado en la bahía (Figura 2).



Figura 2. Ciudad de San Francisco, California, después del terremoto de 1906. Fotografía tomada desde un papalote.

La Segunda Guerra Mundial trajo consigo grandes avances en el campo de la teledetección, se empezaron a utilizar películas infrarrojas y el radar, utilizados para detectar objetivos militares camuflados con vegetación muerta o artificial.

Para el año de 1960 se encontraba en pleno apogeo la carrera espacial entre Estados Unidos y la Unión Soviética, siendo EUA el primer país en poner en órbita un satélite meteorológico llamado TIROS-1 (Television Infrared Observation Satellite), el cual solamente estuvo en operación 78 días, pero probó que los satélites podían ser útiles para monitorear las condiciones climatológicas de toda la tierra. Entre los años de 1961 y 1965 el programa TIROS puso en órbita a 9 satélites más, hasta que en el año de 1970 el programa cambia de nombre a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). El programa NOAA ha puesto en órbita 19 satélites, de los cuales solamente sigue en operación el NOAA19 lanzado el 4 de febrero de 2009.

En el año de 1966 Estados Unidos puso en órbita al satélite ESSA-2 (Environmental Science Services Administration-2) siendo el primer satélite meteorológico de órbita polar equipado con un sistema de transmisión de imágenes en tiempo real.

En 1970 Estados Unidos crea el programa ERTS (Earth Resources Technology Satellite), el cual pretendía monitorear los recursos naturales de la tierra empleando percepción remota. Este programa surgió a raíz de la poca información recibida por los primeros satélites puestos en órbita, viéndose la importancia y los grandes beneficios que tenía el implementar esta tecnología.

En 1972 es lanzado el primer satélite producto de este programa, el cual fue llamado ERTS1 pero posteriormente fue renombrado como Landsat 1. Este satélite estaba equipado con cámara llamada RBV (Return Beam Vidicon) y un escáner multispectral (MSS) de cuatro bandas (verde, rojo, y dos del infrarrojo). Estuvo en operación hasta el año de 1978, adquiriendo en este periodo más de 300,000 imágenes de la superficie terrestre. En los años siguientes se lanzaron los satélites Landsat 2 y 3, los cuales estaban equipados con los mismos sensores que el Landsat 1.

La siguiente generación de los satélites Landsat (Landsat 4 y 5) presentaron un cambio significativo con respecto a sus antecesores, al no llevar consigo el sensor RBV e incorporar un nuevo sensor llamado Mapa temático (TM) que mejoraba la resolución espacial y espectral.

El 5 de octubre de 1993 es lanzado fallidamente el satélite Landsat 6, al no alcanzar la velocidad necesaria para ponerlo en órbita, causando su pérdida. El satélite Landsat 6 estaba equipado con un nuevo sensor denominado ETM (Enhanced Thematic Mapper). Al igual que el sensor TM tenía un rango espectral de 0.45-12.5 μm , con la única diferencia que el sensor ETM incluía una octava banda correspondiente al canal pancromático.

El último satélite puesto en órbita por este programa es el Landsat 7 (15 de abril de 1997), equipado con el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), con las siguientes características que los hacen diferente del Landsat 6 : una banda pancromática con 15m de resolución espacial, un canal del infrarrojo térmico de 60m de resolución.

Otros países como Francia han inspeccionado en el campo de la aeronáutica espacial, teniendo grandes avances en esta área. En 1978 crearon el programa SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) por medio de su agencia espacial CNES (Centre National d'études spatiales) y en colaboración con Bélgica y Suecia. El 22 de febrero de 1986 es puesto en órbita el satélite SPOT 1, equipado con un sensor denominado HRV (High Resolution Visible) de cuatro bandas espectrales correspondientes al verde, rojo, infrarrojo cercano y una del pancromático. En los años de 1990 y 1993 se lanzan los satélites SPOT 2 y SPOT 3 respectivamente, equipados con la misma tecnología que el SPOT 1.

Para marzo de 1998 es puesto en órbita SPOT 4 correspondiente a la segunda generación y equipado con el sensor HIRVIR (High Resolution Visible and Infrared) capaz de detectar cinco bandas espectrales correspondientes al verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo medio y un canal pancromático.

Cuatro años después del lanzamiento del SPOT 4 es puesto en órbita el SPOT 5 (4 de mayo de 2002), equipado con un nuevo sensor denominado HRG (High Resolution Geometrical), con la capacidad de adquirir dos imágenes pancromáticas con una resolución espacial de 5m, tres multiespectrales con una resolución espacial de 10m correspondientes al verde, rojo e infrarrojo cercano y por último una del infrarrojo medio con una resolución de 20m

En septiembre de 2012 es lanzado el SPOT 6, ofreciendo una resolución espacial de 1.5m para el canal pancromático y de 6m a las bandas pertenecientes al azul, verde, rojo e infrarrojo cercano. La alta resolución espacial que ofrece este satélite permite la obtención de mapas de zonas urbanas y naturales, así como para agricultura y monitoreo de recursos.

En la actualidad existen muchos otros satélites para el monitoreo de la tierra, de donde destacan el satélite IRS de India, el MOS japonés, el ERS de la Agencia Europea del Espacio y el RADARSAT canadiense. Este crecimiento relativamente rápido que se ha tenido se debe a la vasta información que ofrece el empleo de esta tecnología, permitiendo el monitoreo continuo y en muchos casos la solución de problemas de diferente índole.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. PERCEPCIÓN REMOTA Y SUS ELEMENTOS

El proceso de la percepción remota involucra una interacción entre la radiación incidente y los objetos de interés (Arbelo, 2004). En la Figura 3 se muestran los elementos que lo integran.

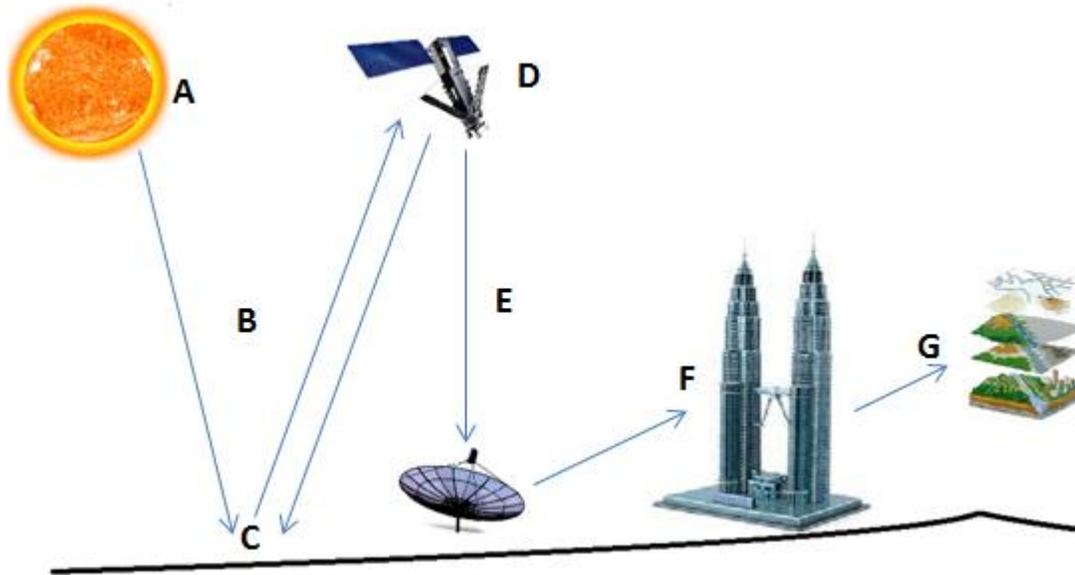


Figura 3. Elementos de la percepción remota

- A. Fuente de energía: Es el primer elemento de la PR, ya que es a partir de la fuente (natural o artificial) que se proveerá de energía luminosa o electromagnética al objeto de interés.
- B. Radiación y medio de transmisión: La energía emitida de la fuente al objeto y a la vez la energía reflejada o emitida por el objeto al sensor es transmitida a través de la atmósfera, en dicho trayecto parte de la energía interactúa con las moléculas de la atmósfera provocando una disipación de la misma.
- C. Interacción con el objeto: Cuando la energía emitida por la fuente entra en contacto con el objeto, éste la transmitirá, absorberá o reflejará dependiendo de sus propiedades.
- D. Detección de la energía por medio del sensor: La finalidad del sensor es captar y almacenar la radiación electromagnética proveniente del objeto y de la atmósfera.
- E. Transmisión, recepción y procesamiento: La información grabada en el sensor es transmitida (usualmente de forma electrónica) a una estación de recepción y procesamiento de los datos, con el fin de obtener imágenes digitales.

- F. Interpretación y análisis: A partir de las imágenes digitales se puede extraer información tanto visual como digital a cerca del objeto en estudio. Una de las ventajas de utilizar la información digital es que permite realizar operaciones a través del procesamiento de imágenes que dan como resultado una mayor información.
- G. Aplicación: La información obtenida mediante el análisis y la interpretación de las imágenes, en muchos casos amplían el conocimiento acerca del objeto en estudio, ayudando a resolver un problema en particular.

2.1.1. SENSORES Y PLATAFORMAS

Los sensores y plataformas forman una parte esencial de la percepción remota, es importante señalar que estos elementos son dos cosas diferentes, ya que el primero es un aparato mediante el cual se recibe la información de la radiación electromagnética proveniente del objeto en estudio, mientras que el segundo, es el dispositivo en el cual se instala el sensor para protegerlo y garantizar el buen funcionamiento de éste.

Los sensores se pueden clasificar en general en dos grandes categorías, sensores activos y pasivos. Los sensores activos son aquellos que pueden emitir su propia energía electromagnética, la cual es transmitida al objeto en estudio para posteriormente ser reflejada al sensor, representando una ventaja ya que no importa si es de día o noche, el sensor puede obtener la información del cuerpo en estudio. Un ejemplo de este tipo de sensores es el Radar el cual puede trabajar bajo cualquier condición atmosférica pero su resolución espacial es muy pobre. Por otro lado, los sensores pasivos son aquellos que necesitan de la energía emitida por el sol para la adquisición de la información, a la vez este tipo de sensores se divide en sensores de barrido y sensores de empuje. La diferencia principal entre esta clase de sensores es que el primero usa espejos oscilatorios que se mueven perpendicularmente a la dirección del satélite, permitiendo explorar una franja de terreno a ambos lados, mientras que los de empuje disponen de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor, eliminando de esta manera el espejo oscilante. En la actualidad la mayoría de los sensores son pasivos.

Otra forma de clasificar a los sensores es por su resolución espectral, resolución espacial, resolución temporal y resolución radiométrica, los que se describirán en los párrafos siguientes:

Resolución espectral hace referencia al número y amplitud de bandas espectrales que un sensor puede detectar. Mientras mayor sea el número de bandas que proporcione un sensor será más fácil la caracterización espectral de los tipos de cubierta. Por otra parte es preferible tener bandas estrechas, ya que bandas anchas registran un valor promedio, lo que dificulta la diferenciación espectral de las cubiertas de interés (Vázquez, 2000).

La resolución espacial se refiere al objeto más pequeño que puede ser detectado por el sensor. El área superficial que abarca un pixel (unidad mínima de información espacial) depende de la plataforma y sensor utilizado.

Se define como resolución temporal al intervalo de tiempo en que el sensor tarda en adquirir una imagen de una misma escena terrestre, dicho intervalo de tiempo depende de las características de la órbita del satélite.

La resolución radiométrica hace alusión a la capacidad del sensor para detectar variaciones de la radiancia espectral. Mientras mayor resolución radiométrica se tenga se contará con mayor información en una imagen, por lo general los sistemas ofrecen imágenes de 8 bits, es decir, una variación de 256 niveles por pixel que varían de 0 a 255.

PLATAFORMAS

En la actualidad existen un gran número de plataformas disponibles para la adquisición de imágenes satelitales, cada una de ellas tienen características que la hacen única, de ahí radica la importancia de elegir adecuadamente la plataforma a utilizar, ya que cada proyecto puede exigir propiedades diferentes. En este apartado se mencionarán las plataformas más utilizadas e importantes.

SPOT

Los satélites SPOT son una iniciativa de la agencia espacial francesa, han lanzado 6 satélites al espacio, el último de ellos en septiembre de 2012 y se tiene programado otro lanzamiento para el 2014 (Figura 4). Se encuentran en órbita el SPOT 4, 5 y 6, los cuales tienen una órbita heliosíncrona a una altitud de 822 km e inclinación en el ecuador de 98.7°, completa una órbita en 101.4 minutos, su resolución temporal es de 26 días. Cada imagen obtenida abarca un área de 60 por 60 km.

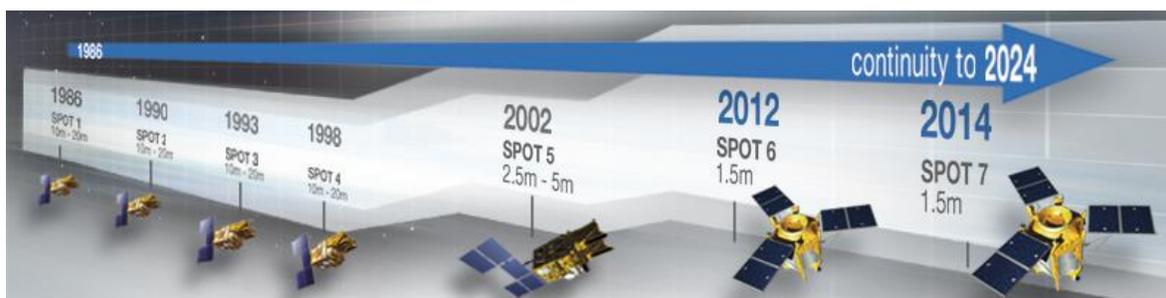


Figura 4. Historia de los Satélites Spot.

En la Tabla 1 se muestran las características de los sensores colocados en los satélites 4, 5, y 6 que siguen en operación.

Tabla 1. Características de los satélites Spot.

Satélite	Bandas	Resolución Espectral (μm)	Resolución (m)
SPOT 4	Monoespectral	0.61-0.68	10
	Verde	0.50-0.59	20
	Rojo	0.61-0.68	20
	Infrarrojo cercano	0.78-0.89	20
	Infrarrojo Medio	1.58-1.75	20

Tabla 1 Continuación. Característica de los satélites Spot

Satélite	Bandas	Resolución Espectral (μm)	Resolución (m)
SPOT 5	2 pancromáticas	0.48-0.71	5
	Verde	0.50-0.59	10
	Rojo	0.61-0.68	10
	Infrarrojo cercano	0.78-0.89	10
	Infrarrojo Medio	1.58-1.75	20
SPOT 6	Pancromática	0.450-0.745	1.5
	Azul	0.450-0.520	6
	Verde	0.530-0.590	6
	Rojo	0.625-.0695	6
	Infrarrojo Cercano	0.760-0.890	6

LANDSAT

Landsat es un programa creado por los Estados Unidos de América y dirigido por la NASA. Se han lanzado 7 satélites. En la Tabla 2 se muestra un resumen de los satélites Landsat puestos en órbita.

Tabla 2. Satélites Landsat lanzados en toda su historia

Satélite	Año de lanzamiento	Años en operación	Aditamentos
Landsat 1	1972	6	Una cámara (RBV) y un sensor multiespectral (MSS)
Landsat 2	1975	7	Una cámara (RBV) y un sensor multiespectral (MSS)
Landsat 3	1978	5	Una cámara (RBV) y un sensor multiespectral (MSS)
Landsat 4	1982	19	Mapa temático (TM) y sistema de escáner multiespectral (MSS).
Landsat 5	1984	27	Mapa temático (TM) y sistema de escáner multiespectral (MSS).
Landsat 6	1993	No llegó a órbita	Mapa temático mejorado (ETM)
Landsat 7	1999	Sigue en operación	Mapa temático mejorado + (ETM+)

Para fines de este estudio se describirá únicamente el satélite Landsat 7 ya que fue el último lanzado por la NASA y que cuenta con la tecnología más avanzada de todos los satélites que siguen en operación.

El satélite para la observación de la tierra Landsat 7 fue lanzado el 15 de abril de 1999, equipado con un sensor llamado Mapa Temático Mejorado + (ETM+) el cual cuenta con una banda pancromática con 15 m de resolución espacial, un canal Infrarrojo térmico con una resolución espacial de 6 m y seis bandas más correspondientes al Azul, Verde, Rojo, IR Cercano y dos del IR medio con una resolución espacial de 30 m, lo que proporciona un rango espectral de 0.45-12.5 μ m (Tabla 3)

Tabla 3. Bandas del sensor ETM+

Banda	Resolución Espectral (μ m)	Resolución (m)
1	0.450-0.515	30
2	0.525-0.605	30
3	0.630-0.690	30
4	0.750-0.900	30
5	1.550-1.750	30
6	10.40-12.50	60
7	2.090-2.350	30
8	0.520-0.900	15

Su órbita es heliosíncrona, es decir, siempre pasa por el mismo lugar a la misma hora; completa una órbita en 99 minutos, lo que propicia que al día complete 14.5 órbitas aproximadamente. Tiene una resolución temporal de 16 días y secciona a la tierra en 57,784 escenas, cada una de 183 km de ancho por 170 km de largo.

En mayo de 2003 un dispositivo llamado Scan Line Corrector (SLC) falló, lo que ocasionó que se presentara en las imágenes un bandeo, el cual no pudo ser corregido por la NASA, provocando una pérdida de aproximadamente el 23% de los datos y que la adquisición de las imágenes se volviera gratuita.

2.2. PROCESAMIENTO DE DATOS

La radiancia procedente de la tierra que es captada por los sensores es transformada por ellos mismos en una señal eléctrica denominada Nivel Digital (ND), la cual se le asigna a un pixel (unidad visual más pequeña que aparece en una imagen). El valor del Nivel Digital varía en la escala de grises dependiendo de la resolución radiométrica del sensor, generalmente la resolución es 8 bits, lo que permite que el ND correspondiente a un pixel pueda tomar un valor de 0 a 255.

Los sensores son capaces de desglosar los componentes de la radiancia dependiendo de la longitud de onda del espectro electromagnético para formar bandas o canales. El valor del ND correspondiente a un pixel puede variar de una banda a otra. Entonces, una imagen satelital estará formada por k número de matrices llamadas canales, el número de éstas dependerán de la resolución espectral del sensor. En la Figura 5 se muestra como está integrada una imagen satelital, como se observa estas matrices están en un espacio de tres dimensiones, las primeras

dos dimensiones corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras que la tercera corresponde a su localización espectral.

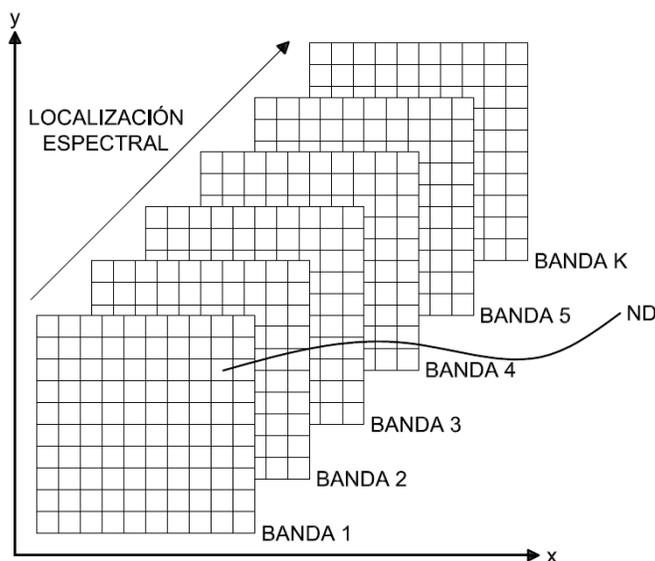


Figura 5. Organización de una imagen satelital.

Para poder hacer un uso correcto de la información que proporcionan las imágenes satelitales es necesario que éstas sean preprocesadas para corregir errores radiométricos, geométricos y atmosféricos. Los errores radiométricos se deben a fallas en los sensores, generando píxeles incorrectos. Los errores geométricos son debido a alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación en los sensores, generando distorsiones en la imagen. Y por último los errores atmosféricos se producen por la interferencia de partículas presentes en la atmósfera, alterando los valores de radiancia que captan los sensores.

La **corrección geométrica** en muchas ocasiones son hechas en los centros de recepción y venta de imágenes, y otras pueden ser corregidas referenciando las imágenes a mapas existentes de la zona. Estas correcciones son empleadas cuando se quieren realizar estudios multitemporales para ajustar geográficamente dos o más imágenes entre sí.

Uno de los métodos más empleados para la georreferenciación es el de puntos de control. Se trata de ubicar puntos que se conozcan sus coordenadas en la imagen (Fila-Columna) y sus coordenadas reales. Estos puntos deben ser fácilmente localizables y que sean fijos, por lo general se recomiendan objetos artificiales como son las construcciones. El número de puntos de control es muy importante ya que mientras más sean éstos se tendrán menos deformaciones en la imagen, a la vez es deseable que dichos puntos se distribuyan por toda la imagen y no se concentren en sólo algunas partes. La transformación se lleva a cabo mediante una regresión que puede ser lineal, cuadrática o cúbica dependiendo del objetivo que se siga.

Al realizar este proceso se logra georreferenciar a la imagen, en la cual todos los píxeles estarán referenciados a un sistema coordenado. Uno de los inconvenientes de esta transformación es que

la imagen presenta una distorsión geométrica y no está adaptada al mapa de referencia. Para corregir este error es necesario transformar los ND de la imagen original a esa posición. Esto da como resultado una nueva imagen en donde los píxeles son almacenados en una nueva geometría, esto se hace empleando un método de interpolación (Figura 6).

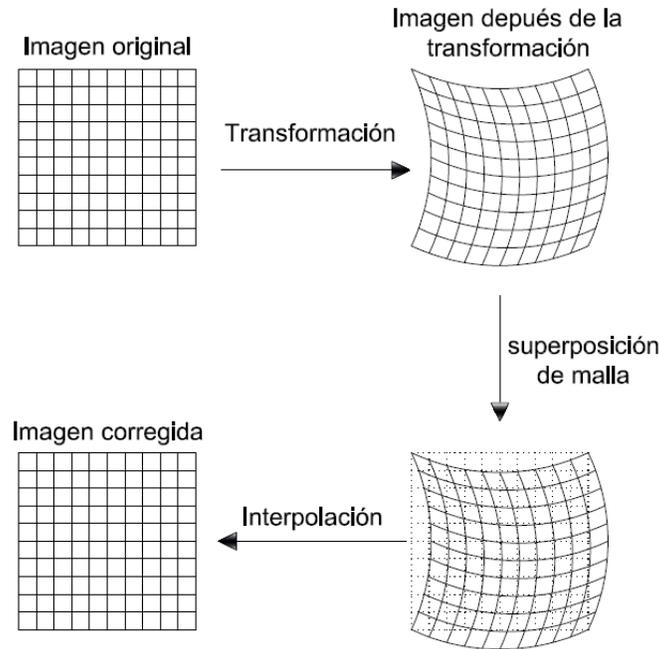


Figura 6. Proceso de corrección geométrica (Vázquez, 2000).

Existen tres métodos de interpolación: vecino más próximo, Bi-lineal y convolución cúbica.

El método del vecino más próximo asigna el valor del ND a la imagen corregida correspondiente al pixel más cercano de la imagen original. Esta es la solución más rápida y no implica una transformación de los ND originales.

El método Bi-lineal se basa en un promedio de los cuatro píxeles más cercanos en la imagen original, dicho promedio se pondera dependiendo de la distancia del pixel original al corregido.

Por último, el método de convolución cúbica involucra un promedio de los 16 píxeles más cercanos de la imagen original respecto al pixel corregido. El resultado es el mejor de todos, pero requiere de un cálculo más complejo.

2.2.1. Histograma

Un histograma es una presentación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. En el eje vertical se presentan las frecuencias (número de píxeles) y en horizontal los valores de las variables, normalmente señalando las marcas de clase (ND), es decir, la mitad del intervalo en el que están agrupados los datos.

2.2.2. Composición a color

Es una técnica empleada para hacer más clara la visualización de una imagen, ayudando a que la interpretación visual de la información sea más fácil, al resaltar características de diferentes objetos. Esta técnica hace uso de las bandas espectrales de las que está integrada una imagen, en el proceso de una composición a color únicamente se hace uso de tres de ellas. Cada banda es desplegada usando uno de los colores primarios (rojo, verde y azul). Las relaciones entre los valores de los píxeles de las imágenes y los colores asignados a cada píxel, se almacena en una representación. El valor asignado a cada píxel representa una intensidad relativa, que va de 0 a 255. Las tres intensidades juntas determinan el color final, por ejemplo: intensidad de rojo=255, verde=0 y azul=0, resulta un rojo intenso (Vázquez, 2000).

Existen muchas combinaciones que se pueden llevar a cabo entre las bandas que integran a una imagen, entre las que destacan:

- **Composición de color verdadero:** Recibe este nombre ya que la imagen resultante de la composición despliega el color correspondiente a cada objeto en la imagen, dando la impresión de estar viendo una fotografía aérea. Para lograr esta composición con imágenes Landsat, la banda 1 es desplegada en el color azul, la banda 2 en color verde y por último la banda 3 en el color rojo.
- **Composición falso color infrarrojo:** En este tipo de imagen, la banda 2 se despliega en el color azul, la banda 3 en el color verde y la banda 4 es desplegada en el rojo. En esta combinación la vegetación se ve de un color rojizo, el agua de color azulosa y el terreno sin vegetación en tonos marrón y gris.

2.2.3. Clasificación digital

La última fase de procesamiento es la clasificación digital. Su objetivo es agrupar aquellos píxeles que pertenecen a una misma familia, definidos por su ND y pertenecientes a una clase determinada. En la clasificación digital se distinguen tres fases: La fase de entrenamiento, fase de asignación y comprobación.

La **fase de entrenamiento** es el proceso mediante el cual el usuario define las clases o categorías que son de interés para el estudio, seleccionando grupos de píxeles de la imagen que representen correctamente a las categorías de interés. Existen dos métodos de clasificación: el supervisado y el no supervisado.

El método supervisado implica el conocimiento previo de la zona, ya que con base en esto, el usuario selecciona las muestras que conformarán las diferentes categorías, definiendo de este modo clases informacionales.

La clasificación no supervisada es un proceso en el cual se realiza una búsqueda automática de ND homogéneos para formar grupos de píxeles que pertenecen a una misma clase espectral.

En la **fase de asignación** se agrupan aquellos pixeles en las diferentes clases que fueron determinadas en la fase de entrenamiento. El proceso de asignación consiste en agrupar aquellos pixeles que tienen un valor espectral similar y en ir discriminando aquellos que su respuesta sea diferente para formar otros grupos de comportamiento similar.

La **fase de comprobación** consiste en determinar si las clases informacionales o espectrales son confiables. Existen tres formas de corroborar la información. La primera es mediante una comparación del inventario de la clasificación con el obtenido por otras fuentes convencionales (% de error), la segunda es verificando la confiabilidad de las áreas de entrenamiento y por último, es seleccionando áreas de verificación para las que realmente se conozca la cubierta terrestre.

2.3. TRATAMIENTO DE LA IMAGEN

Una de las técnicas más empleadas para el tratamiento de las imágenes satelitales es el realce, que consiste en mejorar las características de brillo y contraste, así como reducir, agudizar o intensificar detalles de objetos mediante operaciones matriciales.

Las operaciones que se pueden aplicar con esta técnica prácticamente son de dos tipos:

- a) Realce de contraste
- b) Realce espacial o local

Las operaciones de **realce de contraste** tienden a mejorar la diferencia entre los valores más oscuros y los más claros, mediante un análisis del histograma. Se puede hacer uso de tres métodos para llevar a cabo esta operación:

1. Expansión lineal: consiste en reajuste de los niveles digitales que integran a la imagen, asignándole al ND más bajo el valor de 0 y al ND más alto el valor de 255, con la finalidad de distribuir a todos los pixeles a lo largo de la paleta de grises. El algoritmo que emplea es el siguiente.

$$ND = 255 \frac{ND_{ij} - ND_{min}}{ND_{max} - ND_{min}} \quad \text{Ecuación 1}$$

2. Expansión del histograma ecualizado: el objetivo de aplicar este operador es tener un histograma lo más uniforme posible, mediante una reagrupación de pixeles, para esto se hace uso de un factor de escala que al ser multiplicado por la frecuencia acumulada de los ND de la imagen original se obtiene un nuevo valor en la escala de grises a la cual pertenecerán dichos niveles digitales.

$$\text{Factor de escala} = \frac{ND_{Tot}}{\# \text{ de pixeles}} \quad \text{Ecuación 2}$$

En la Figura 7 se presenta un ejemplo de la obtención del histograma ecualizado, usando un factor de escala de 0.535 resultando de dividir 15 entre 28.

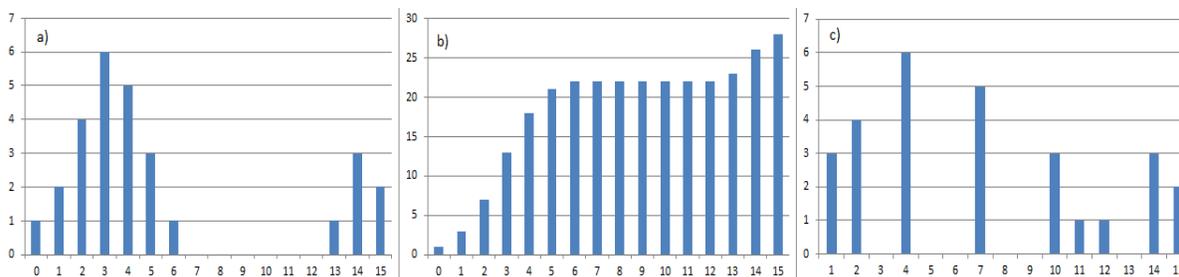


Figura 7. Ejemplo a) Histograma original. b) Histograma de frecuencias acumuladas. c) Histograma ecualizado.

3. Expansión espacial

Es muy similar a la expansión lineal, la diferencia se basa en restringir los niveles digitales a un ámbito donde se tenga una mejor visualización del área de estudio. Es decir; se utiliza para resaltar sitios de interés, donde el usuario determina los niveles máximos y mínimos que quiera que se desplieguen.

En cuanto a las operaciones de **realce espacial** su objetivo es remarcar la diferencia entre aquellas zonas o puntos que tienen una respuesta espectral diferente y así hacer más fácil la identificación de las fronteras de los objetos que integran a la imagen. Dicho realce se puede llevar a cabo mediante el uso de filtros, empleando matrices denominadas Kernel de dimensiones variables (comúnmente de 3x3, 5x5, etc.), a las cuales se les asignan valores a cada elemento según si se quiere acentuar o atenuar las variaciones de las fronteras de los objetos.

Las matrices Kernel son aplicadas a la imagen mediante un proceso denominado convolución, el cual consiste en que la matriz se desplace por toda el área renglón por renglón, columna por columna (Figura 8), cada vez que se mueve dicha matriz solamente se modifica el valor del ND correspondiente al elemento central, esto en función de la información proporcionada por los píxeles vecinos; mientras más grande sea la matriz involucrará mayor información de píxeles adyacentes.

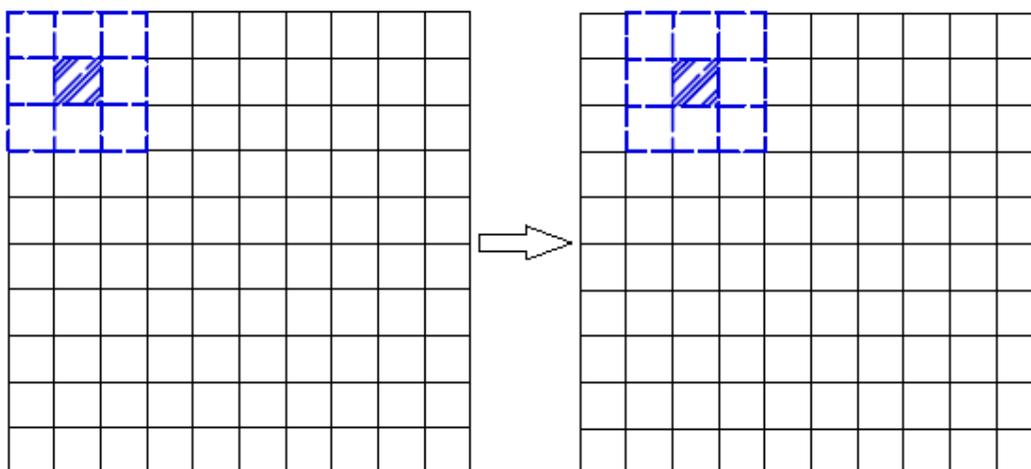


Figura 8. Desplazamiento de la matriz por toda la imagen.

En la Figura 9 se muestra cual sería el resultado de aplicar una matriz Kernel de 3x3 a una imagen, como se puede observar los niveles digitales de la periferia no son modificados debido a que no se cuenta con información de los pixeles vecinos, por otro lado, se observa que el valor de los ND correspondientes al área central han sido modificados.

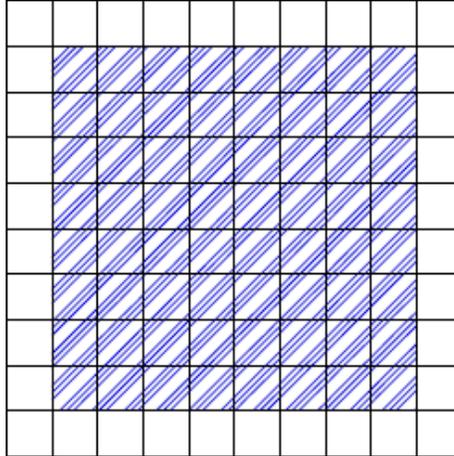


Figura 9. Ejemplo de una imagen con realce espacial obtenida a partir de aplicar una matriz de 3x3.

El valor que se le asigne a los elementos de la matriz dependerá del objetivo que se siga, la elección de estos pesos dieron origen a los filtros de paso bajo y alto.

Los **filtros de paso bajo** tienen como objetivo el suavizar el contraste espacial que exista en una imagen, es decir; atenúa la diferencia entre las frecuencias altas y bajas.

Los filtros de paso bajo son usualmente empleados para corregir el ruido que se puede presentar en una imagen. Existen dos tipos de ruidos según su estructura: el sistemático y el aleatorio. El sistemático es aquel que se produce por problemas en el sensor, mientras que el aleatorio se presenta en forma de puntos en la imagen lo cual ocasiona que se tenga una pérdida en la información. Lo que hacen los filtros de paso bajo es tomar la información de los pixeles vecinos para atenuar dicha variación. Un aspecto importante que se debe tomar en cuenta es que las frecuencias altas (bordes), se perderán.

Entre los filtros de paso bajo más comunes se encuentran:

- **Filtro de la media:** este tipo de filtro se caracteriza porque todos sus elementos tienen el mismo peso y que el valor central resultante es igual al promedio de ND involucrados en dicha operación, véase Figura 10.

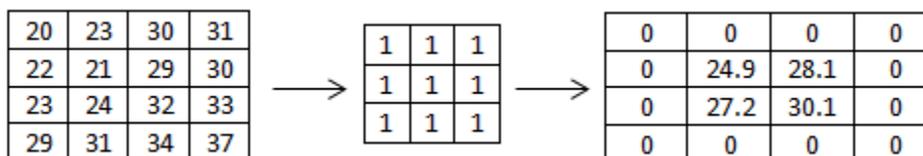


Figura 10. Aplicación del filtro de la media.

- Filtro de la media ponderada:** Su funcionamiento es muy parecido al del filtro de la media, con la única diferencia que se le asigna una ponderación diferente a un elemento de la misma, generalmente al elemento central, con el fin de obtener un resultado más parecido al de la imagen original (Figura 11).

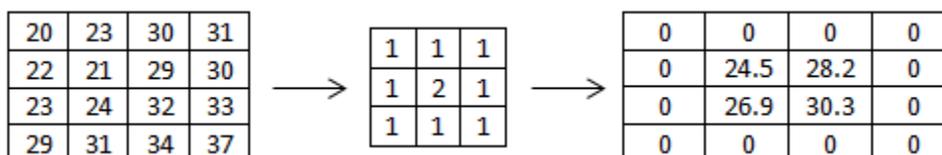


Figura 11. Aplicación del filtro media ponderada

- Filtro de la mediana:** El funcionamiento de este filtro es relativamente sencillo, ya que consiste en ordenar de mayor a menor los elementos que están involucrados en la operación y tomar aquel que se encuentre en medio (Figura 12). Una ventaja de usar este tipo de filtro es que el resultado es un elemento que está presente en la imagen original y no un promedio. Por el otro parte, el ordenar los elementos de manera adecuada hace más complejo el cálculo produciendo que se le dedique más recursos a esta operación.

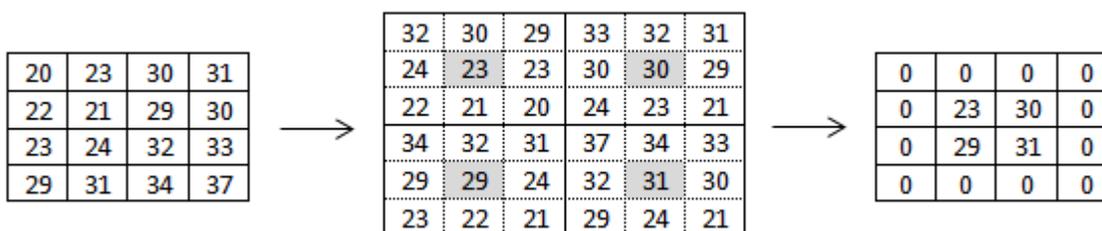


Figura 12. Aplicación del filtro de la mediana

- Filtros Adaptivos:** Son filtros más complejos que los anteriores, ya que los elementos que integran a la matriz son recalculados a partir del histograma de los ND que aparecen en la ventana.

Los **filtros de paso alto** son empleados con la finalidad de enfatizar los bordes (cambios drásticos en los ND) presentes en la imagen. Los filtros de paso alto precisamente enfatizan los bordes al acentuar frecuencias altas y suprimir frecuencias bajas. Entre los que destacan:

- **Filtros direccionales:** Se usan para realzar elementos que siguen una determinada dirección en el espacio, resaltando el contraste entre los píxeles situados en ambos lados del elemento. En la Figura 13 se muestran matrices de filtrado de este tipo.

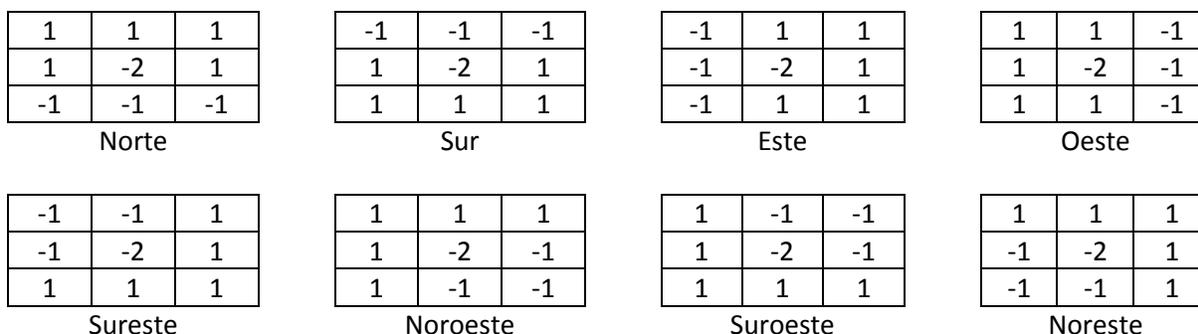


Figura 13. Filtros direccionales.

- **Filtros laplacianos:** Es una operación omnidireccional que resalta todos los bordes presentes en una imagen sin importar su dirección. Son muy usados ya que acentúan de manera drástica la variación en los ND. El uso de este filtro está condicionado ya que en imágenes que tengan ruido se mostrarán más fuertemente esos puntos que los bordes o fronteras de interés. Una de las máscaras laplacianas más empleadas es la matriz de 3x3 que está formada por un 8 en la posición central y por -1 en las posiciones restantes (Figura 14)

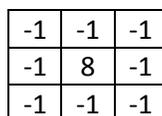


Figura 14. Filtro laplaciano.

- **Filtros de gradiente:** también son conocidos como filtros de la primera derivada son empleados cuando se quiere resaltar una frontera continua como ríos, carreteras, zonas costeras, etc. Para datos de imágenes satelitales, no es posible obtener una derivada continua, por lo que se lleva a cabo una derivada finita que es la diferencia entre dos píxeles adyacentes.

Entre los filtros de gradientes más empleados están: el Sobel, Roberts y Prewitt.

Operador Sobel: Este operador hace uso de dos filtros de paso alto, uno en dirección horizontal y otro en dirección vertical (Figura 15), haciendo énfasis en los píxeles cercanos al centro de la máscara.

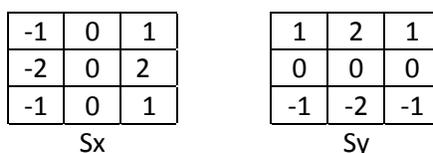


Figura 15. Máscaras del operador Sobel

Operador Roberts: Este operador utiliza las direcciones diagonales para calcular el vector gradiente, haciendo uso de las máscaras que se muestran en la Figura 16.

1	0
0	-1

S_x

0	1
-1	0

S_y

Figura 16. Máscaras del operador Roberts

Operador Prewitt: Éste operador, al igual que el Sobel hace uso de dos matrices de 3x3, con la única diferencia que este operador no otorga una importancia especial a píxeles cercanos al centro de la máscara (Figura 17).

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

S_x

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

S_y

Figura 17. Máscaras del operador Prewitt

El operador Sobel es el más empleado para detección de bordes. Una vez aplicados los dos Kernel, se obtiene la magnitud haciendo uso de la Ecuación 3.

$$|R| = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \tag{Ecuación 3}$$

2.3.1. Corrección atmosférica

La radiación electromagnética detectada por los sensores se ve notablemente afectada por los distintos componentes que afectan a la atmósfera. Los aerosoles y vapor de agua presentes en la atmósfera propicia la dispersión de la radiación transmitida entre la superficie y el sensor. Por ello, la radiancia detectada por éste no corresponde exactamente a la que parte de la superficie terrestre, sino que cuenta con un porcentaje añadido, a consecuencia de la interferencia atmosférica.

El principal problema de esta dispersión es su carácter heterogéneo, en el espacio y tiempo (Chuvieco, 1995), es decir, la dispersión atmosférica no es constante en la imagen, ya que pueden existir zonas que se vean más afectadas que otras, en función de la concentración de los aerosoles y vapor de agua. Realizar una rigurosa corrección atmosférica resulta sumamente compleja, ya que se requerirían una serie de medidas simultáneas al momento de la adquisición de dichas imágenes.

A pesar de esta limitante es necesario realizar una estimación del afecto atmosférico para el caso que se requiera establecer modelos que relacionen los ND con parámetros físicos como la temperatura, biomasa, humedad del suelo, clorofila en el agua, sólidos suspendidos totales, etc. y cuando se realicen estudios multitemporales, debido a que la dispersión sufrida por una imagen no es la misma que experimenta otra adquirida en una fecha distinta.

Uno de los métodos más empleados para la estimación del efecto de dispersión que produce la atmósfera, es el que se le denomina “Corrección del histograma por sus valores mínimos” desarrollado por Chávez (Chavez, 1996), en el cual se establece que las áreas con una fuerte absorbancia como pueden ser cuerpos de agua o sombras deberían presentar una radiancia espectral muy baja y cercana a cero, por lo que mediante un análisis del histograma se pueden determinar estos valores mínimos que corresponderían al efecto de dispersión atmosférica. En consecuencia una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en restar a todos los Nivel Digital de cada banda el ND mínimo de esa misma banda, produciendo que el histograma se recorra.

2.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA PERCEPCIÓN REMOTA

El uso de la percepción remota ha adquirido una gran importancia para el estudio de diversos temas, debido a las ventajas que presenta sobre muchos métodos tradicionales, por lo cual a continuación se mencionarán algunas de sus ventajas y limitaciones que se deben tomar en cuenta al trabajar con esta herramienta.

➤ **Ventajas:**

- Análisis global del área de estudio.
- Identificación de puntos críticos de manera rápida.
- Estudios multitemporales.
- Obtención de datos de los sitios de difícil acceso.
- Información continuamente actualizada.
- Versatilidad para emplear la información en diversos campos de estudios.
- Se puede obtener información sin necesidad de ir al sitio.

➤ **Limitaciones:**

- Se requiere de personal capacitado para una debida interpretación y manejo de datos.
- Las nubes y la vegetación pueden afectar la adquisición de información.
- La información recabada es sólo de la superficie del objeto en estudio.
- La adquisición de las imágenes dependen del paso del satélite
- La resolución espacial del sensor limita el tamaño mínimo de superficies observables.

2.5. PRINCIPIOS FÍSICOS

La radiación electromagnética se ha explicado básicamente haciendo uso de dos teorías aparentemente contrapuestas, la primera de ellas desarrollada por Maxwell, quien concibe a la radiación electromagnética como un haz ondulatorio (Teoría ondulatoria) y la segunda, corresponde a la desarrollada por Planck, que considera que la radiación electromagnética es una sucesión de unidades discretas de energías denominados fotones o cuantos, con masa igual a cero. En la actualidad se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo a estos dos planteamientos.

Según la teoría ondulatoria desarrollada por Maxwell, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y contenido en dos campos de fuerzas ortogonales entre sí (eléctrico y magnético). Las ondas generadas por estos campos quedan definidas por su longitud de onda (λ) y su frecuencia (ν). La primera hace referencia a la distancia que existe entre dos crestas, mientras que la frecuencia hace alusión al tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas de la onda. Ambos elementos están inversamente relacionados como se puede observar en la Ecuación 4.

$$c = \lambda \cdot \nu \tag{Ecuación 4}$$

Donde:

c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s)

λ es la longitud de onda

ν es la frecuencia (ciclos por segundo)

La interacción de las ondas electromagnéticas con las superficies y la atmósfera depende de la frecuencia de estas ondas (Elachi & Zyl, 2006). A pesar que la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suele establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se le denomina espectro electromagnético (Figura 18).

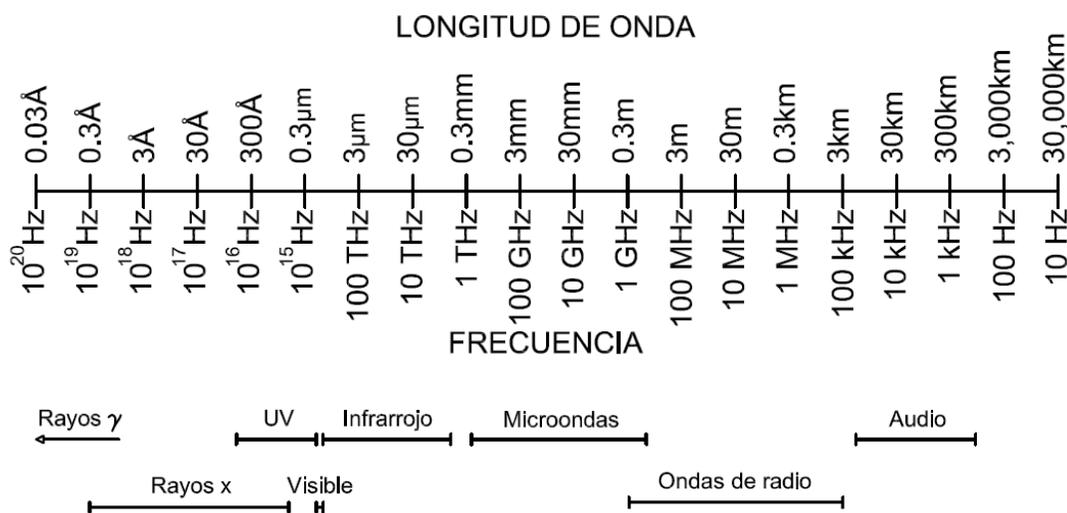


Figura 18. Espectro electromagnético (Elachi & Zyl, 2006)

En percepción remota es común el uso de bandas espectrales, pero su denominación y amplitud varía dependiendo de los diferentes métodos y medios para la detección de cada tipo de radiación. Las regiones del espectro electromagnético más empleadas en PR se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Principales bandas de espectro electromagnético usadas en PR.

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

La franja del visible (0.4μm-0.7μm) es denominada de esta manera debido a que es la única radiación electromagnética que puede ser percibida por los ojos, en esta banda la radiación solar es máxima. A la vez, esta pequeña porción del espectro electromagnético se encuentra dividido en tres bandas: La banda del azul (0.4μm-0.5μm), la banda del verde (0.5μm-0.6μm) y la banda del rojo (0.6μm-0.7μm). La franja del infrarrojo próximo (0.7μm-1.3μm) es conocido también como infrarrojo reflejado o fotográfico, ya que puede detectarse haciendo uso de películas dotadas de emulsiones especiales. Es empleada en la discriminación de masas vegetales y medición de la concentración de humedad. En la banda del infrarrojo Medio (1.3μm-8μm) es donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. La banda de Infrarrojo Térmico (8μm-14μm) incluye la porción emisiva del espectro terrestre. Y por último, la porción microondas es de gran interés por ser un tipo de energía muy transparente a la cubierta de las nubes.

Por otro lado, la Teoría desarrollada por Planck, señala que la energía viaja como un flujo de partículas llamadas fotones. La energía transportada por cada fotón puede ser calculada haciendo uso de la Ecuación 5.

$$E = h \cdot \nu \tag{Ecuación 5}$$

Donde:

E es la energía radiante de un fotón (Julios)

h es la constante de Planck (6.6×10^{-34} Js)

ν es la frecuencia

Sustituyendo la Ecuación 4 en la Ecuación 5 ambas teorías puede ser relacionadas, dando por resultado la Ecuación 6.

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \tag{Ecuación 6}$$

Analizando la Ecuación 6 se puede concluir que a mayor longitud de onda o menor frecuencia el contenido energético será menor y viceversa. Esta es la razón por la cual resulta más difícil la detección de ondas largas como las microondas.

La ecuación de radiación desarrollada por Planck (Ecuación 7), señala que cualquier objeto cuya temperatura sea mayor a la del cero absoluto (-273 °C) es capaz de radiar energía, y que ésta

incrementa con la temperatura. El incremento en la temperatura de un objeto propicia que éste irradie con mayor intensidad en longitudes de onda más cortas.

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

Ecuación 7

Donde:

M_{λ} es la emitancia radiante espectral del objeto medida en $Wm^{-2}\mu m^{-1}$, es el índice de energía que es emitida por unidad de área superficial del objeto en una longitud de onda particular (Vázquez, 2000).

$$c_1 = 3.74 \times 10^{-8} Wm^{-2}\mu m^{-4}$$

$$c_2 = 1.44 \times 10^4 \mu mK$$

Haciendo uso de la Ecuación 7 se puede construir la curva de emitancia de un cuerpo negro a distintas temperaturas (Figura 19). El uso de estas curvas ayuda a conocer el comportamiento espectral de un objeto, del cual se conozca su temperatura y su emitancia, es decir, su grado de similitud con un cuerpo negro.

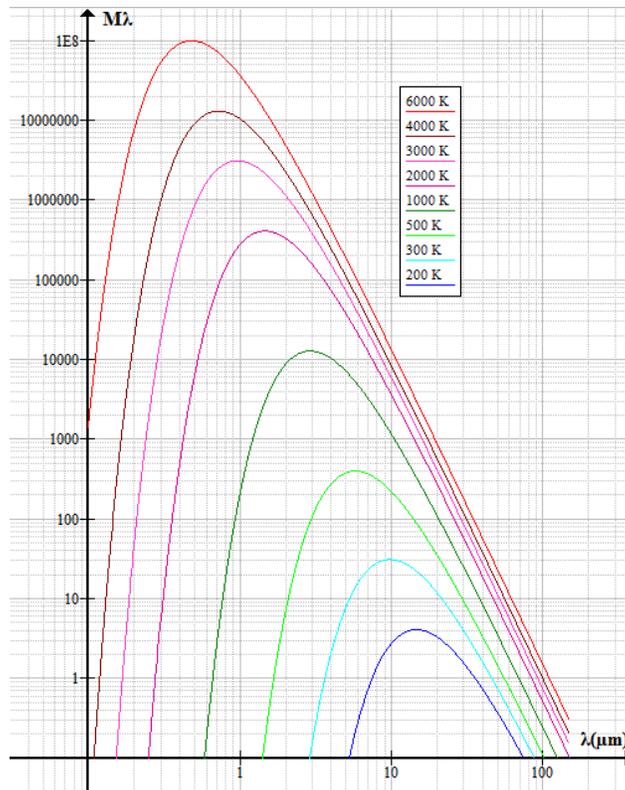


Figura 19. Emitancia radiante espectral de un cuerpo negro a diferentes temperaturas.

Wien dedujo a partir de la ecuación desarrollada por Planck, que es posible calcular la longitud de onda a la que se produce la máxima emitancia de un cuerpo cuando se conoce su temperatura (Ecuación 8).

$$\lambda_{max} = \frac{2898 \mu m K}{T}$$

Ecuación 8

Donde:

T es expresada en grados Kelvin

La Ecuación 8 es empleada en la selección de la banda más conveniente para el estudio de determinado fenómeno, siempre que se conozca la temperatura. Por ejemplo, la temperatura del Sol es aproximadamente de unos 5700°C, siendo en la región del visible donde se presenta su máxima emitancia. Por consiguiente, se puede deducir que cuanto más caliente esté el objeto emisor, radiará a longitudes de onda más cortas.

La ley desarrollada por Stefan-Boltzmann permite calcular el total de energía que irradia un cuerpo por unidad de superficie (Ecuación 9), dependiendo directamente de la temperatura y al estar elevada a la cuarta potencia, una pequeña variación en la ella, implica un aumento considerable de la emitancia radiante del objeto.

$$M = \sigma \cdot T^4$$

Ecuación 9

Donde:

M es la emitancia radiante del objeto (Wm^{-2})

σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-2} Wm^{-2}K^{-4}$)

T es la Temperatura en K

La radiación que recibe la superficie terrestre puede dividirse en tres términos, como se muestra en la Ecuación 10.

$$E_I(\lambda) = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda)$$

Ecuación 10

Donde:

E_I es la energía electromagnética sobre un cuerpo

E_R es la energía reflejada

E_A es la energía absorbida

E_T es la energía transmitida

La proporción del flujo de energía reflejado, absorbido y transmitido depende de las características de la superficie. En la Figura 20 se muestra la relación entre el flujo incidente y reflejado.

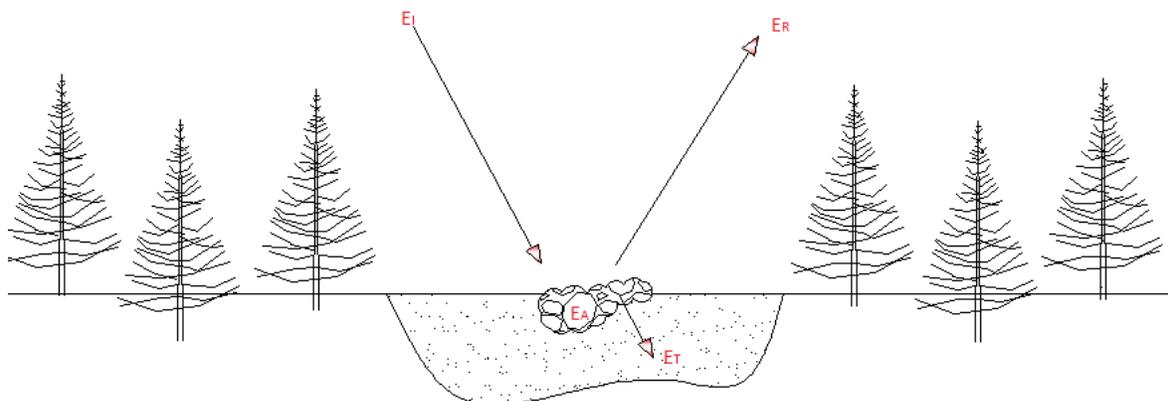


Figura 20. Relación entre flujo incidente y reflejado (Chuvieco, 1995)

La diferencia de energía absorbida, reflejada y transmitida entre los diferentes cuerpos que integran a la superficie terrestre, ha permitido la creación de curvas de reflectancias, también conocidas como curvas espectrales, que relacionan la energía reflejada con las diferentes longitudes de onda. El conocer la firma espectral de estas superficies, permite hacer una discriminación entre ellas para identificarlas.

En la Figura 21 se muestran las firmas espectrales de superficies terrestres más comunes. Se observa que para el caso del agua, ésta presenta una mayor respuesta espectral en la región del azul y verde. Fuera del visible, no refleja, y en el infrarrojo su absorbancia asciende rápidamente (Sepúlveda, 2011). Además, presenta una baja reflectancia lo que propicia que el valor de los Niveles Digitales sea bajo, esto se cumple siempre y cuando el agua esté libre de contaminantes que hagan que su firma espectral se modifique.

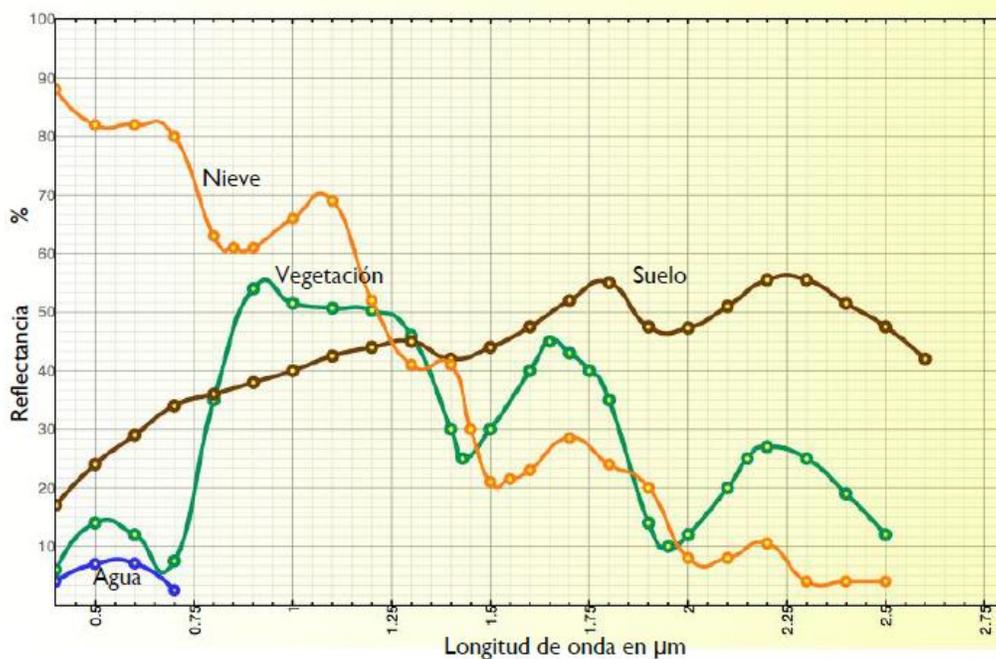


Figura 21. Curvas espectrales de agua, vegetación, suelo y nieve. Tomada de Sepúlveda, 2011.

La energía que es detectada por el sensor, como se vio anteriormente, depende de las condiciones atmosféricas y del ángulo con el cual la superficie refleja la energía incidente. Esta geometría de observación está estrechamente ligada a la rugosidad que presenta la superficie. Por lo que se ha establecido una clasificación entre dos tipos de cubierta (Figura 22).

- Cubierta Especular: son aquellas que reflejan la energía con el mismo ángulo del flujo incidente.
- Cubierta Lambertiana: son aquellas que lo reflejan uniformemente en todas direcciones.

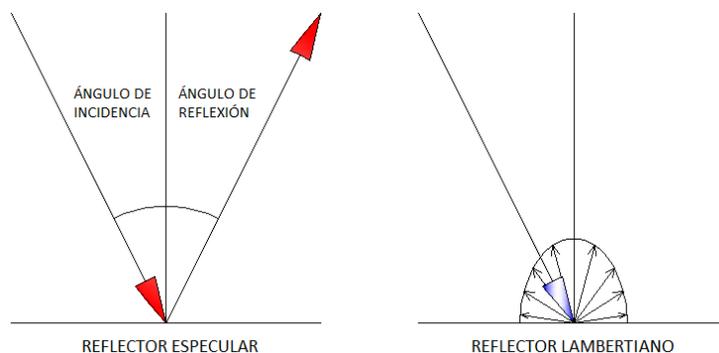


Figura 22. Superficies especulares y lambertinas

2.6. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA SUJETOS A SER EVALUADOS MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA

Los parámetros de calidad del agua se clasifican en cuatro grandes grupos: Físicos, Químicos, Biológicos y Radiológicos. Al emplear percepción remota para evaluar la calidad de un cuerpo de agua, únicamente es posible determinar algunos parámetros Físicos y Químicos, la razón de esto se debe a que solamente algunos parámetros son capaces de modificar la firma espectral del agua lo suficiente para que sean detectados por los sensores. Es importante señalar que en este apartado se definirán únicamente aquellos parámetros que son susceptibles a ser medidos por percepción remota.

Los parámetros físicos son los que pueden ser medidos o detectados haciendo uso de los sentidos o aparatos, entre los destacan: Turbiedad, sólidos, olor, color, sabor, etc. estos parámetros afectan directamente en la aceptabilidad y calidad del agua.

Los sólidos presentes en el agua tienen su origen en las aguas residuales y la erosión de suelos. El incremento de la concentración de sólidos en un cuerpo de agua propicia que ésta pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática y limita su uso. De ello se deriva el interés por determinar de forma cuantitativa este parámetro.

- Los Sólidos Totales (ST): Materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103°C.
- Sólidos Suspendidos Totales (SST): Es la materia retenida por un filtro de microfibras de vidrio con diámetro nominal de poro de 1.2 μm .

- Los Sólidos Disueltos Totales (SDT): Es aquella materia residual producto de la evaporación de una muestra previamente filtrada.

La turbiedad se define como el grado de opacidad producida por partículas de arcilla y limo, descargas de aguas residuales, desechos industriales o la presencia de numerosos microorganismos.

Una de las técnicas más empleadas para medir la turbiedad en campo es mediante el uso del disco Secchi. Este consiste en un disco circular de aproximadamente 20 cm de diámetro dividido en cuadrantes pintados de blanco y negro alternadamente, una cadena graduada atada al centro del disco y una pesa para evitar que este dispositivo sea arrastrado por las corrientes. Su funcionamiento es el siguiente: Se sumerge el disco lentamente en el cuerpo de agua lo más vertical posible hasta que los cuadrantes dibujados en el disco dejen de apreciarse. La medición resultante es subjetiva ya que depende de la apreciación de la persona que está tomando las muestras.

En laboratorio, comúnmente se emplean turbidímetros para medir la turbidez, estos instrumentos hacen pasar un rayo de luz a través de la muestra, midiendo la luz reflejada por las partículas en un ángulo de 90° con respecto al rayo incidente. Las lecturas se dan en Unidades Nefelométricas o UTN.

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

La Cuenca Villa Victoria San José del Rincón pertenece a la región hidrológica 18, se encuentra ubicada en el occidente del Estado de México, entre las latitudes $100^{\circ}16'$ y $99^{\circ}53'$ y las longitudes $19^{\circ}40'$ y $19^{\circ}23'$. Tiene una extensión de 61,926 hectáreas, de las cuales 29,132 corresponden al municipio San José del Rincón y 24,132 al municipio de Villa Victoria, entre estos dos municipios se abarca el 86% del área de la cuenca. El área restante está dividida por los municipios San Felipe del Progreso, Almoloya de Juárez, Villa de Allende e Ixtlahuaca pertenecientes al Estado de México y Zitácuaro, Angangueo y Ocampo del estado de Michoacán. En la Figura 23 se muestra un croquis con la ubicación de los municipios que la integran.

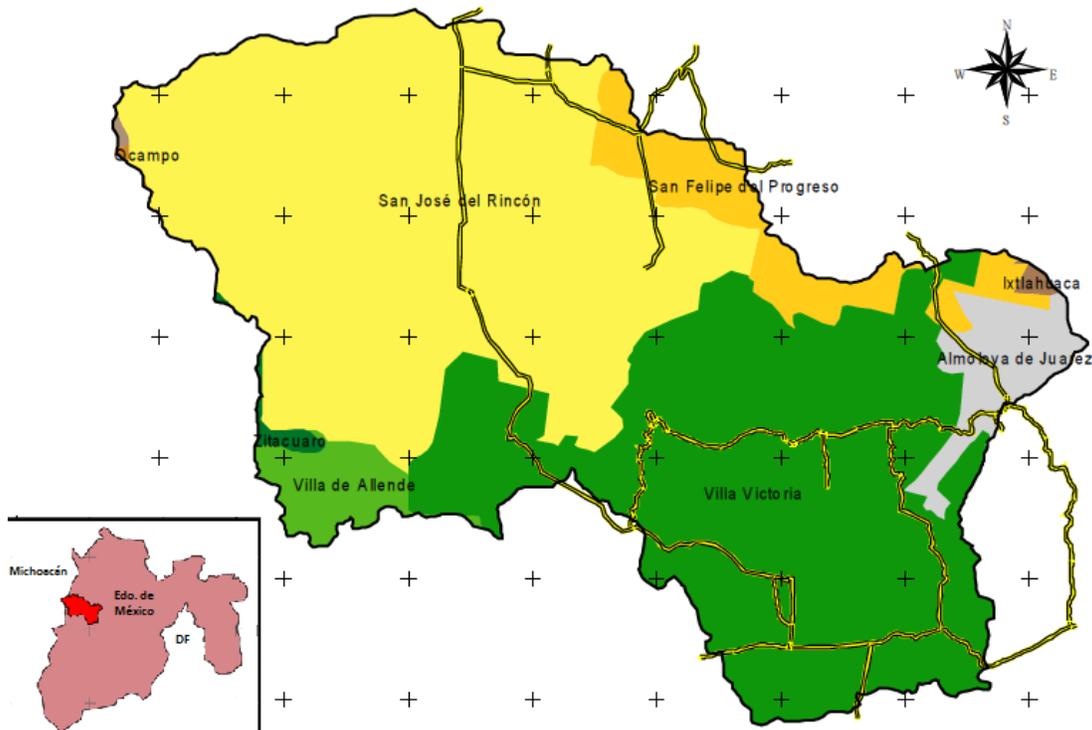


Figura 23. Distribución de los municipios que integran la Cuenca Villa Victoria San José del Rincón

El clima en la cuenca se encuentra monitoreada por 5 estaciones climatológicas automatizadas, con base en la información que éstas proporcionan, se sabe que el clima predominante es el subhúmedo con lluvias durante el verano, la precipitación media anual es de 1,053 mm. La temperatura media anual oscila entre los 11 y 15°C.

En lo que se refiere al relieve la cuenca está conformada por planicies, elevaciones orográficas, lagos, valles y tierras de cultivo. Al noroeste de la cuenca se encuentran Sierras, tales como la Cañada de Guadarrama y la Cañada del Sauce principalmente, con pendientes de hasta 70%; en la parte central de la cuenca se identifican Valles de laderas tendidas con pendientes entre 0 y 2%; alrededor del embalse se observan Lomeríos de basalto con pendientes de hasta 15%.

La hidrología de la cuenca está compuesta por ríos, mantos acuíferos, manantiales y embalses artificiales. El río más caudaloso es el de La Compañía, le siguen: el Río de los Coyotes, el Río prieto, San José y San Marcos.

Se tienen registrados 692 mantos acuíferos y manantiales en el municipio de Villa Victoria, para el municipio de San José del Rincón no existen datos oficiales de los manantiales que le conforman.

La presa Villa Victoria es uno de los cuerpos de agua más importantes, no sólo del Estado de México, sino de la Zona Metropolitana del Valle de México, ya que abastece con $4.2 \text{ m}^3/\text{s}$ al sistema Cutzamala. Es alimentada principalmente del agua que escurre de las montañas provenientes del Río de La Compañía, manantiales y arroyos, tiene una capacidad de 186 millones de metros cúbicos y se encuentra a una altitud de 2,545 msnm, es una presa de almacenamiento cuya altura del NAME (Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias) se encuentra en la cota 2,608 msnm.

El análisis del medio socioeconómico se hará únicamente para el municipio de Villa Victoria dada su influencia sobre la presa Villa Victoria. Este municipio está constituido por 106 localidades con un alto grado de marginación. La tasa de crecimiento demográfico es del 2.52%, la cual no ha variado desde la década de los 70's. En la estructura de la población predominan los jóvenes, el 68 % de la población tiene una edad menor de 30 años, debido a la migración que existe en el municipio. El número de ocupantes por vivienda tiene una alta densidad, siendo de 5.1 en promedio.

En lo que respecta a salud, INEGI reporta que 37% de los habitantes del municipio no cuentan con derechohabencia a servicios de salud (IMSS, ISSSTE o seguro popular), la capacidad instalada es insuficiente para acceder a servicios de salud gratuitos, las personas distribuidas en las localidades se tienen que desplazar a centros urbanos para recibir atención sólo de primer contacto, ya que para enfermedades graves es necesario trasladarse a centros de salud en Valle de Bravo o en la Ciudad de Toluca. El personal médico al 2009 era de 1:1,210, es decir, por cada médico, había 1,210 pacientes.

Las principales muertes entre los habitantes de este municipio se deben a enfermedades del sistema circulatorio, respiratorio y digestivo; en menor orden por enfermedades endócrinas, nutricionales, metabólicas y tumores.

El tema de infraestructura sanitaria arroja cifras alarmantes para la cuenca, ya que, de acuerdo a información obtenida del XII Censo de la Población y Vivienda, el municipio presenta contrastes que hacen evidente el desequilibrio que existe en el interior de sus localidades.

Hay un rezago importante en la cobertura de servicio de agua potable en el municipio (49%). Desde hace varios años se ha manifestado la necesidad de la ampliación y mejoramiento de la red actual. En las localidades que rodean a la cabecera municipal se debe buscar fuentes alternas de abastecimiento, ya que, debido a la distribución espacial de la población, dotar desde una sola fuente sería complejo y costoso.

El servicio de alcantarillado es otro problema que se presenta en la comunidad, ya que únicamente el 45% de la población está conectada a la red de drenaje. La cabecera municipal y cinco localidades más, vierten sus aguas residuales en la presa Villa Victoria, a pesar de que se cuenta con una planta de tratamiento de 22.5 L/s construida por CONAGUA, misma que no opera por falta de colectores.

Las actividades económicas primarias son principalmente la agricultura y la ganadería. Dada las características del territorio se practica la rotación de cultivos entre los que destacan maíz, avena, papa, canola y zanahoria con rendimientos superiores al nivel medio nacional. A pesar de que la agricultura es la actividad principal, ésta la complementan actividades comerciales o de servicios ya que no es rentable por sí sola, en un 80% es para autoconsumo. En lo que respecta a la ganadería, tienen la actividad de cría y explotación de animales, destacando las especies de bovino, porcino, caprino, equino, ovino, aves de corral, conejos y colmenas, sin embargo, se presenta la problemática de falta de infraestructura, escasa asesoría técnica y elevados costos de los alimentos adecuados para el ganado. La producción es principalmente de autoconsumo a nivel municipal y no hay impacto a nivel regional.

La silvicultura de madera, leña y carbón, y la recolección de productos como la lechuguilla candelilla, barbasco y resina, es para autoconsumo. Es importante señalar que la tala se realiza sin control y de manera clandestina, ocasionando una gran deforestación en gran parte de la cuenca.

La actividad industrial se concentra en la operación de 33 unidades productivas, de las cuales, 2 maquilan ropa interior, 1 empaca forraje, 2 producen alambre requemado, 1 fabrica arillos de alambrón, 11 fabrican block, 7 producen lácteos, 7 dulces regionales, etc. en conjunto, estas unidades productivas generan 640 empleos.

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE LOS MODELOS

4.1. REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN Y EXPERIENCIAS PREVIAS

En la literatura se pueden encontrar varios artículos relacionados con el estudio de la calidad del agua haciendo uso de la percepción remota, por ejemplo: en España obtuvieron un modelo del índice de estado trófico para el Río Ebro (Álvarez & Zarazaga, 2006), en Brasil hicieron una correlación de los Sólidos Suspendidos Totales de la bahía Guanabara entre imágenes satelitales y pruebas de laboratorio (Braga & Setzer, 1993), en Estados Unidos se llevó a cabo un monitoreo del estuario de Florida usando imágenes del satélite MODIS (Chen, HU, & Muller-Karger, 2006), en Canadá se estudió la turbiedad que se producía al descargar el Río Fraser en la zona costera y así como estos ejemplos existen muchos.

Los parámetros que se pueden monitorear mediante la percepción remota son pocos (Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Disueltos Totales, temperatura, turbiedad, clorofila, etc), pero la información que brinda es la suficiente para dar una idea de las condiciones en la que se encuentra el cuerpo de agua.

Los modelos de calidad del agua obtenidos por PR son producidos a partir de una correlación entre los datos resultantes de un muestreo tradicional y de la reflectancia, información obtenida de las imágenes satelitales. Es recomendable realizar muestreos en distintas épocas del año con la finalidad de que el modelo sea más confiable y exacto.

El monitoreo de cuerpos de agua mediante percepción remota trae consigo grandes ventajas, como el poder contar con información de manera periódica del cuerpo en estudio a costos bajos y sin la necesidad de mover personal al sitio, que en muchas ocasiones es difícil el acceso, se eliminan las pruebas de laboratorio que además de laboriosas, implican dedicarle tiempo, personal y recursos económicos.

En el caso de este estudio, la obtención de los modelos de calidad del agua se basará en la metodología desarrollada en el proyecto “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota” perteneciente al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), en el cual se desarrollaron modelos para monitorear el vaso de la presa Valle de Bravo.

4.2. SELECCIÓN DE LA PLATAFORMA ADECUADA

En el capítulo tres se mencionaron las principales plataformas para estudios de la tierra, para la selección, se analizaron las características de cada una de ellas tales como: resolución espectral, temporal, radiométrica y espacial, así como el costo de adquisición.

Las imágenes tomadas por el satélite SPOT 5 con fecha posterior al año 2010, tienen un costo de adquisición muy variable, dependiendo de la resolución espacial de la imagen y del tratamiento

previo que haya recibido, el precio varía desde los 32,300 hasta 137,700 pesos aproximadamente. Dichas imágenes tienen una mejor resolución espacial que las adquiridas por el satélite Landsat 7, sin embargo, el elevado costo de adquisición es un punto importante a considerar en la selección de la plataforma.

Se seleccionó el satélite Landsat 7 debido a la facilidad de adquisición y a que la resolución de las imágenes satisface las necesidades del presente trabajo. Una de las desventajas más importantes que se presentan con este satélite es el bandeo que despliegan las imágenes a partir del año 2003 debido a un fallo en el sensor SLC; para el presente estudio, esto no representa un problema significativo, ya que se tomarán las muestras suficientes considerando que habrá una pérdida de datos, con el fin de tener los necesarios para la generación de los modelos de calidad del agua.

4.3. PLANEACIÓN DE LAS FECHAS DE MUESTREO Y ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

En los estudios de calidad del agua es necesario conocer las variaciones que se presentan en el cuerpo de agua a lo largo del año, por lo que para este estudio se programaron dos muestreos: uno en temporada de estiaje (mes de abril) y otra en temporada de lluvias (mes de junio). Para determinar la fecha de los muestreos fue necesario conocer cuándo pasaría el satélite por la zona de interés, ya que en la literatura se recomienda que el muestreo se haga preferentemente el día en que el satélite toma la imagen o en un intervalo de ± 1 día, con el fin de poder relacionar las muestras de campo con los niveles digitales de la imagen.

La USGS, en su página de internet¹, cuenta con un calendario donde se pueden consultar las fechas en las que el satélite Landsat 7 toma las imágenes de las diferentes escenas. Con base en la información obtenida en este sitio web, se programaron las visitas, la primera para el día 14 de abril y la segunda para el día 17 de Junio. Cabe señalar que para un estudio como éste, es muy importante tener cuidado con las condiciones climatológicas, sobre todo en temporada de lluvias ya que si existe nubosidad podría interferir con los resultados esperados.

La adquisición de las imágenes se puede hacer mediante el portal de internet² perteneciente a la USGS, donde se pueden solicitar sin costo las imágenes que sean de interés.

4.4. PRE-PROCESAMIENTO, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES

El pre-procesamiento, procesamiento y análisis de las imágenes consistió en la determinación de los puntos de muestreo, extracción de datos para la generación de los modelos y la creación de mapas de calidad. El software seleccionado para el tratamiento de las imágenes fue Idrisi Selva ya que este programa cuenta con diversas funciones que permitieron que se cumplieran los objetivos que se buscaban en este trabajo.

4.4.1. DETERMINACIÓN DE SITIOS DE MUESTREO

La determinación de los puntos de muestreo es un aspecto muy importante para caracterizar el agua adecuadamente, ya que la calidad del líquido puede cambiar drásticamente de un punto a

¹ http://landsat.usgs.gov/tools_L7_acquisition_calendar.php

² <http://glovis.usgs.gov/>

otro, como consecuencia, es necesario que se conozca el sitio para establecer cuáles son los puntos críticos (descargas municipales o industriales), si es que existen. También es importante conocer la batimetría del embalse, ya que los puntos de muestreo deben cumplir con la condición de tener más de dos metros de profundidad para que el suelo no influya en las lecturas que toma el sensor del satélite.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) recomienda para embalses, que las muestras se tomen en la ubicación, profundidad y frecuencia en relación con las condiciones locales y propósito de la investigación. En este trabajo se empleó una técnica que consiste en la agrupación de Niveles Digitales similares en clústeres, lo que permitió conocer la variación de la calidad del agua del embalse y así determinar los posibles puntos de muestreo.

El primer paso para la determinación de los sitios fue obtener una imagen con la fecha más próxima a la del muestreo (14 de abril), con el fin de que las condiciones del embalse fueran lo más parecidas. La imagen seleccionada correspondió a la del 13 de marzo.

El trabajar con la escena completa implica dedicarle muchos recursos del equipo de cómputo, ocasionando que las operaciones entre imágenes se vuelvan lentas, por lo que se optó por recortarla y trabajar solamente con una porción de la imagen que correspondiera al área de estudio (Figura 24).

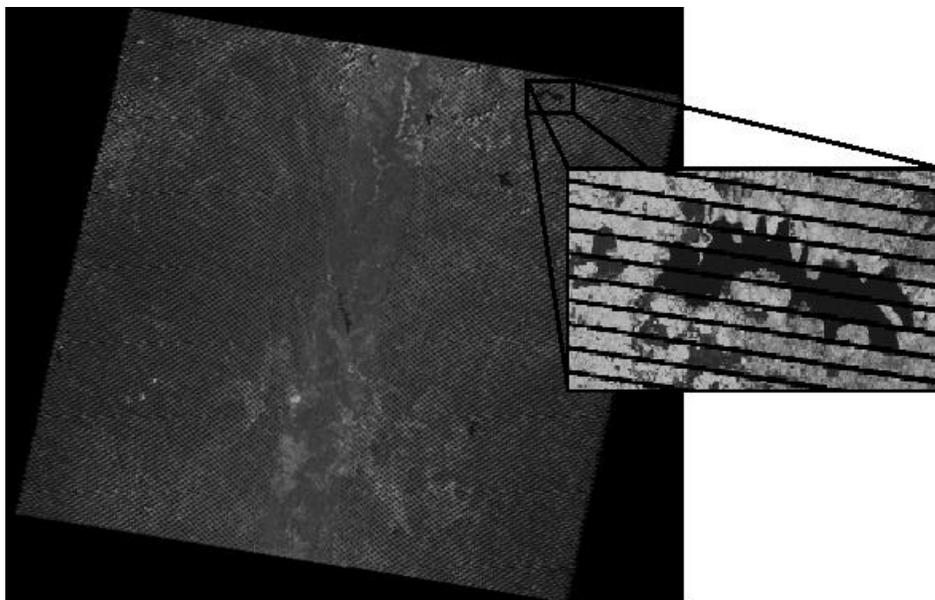


Figura 24. Recorte de la escena que muestra la presa Villa Victoria.

El llevar a cabo diferentes composiciones a color, como se mencionó en el capítulo tres, ayuda a extraer e identificar información útil. En la Figura 25 se realizó una composición de color verdadero. El resultado muestra que existe interferencia atmosférica, ya que se ve un color grisáceo en toda la imagen, por lo que es necesario hacer una corrección atmosférica.



Figura 25. Composición color verdadero

La corrección atmosférica se puede hacer mediante un análisis del histograma. El proceso consiste en identificar el valor del Nivel Digital mínimo que sea significativo para cada banda para posteriormente restarle ese valor a cada una de ellas. A continuación se muestran de la Figura 26 a la Figura 31 el histograma correspondiente a las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 respectivamente.

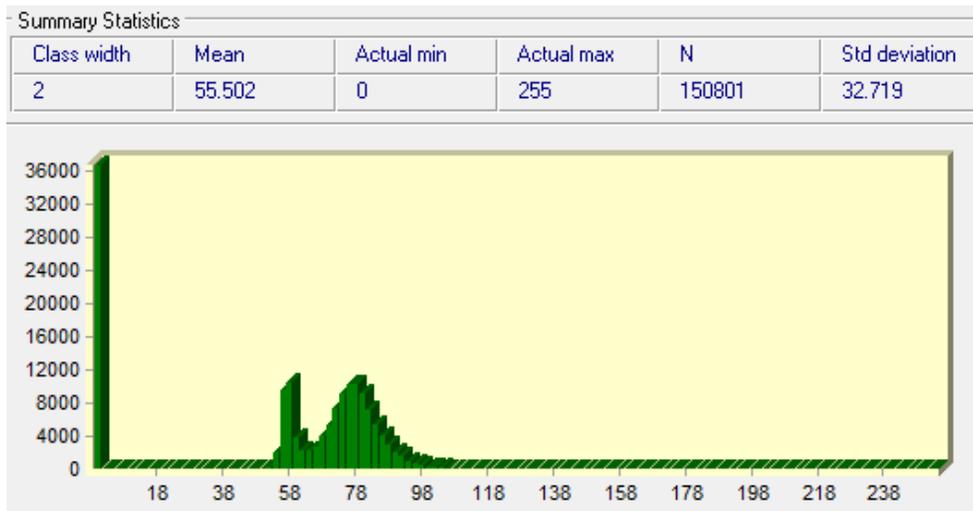


Figura 26. Histograma correspondiente a la Banda 1.

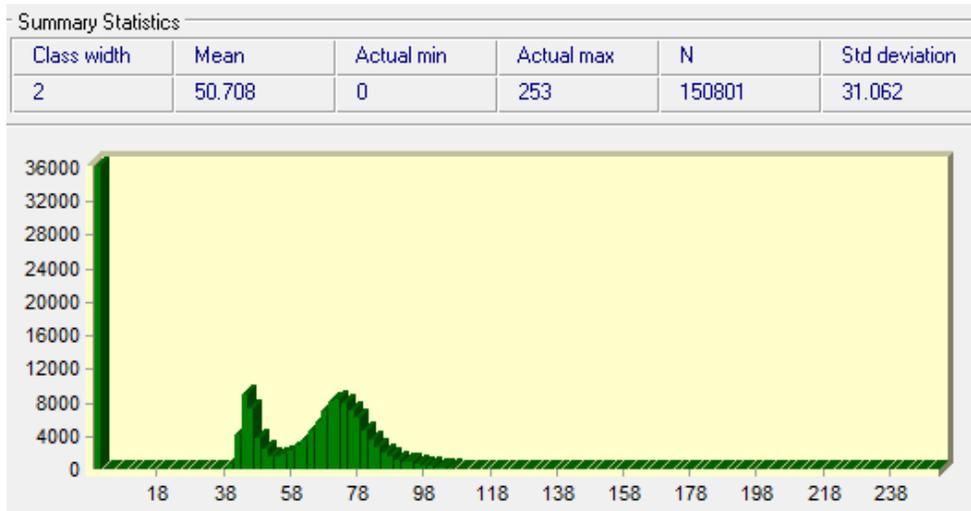


Figura 27. Histograma correspondiente a la Banda 2.

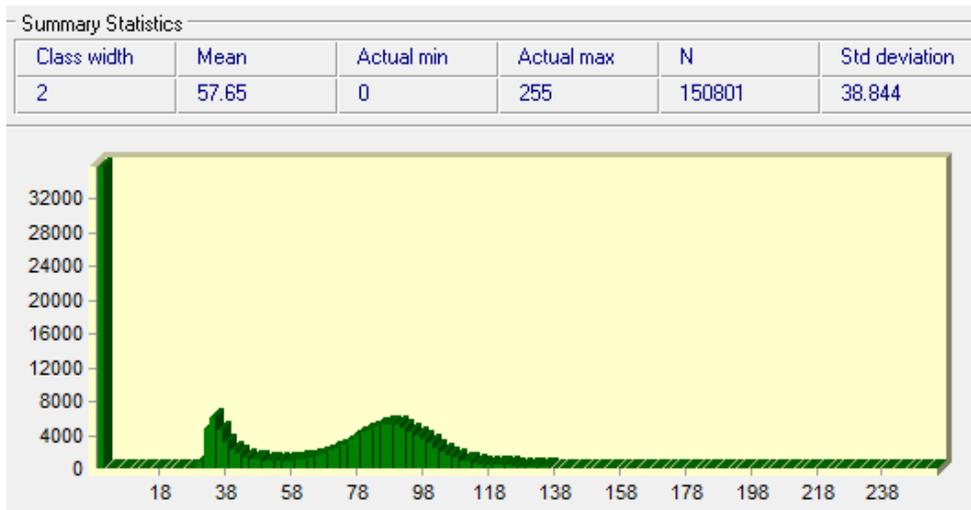


Figura 28. Histograma correspondiente a la Banda 3.

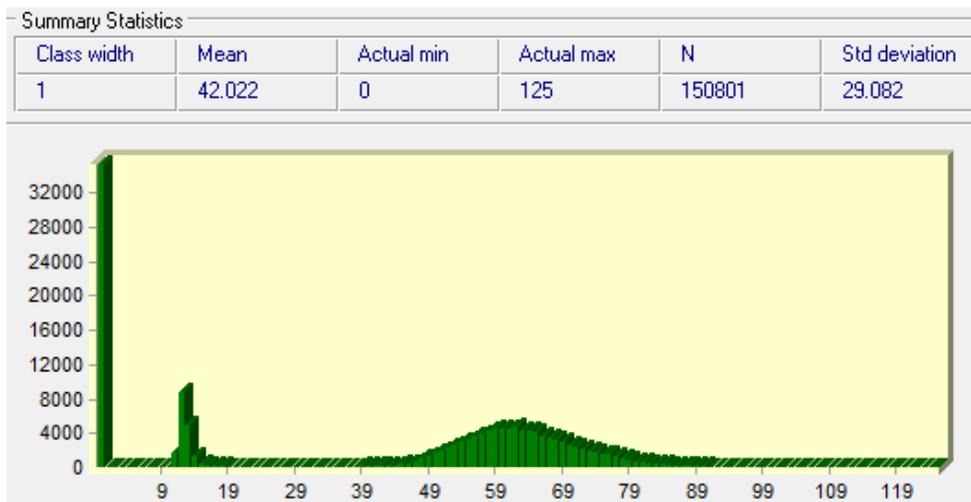


Figura 29. Histograma correspondiente a la Banda 4.

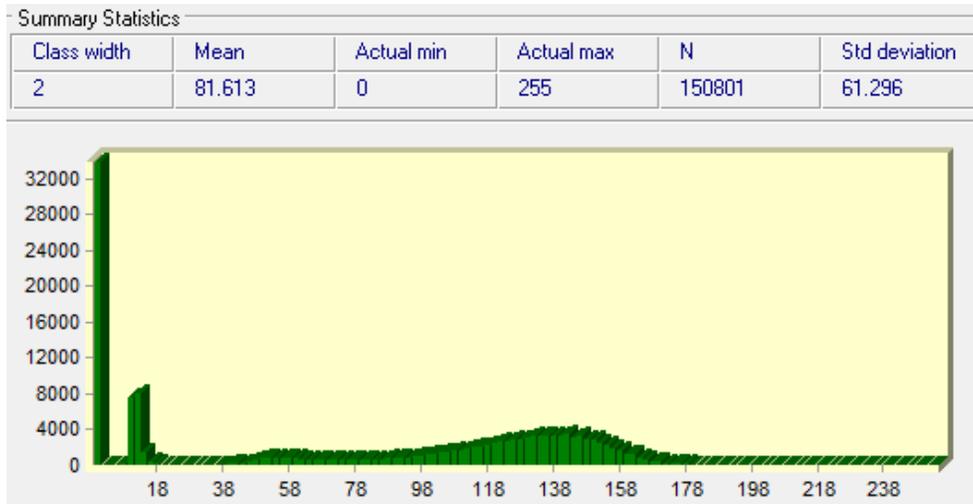


Figura 30. Histograma correspondiente a la Banda 5.

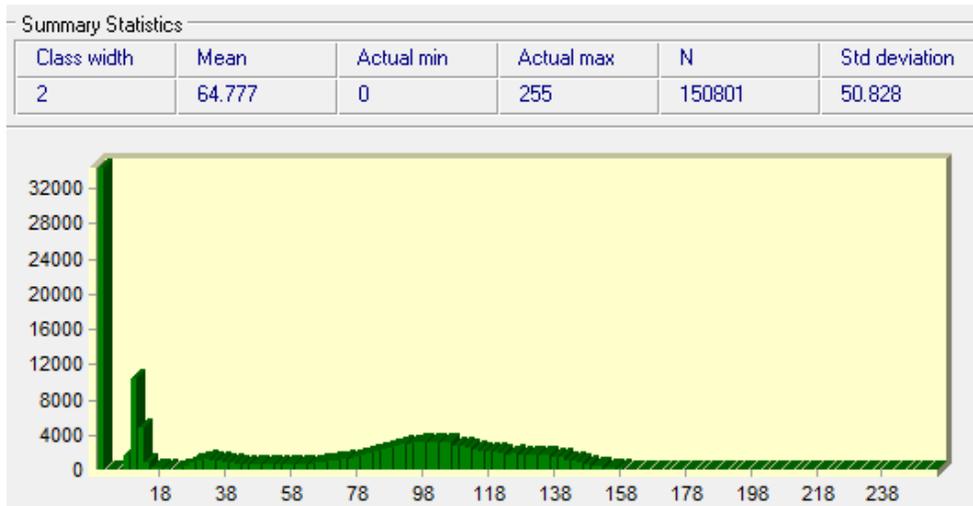


Figura 31. Histograma correspondiente a la Banda 7.

Los valores mínimos de los Niveles Digitales significativos de cada banda se muestran en la Tabla 5, estos se obtuvieron a partir del análisis realizado a los histogramas anteriores.

Tabla 5. Valores de Nivel Digital mínimo significativo

Banda	Nivel Digital mínimo	Porcentaje de Saturación
1	53	0.32
2	40	0.37
3	30	0.55
4	11	0.30
5	9	0.28
7	8	0.27

El objetivo de identificar los valores anteriores es poder recorrer todo el histograma a la izquierda para así eliminar parte de la interferencia que ocasionan las partículas presentes en la atmosfera. La sustracción de estos valores, produce que algunos ND adopten valores negativos, por lo que es

necesario reclasificarlos para que tomen el valor de cero. El resultado se muestra de la Figura 32 a la Figura 37.

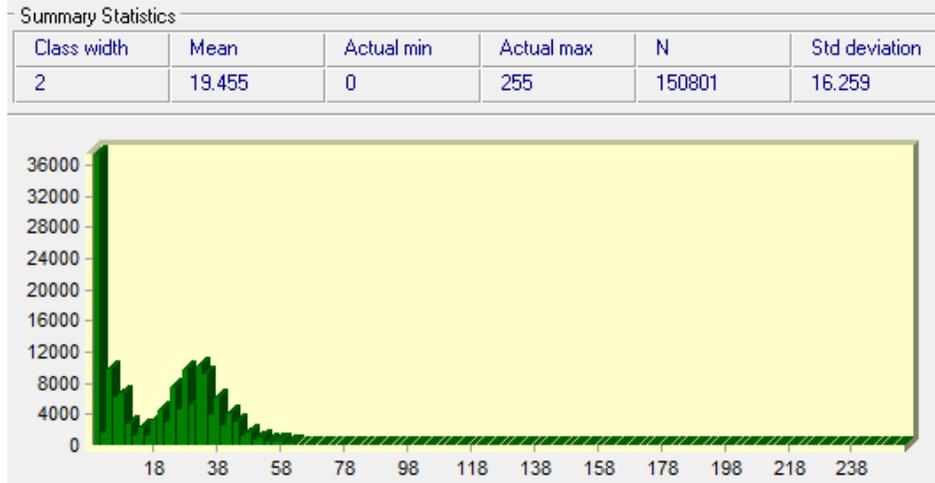


Figura 32. Histograma corregido correspondiente a la Banda 1.

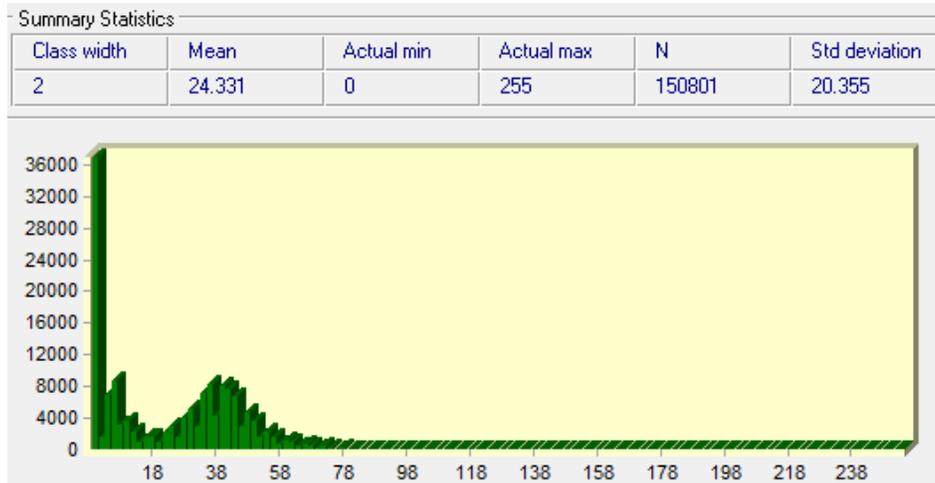


Figura 33. Histograma corregido correspondiente a la Banda 2.

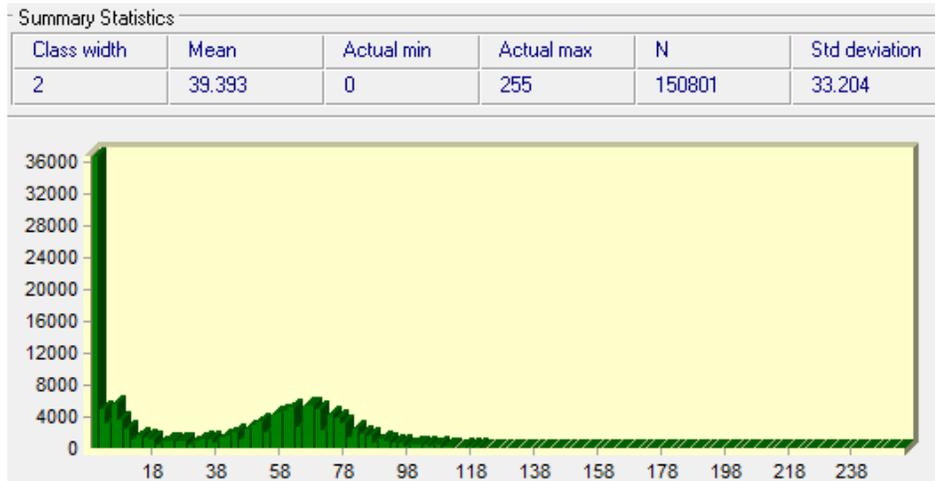


Figura 34. Histograma corregido correspondiente a la Banda 3.

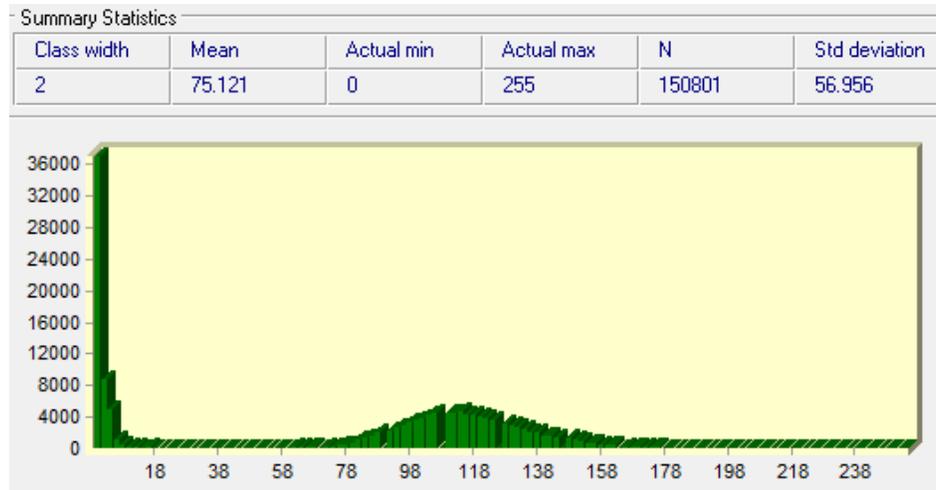


Figura 35. Histograma corregido correspondiente a la Banda 4.

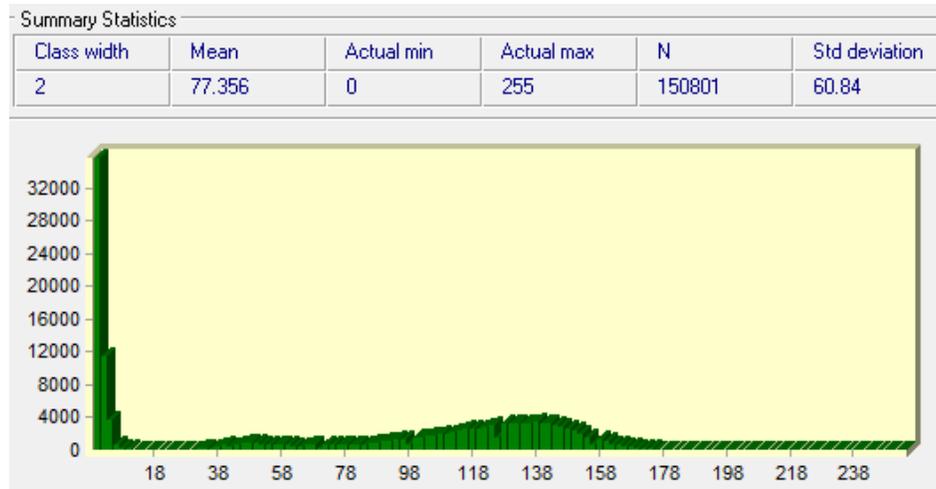


Figura 36. Histograma corregido correspondiente a la Banda 5.

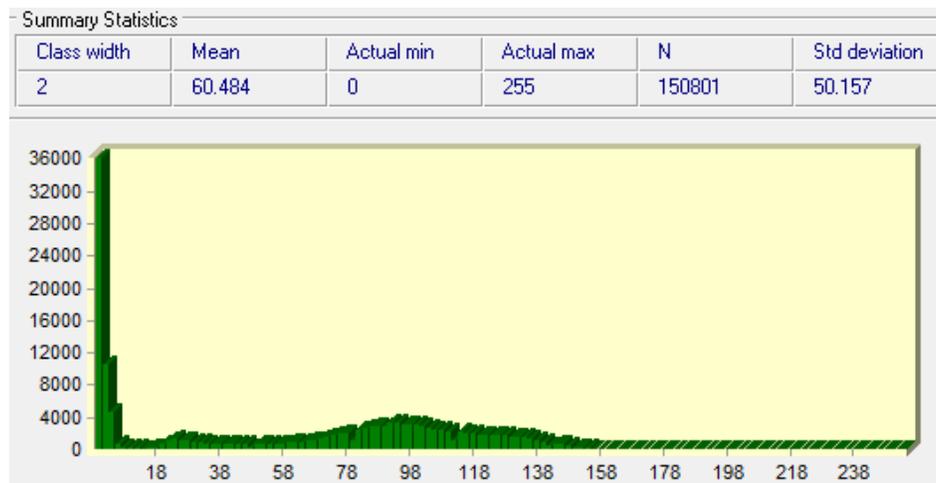


Figura 37. Histograma corregido correspondiente a la Banda 7.

En el capítulo tres se hizo mención que al recorrer el histograma hacia la izquierda modifica los valores de Nivel Digital de toda la imagen, aspecto importante que se debe considerar en estudios

multitemporales. Con las imágenes producto de esta corrección atmosférica se realizaron dos distintas composiciones para poder identificar diferentes elementos que componen al área de estudio (Figura 38 y Figura 39).



Figura 38. Composición color verdadero.



Figura 39. Composición Falso color infrarrojo.

La composición de color verdadero permite identificar la localidad de Villa Victoria localizada en la parte inferior del embalse, también se puede observar que parte del suelo se encuentra sin cobertura vegetal, lo que ocasiona que se erosione. En la composición falso color infrarrojo se observan las áreas en las que existe un poco de vegetación (color rojizo) y reafirma que gran parte del área que rodea al embalse se encuentra deforestada (color grisáceo).

El presente trabajo se enfoca específicamente al estudio del agua, por lo que la información correspondiente al suelo no es de interés, además dificulta el proceso de clasificación no supervisada y el procesamiento general de la imagen, por lo que se procedió a eliminar toda aquella información que no correspondiera al embalse, haciendo uso de una técnica de enmascaramiento. Se definió la frontera entre el embalse y el suelo mediante la aplicación del

filtro Sobel a la imagen correspondiente a la banda 4 ya que en ésta queda bien delimitada la frontera (Figura 40).

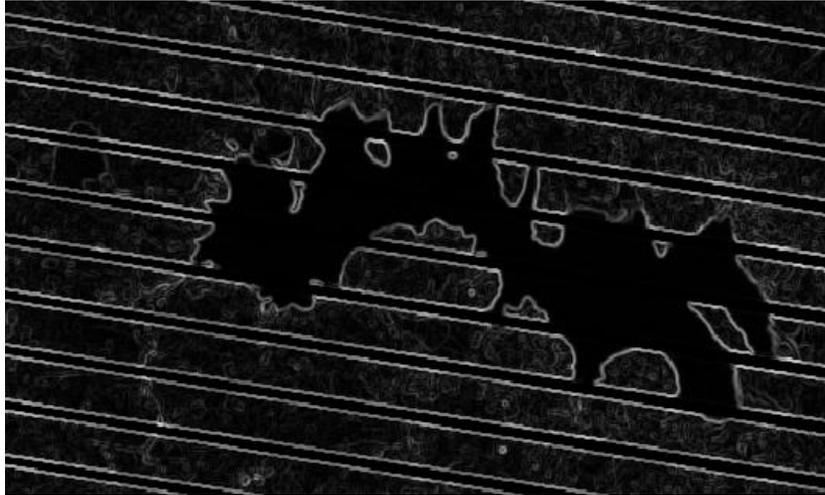


Figura 40. Aplicación del filtro Sobel.

Posteriormente se realizó una reclasificación de los ND con la finalidad de eliminar los bordes tenues y resaltar los bordes del embalse. Los ND comprendidos en el intervalo de 187 a 255 tomaron el valor de 0, el resto de los ND se les asignó el valor de 1. El resultado de esta operación se muestra en la Figura 41, en donde se puede ver que la frontera entre el embalse y el suelo queda perfectamente delimitada.

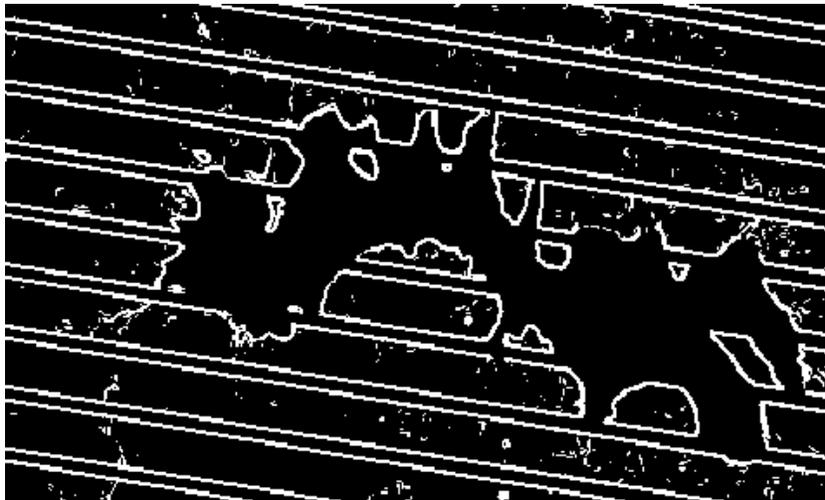


Figura 41. Discretización de los bordes del embalse.

El siguiente paso fue la creación de los polígonos de enmascaramiento correspondiente al embalse y la isla localizada en la parte superior del mismo (Figura 42), éstos se encontraban en formato Vector por lo que fue necesario convertirlos a formato a Raster para poder hacer operaciones entre ellas, que permitiera obtener una máscara que correspondiera únicamente al agua (Figura 43).

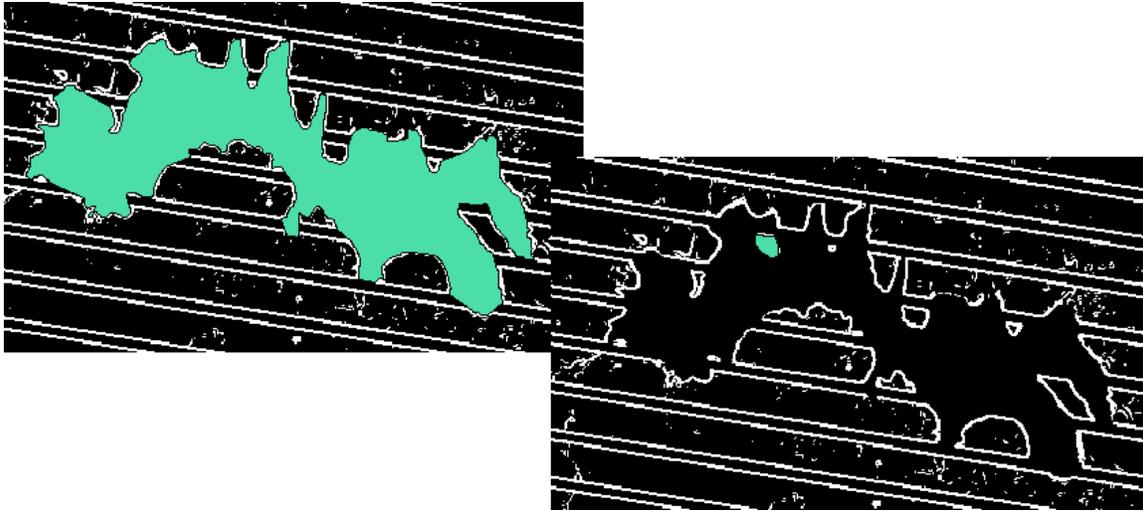


Figura 42. Máscaras del embalse en formato Vector.

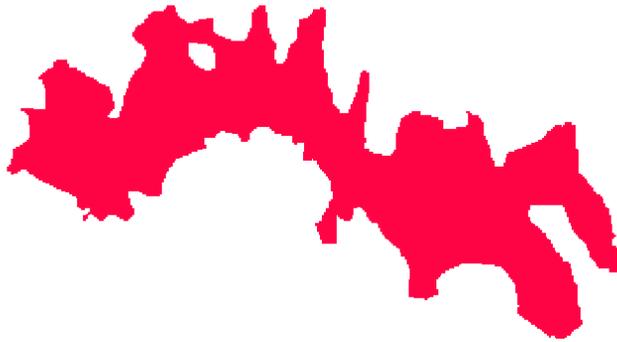


Figura 43. Polígono de Enmascaramiento (Vaso de la presa Villa Victoria).

Dicho polígono tiene un formato Raster, el cual asigna el valor de 1 a la parte correspondiente al agua del embalse y el valor de 0 a lo que lo rodea. Al multiplicar el polígono de enmascaramiento con cada una de las seis bandas se obtiene como producto imágenes que únicamente tienen información del embalse (Figura 44), es importante recalcar que esta operación no modifica el valor de los ND del agua.



Figura 44. Embalse de la presa Villa Victoria.

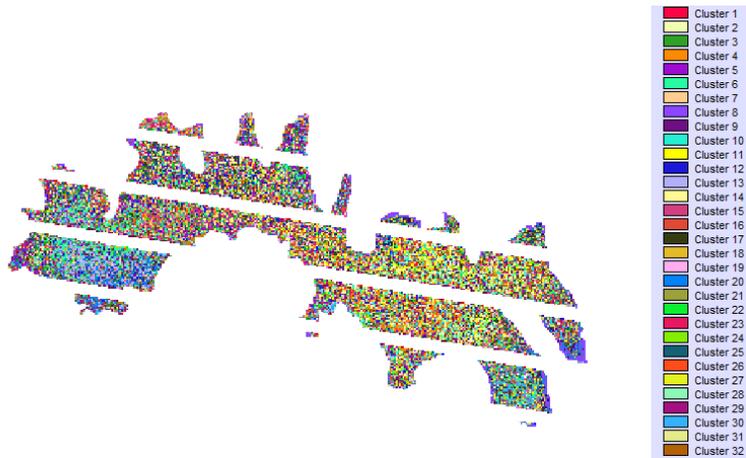


Figura 45. Clasificación Fina reteniendo todos los clústeres.

Una vez que se eliminó la información innecesaria, se realizó una clasificación fina con todas las bandas, reteniendo todas las clases para saber cómo están distribuidos. Resultaron 252 clases (Figura 45), la cual es una cantidad muy grande que dificulta el establecimiento de los puntos de muestreo.

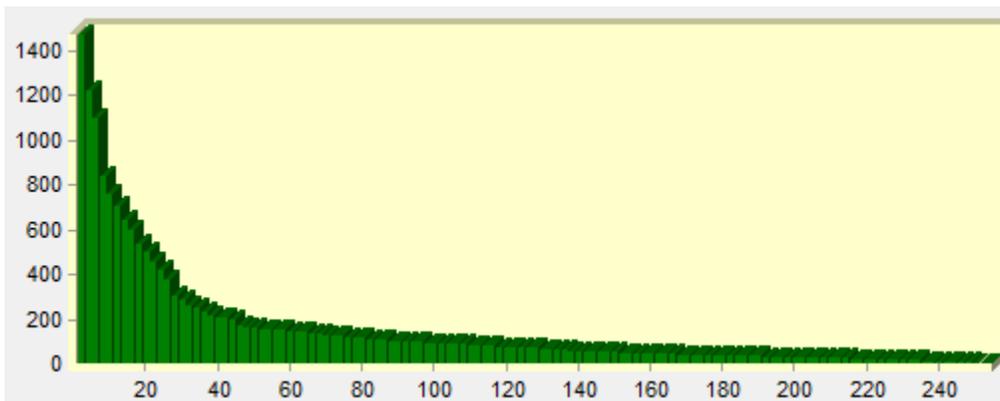


Figura 46. Histograma de la clasificación fina.

Se hizo un análisis del histograma de la clasificación fina, donde se observó que existe una gran diferencia entre las primeras tres clases y a la vez de éstas con las demás, ya que es en estas tres clases es donde se agrupa el mayor número de píxeles. Otros dos puntos donde se observaron variaciones fueron entre las clases 8 y 9, y entre las clases 14 y 15. Cabe aclarar que si se hace una clasificación tomando sólo las tres primeras clases no sería de utilidad, debido al escaso número de clústeres que generarían, presentando el embalse una nula variación, por lo que se optó por hacer una clasificación gruesa y fina, con 8 y 15 familias cada una (Figura 47 a Figura 50).

La clasificación gruesa y fina es una función del programa Idrisi. La clasificación gruesa consiste en la agrupación de los ND a partir de un análisis del histograma, en el cual sólo toma en cuenta las variaciones en los picos que sean significativas para la formación de los clústeres mientras que una clasificación fina sí detecta esta variación en los picos del histograma, dando como resultado un mayor número de familias que el de la clasificación gruesa.

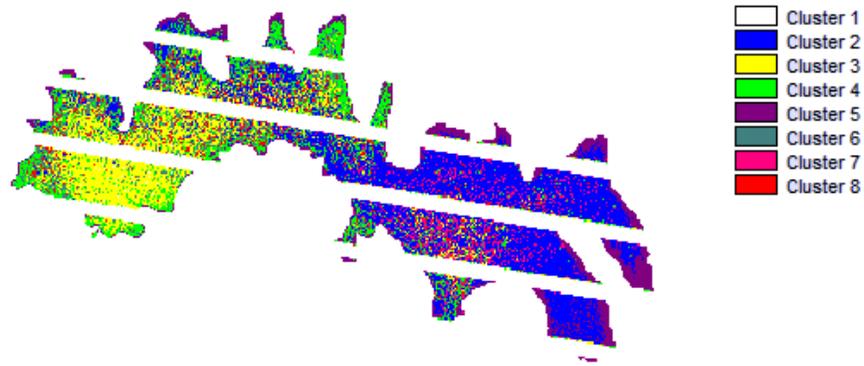


Figura 47. Clasificación fina (Ocho familias)

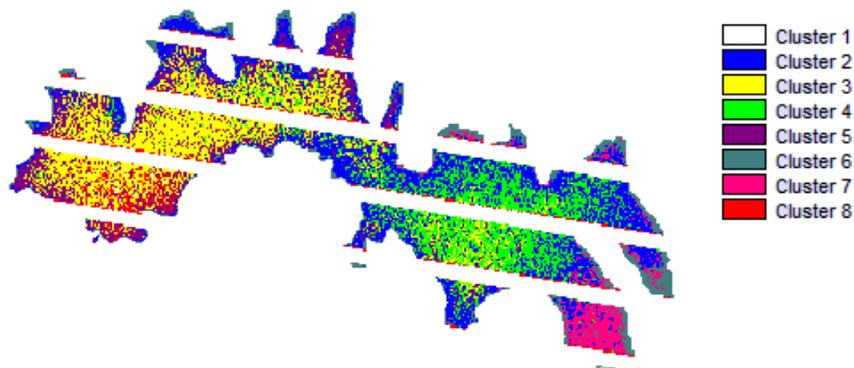


Figura 48. Clasificación gruesa (Ocho familias)

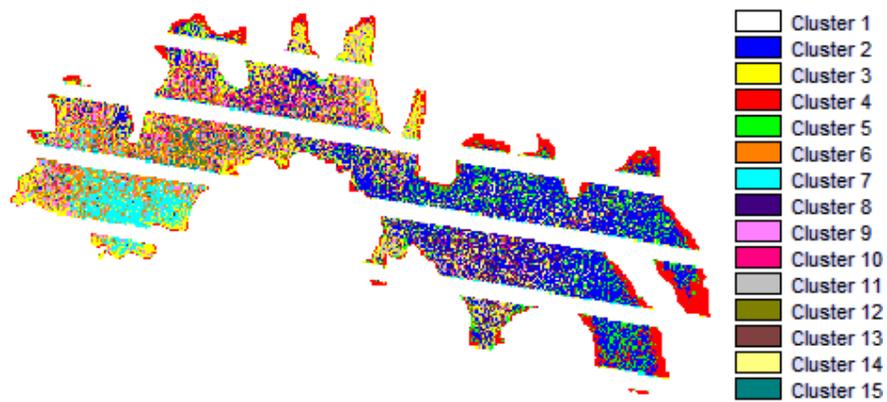


Figura 49. Clasificación fina (Quince familias)

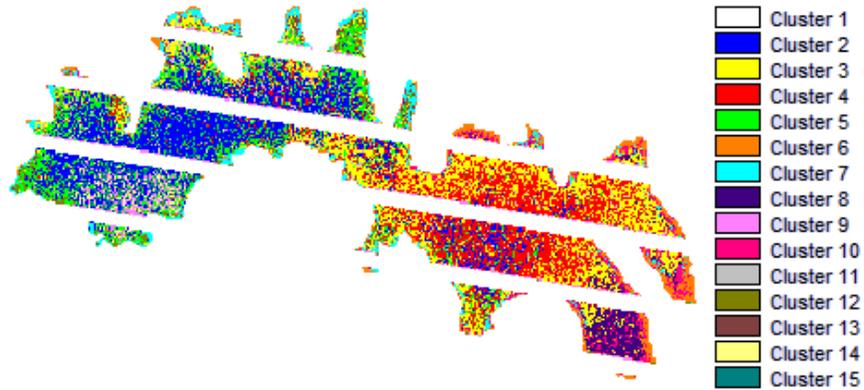


Figura 50. Clasificación gruesa (Quince familias).

Finalmente, se procedió a determinar los puntos de muestreo con ayuda de la información obtenida por la clasificación fina. Se propusieron 47 puntos con el objetivo de cubrir todo el embalse y tener las muestras necesarias para la generación de los modelos. En la Figura 51 se muestra la ubicación de los puntos de muestreo.

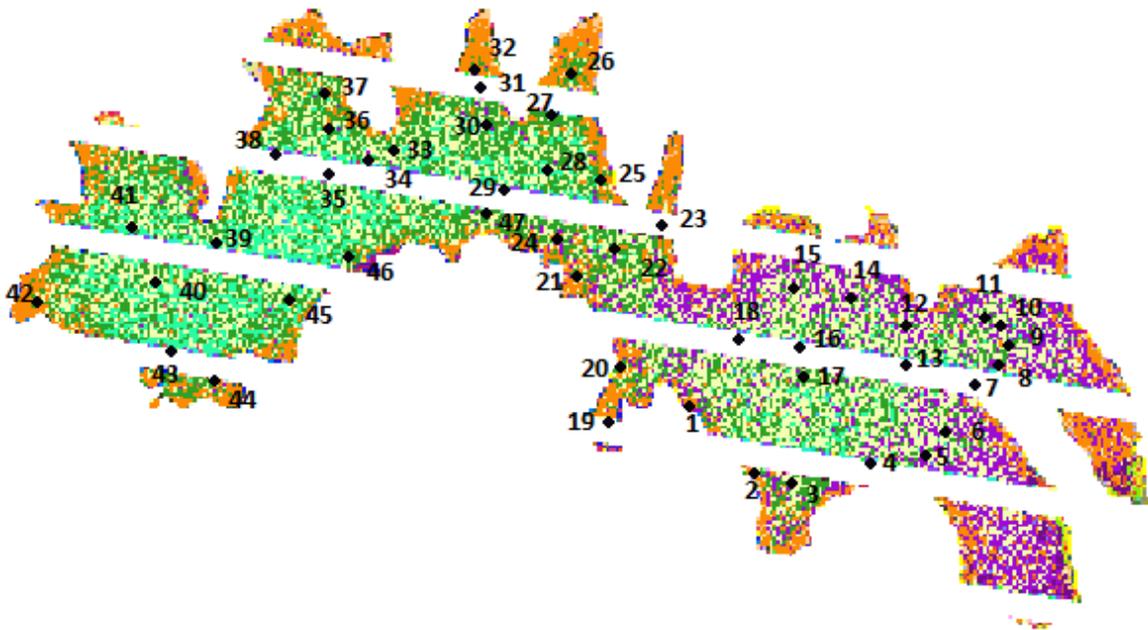


Figura 51. Localización de los puntos de muestreo.

En la Tabla 6 se indican las coordenadas de los 47 puntos de muestreo, además se marca con color gris aquellas estaciones en donde se determinaron parámetros extra (Coliformes, DBO, Fosfatos, Nitratos y Nitrógeno Amoniacal).

Tabla 6. Coordenadas de las Estaciones de muestreo.

Estación de muestreo	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
1	19°27'17.2"N	99°59'46.8"O
2	19°26'57.4"N	99°59'26.2"O
3	19°26'55.3"N	99°59'14.5"O
4	19°27'00.6"N	99°58'49.3"O
5	19°27'02.5"N	99°58'32.6"O
6	19°27'10.3"N	99°58'25.9"O
7	19°27'24.4"N	99°58'17.0"O
8	19°27'30.1"N	99°58'09.8"O
9	19°27'36.0"N	99°58'06.6"O
10	19°27'41.6"N	99°58'09.1"O
11	19°27'44.0"N	99°58'14.0"O
12	19°27'41.7"N	99°58'38.7"O
13	19°27'30.1"N	99°58'38.6"O
14	19°27'49.3"N	99°58'56.5"O
15	19°27'52.8"N	99°59'13.5"O
16	19°27'35.4"N	99°59'11.8"O
17	19°27'26.0"N	99°59'10.7"O
18	19°27'37.5"N	99°59'31.0"O
19	19°27'12.6"N	100°00'12.1"O
20	19°27'28.9"N	100°00'08.4"O
21	19°27'56.1"N	100°00'21.2"O
22	19°28'03.5"N	100°00'10.3"O
23	19°28'11.1"N	99°59'55.3"O
24	19°28'06.4"N	100°00'28.0"O
25	19°28'24.7"N	100°00'14.6"O
26	19°28'56.9"N	100°00'24.3"O
27	19°28'43.9"N	100°00'29.7"O
28	19°28'27.6"N	100°00'30.9"O
29	19°28'21.3"N	100°00'45.2"O
30	19°28'40.3"N	100°00'50.5"O
31	19°28'52.0"N	100°00'52.4"O
32	19°28'57.0"N	100°00'54.6"O
33	19°28'32.6"N	100°01'19.8"O
34	19°28'30.2"N	100°01'27.6"O
35	19°28'26.1"N	100°01'39.9"O
36	19°28'39.2"N	100°01'40.4"O
37	19°28'50.0"N	100°01'41.6"O
38	19°28'31.8"N	100°01'56.8"O
39	19°28'04.7"N	100°02'15.1"O
40	19°27'53.1"N	100°02'33.9"O
41	19°28'10.1"N	100°02'41.6"O
42	19°27'47.0"N	100°03'11.4"O
43	19°27'32.6"N	100°02'29.3"O
44	19°27'23.9"N	100°02'15.8"O
45	19°27'48.5"N	100°01'52.3"O
46	19°28'01.3"N	100°01'33.7"O
47	19°28'13.9"N	100°00'51.0"O

4.4.2. ANÁLISIS DIGITAL

El empleo de la clasificación no supervisada permite visualizar zonas dentro del embalse con distinta calidad, por ejemplo: analizando la imagen resultante de la clasificación gruesa con 15 familias (Figura 52), se observa que en la zona cercana a la cortina predomina una familia en particular (color azul), con lo que se podría suponer que la calidad del agua en esa área tiende a ser homogénea, mientras que en la zona Este está conformada por un mayor número de familias tendiendo a ser heterogénea su calidad. También se observa en la periferia de la frontera del embalse dos familias principalmente (color verde y naranja), que se puede deber a la interacción del suelo ya que por lo general son zonas de baja profundidad.

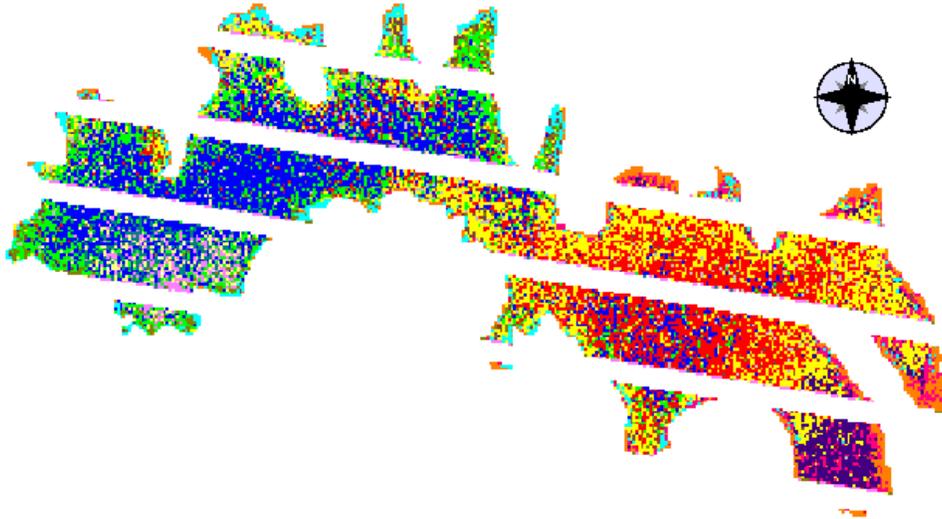


Figura 52. Clasificación fina con 15 familias

Esta variación de la calidad del agua detectada por los sensores, es lo que permitió establecer los puntos de muestreo, se trató de cubrir todo el embalse y ubicar a cada uno de ellos en las diferentes familias con la finalidad de contar con muestras de diferentes características que permitieran la generación de los modelos.

4.5. CAMPAÑAS DE MUESTREO

Las campañas de muestreo fueron planeadas para realizarse una en temporada de estiaje y la otra en temporada de lluvia (14 de abril y 17 de junio respectivamente), con el objetivo de contar con las dos temporadas predominantes en el año, pero unos días antes de llevar a cabo el muestreo programado para el 17 de junio entró un huracán a costas mexicanas, ocasionando que las imágenes adquiridas por el satélite presentaran un alto porcentaje de nubosidad e imposibilitaran la extracción de datos. Las muestras tomadas en esta fecha no fueron desechadas, ya que fueron empleadas en otros dos estudios enfocados en hacer un diagnóstico de la calidad del agua.

La campaña del 14 de abril estaba constituida por 47 puntos de muestreo distribuidos a lo largo del embalse, de los cuales se perdieron 15 a causa del bandeo de las imágenes del satélite Landsat 7 (Figura 53). Los puntos que se vieron afectados por el bandeo corresponden a las estaciones de muestreo: 4, 7, 16, 18, 19, 23, 29, 31, 32, 34, 35, 38, 39 y 43, señalados de color rojo en la Figura 53.



Figura 53. Muestreo correspondiente a la campaña del 14 de abril.

En cada una de las estaciones de muestro se determinaron en campo los siguientes parámetros de calidad del agua: temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, pH, sólidos disueltos totales, salinidad, presión atmosférica, turbiedad y sólidos suspendidos totales. En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos de estas mediciones, remarcando con un color gris las estaciones de muestreo en las que se hicieron pruebas adicionales y de color amarillo las estaciones que se vieron afectadas por el bandeo de las imágenes.

Tabla 7. Parámetros de calidad medidos en campo.

Est.	Coordenadas	Temp (°c)	pH	OD %	OD ppm	µS/cm	µS/cm A	MOhm·cm	TDS (mg/l)	Salinidad	P (mbar)	Turb (NTU)	SST (mg/l)
1	19°27'17"N-99°59'46"O	17.96	8.75	84.8	5.96	157	136	0.0064	78	0.07	757.3	6.45	14
2	19°26'57"N-99°59'26"O	17.79	8.67	81.4	5.76	151	130	0.0066	75	0.07	759.5	7.09	20
3	19°26'55"N-99°59'14"O	17.33	8.67	75.7	5.41	160	137	0.0062	80	0.08	759.9	9.42	12
4	19°27'00"N-99°58'49"O	18.58	9.03	84.7	5.91	162	143	0.0062	81	0.08	760.8	9.16	10
5	19°27'02"N-99°58'32"O	19.06	8.93	85.3	5.89	162	144	0.0062	81	0.08	761.4	7.57	10
6	19°27'10"N-99°58'25"O	18.83	8.88	84.1	5.84	161	142	0.0062	81	0.08	762.1	7.27	28
7	19°27'24"N-99°58'17"O	19.28	8.89	85.8	5.91	161	143	0.0062	80	0.08	762.6	6.77	18
8	19°27'30"N-99°58'09"O	19.46	8.99	88.5	6.08	159	142	0.0063	79	0.07	763.4	7.01	18
9	19°27'36"N-99°58'06"O	19.12	9.02	90.5	6.26	162	144	0.0062	81	0.08	763.9	6.87	6
10	19°27'41"N-99°58'09"O	19.60	8.99	87.8	6.02	164	147	0.0061	82	0.08	764.4	7.03	18
11	19°27'44"N-99°58'14"O	20.03	8.96	85.7	5.80	164	149	0.0061	82	0.08	761.6	6.77	32
12	19°27'41"N-99°58'38"O	19.96	9.04	89.5	6.07	160	144	0.0063	80	0.08	761.2	6.43	8
13	19°27'30"N-99°58'38"O	19.69	9.00	90.0	6.12	163	146	0.0061	81	0.08	760.3	6.64	10
14	19°27'49"N-99°58'56"O	19.74	9.15	93.4	6.34	158	143	0.0063	79	0.07	759.1	7.4	12
15	19°27'52"N-99°59'13"O	19.88	9.05	94.7	6.41	162	147	0.0062	81	0.08	758.6	7.13	8
16	19°27'35"N-99°59'11"O	19.91	9.01	93.7	6.34	162	147	0.0062	81	0.08	759.3	6.94	4
17	19°27'26"N-99°59'10"O	19.66	8.97	94.1	6.40	155	140	0.0064	78	0.07	758.7	7.09	8
18	19°27'37"N-99°59'31"O	20.18	9.08	94.6	6.36	162	147	0.0062	81	0.08	757.9	7.25	38
19	19°27'12"N-100°00'12"O	19.69	8.96	100.9	6.82	155	139	0.0065	77	0.07	755.1	7.35	16
20	19°27'28"N-100°00'08"O	19.98	9.41	101.1	6.80	161	146	0.0062	81	0.08	756.4	7.6	16
21	19°27'56"N-100°00'21"O	19.33	8.97	99.3	6.78	162	145	0.0062	81	0.08	756.6	8.37	16
22	19°28'03"N-100°00'10"O	20.24	8.97	101.0	6.77	162	147	0.0062	81	0.08	757.3	6.95	8
23	19°28'11"N-99°59'55"O	19.97	8.93	103.2	6.96	162	147	0.0062	81	0.08	757.3	6.09	4
24	19°28'06"N-100°00'28"O	19.45	8.93	101.7	6.89	162	145	0.0062	81	0.08	753.4	6.05	4
25	19°28'24"N-100°00'14"O	19.39	8.93	105.6	7.15	161	144	0.0062	80	0.08	751.5	5.1	16
26	19°28'56"N-100°00'24"O	18.97	8.84	105.5	7.19	160	142	0.0062	80	0.08	750.1	7.43	16
27	19°28'43"N-100°00'29"O	18.56	8.83	102.3	7.04	161	141	0.0062	80	0.08	751.4	5.64	14
28	19°28'27"N-100°00'30"O	18.91	8.95	105.3	7.20	160	142	0.0062	80	0.08	751.5	5.23	10
29	19°28'21"N-100°00'45"O	18.93	8.73	100.8	6.89	161	143	0.0062	81	0.08	751.7	5.35	14
30	19°28'40"N-100°00'50"O	18.68	8.87	107.1	7.36	162	143	0.0062	81	0.08	751.9	5.31	4
31	19°28'52"N-100°00'52"O	18.63	8.85	104.7	7.20	161	141	0.0062	80	0.08	751.5	5.8	4
32	19°28'57"N-100°00'54"O	18.66	8.79	104.3	7.17	160	141	0.0063	80	0.08	751.5	7.2	8
33	19°28'32"N-100°01'19"O	18.67	8.73	102.6	7.04	154	135	0.0065	77	0.07	751.3	5.51	8
34	19°28'30"N-100°01'27"O	18.33	8.78	101.9	7.05	152	132	0.0066	76	0.07	751.3	5.82	2
35	19°28'26"N-100°01'39"O	18.24	8.75	101.3	7.02	146	127	0.0069	73	0.07	751.5	5.48	8
36	19°28'39"N-100°01'40"O	17.98	8.69	99.6	6.94	153	133	0.0065	77	0.07	751.5	5.86	16
37	19°28'50"N-100°01'41"O	18.39	8.82	105.5	7.29	156	137	0.0064	78	0.07	751.8	5.89	8
38	19°28'31"N-100°01'56"O	17.63	8.59	94.1	6.61	153	132	0.0065	77	0.07	751.7	5.82	6
39	19°28'04"N-100°02'15"O	18.24	8.67	101.0	7.00	161	140	0.0062	81	0.08	751.5	5.55	2
40	19°27'53"N-100°02'33"O	17.53	8.68	100.9	7.11	157	135	0.0064	79	0.07	752	6.09	6
41	19°28'10"N-100°02'41"O	17.46	8.49	98.4	6.94	159	136	0.0063	80	0.08	752.5	6.11	14
42	19°27'47"N-100°03'11"O	16.84	8.29	91.1	6.51	156	132	0.0064	78	0.07	751.9	6.19	20
43	19°27'32"N-100°02'29"O	17.09	8.54	95.2	6.76	154	131	0.0065	77	0.07	750.8	5.5	14
44	19°27'23"N-100°02'15"O	18.76	8.77	102.2	7.00	152	134	0.0066	76	0.07	750.7	4.73	2
45	19°27'48"N-100°01'52"O	17.55	8.41	96.3	6.76	159	136	0.0063	79	0.07	749.5	5.55	6
46	19°28'01"N-100°01'33"O	17.88	8.60	99.7	6.94	154	133	0.0065	77	0.07	748.9	5.49	10
47	19°28'13"N-100°00'51"O	17.86	8.69	95.1	6.62	160	138	0.0063	80	0.08	748.1	6.36	10

Las pruebas adicionales realizadas a los puntos cercanos a descargas municipales, a la cortina del embalse y a ríos que llegan al mismo, consistieron en la determinación de DBO, Coliformes Totales y Fecales, Nitrógeno Amoniacal, Nitratos y Fosfatos. Los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros físico-químicos.

Estación	Parámetros químicos				Parámetros Microbiológicos	
	Fosfatos mg/l	Nitratos mg/l	Nitrógeno amoniacal mg/l	DBO ₅ mg/L	Coliformes totales UFC/ml	Coliformes fecales UFC/ml
1	0.02	2.4	0.07	23	Incontable	Incontable
10	0.03	2.2	0.05	21	Incontable	Incontable
15	0.02	2.3	0.01	26	Incontable	Incontable
19	0.07	2.7	0	22	Incontable	Incontable
26	0.08	2	0.15	32	Incontable	Incontable
41	0.12	1.3	0	16	Incontable	Incontable
42	0.14	1.7	0.03	20	Incontable	Incontable

Una manera más fácil de interpretar los datos anteriores es mediante la creación de gráficas con isolíneas de concentración que permitan extraer de manera visual la información que se pretende mostrar. Para lo cual se empleó el programa Surfer 8 que realiza distintas interpolaciones a partir de la lectura de los datos ingresados por el usuario y con estos genera las curvas de concentración correspondientes a los distintos parámetros. Los mapas obtenidos se muestran de la Figura 54 a Figura 58.

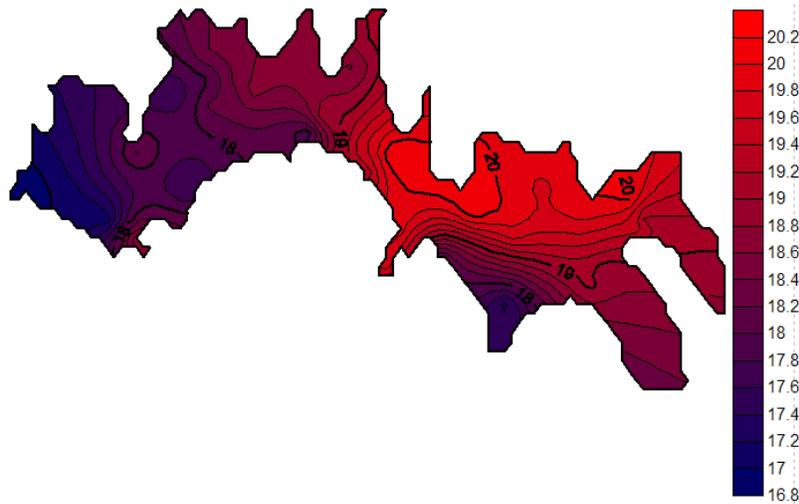


Figura 54. Distribución espacial de la temperatura.

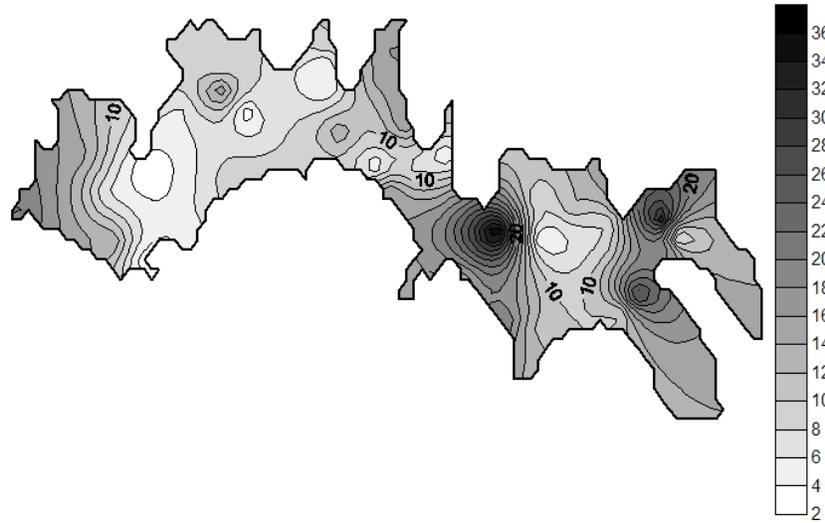


Figura 55. Distribución de los sólidos suspendidos totales.



Figura 56. Distribución espacial del pH.



Figura 57. Distribución espacial del oxígeno disuelto.



Figura 58. Distribución espacial de la conductividad.

La generación de estos mapas de distribución de la calidad del agua, permite visualizar la variación de la calidad de un punto a otro y ubicar zonas que son de interés, por ejemplo: el mapa correspondiente a la temperatura muestra que la zona cercana a la cortina es la que presenta la temperatura más baja, esto debido a que es el punto que tiene la mayor profundidad del embalse, en lo que respecta a los mapas de sólidos suspendidos totales y pH, los puntos críticos se presentan cerca del embarcadero y en cuanto a la distribución de oxígeno disuelto se observa que cerca de la cortina el agua tiene mejor calidad.

4.6. VARIACIÓN DE CALIDAD MEDIANTE DETECCIÓN DE BORDES

Para poder hacer una comparación de las condiciones que presenta el embalse en las dos épocas predominantes (estiaje y temporada de lluvias), se decidió buscar una imagen que fuera de la temporada de lluvias y que presentara poca nubosidad. La imagen correspondió a la de la fecha del 1 de junio de 2012, con un porcentaje de nubosidad del 5%. Las imágenes correspondientes a esta fecha no intervendrán en la generación de los modelos de calidad del agua debido a la diferencia en días de la fecha de muestreo y el de la adquisición de las imágenes es mayor a ± 1 día.

En la Figura 59 se muestran dos composiciones de color verdadero una de la época de estiaje y la otra de la temporada de lluvias. Como primer punto se observa que el color del agua del embalse presenta una tonalidad diferente, esto se puede deber a que en temporada de lluvias se tiene un mayor arrastre de partículas lo cual hace que la respuesta espectral del agua cambie. Otro aspecto importante que hace que la reflectancia detectada por los sensores cambie de una época a otra es la interferencia atmosférica. A simple vista el área que ocupa el agua del embalse parece ser similar en las dos temporadas. También se observa un mayor número de áreas verdes en la temporada de lluvias.



Figura 59. Composición a color verdadero. a) Estiaje, b) lluvia.

La variación de la calidad mediante la detección de bordes consiste en la aplicación del filtro Sobel a una imagen con la finalidad de resaltar las fronteras que indican una variación en la calidad del agua.

En el Capítulo 2 se explicó el funcionamiento del filtro Sobel, el cual opera aplicando las siguientes expresiones:

$$k_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad k_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

$$R = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

Donde:

k_x y k_y son los operadores Sobel

S_x y S_y son las imágenes resultantes de aplicar los operadores

R es la imagen resultante

En la Figura 60 se despliegan las imágenes después de haber aplicado el filtro Sobel, se observa que en la temporada de estiaje presenta una mayor variabilidad en la calidad del agua, esto se puede deber al efecto de dilución sobre los contaminantes en época de lluvia, además se observa que en las dos temporadas se presenta una mayor variabilidad de la calidad del agua en lo que corresponde a la zona Este del embalse

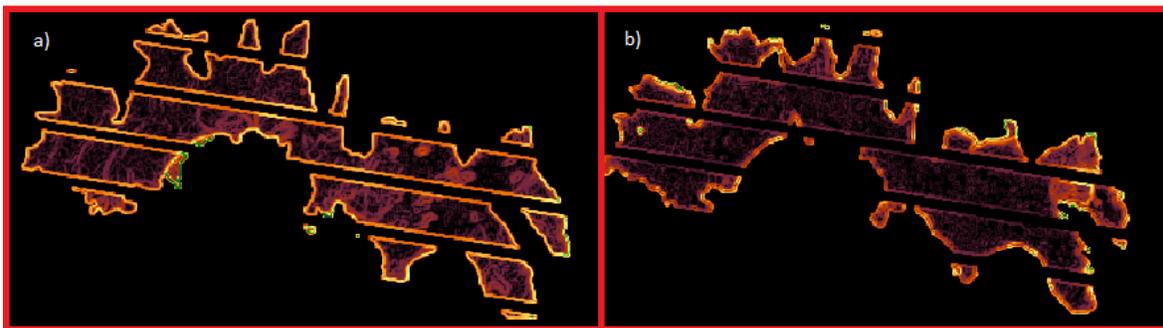


Figura 60. Variación de la calidad aplicando el filtro Sobel. a) temporada de estiaje y b) temporada de lluvias.

4.7. COMPARACIÓN MEDIANTE CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

La comparación mediante clasificación no supervisada, se lleva a cabo mediante la agrupación de los Niveles Digitales en clústeres, para que de esta manera se pueda observar la variación que existe en el embalse en las dos temporadas predominantes.

Para realizar una comparación mediante clasificación no supervisada, es necesario hacer una corrección atmosférica que permita poder comparar la información presente en imágenes correspondientes a diferentes fechas. La corrección atmosférica se basa en la identificación de los Niveles Digitales que no sean significativos para cada banda, para que posteriormente éstos sean extraídos logrando de esta manera eliminar parte de la interferencia producida por las partículas presentes en la atmósfera. La identificación de los ND que no son significativos se realiza mediante el análisis de los histogramas. En la Tabla 9 se muestran los valores de los ND que no son significativos para las imágenes correspondientes a las fechas 14 de abril y 1 de junio.

Tabla 9. ND mínimos correspondientes a las dos temporadas

Banda	ND mínimo (14 de abril)	ND mínimo (1 de junio)
1	68	64
2	53	43
3	44	39
4	16	14
5	14	12
7	11	10

La clasificación no supervisada permite conocer cómo están agrupados los ND a lo largo del embalse e identificar la variación de la calidad del agua, con la finalidad de que esta clasificación no sea afectada con información innecesaria (suelo). Es necesario acotar el área de trabajo haciendo uso de la técnica de enmascaramiento y así eliminar todo lo que no es de utilidad.

Una vez hecha la corrección atmosférica y delimitada el área de estudio (embalse), se realizó una clasificación no supervisada gruesa y que retuviera todos los clústeres con la finalidad de realizar posteriormente un análisis de los histogramas generados e identificar cuáles son las familias significativas. En la Figura 61 y Figura 62 se muestra el resultado de la clasificación gruesa.

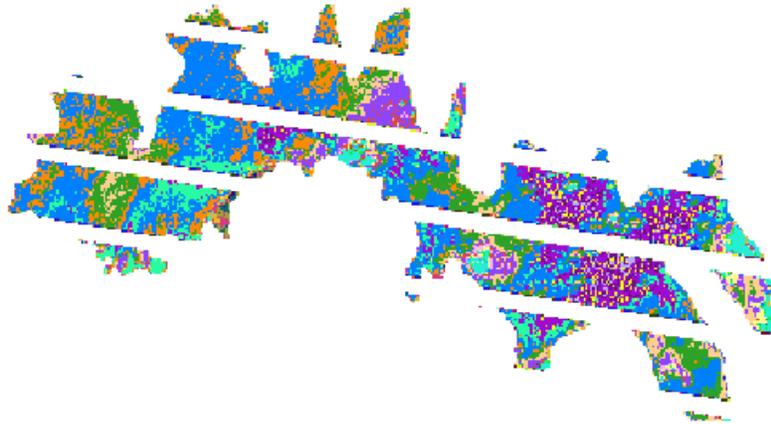


Figura 61. Clasificación fina reteniendo todos los clústeres (14 de abril)

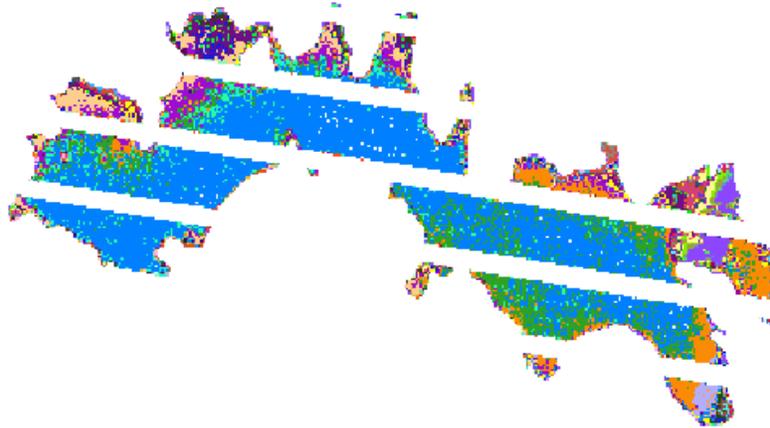


Figura 62. Clasificación fina reteniendo todos los clústeres (1 de junio)

El resultado de aplicar una clasificación no supervisada arrojó para la imagen del 14 de abril, 114 familias; mientras que para la imagen del 1 de junio se tuvieron 255 familias. Debido al gran número de familias formadas, se analizó el histograma de cada una de ellas (Figura 63 y Figura 64). El histograma correspondiente a la imagen de abril muestra que la última familia significativa es la correspondiente a la clase 10, mientras que para la imagen de junio la última clase significativa es la 14.

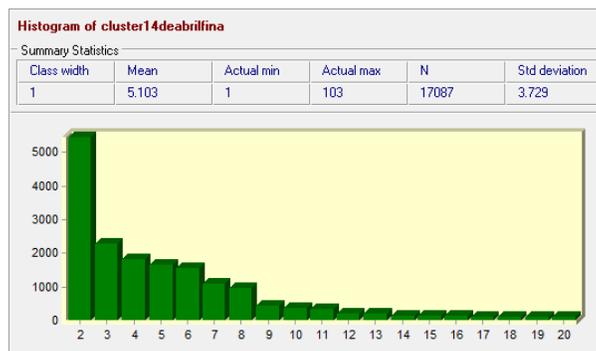


Figura 63.- Histograma de la clasificación fina (14 de abril)

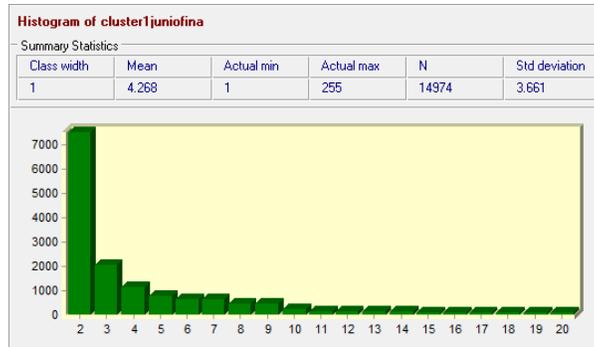


Figura 64. Histograma de la clasificación fina (1 de junio)

La información obtenida mediante el análisis del histograma fue utilizada para volver a hacer una clasificación fina, pero esta vez con la restringiendo el número de familias. En la Figura 65 se muestra una clasificación con 10 familias y en la Figura 66 con 14 familias.

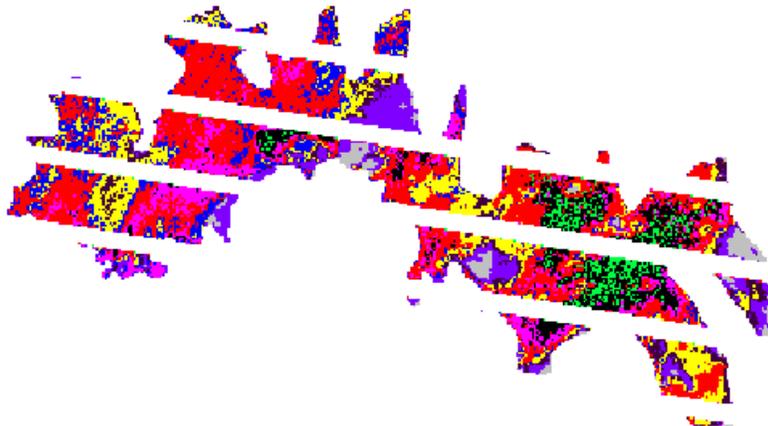


Figura 65. Clasificación fina con 10 familias (14 de abril)

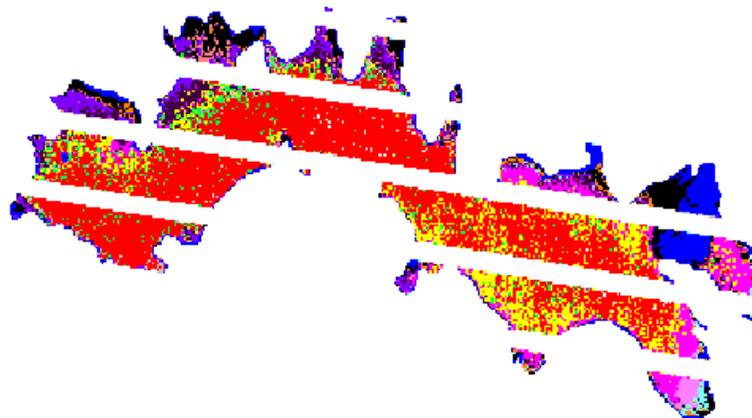


Figura 66. Clasificación fina con 14 familias (1 de junio)

La generación de estas dos últimas imágenes permite verificar los resultados obtenidos mediante la detección de bordes, al ver que en temporada de lluvias se tiene una mayor homogeneidad en la calidad del agua del embalse.

4.8. GENERACIÓN DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

Los parámetros de calidad del agua sujetos a ser evaluados mediante percepción remota para este trabajo son los siguientes:

- Sólidos Disueltos Totales (SDT)
- Índice de Estado Trófico (IET o TSI por sus siglas en inglés)
- Turbiedad

Para el caso del Índice de Estado Trófico se obtuvieron dos modelos, el primero a partir de las lecturas tomadas del Disco Secchi y el segundo de la clorofila A, ambas haciendo una correlación con la reflectancia detectada por el sensor.

La obtención del IET para este estudio se basa en las investigaciones realizadas por Carlson (Carlson, 1977), en las cuales establece las dificultades que se tiene al determinar este índice de manera tradicional al depender de un gran número de parámetros, como: la concentración de nutrientes, la carga de nutrientes, productividad, fauna y flora e incluso la morfología del lago, y al no estar homogeneizados los rangos de la clasificación entre estos parámetros en ocasiones, dan como resultado un IET diferente para un mismo cuerpo de agua. Por lo que Carlson ve la necesidad de crear una nueva escala del IET que dependa de menos parámetros. Estudios realizados por diferentes investigadores muestran que existe una relación directa entre este índice y los siguientes parámetros: Biomasa de algas, carga de nutrientes o concentración de nutrientes, permitiendo crear una nueva clasificación. Basado en esta hipótesis, Carlson se enfoca en construir un nuevo índice a partir de la biomasa de las algas, medida de manera indirecta con la profundidad del Disco Secchi.

La medida de la biomasa de algas a través de la profundidad del Disco de Secchi, se basa en la relación de la penetración de la luz y el crecimiento de estos organismos. Con esta relación el autor estableció que el 0 de la nueva escala debería establecerse cuando el disco de Secchi se encuentra a una profundidad de 64m, siendo ésta la medida más grande reportada en la literatura y de 100 cuando el Disco estuviera a una profundidad de 6.4cm. La relación resultante para medir el IET a partir de la Profundidad del Disco Secchi se muestra en la Ecuación 11.

$$IET(PDS) = 10 \left(6 - \frac{\ln PDS}{\ln 2} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Haciendo uso de la Ecuación 11 se obtuvieron los Índices de Estado Trófico para todos los puntos del muestreo realizado el 14 de abril, los cuales tuvieron un comportamiento similar a lo largo de todo el embalse. En la Tabla 10 se muestra los resultados obtenidos y se sombrea de color gris los puntos que se perdieron por efecto del bandeo.

Tabla 10. Índice de Estado Tráfico (Campaña del 14 de abril)

Estación de muestreos	Latitud	Longitud	PDS	IET
1	19°11'11.1"N	100°08'01.8"O	0.66	65.99
2	19°11'01.1"N	100°08'08.0"O	0.55	68.62
3	19°10'40.3"N	100°07'53.0"O	0.49	70.29
4	19°10'41.4"N	100°08'15.1"O	0.49	70.29
5	19°10'33.2"N	100°08'44.3"O	0.62	66.90
6	19°10'19.2"N	100°08'32.4"O	0.56	68.37
7	19°10'35.5"N	100°08'47.0"O	0.51	69.71
8	19°10'48.7"N	100°08'42.0"O	0.58	67.86
9	19°10'58.8"N	100°08'37.1"O	0.58	67.86
10	19°11'01.0"N	100°08'47.2"O	0.47	70.89
11	19°11'02.7"N	100°08'59.6"O	0.63	66.67
12	19°10'50.3"N	100°09'24.9"O	0.66	65.99
13	19°10'57.0"N	100°09'45.1"O	0.67	65.78
14	19°11'07.1"N	100°09'32.8"O	0.56	68.37
15	19°11'10.3"N	100°09'20.8"O	0.6	67.37
16	19°11'15.2"N	100°09'12.1"O	0.65	66.21
17	19°11'21.4"N	100°09'01.9"O	0.66	65.99
18	19°11'21.7"N	100°08'54.5"O	0.62	66.90
19	19°11'27.5"N	100°08'35.6"O	0.62	66.90
20	19°11'35.3"N	100°08'23.2"O	0.57	68.11
21	19°11'49.0"N	100°08'26.2"O	0.53	69.16
22	19°11'46.9"N	100°08'46.6"O	0.84	62.52
23	19°11'45.3"N	100°08'54.0"O	0.73	64.54
24	19°11'57.4"N	100°09'03.3"O	0.77	63.77
25	19°11'52.0"N	100°09'17.6"O	0.92	61.20
26	19°11'49.7"N	100°09'26.3"O	0.67	65.78
27	19°11'56.1"N	100°09'45.7"O	0.76	63.96
28	19°11'58.1"N	100°09'54.1"O	0.94	60.89
29	19°12'02.5"N	100°10'14.7"O	0.88	61.84
30	19°12'08.1"N	100°10'17.4"O	0.93	61.05
31	19°12'12.3"N	100°10'28.3"O	1.09	58.76
32	19°12'21.1"N	100°10'37.1"O	1.09	58.76
33	19°12'28.9"N	100°10'23.6"O	1.08	58.89
34	19°12'42.5"N	100°10'09.6"O	1.05	59.30
35	19°12'39.3"N	100°09'50.6"O	1.05	59.30
36	19°12'37.1"N	100°09'36.4"O	1.07	59.02
37	19°12'44.5"N	100°09'18.2"O	0.91	61.36
38	19°12'52.2"N	100°09'06.0"O	0.88	61.84
39	19°13'09.6"N	100°08'38.4"O	1.11	58.49
40	19°13'12.0"N	100°08'28.0"O	0.88	61.84
41	19°13'07.2"N	100°08'14.1"O	0.81	63.04
42	19°13'00.8"N	100°08'15.7"O	0.92	61.20
43	19°12'55.1"N	100°08'23.6"O	1.04	59.43
44	19°12'49.0"N	100°08'31.8"O	0.95	60.74
45	19°12'43.7"N	100°08'32.6"O	1.04	59.43
46	19°12'31.3"N	100°08'41.4"O	0.95	60.74
47	19°12'21.5"N	100°08'58.3"O	0.78	63.58

Para la obtención de los modelos de calidad del agua, como se mencionó con anterioridad se hizo uso de la metodología desarrollada en el proyecto “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota”. Esta metodología establece como primer paso la extracción de los Niveles Digitales correspondientes a los puntos de muestreo, posteriormente se convierten estos ND a unidades físicas de radiancia y reflectancia, para esto es necesario llevar a cabo una corrección radiométrica, finalmente se hace una regresión lineal por pasos atrasados que permite relacionar los valores de reflectancia con los valores de los diferentes parámetros obtenidos en el muestreo y así obtener los diferentes modelos de calidad del agua.

Se extrajeron los ND correspondientes a las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 correspondientes a las imágenes del 14 de abril adquiridas por el satélite Landsat 7. En la Tabla 11 se muestran los valores de los ND correspondientes a los 47 puntos de muestreo, se marca de color gris aquellos que se perdieron por el bandeo que presenta dicho satélite.

Tabla 11. Niveles Digitales correspondientes a la campaña del 14 de abril.

Muestra	Coordenada X	Coordenada Y	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
1	395420.07	2151451.71	76	59	50	20	17	17
2	396017.24	2150839.58	73	54	49	18	17	14
3	396358.04	2150773.06	72	56	46	17	15	13
4	397093.81	2150931.79	0	0	0	0	0	0
5	397581.11	2150987.43	76	57	50	18	16	15
6	397777.84	2151226.10	72	56	48	17	15	13
7	398039.80	2151658.07	0	0	0	0	0	0
8	398250.73	2151832.10	73	55	46	17	14	13
9	398345.06	2152012.95	72	57	48	17	15	13
10	398273.14	2152185.51	74	55	47	17	14	13
11	398130.68	2152260.09	74	57	48	17	14	13
12	397410.08	2152193.46	94	78	75	31	41	35
13	397410.97	2151836.86	0	0	0	0	0	0
14	396892.41	2152430.05	74	57	48	17	14	14
15	396397.35	2152540.48	74	57	47	17	15	13
16	396443.85	2152005.31	0	0	0	0	0	0
17	396474.26	2151716.17	74	57	46	17	14	15
18	395884.38	2152073.09	0	0	0	0	0	0
19	394681.51	2151314.60	0	0	0	0	0	0
20	394792.32	2151815.04	73	59	49	19	16	15
21	394423.98	2152653.37	75	58	48	18	19	13
22	394743.12	2152878.99	74	57	49	17	16	11
23	395181.84	2153110.08	0	0	0	0	0	0
24	394227.57	2152971.16	87	71	66	26	34	30
25	394621.56	2153531.43	88	70	66	28	35	31
26	394344.54	2154522.94	77	60	52	20	24	20
27	394184.77	2154124.23	80	64	57	23	27	23
28	394146.84	2153623.36	84	68	65	26	31	27
29	393728.77	2153432.14	0	0	0	0	0	0
30	393577.69	2154017.13	78	63	54	21	24	21
31	393524.42	2154377.13	0	0	0	0	0	0
32	393461.19	2154531.21	0	0	0	0	0	0
33	392722.03	2153785.49	79	61	53	20	22	18
34	392494.18	2153713.06	0	0	0	0	0	0
35	392134.81	2153589.17	0	0	0	0	0	0
36	392122.64	2153991.96	77	57	52	19	21	18
37	392089.64	2154324.17	77	60	53	20	22	19
38	391643.13	2153767.35	0	0	0	0	0	0
39	391104.55	2152937.48	0	0	0	0	0	0
40	390554.23	2152584.20	83	67	59	24	27	24
41	390332.89	2153108.16	78	61	54	20	22	20
42	389459.66	2152403.34	77	60	49	20	21	16
43	390684.54	2151953.19	0	0	0	0	0	0
44	391076.57	2151683.37	84	66	61	25	30	28
45	391766.34	2152435.47	75	59	47	18	20	16
46	392311.03	2152825.71	74	59	50	19	21	19
47	393558.32	2153205.66	72	57	47	18	17	17

La transformación de los Niveles Digitales a unidades físicas de reflectancia se hace con el fin de corregir errores radiométricos producidos por las variaciones debidas a los diferentes ángulos solares respecto al cenit y las variaciones de la radiación incidente asumiendo una superficie Lambertiana (Álvarez & Zarazaga, 2006). Los valores de cada ND se convierten a valores de reflectancia para cada banda haciendo uso de la Ecuación 12.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi d_s^2 (\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda} ND_{\lambda})}{E_{0\lambda} \cos \theta_i} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

ρ_{λ} es el valor de reflectancia para cada banda

d_s^2 es el factor de corrección de la distancia de la Tierra al Sol (en unidades astronómicas)

α_{λ} y β_{λ} son coeficientes de calibración de cada una de las bandas que dependen del sensor

$E_{0\lambda}$ es la irradiancia exoatmosférica Solar media [$W m^{-2} \mu m^{-1}$]

θ_i es el ángulo del cenit solar

Para el cálculo de d_s^2 , se empleó la Ecuación 13.

$$d_s^2 = \left[1 + 0.01674 \sin \left(\frac{2\pi(J - 93.5)}{365} \right) \right]^2 \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde J es el día juliano del año, por lo que varía de 1 a 365.

Para calcular $\cos \theta_i$, se empleó la Ecuación 14.

$$\cos \theta_i = \cos \phi_i \cos \delta_i \cos \omega_i + \sin \phi_i \sin \delta_i \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

ϕ_i es la latitud en decimales

ω_i es el ángulo horario obtenido a partir de la hora solar h y calculado como:

$$\omega_i = 15(h - 12) \quad \text{Ecuación 15}$$

δ_i es la declinación solar, calculado como:

$$\delta_i = 23.45 \sin \left[\frac{284 + J}{365} \right] \quad \text{Ecuación 16}$$

La radiancia espectral detectada por el sensor para cada una de sus bandas se puede obtener a partir de la expresión $\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda} ND_{\lambda}$. Los coeficientes de calibración α_{λ} y β_{λ} se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Rango espectral del sensor ETM+, ámbitos dinámicos de postcalibración e irradiancia solar exoatmoférica media.

Banda	Rango espectral (μm)	β_{λ} $\left(\frac{W}{m^2 sr \mu m} DN\right)$	α_{λ} $\left(\frac{W}{m^2 sr \mu m}\right)$	$ESUN_{\lambda}$ $\left(\frac{W}{m^2 \mu m}\right)$
1	0.452-0.514	0.778740	-6.98	1997
2	0.519-0.601	0.798819	-7.20	1812
3	0.631-0.692	0.621654	-5.62	1533
4	0.772-0.898	0.639764	-5.74	1039
5	1.547-1.748	0.126220	-1.13	230.8
7	2.065-2.346	0.043898	-0.39	84.90

Las imágenes fueron adquiridas por el satélite el 14 de abril de 2012 a las cinco de la tarde con 15 segundos, dato necesario para el cálculo del factor de corrección de la distancia así como el coseno del ángulo cenital. En la Tabla 13 se muestran los valores de estos factores así como los datos que se necesitaron para su cálculo.

Tabla 13. Factores para la obtención de la reflectancia.

Hora adquisición	17:00:15
Hora decimal	17.0040
Fecha	14/04/2012
Día Juliano año	105
Factor distancia	1.006595448
Declinación Solar $\delta =$	9.414893347
Latitud $\phi =$	19.468463
Hora h =	17.0040
Ángulo horario $\omega =$	75.06070833
cos AngCenital $\theta =$	0.294302012

Como se mencionó anteriormente la radiancia se puede calcular a partir de la expresión $\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda}ND_{\lambda}$, el valor de los coeficientes α_{λ} y β_{λ} depende de la banda con la que se está trabajando (Tabla 12). Y el ND corresponde a los Niveles Digitales mostrados en la Tabla 11. Los valores de radiancia se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores de la radiancia correspondiente a los puntos del muestreo de 14 de abril

Estación	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
1	52.2042	39.9303	25.4627	7.0553	1.0157	0.3563
2	49.8680	35.9362	24.8410	5.7758	1.0157	0.2246
3	49.0893	37.5339	22.9761	5.1360	0.7633	0.1807
5	52.2042	38.3327	25.4627	5.7758	0.8895	0.2685
6	49.0893	37.5339	24.2194	5.1360	0.7633	0.1807
8	49.8680	36.7350	22.9761	5.1360	0.6371	0.1807
9	49.0893	38.3327	24.2194	5.1360	0.7633	0.1807
10	50.6468	36.7350	23.5977	5.1360	0.6371	0.1807
11	50.6468	38.3327	24.2194	5.1360	0.6371	0.1807
12	66.2216	55.1079	41.0041	14.0927	4.0450	1.1464
14	50.6468	38.3327	24.2194	5.1360	0.6371	0.2246
15	50.6468	38.3327	23.5977	5.1360	0.7633	0.1807
17	50.6468	38.3327	22.9761	5.1360	0.6371	0.2685
20	49.8680	39.9303	24.8410	6.4155	0.8895	0.2685
21	51.4255	39.1315	24.2194	5.7758	1.2682	0.1807
22	50.6468	38.3327	24.8410	5.1360	0.8895	0.0929
24	60.7704	49.5161	35.4092	10.8939	3.1615	0.9269
25	61.5491	48.7173	35.4092	12.1734	3.2877	0.9708
26	52.9830	40.7291	26.7060	7.0553	1.8993	0.4880
27	55.3192	43.9244	29.8143	8.9746	2.2779	0.6197
28	58.4342	47.1197	34.7875	10.8939	2.7828	0.7952
30	53.7617	43.1256	27.9493	7.6950	1.8993	0.5319
33	54.5405	41.5280	27.3277	7.0553	1.6468	0.4002
36	52.9830	38.3327	26.7060	6.4155	1.5206	0.4002
37	52.9830	40.7291	27.3277	7.0553	1.6468	0.4441
40	57.6554	46.3209	31.0576	9.6143	2.2779	0.6636
41	53.7617	41.5280	27.9493	7.0553	1.6468	0.4880
42	52.9830	40.7291	24.8410	7.0553	1.5206	0.3124
44	58.4342	45.5221	32.3009	10.2541	2.6566	0.8391
45	51.4255	39.9303	23.5977	5.7758	1.3944	0.3124
46	50.6468	39.9303	25.4627	6.4155	1.5206	0.4441
47	49.0893	38.3327	23.5977	5.7758	1.0157	0.3563

Para el cálculo de la reflectancia se hizo uso de la Ecuación 12, en donde la irradiancia exoatmosférica Solar media ($E_{0\lambda}$) depende de las características del sensor (Tabla 12). Los valores físicos de reflectancia se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Valores de reflectancia correspondiente a los puntos del muestreo de 14 de abril

Estación	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
1	0.28089	0.23679	0.17847	0.07296	0.04729	0.04509
2	0.26832	0.21310	0.17412	0.05973	0.04729	0.02842
3	0.26413	0.22258	0.16104	0.05312	0.03554	0.02287
5	0.28089	0.22731	0.17847	0.05973	0.04141	0.03398
6	0.26413	0.22258	0.16976	0.05312	0.03554	0.02287
8	0.26832	0.21784	0.16104	0.05312	0.02966	0.02287
9	0.26413	0.22731	0.16976	0.05312	0.03554	0.02287
10	0.27251	0.21784	0.16540	0.05312	0.02966	0.02287
11	0.27251	0.22731	0.16976	0.05312	0.02966	0.02287
12	0.35631	0.32679	0.28741	0.14574	0.18832	0.14509
14	0.27251	0.22731	0.16976	0.05312	0.02966	0.02842
15	0.27251	0.22731	0.16540	0.05312	0.03554	0.02287
17	0.27251	0.22731	0.16104	0.05312	0.02966	0.03398
20	0.26832	0.23679	0.17412	0.06635	0.04141	0.03398
21	0.27670	0.23205	0.16976	0.05973	0.05904	0.02287
22	0.27251	0.22731	0.17412	0.05312	0.04141	0.01175
24	0.32698	0.29363	0.24819	0.11266	0.14719	0.11732
25	0.33117	0.28889	0.24819	0.12589	0.15306	0.12287
26	0.28508	0.24152	0.18719	0.07296	0.08842	0.06176
27	0.29765	0.26047	0.20897	0.09281	0.10605	0.07842
28	0.31441	0.27942	0.24383	0.11266	0.12956	0.10065
30	0.28927	0.25573	0.19590	0.07958	0.08842	0.06731
33	0.29346	0.24626	0.19155	0.07296	0.07667	0.05065
36	0.28508	0.22731	0.18719	0.06635	0.07079	0.05065
37	0.28508	0.24152	0.19155	0.07296	0.07667	0.05620
40	0.31022	0.27468	0.21769	0.09943	0.10605	0.08398
41	0.28927	0.24626	0.19590	0.07296	0.07667	0.06176
42	0.28508	0.24152	0.17412	0.07296	0.07079	0.03953
44	0.31441	0.26994	0.22640	0.10605	0.12368	0.10620
45	0.27670	0.23679	0.16540	0.05973	0.06492	0.03953
46	0.27251	0.23679	0.17847	0.06635	0.07079	0.05620
47	0.26413	0.22731	0.16540	0.05973	0.04729	0.04509

Los valores de reflectancia obtenidos permiten hacer una correlación entre los datos de campo y los que proporciona la imagen, ya que estos valores son lo más cercano a lo que estaría midiendo el satélite si no existiera interferencia atmosférica. Esta corrección ha sido aceptada para el caso de estudios multitemporales debido a que los resultados obtenidos en la mayoría de los casos son satisfactorios y cercanos a la realidad.

El siguiente paso, para la obtención de los modelos, fue introducir los datos de reflectancia y los de campo a un programa estadístico que permitiera realizar una regresión por pasos atrasados y de esta manera correlacionar los datos. El programa seleccionado fue Statplus versión 2009.

En estadística las regresiones lineales múltiples son una herramienta muy utilizada para relacionar un conjunto k de variables independientes (variables explicativas) con una variable dependiente (variable a explicar). El modelo sigue la forma mostrada en la Ecuación 17.

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_{k-1} X_{k-1} + \beta_k X_k \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

Y es la variable dependiente (variable a explicar)

X son las variables independientes (variables explicativas)

β son los coeficientes a determinar

Para una muestra de n observaciones (cada observación estará conformada por una variable independiente "Y" y un conjunto de variables independientes "X"), se generaría un sistema de ecuaciones lineales como el que se muestra en la Figura 67.

$$\begin{cases} Y_1 = \beta_1 + \beta_2 X_{21} + \dots + \beta_k X_{k1} \\ Y_2 = \beta_1 + \beta_2 X_{22} + \dots + \beta_k X_{k2} \\ \dots \\ Y_n = \beta_1 + \beta_2 X_{2n} + \dots + \beta_k X_{kn} \end{cases}$$

Figura 67. Sistema de ecuaciones de un conjunto de n muestras.

O de forma matricial $Y = X\beta$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{21} & \dots & X_{k1} \\ 1 & X_{22} & \dots & X_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{2n} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

El sistema de ecuaciones expresado de forma matricial permite observar de una manera más clara cuál es el funcionamiento de una regresión múltiple, en este caso la solución a este sistema consiste en la determinación de los coeficientes β , ya que los valores de "X" y "Y" son conocidos, en el caso de este estudio corresponden a los valores de reflectancia y a los del muestreo respectivamente.

La regresión por pasos atrasados es un tipo de regresión múltiple, cuyo funcionamiento básicamente radica en un proceso iterativo, donde en el primer paso emplea todas variables dependientes e independientes para la generación del modelo, calcula el error medio cuadrático e identifica aquella variable explicativa que produce que el error sea mayor y la elimina, esto lo hace nuevamente hasta que el error sea el mínimo. Este tipo de regresión permite identificar cuáles son las variables que hacen que el modelo tenga una mayor exactitud.

Los datos que se ingresaron para la generación de los modelos correspondieron a los 32 puntos de la primera campaña (14 de abril), que no se vieron afectados por el bandedo de las imágenes, en la segunda campaña no fue posible la extracción de los datos debido a la nubosidad excesiva que se presentó en ese día.

El software Statplus fue alimentado con los valores de la reflectancia de los 32 puntos, haciendo combinaciones entre las bandas para resaltar diferentes características y ayudara a que la generación de los modelos fuera más exacta. Las combinaciones que se hicieron fueron las siguientes: [B1, B2, B3, B4, B5 y B7], [B1, B2, B3, B4 y B5], [B1, B2, B3 y B4], [B1, B2 y B3] y [B3 y B5].

RESULTADOS

Para seleccionar el modelo que arrojaba los mejores resultados, se tomó como criterio que el índice de concordancia fuera el más alto y que utilizara el mínimo número de bandas. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

- Índice de Estado Tráfico (PDS):

$$IET_{PDS} = 45.70 + 158.35B_3 - 156.99B_5$$

Índice de concordancia: 0.78

- Sólidos Disueltos Totales:

$$SDT = 50.39 + 162.98B_2 - 104.07B_4 - 41.99B_5$$

Índice de concordancia: 0.67

- Turbiedad

$$Turb = 18.26 - 60.20B_3 - 21.12\frac{B_5}{B_3} + 100.69B_5$$

Índice de concordancia: 0.80

La finalidad de obtener estos modelos es poder aplicarlos a imágenes satelitales previamente tratadas y así obtener mapas de calidad, los cuales muestran la variación del parámetro evaluado a lo largo del embalse (Figura 68 a Figura 70). La generación de estos mapas facilita la identificación de zonas con diferentes calidades, con la opción de extraer para un determinado punto el valor del parámetro evaluado y sus coordenadas cartesianas.

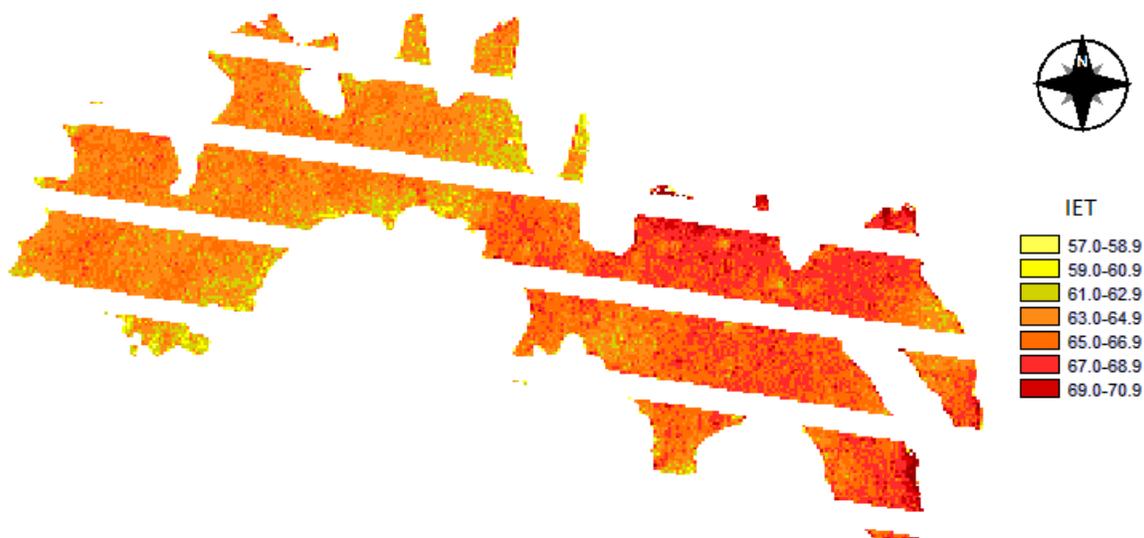


Figura 68. Mapa de calidad correspondiente al Índice de Estado Tráfico (14 de abril de 2012)



Figura 69. Mapa de calidad correspondiente a Sólidos Disueltos Totales (14 de abril de 2012)



Figura 70. Mapa de calidad correspondiente a Turbiedad (14 de abril de 2012)

COMPROBACIÓN DE RESULTADOS

La corroboración de los modelos consistió hacer una comparación de los valores obtenidos haciendo uso de éstos con los valores producto de los muestreos. Los resultados se muestran de Tabla 16 a la Tabla 18.

Tabla 16. Comprobación del modelo de Índice de Estado Tráfico

Muestra	Coordenada X	Coordenada Y	IET _{medido}	IET _{calculado}	% Error
1	395420.07	2151451.71	65.99	66.54	0.82
2	396017.24	2150839.58	68.62	65.85	4.05
3	396358.04	2150773.06	70.29	65.62	6.64
5	397581.11	2150987.43	66.90	67.46	0.84
6	397777.84	2151226.1	68.37	67.00	1.99
8	398250.73	2151832.1	67.86	66.55	1.94
9	398345.06	2152012.95	67.86	67.00	1.26
10	398273.14	2152185.51	70.89	67.24	5.16
11	398130.68	2152260.09	66.67	67.93	1.89
12	397410.08	2152193.46	65.99	61.65	6.59
14	396892.41	2152430.05	68.37	67.93	0.64
15	396397.35	2152540.48	67.37	66.31	1.57
17	396474.26	2151716.17	65.99	66.55	0.83
20	394792.32	2151815.04	68.11	66.77	1.97
21	394423.98	2152653.37	69.16	63.31	8.45
22	394743.12	2152878.99	62.52	66.77	6.81
24	394227.57	2152971.16	63.77	61.89	2.94
25	394621.56	2153531.43	61.20	60.97	0.38
26	394344.54	2154522.94	65.78	61.46	6.56
27	394184.77	2154124.23	63.96	62.14	2.84
28	394146.84	2153623.36	60.89	63.97	5.06
30	393577.69	2154017.13	61.05	62.84	2.94
33	392722.03	2153785.49	58.89	63.99	8.67
36	392122.64	2153991.96	59.02	64.23	8.82
37	392089.64	2154324.17	61.36	63.99	4.29
40	390554.23	2152584.2	61.84	63.52	2.71
41	390332.89	2153108.16	63.04	64.68	2.61
42	389459.66	2152403.34	61.20	62.16	1.56
44	391076.57	2151683.37	60.74	62.13	2.30
45	391766.34	2152435.47	59.43	61.70	3.81
46	392311.03	2152825.71	60.74	62.85	3.47
47	393558.32	2153205.66	63.58	64.47	1.39

Error promedio 3.49%

COMPROBACIÓN DE RESULTADOS

Tabla 17. Comprobación del modelo de sólidos disueltos totales

Muestra	Coordenada X	Coordenada Y	SDT _{medido}	SDT _{calculado}	% Error
1	395420.07	2151451.71	78	79.40	1.80
2	396017.24	2150839.58	75	76.92	2.56
3	396358.04	2150773.06	80	79.64	0.45
5	397581.11	2150987.43	81	79.48	1.88
6	397777.84	2151226.1	81	79.64	1.67
8	398250.73	2151832.1	79	79.12	0.15
9	398345.06	2152012.95	81	80.42	0.72
10	398273.14	2152185.51	82	79.12	3.51
11	398130.68	2152260.09	82	80.66	1.63
12	397410.08	2152193.46	80	80.57	0.72
14	396892.41	2152430.05	79	80.66	2.10
15	396397.35	2152540.48	81	80.42	0.72
17	396474.26	2151716.17	78	80.66	3.41
20	394792.32	2151815.04	81	80.34	0.82
21	394423.98	2152653.37	81	79.51	1.84
22	394743.12	2152878.99	81	80.17	1.03
24	394227.57	2152971.16	81	80.34	0.82
25	394621.56	2153531.43	80	77.94	2.57
26	394344.54	2154522.94	80	78.45	1.94
27	394184.77	2154124.23	80	78.73	1.59
28	394146.84	2153623.36	80	78.76	1.55
30	393577.69	2154017.13	81	80.07	1.14
33	392722.03	2153785.49	77	79.71	3.52
36	392122.64	2153991.96	77	77.56	0.72
37	392089.64	2154324.17	78	78.94	1.20
40	390554.23	2152584.2	79	80.35	1.71
41	390332.89	2153108.16	80	79.71	0.36
42	389459.66	2152403.34	78	79.19	1.52
44	391076.57	2151683.37	76	78.15	2.83
45	391766.34	2152435.47	79	80.04	1.31
46	392311.03	2152825.71	77	79.10	2.73
47	393558.32	2153205.66	80	79.23	0.96

Error promedio 1.61%

COMPROBACIÓN DE RESULTADOS

Tabla 18. Comprobación del modelo de turbiedad

Muestra	Coordenada X	Coordenada Y	Turb. Medido	Turb. Calculado	% Error
1	395420.07	2151451.71	6.45	6.68	3.59
2	396017.24	2150839.58	7.09	6.80	4.03
3	396358.04	2150773.06	9.42	7.48	20.56
5	397581.11	2150987.43	7.57	6.79	10.36
6	397777.84	2151226.1	7.27	7.20	0.99
8	398250.73	2151832.1	7.01	7.66	9.30
9	398345.06	2152012.95	6.87	7.20	4.77
10	398273.14	2152185.51	7.03	7.50	6.72
11	398130.68	2152260.09	6.77	7.34	8.38
12	397410.08	2152193.46	6.43	6.08	5.41
14	396892.41	2152430.05	7.4	7.34	0.85
15	396397.35	2152540.48	7.13	7.34	3.00
17	396474.26	2151716.17	7.09	7.66	8.07
20	394792.32	2151815.04	7.6	6.93	8.88
21	394423.98	2152653.37	8.37	6.64	20.67
22	394743.12	2152878.99	6.95	6.93	0.36
24	394227.57	2152971.16	6.05	5.61	7.19
25	394621.56	2153531.43	5.1	5.71	11.89
26	394344.54	2154522.94	7.43	5.92	20.34
27	394184.77	2154124.23	5.64	5.64	0.01
28	394146.84	2153623.36	5.23	5.41	3.35
30	393577.69	2154017.13	5.31	5.84	9.94
33	392722.03	2153785.49	5.51	6.00	8.81
36	392122.64	2153991.96	5.86	6.13	4.65
37	392089.64	2154324.17	5.89	6.00	1.79
40	390554.23	2152584.2	6.09	5.54	8.95
41	390332.89	2153108.16	6.11	5.92	3.09
42	389459.66	2152403.34	6.19	6.32	2.09
44	391076.57	2151683.37	4.73	5.55	17.27
45	391766.34	2152435.47	5.55	6.55	18.03
46	392311.03	2152825.71	5.49	6.27	14.15
47	393558.32	2153205.66	6.36	7.03	10.48

Error promedio 8.06%

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los modelos de calidad del agua generados a partir de relacionar los datos de campo con la información extraída de las imágenes satelitales fueron los siguientes:

- Índice de estado trófico
- Sólidos suspendidos totales
- Turbiedad

Los índices de concordancias obtenidos para estos modelos son aceptables, al presentar un valor promedio de 0.75. Es importante tener en cuenta que estos modelos fueron generados a partir de los datos de la primera campaña que se llevó a cabo el 14 de abril (Temporada de estiaje), ya que para la segunda campaña no fue posible la obtención de datos debido a la nubosidad que presentaban las imágenes. Este inconveniente implica que la aplicación de los modelos arroje resultados más confiables cuando se evalúen imágenes que correspondan a temporada de estiaje.

La aplicación de estos modelos a imágenes satelitales previamente tratadas, permiten la obtención de mapas de calidad, los cuales muestran cual es el comportamiento del agua a lo largo del embalse, facilitando la identificación de “puntos críticos” (puntos que muestran los valores más altos respecto a los demás), detallando para cada pixel el valor del parámetro, así como sus coordenadas cartesianas.

El mapa de calidad correspondiente al índice de estado trófico (Figura 68), muestra que la zona Este es la que ha experimentado una mayor eutroficación, con valores que alcanzan una ponderación de 71 en una escala de 100. Estos datos son congruentes con la información recopilada, ya que es en esta área en la que se registran el mayor número de descargas de aguas residuales sobre el embalse, produciendo que la eutroficación sea mayor debido al exceso de nutrientes. Lo que resulta alarmante para una presa que está destinada como fuente de abastecimiento.

El mapa de calidad de sólidos disueltos totales (Figura 69), muestra una alta concentración a lo largo del embalse, siendo la zona Este la que presenta el mayor contenido de sólidos disueltos totales. Este alto contenido de sólidos disueltos se debe en gran medida, a la gran deforestación que ha existido en las zonas cercanas al embalse.

Por último el mapa de calidad correspondiente a la turbiedad (Figura 70), al igual que los otros dos mapas de calidad muestra que los niveles más altos se presentan en la zona Este, con valores que oscilan entre 4 y 8 UTN que para un embalse de esta índole es alto, a pesar de esto, se observó que existe abundante vida acuática.

Otra aplicación de la percepción remota es la utilización de filtros para detectar la variación en la calidad del agua, esta técnica consiste en la aplicación de un filtro Sobel para resaltar los bordes o fronteras que indicarían un cambio en la calidad del agua. El resultado de aplicar esta técnica (Figura 60) muestra que en temporada de estiaje, el embalse presenta una mayor variación en su calidad, mientras que en temporada de lluvias la calidad del agua es más homogénea a lo largo del

embalse. Este resultado se debe al efecto de dilución que experimentan los contaminantes al presentarse las lluvias.

En el análisis digital realizado para conocer el área de estudio, se llevaron a cabo composiciones a color que proporcionaron información valiosa como las áreas que presentaban mayor deforestación (zona Norte y Este del embalse), la ubicación de centros urbanos, la topografía cercana al embalse, etc.

En cuanto a los resultados de los muestreos realizados, algunos parámetros tales como: pH, coliformes totales y fecales, turbiedad, etc. presentan valores que se salen del rango establecido por la NOM-127-SSA1-1994, se hace referencia a esta norma ya que el embalse está destinado como fuente de abastecimiento y además existen personas que extraen de éste agua para su consumo y actividades.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El avance en la tecnología espacial que se ha tenido en los últimos años ha permitido comprender distintos fenómenos y formular nuevas técnicas de percepción remota. En la actualidad existe una amplia gama de satélites y sensores dedicados al estudio de la Tierra, cada uno de ellos con características de resolución temporal, espacial, espectral y radiométrica diferentes que deben ser tomados en cuenta para la elección de aquel que más se apegue a las necesidades del proyecto. Gracias a estos avances la PR ha sido aplicada para el estudio de problemas ambientales, demográficos, económicos-sociales, etc. con resultados aceptables que cada vez hacen más frecuente el uso de esta técnica, no sólo por su exactitud y rapidez en la obtención de información, sino también por el bajo costo en comparación con los muestreos tradicionales. En lo que respecta al agua, se han realizado estudios para la obtención de modelos que permitan monitorear la calidad de cuerpos de agua a partir de imágenes satelitales, en México el monitoreo de cuerpos de agua haciendo uso de esta técnica es prácticamente nula; a pesar de las grandes ventajas que ésta conlleva, existen muy pocos estudios realizados.

En el caso del presente estudio, se obtuvieron modelos para evaluar los parámetros de IET, SDT y Turbiedad con los cuales se podría establecer un monitoreo de la calidad del agua de la presa Villa Victoria, no obstante de ser pocos los parámetros evaluados, éstos permiten conocer las condiciones en las que se encuentra un cuerpo de agua y en un momento dado detectar anomalías en la calidad de ésta que permita tomar las medidas de corrección necesarias.

Es recomendable que se corrobore periódicamente la exactitud de los modelos y se realicen muestreos que permitan reajustarlos, con la finalidad de que los datos obtenidos sigan siendo confiables y se adapten a las nuevas condiciones del embalse.

La aplicación de técnicas de percepción remota para el estudio de la calidad de cuerpos de agua, se ve limitada a que exista una profundidad mínima de dos metros, condición que en muchas zonas de la presa no se cumple, debido al asolvamiento excesivo que ha presentado el embalse, lo que reduce su vida útil. La reforestación de la zona ayudaría a reducir el arrastre de partículas al embalse y al mismo tiempo mejorarían el aspecto visual.

La metodología empleada en este trabajo logró que se generaran modelos con resultados aceptables, comprobándose que esta metodología puede ser usada para la generación de otros modelos de calidad para diferentes cuerpos, y así establecer un sistema de monitoreo a lo largo del país.

La calidad que presenta el agua de la presa Villa Victoria se ve afectada principalmente por descargas residuales que se vierten directamente en el embalse, el excesivo arrastre de partículas de suelo y productos químicos utilizados en la agricultura también contribuye al deterioro de la calidad del agua; como consecuencia, los valores de parámetros como: pH, sólidos suspendidos totales, coliformes totales y fecales, entre otros son altos, otro efecto adverso es la presencia de algas (fitoplancton) cuyo crecimiento excesivo podría llevar al agotamiento de oxígeno y en consecuencia a la muerte de peces y otros organismos que ahí habiten. A pesar de las medidas

que se han implantado para el saneamiento de la Cuenca Villa Victoria-San José del Rincón, estas no han sido suficientes, no sólo por su eficacia, sino por el tiempo que conlleva la restauración de los factores ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- AmesRemote*. (14 de Mayo de 1012). Recuperado el 19 de noviembre de 2012, de AmesRemote: <http://www.amesremote.com/section1.htm>
- Natural Resources Canada*. (29 de enero de 2008). Recuperado el 19 de noviembre de 2012, de <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography-boundary/remote-sensing/fundamentals/1262>
- Aldalur, & Santamaría. (2002). Realce de imágenes; filtrado espacial. *Revista de Teledetección*, 31-42.
- Álvarez, J. A., & Zarazaga, f. J. (2006). Water Quality Assessment with Simultaneous Landsat-5 TM Data at Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil.
- Arbelo, M. (2004). *Teledetección*. Recuperado el 25 de noviembre de 2012, de <http://marbelo.webs.ull.es/rs.html>
- ASTRIUM. (2012). *ASTRIUM AN EADS COMPANY*. Recuperado el 30 de septiembre de 2012, de <http://www.astrium-geo.com/>
- Braga, C. Z., & Setzer, A. (1993). Water Quality Assessment with Simultaneous Landsat-5 TM Data at Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil.
- Carlson, R. (1977). A trophic state index for lakes.
- Chavez, p. (1996). *Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved*.
- Chen, Z., HU, C., & Muller-Karger, F. (2006). Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery.
- Chuvieco, E. (1995). *FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL* (Segunda ed.). MADRID: RIALP.S.A.
- Elachi, C., & Zyl, J. V. (2006). *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing* (Segunda ed.). (J. W. Sons, Ed.) New Jersey.
- glovis. (2012). *Visualization Viewer*. Recuperado el 30 de septiembre de 2012, de <http://glovis.usgs.gov/>
- Kizys, R., & Juan, A. A. (s.f.). *Modelo de Regresión Lineal Múltiple*. Recuperado el 8 de 4 de 2013, de http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/T01_Reg_Lineal_Multiple.pdf
- Murcia, U. d. (s.f.). *Fotointerpretación y Teledetección*. Recuperado el 28 de Enero de 2013, de <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema06.pdf>
- NASA. (25 de septiembre de 2012). *NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION*. Recuperado el 30 de septiembre de 2012, de <http://landsat.gsfc.nasa.gov>

- Sepúlveda, R. T. (2011). *DISEÑO DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE EL USO DE LA PERCEPCIÓN REMOTA*. D. F.
- UNESCO-WWAP. (2012). *MANAGING WATER UNDER UNCERTAINTY AND RISK*.
- USGS. (30 de septiembre de 2012). *Landsat 7 Acquisition Calendar*. Recuperado el 30 de septiembre de 2012, de http://landsat.usgs.gov/tools_L7_acquisition_calendar.php
- USGS, & EPA. (09 de Febrero de 2011). *La Ciencia del Agua*. Recuperado el 24 de Octubre de 2012, de <http://water.usgs.gov/gotita/earthwherewater.html>
- Vázquez, A. (2000). *EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA*. *Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería, UNAM, D. F.*

ANEXOS

Tabla A. I. Parámetros de calidad del agua, segunda campaña (17 de junio)

Est	Coordenadas	Temp (°c)	pH	OD %	OD ppm	µS/cm	µS/cm A	MOhm·cm	TDS (mg/l)	Salinidad	P (mbar)	Turb (NTU)	SST (mg/l)
1	19°27'20"N-99°59'47"O	18.76	7.74	94.8	6.51	156	137	0.0064	78	0.07	753.3	10.4	18
2	19°26'55"N-99°59'17"O	18.49	8.46	99.5	6.9	155	136	0.0065	77	0.07	755	13.5	18
3	19°27'00"N-99°58'57"O	18.47	8.23	92.2	6.39	161	141	0.0062	81	0.08	755	12.8	30
4	19°27'01"N-99°58'31"O	18.57	8.19	94.7	6.55	158	139	0.0063	79	0.07	754.4	15.4	20
5	19°26'45"N-99°58'18"O	17.82	8.62	105.1	7.38	157	135	0.0064	78	0.07	754.7	15.3	32
6	19°26'38"N-99°58'13"O	17.67	8.65	105.4	7.44	159	137	0.0063	79	0.07	756.4	17.3	30
7	19°27'32"N-99°58'19"O	18.81	7.79	101.9	7.05	159	140	0.0063	79	0.07	757.9	11.5	10
8	19°27'30"N-99°58'05"O	18.61	8.67	110.6	7.62	157	138	0.0064	79	0.07	752.8	11.3	6
9	19°27'42"N-99°58'04"O	18.59	8.73	110.4	7.59	158	139	0.0063	79	0.07	751	11.9	6
10	19°27'49"N-99°58'05"O	18.21	8.69	109.6	7.58	159	139	0.0063	80	0.08	749.7	16.8	26
11	19°27'49"N-99°58'18"O	18.74	8.61	108.4	7.41	158	139	0.0063	79	0.07	748.5	11.2	10
12	19°27'40"N-99°58'36"O	18.91	8.31	100.5	6.83	164	145	0.0061	82	0.08	747.5	11.8	26
13	19°27'42"N-99°58'49"O	19.01	8.41	102.6	6.96	141	125	0.0071	71	0.07	746.9	12.7	24
14	19°27'33"N-99°58'45"O	18.96	8.28	99.2	6.73	157	139	0.0064	78	0.07	746.6	12.2	6
15	19°27'40"N-99°58'50"O	18.99	8.34	100.2	6.79	164	145	0.0061	82	0.08	746.5	13.3	10
16	19°27'52"N-99°59'05"O	18.56	8.72	115.4	7.9	164	144	0.0061	82	0.08	747	14.7	24
17	19°27'46"N-99°59'12"O	19.05	8.63	112.3	7.61	160	142	0.0063	80	0.08	747.1	12	24
18	19°27'35"N-99°59'14"O	18.95	8.23	100.7	6.84	166	147	0.006	83	0.08	747.3	10.1	6
19	19°27'25"N-99°59'14"O	18.81	8.18	100.7	6.85	164	145	0.0061	82	0.08	747.2	9.67	18
20	19°27'38"N-99°59'36"O	18.85	8.38	105.3	7.17	166	146	0.006	83	0.08	747.3	9.16	28
21	19°27'19"N-100°00'08"O	19.08	8.68	113.7	7.7	165	147	0.0061	83	0.08	747.5	9.74	10
22	19°27'28"N-100°00'08"O	19.14	8.79	120.7	8.16	166	147	0.006	83	0.08	747.5	9.02	22
23	19°27'55"N-100°00'21"O	19.02	8.08	106.9	7.26	164	145	0.0061	82	0.08	748.1	8.77	6
24	19°28'08"N-100°00'09"O	18.98	8	104.9	7.13	166	147	0.006	83	0.08	748.4	7.86	10
25	19°28'13"N-99°59'57"O	18.96	8.22	102.3	6.96	166	147	0.006	83	0.08	748.7	9.07	24
26	19°28'10"N-100°00'29"O	18.98	7.99	97.5	6.62	166	147	0.006	83	0.08	748.3	8.02	18
27	19°28'25"N-100°00'14"O	18.96	8.36	106.7	7.25	165	146	0.0061	83	0.08	748.2	7.33	6
28	19°28'57"N-100°00'24"O	18.87	8.17	106.2	7.23	158	139	0.0063	79	0.07	747.5	9.77	20
29	19°28'44"N-100°00'30"O	18.89	8.36	109.4	7.44	161	142	0.0062	80	0.08	747	7.77	4
30	19°28'29"N-100°00'31"O	18.88	8.18	101	6.86	155	137	0.0065	77	0.07	746.2	6.87	16
31	19°28'21"N-100°00'44"O	18.97	8.18	99.7	6.76	158	140	0.0063	79	0.07	746	7.85	14
32	19°28'56"N-100°00'54"O	18.79	8.42	107.1	7.28	161	142	0.0062	80	0.08	745.9	9.68	30
33	19°28'33"N-100°01'15"O	18.9	8.15	100.7	6.83	156	138	0.0064	78	0.07	745.8	7.1	6
34	19°28'25"N-100°01'38"O	18.94	8.03	94	6.37	151	133	0.0066	75	0.07	745.7	7.24	18
35	19°28'38"N-100°01'40"O	18.86	8.15	99.3	6.74	154	136	0.0065	77	0.07	745.6	7.57	8
36	19°28'52"N-100°01'48"O	18.82	8.37	101.1	6.86	145	128	0.0069	72	0.07	745.3	7.57	16
37	19°28'34"N-100°01'57"O	18.98	8.35	101.5	6.86	138	122	0.0072	69	0.06	744.8	7.23	18
38	19°28'05"N-100°02'12"O	19.19	8.18	98.5	6.63	141	126	0.0071	71	0.07	744.4	7.27	2
39	19°27'54"N-100°02'31"O	19.26	8.22	97.5	6.55	149	133	0.0067	75	0.07	744.1	6.97	20
40	19°27'47"N-100°03'07"O	18.99	7.98	90.3	6.09	139	123	0.0072	70	0.07	743.8	9.08	0
41	19°27'31"N-100°02'29"O	19.2	8.05	95.5	6.42	155	138	0.0065	77	0.07	743.7	8.59	6
42	19°27'23"N-100°02'17"O	19.19	8.04	93.6	6.3	154	137	0.0065	77	0.07	743.7	6.71	18
43	19°27'44"N-100°01'57"O	19.08	8	94.9	6.4	156	139	0.0064	78	0.07	743.8	6.81	12
44	19°28'01"N-100°01'34"O	19.03	8.14	98.5	6.64	146	129	0.0069	73	0.07	743.5	7	6
45	19°28'09"N-100°01'08"O	18.86	7.99	104.8	7.09	161	143	0.0062	81	0.08	743.5	7.34	16

Tabla A. II. Parámetro químicos, segunda campaña (17 de junio)

Estación	Parámetros químicos					Parámetros Microbiológicos		Referencia
	Fosfatos mg/L	Nitritos mg/L	Nitratos mg/L	Nitrógeno amoniacal mg/L	DBO ₅ mg/L	Coliformes totales UFC/ml	Coliformes fecales UFC/ml	
1	0.03	0.002	0.5	0.13	10	Incontable	Incontable	
10	0.2	0	2.2	0.05	12	Incontable	Incontable	
19	0.06	0	1.6	0.12	2	Incontable	Incontable	
21	0.04	0	1.8	0.13	10	Incontable	Incontable	Rastro
28	0.07	0	0.5	0.05	18	Incontable	Incontable	
40	0.05	0	0.6	0.15	7	Incontable	Incontable	Cortina

Tabla A. III. DATOS DE ENTRADA PARA LA GENERACIÓN DE LOS MODELOS

Muestra	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	TSI	SDT	TURB.
1	0.281	0.237	0.178	0.073	0.047	65.995	78	6.45
2	0.268	0.213	0.174	0.060	0.047	68.625	75	7.09
3	0.264	0.223	0.161	0.053	0.036	70.291	80	9.42
5	0.281	0.227	0.178	0.060	0.041	66.897	81	7.57
6	0.264	0.223	0.170	0.053	0.036	68.365	81	7.27
8	0.268	0.218	0.161	0.053	0.030	67.859	79	7.01
9	0.264	0.227	0.170	0.053	0.036	67.859	81	6.87
10	0.273	0.218	0.165	0.053	0.030	70.893	82	7.03
11	0.273	0.227	0.170	0.053	0.030	66.666	82	6.77
12	0.356	0.327	0.287	0.146	0.188	65.995	80	6.43
14	0.273	0.227	0.170	0.053	0.030	68.365	79	7.4
15	0.273	0.227	0.165	0.053	0.036	67.370	81	7.13
17	0.273	0.227	0.161	0.053	0.030	65.995	78	7.09
20	0.268	0.237	0.174	0.066	0.041	68.110	81	7.6
21	0.277	0.232	0.170	0.060	0.059	69.159	81	8.37
22	0.273	0.227	0.174	0.053	0.041	62.515	81	6.95
24	0.327	0.294	0.248	0.113	0.147	63.771	81	6.05
25	0.331	0.289	0.248	0.126	0.153	61.203	80	5.1
26	0.285	0.242	0.187	0.073	0.088	65.778	80	7.43
27	0.298	0.260	0.209	0.093	0.106	63.959	80	5.64
28	0.314	0.279	0.244	0.113	0.130	60.893	80	5.23
30	0.289	0.256	0.196	0.080	0.088	61.047	81	5.31
33	0.293	0.246	0.192	0.073	0.077	58.890	77	5.51
36	0.285	0.227	0.187	0.066	0.071	59.024	77	5.86
37	0.285	0.242	0.192	0.073	0.077	61.361	78	5.89
40	0.310	0.275	0.218	0.099	0.106	61.844	79	6.09
41	0.289	0.246	0.196	0.073	0.077	63.040	80	6.11
42	0.285	0.242	0.174	0.073	0.071	61.203	78	6.19
44	0.314	0.270	0.226	0.106	0.124	60.740	76	4.73
45	0.277	0.237	0.165	0.060	0.065	59.434	79	5.55
46	0.273	0.237	0.178	0.066	0.071	60.740	77	5.49
47	0.264	0.227	0.165	0.060	0.047	63.585	80	6.36

Tabla A. IV. Datos estadísticos de la regresión lineal para el modelo de IET

Regresión Lineal							
Estadísticos de Regresión							
<i>R</i>		0.77714					
<i>R Cuadrado</i>		0.60394					
<i>R Cuadrado Ajustado</i>		0.55993					
<i>S</i>		2.67923					
<i>Número Total de Casos</i>		31					
TSI = 43.4601 + 142.2016 * B3 + 104.5425 * B5/B3 - 418.5497 * B5							
ANOVA							
	<i>d.f.</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>nivel p</i>		
<i>Regresión</i>	3.	295.54057	98.51352	13.72389	0.00001		
<i>Residuo</i>	27.	193.8128	7.17825				
<i>Total</i>	30.	489.35337					
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>LCL</i>	<i>UCL</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>nivel p</i>	<i>HO (5%) rechazado?</i>
Intercepto	43.46006	19.45813	3.53527	83.38484	2.23352	0.034	<i>Sí</i>
B3	142.20163	119.69032	-103.38262	387.78589	1.18808	0.24515	<i>No</i>
B5/B3	104.54248	28.54193	45.97929	163.10568	3.66277	0.00107	<i>Sí</i>
B5	-418.54974	177.51272	-782.77575	-54.32373	-2.35786	0.02588	<i>Sí</i>
<i>T (5%)</i>	2.05183						
<i>LCL - Valor inferior de un intervalo de confianza (LCL)</i>							
<i>UCL - Valor superior de un intervalo de confianza (UCL)</i>							

Tabla A. V. Residuos obtenidos de la regresión por variable explicativa del modelo IET

<i>Observación</i>	<i>Y Predicha</i>	<i>Residuo</i>	<i>Residuos Estándar</i>
1	76.74641	-0.67615	-0.26602
2	76.81999	-4.2491	-1.67173
3	74.5556	-2.90077	-1.14126
4	75.76384	-1.89269	-0.74465
5	74.61061	-2.835	-1.11538
6	73.20051	0.97458	0.38343
7	74.61061	-1.42397	-0.56024
8	73.3129	-0.14	-0.05508
9	73.45134	-1.00476	-0.3953
10	74.0088	1.47316	0.57959
11	73.45134	3.73763	1.4705
12	74.56751	0.98388	0.38709
13	73.20051	0.32281	0.127
14	75.75128	0.88477	0.34809
15	79.2477	-2.30173	-0.90557
16	75.75128	0.35593	0.14004
17	79.14599	-2.31356	-0.91023
18	79.16167	-1.72378	-0.67819
19	82.45233	-3.50952	-1.38076
20	81.84252	-0.92909	-0.36553
21	79.45452	-0.14123	-0.05556
22	81.49478	-5.7896	-2.27781
23	79.98536	2.27571	0.89534
24	80.45323	3.1267	1.23014
25	80.95788	2.87043	1.12932
26	80.14212	1.21734	0.47894
27	81.09483	1.67391	0.65857
28	80.99836	2.47659	0.97437
29	80.84053	0.87609	0.34468
30	80.6767	3.39707	1.33651
31	77.07672	5.18435	2.03969

Tabla A. VI. Datos estadísticos de la regresión lineal para el modelo de SDT

Regresión Lineal	
Estadísticos de Regresión	
<i>R</i>	0.54067
<i>R Cuadrado</i>	0.29232
<i>R Cuadrado Ajustado</i>	0.2165
<i>S</i>	1.55741
Número Total de Casos	32
TDS ppm = 50.3881 + 162.9813 * Banda 2 - 104.0748 * Banda 4 - 41.9913 * Banda 5	

ANOVA

	<i>d.f.</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>nivel p</i>
<i>Regresión</i>	3.	28.05362	9.35121	3.85531	0.01991
<i>Residuo</i>	28.	67.91513	2.42554		
<i>Total</i>	31.	95.96875			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error</i>		<i>UCL</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>nivel p</i>	<i>HO (5%)</i>
		<i>Estándar</i>	<i>LCL</i>				<i>rechazado?</i>
Intercepto	50.38806	8.80589	32.35002	68.4261	5.72209	0.	<i>Sí</i>
Banda 2	162.98133	49.38714	61.81636	264.14629	3.30008	0.00264	<i>Sí</i>
Banda 4	-104.07479	65.29205	-237.81949	29.66991	-1.59399	0.12217	<i>No</i>
Banda 5	-41.99133	30.95178	-105.39319	21.41053	-1.35667	0.18572	<i>No</i>

T (5%) 2.04841

LCL - Valor inferior de un intervalo de confianza (LCL)

UCL - Valor superior de un intervalo de confianza (UCL)

Tabla A. VII. Residuos obtenidos de la regresión por variable explicativa del modelo SDT

<i>Observación</i>	<i>Y Predicha</i>	<i>Residuo</i>	<i>Residuos Estándar</i>
1	79.40031	-1.40031	-0.94606
2	76.91729	-1.91729	-1.29534
3	79.64347	0.35653	0.24088
4	79.48016	1.51984	1.02682
5	79.64347	1.35653	0.91649
6	79.11818	-0.11818	-0.07985
7	80.41551	0.58449	0.39489
8	79.11818	2.88182	1.94699
9	80.66226	1.33774	0.90379
10	80.57247	-0.57247	-0.38677
11	80.66226	-1.66226	-1.12304
12	80.41551	0.58449	0.39489
13	80.66226	-2.66226	-1.79866
14	80.33565	0.66435	0.44884
15	79.51194	1.48806	1.00535
16	80.16875	0.83125	0.5616
17	80.33842	0.66158	0.44697
18	77.94245	2.05755	1.39011
19	78.44507	1.55493	1.05053
20	78.7272	1.2728	0.85992
21	78.76257	1.23743	0.83603
22	80.0726	0.9274	0.62656
23	79.71062	-2.71062	-1.83133
24	77.5578	-0.5578	-0.37686
25	78.93858	-0.93858	-0.63411
26	80.35472	-1.35472	-0.91527
27	79.71062	0.28938	0.19551
28	79.18533	-1.18533	-0.80082
29	78.15383	-2.15383	-1.45516
30	80.03723	-1.03723	-0.70076
31	79.10188	-2.10188	-1.42006
32	79.23341	0.76659	0.51792

Tabla A. VIII. Datos estadísticos de la regresión lineal para el modelo de Turbiedad

Regresión Lineal	
Estadísticos de Regresión	
<i>R</i>	0.70395
<i>R Cuadrado</i>	0.49554
<i>R Cuadrado Ajustado</i>	0.44149
<i>S</i>	0.75755
Número Total de Casos	32
Turb = 18.2597 - 60.1968 * B3 - 21.1202 * B5/B3 + 100.6922 * B5	

ANOVA

	<i>d.f.</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>nivel p</i>
<i>Regresión</i>	3.	15.78476	5.26159	9.16841	0.00022
<i>Residuo</i>	28.	16.06871	0.57388		
<i>Total</i>	31.	31.85347			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error</i>		<i>UCL</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>nivel p</i>	<i>HO (5%)</i>
		<i>Estándar</i>	<i>LCL</i>				<i>rechazado?</i>
Intercepto	18.25971	5.42821	7.14053	29.37889	3.36386	0.00224	<i>Sí</i>
B3	-60.19681	33.43103	-128.67717	8.28355	-1.80063	0.08254	<i>No</i>
B5/B3	-21.12024	7.89926	-37.30114	-4.93935	-2.6737	0.01238	<i>Sí</i>
B5	100.69222	49.32159	-0.33848	201.72292	2.04154	0.05072	<i>No</i>

T (5%) 2.04841

LCL - Valor inferior de un intervalo de confianza (LCL)

UCL - Valor superior de un intervalo de confianza (UCL)

Tabla A. IX. Residuos obtenidos de la regresión por variable explicativa del modelo Turbiedad

<i>Observación</i>	<i>Y Predicha</i>	<i>Residuo</i>	<i>Residuos Estándar</i>
1	6.68171	-0.23171	-0.32184
2	6.80397	0.28603	0.39729
3	7.48316	1.93684	2.6902
4	6.78541	0.78459	1.08977
5	7.19781	0.07219	0.10027
6	7.66211	-0.65211	-0.90576
7	7.19781	-0.32781	-0.45532
8	7.50229	-0.47229	-0.65599
9	7.3372	-0.5672	-0.78782
10	6.08231	0.34769	0.48293
11	7.3372	0.0628	0.08722
12	7.34364	-0.21364	-0.29673
13	7.66211	-0.57211	-0.79464
14	6.92506	0.67494	0.93747
15	6.64025	1.72975	2.40256
16	6.92506	0.02494	0.03464
17	5.61484	0.43516	0.60441
18	5.70649	-0.60649	-0.84239
19	5.91841	1.51159	2.09953
20	5.64046	-0.00046	-0.00063
21	5.4052	-0.1752	-0.24334
22	5.83763	-0.52763	-0.73286
23	5.99554	-0.48554	-0.6744
24	6.13237	-0.27237	-0.37831
25	5.99554	-0.10554	-0.14659
26	5.54494	0.54506	0.75707
27	5.92128	0.18872	0.26213
28	6.31958	-0.12958	-0.17999
29	5.54696	-0.81696	-1.13473
30	6.55038	-1.00038	-1.38949
31	6.26694	-0.77694	-1.07914
32	7.02633	-0.66633	-0.92551