



Evaluación de la calidad del agua mediante técnicas de percepción remota

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA



*Alba Beatriz Vázquez González
Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose
Vicente Fuentes Gea*

VÁZQUEZ GONZÁLEZ, Alba Beatriz,
Rodrigo T. Sepúlveda Hirose, Vicente Fuentes Gea.
*Evaluación de la calidad del agua mediante
la aplicación de técnicas de percepción remota.*
México, Universidad Nacional Autónoma de México,
Facultad de Ingeniería, 2015, 182 p.

***Evaluación de la calidad del agua mediante la aplicación
de técnicas de percepción remota***

Primera edición 10 de febrero de 2015

D.R. © 2015, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Avenida Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México

FACULTAD DE INGENIERÍA
<http://www.ingenieria.unam.mx/>

ISBN 978-607-02-6447-4

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en México.

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD
DEL AGUA MEDIANTE LA
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE
PERCEPCIÓN REMOTA**

**ALBA B. VÁZQUEZ GONZÁLEZ
RODRIGO T. SEPÚLVEDA HIROSE
VICENTE FUENTES GEA**

Agradecimiento

Agradecemos a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) el financiamiento otorgado al proyecto IN107710 “*Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota*”, a través del **PROGRAMA DE APOYO A PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (PAPIIT)**. El presente trabajo forma parte del citado proyecto.

ÍNDICE

Presentación7

CAPÍTULO 1. EVALUACIÓN TRADICIONAL DE LA CALIDAD DEL AGUA

1.1 EVALUACIÓN TRADICIONAL DE LA CALIDAD DEL AGUA

1.1.1 Usos del agua y su calidad.....10

1.1.2 Planeación de estudios de campo.....13

1.1.3 Actividades de gabinete y en campo16

1.1.4 Actividades de laboratorio.....19

1.1.5 Evaluación de la calidad del agua27

1.2 CASO ESTUDIO: PRESA VALLE DE BRAVO

1.2.1 Información de la zona de estudio31

1.2.2 Sitios de muestreo.....36

1.2.3 Técnicas de muestreo, preservación de muestras y análisis.....37

1.2.4 Resultados.....48

1.2.5 Análisis y discusión de resultados54

1.2.6 Conclusiones y recomendaciones.....62

ÍNDICE

CAPÍTULO 2. PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

2.1 PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

2.1.1 Concepto de Percepción Remota.....	65
2.1.2 Modelos de Radiación Electromagnética.....	67
2.1.3 Leyes de radiación	70
2.1.4 Terminología y unidades de medida	72
2.1.5 Reflexión especular y difusa	74
2.1.6 Radiancia y Reflexión	74
2.1.7 Irradiancia solar	75
2.1.8 La atmósfera.....	77
2.1.9 Curvas espectrales	81
2.1.10 Percepción remota activa y pasiva.....	83
2.1.11 Satélites para la observación de recursos terrestres.....	86
2.1.12 Satélites meteorológicos.....	87
2.1.13 Características de los sistemas sensores	87

ÍNDICE

2.2. CONCEPTO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

2.2.1 Componentes de un SIG.....92

2.2.2 Modelo raster y vectorial.....93

2.2.3 Funciones de los SIG.....94

2.2.4 Estructura de los SIG y capas temáticas95

2.2.5 PR y SIG97

2.3. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES CON EL USO DE SOFTWARE DE SIG

2.3.1 Estructura básica de una imagen digital97

2.3.2 Preprocesamiento y rectificación de imagen.....100

2.3.3 Distorsiones y correcciones geométricas103

2.3.4 Realce de la imagen.....105

2.3.5 Visualización en imágenes multibanda111

2.3.6 Transformaciones de la imagen112

2.3.7 Clasificación digital116

ÍNDICE

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

3.1 Plataforma seleccionada.....	131
3.2 Bandeado en imágenes Landsat 7.....	133
3.3 Planeación de las fechas del muestreo y adquisición de las imágenes.....	134
3.4 Determinación de sitios de muestreo	135
3.5 Corrección atmosférica	136
3.6 Composición de bandas	141
3.7 Detección de bordes	142
3.8 Determinación de superficie de embalses	145
3.9 Determinación de sitios de muestreo con PR	146
3.10 Variación de calidad mediante detección de bordes	151
3.11 Procesamiento de datos	152
3.12 Generación de los modelos	155
3.13 Generación de mapas de calidad	167
3.14 Comprobación de los modelos	176
BIBLIOGRAFÍA	179

PRESENTACIÓN

La presente publicación es uno de los más importantes productos del proyecto de investigación “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota”, patrocinado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación y Desarrollo Tecnológico (PAPIIT) de la Dirección General de Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México, desarrollado durante 2010 y 2011. El objetivo de la investigación que se planteó fue establecer una metodología que permitiera diseñar modelos de calidad del agua mediante el uso de la percepción remota (PR) y datos de campo, para que a partir de aquellos, pueda monitorearse la calidad del agua únicamente a partir de imágenes satelitales.

Prácticamente no hay experiencias en México del uso de la PR en la evaluación de la calidad del agua, por lo tanto es necesaria la formación de recursos humanos que contribuyan a impulsar las aplicaciones en el campo de calidad del agua y, en general, en diversas aplicaciones en la ingeniería ambiental. El diseño de modelos de calidad del agua mediante la PR puede contribuir de manera muy significativa a la formulación de planes y programas que permitan vigilar la calidad del agua de ríos, lagos naturales y artificiales, humedales y costas del país. Algunas de las ventajas de la PR en la evaluación de la calidad del agua son: la visión sinóptica proporciona una riqueza extraordinaria de datos si se le compara con los que pueden obtenerse del muestreo y colección de datos de superficie; además, el monitoreo de grandes cuerpos de agua puede lograrse económicamente; rapidez en la adquisición de datos de calidad del agua; estudio de zonas inaccesibles o con acceso a alto costo; también puede utilizarse como apoyo en la planeación de los programas de muestreo y definición de puntos de muestreo o localización permanente de instrumentos para el muestreo.

La estrategia para generar los modelos de calidad del agua a partir de la información de campo e imágenes satelitales fue aplicada a un caso estudio: el vaso de la presa Valle de Bravo. Localizada al poniente del Estado de México, a 85 km de la Cd. de Toluca y a 145 km de la Cd. de México. Se trata de un cuerpo de agua originalmente concebido con fines de generación hidroeléctrica y que actualmente es una presa multipropósito: aporta 6 m³/s al caudal del Sistema Cutzamala, que abastece a la Cd. de México (38% de todo el sistema); es un vaso regulador de avenidas y es un destino turístico muy visitado, consolidándose como la presa para uso recreativo más importante del país. El gasto que aporta es conducido hacia la planta de tratamiento de agua para consumo humano Los Berros, la más grande potabilizadora de agua superficial en el país.

Esta publicación está dividida en 3 capítulos. El Capítulo 1 “Evaluación tradicional de la calidad del agua” incluye la planeación de los estudios de calidad, actividades de gabinete y campo, actividades de laboratorio y metodología para la evaluación de la calidad del agua.

En la segunda parte de este capítulo se presenta el caso estudio de la presa Valle de Bravo, describiendo todas las actividades de la evaluación tradicional, los datos de calidad obtenidos en tres campañas de muestreo (dos realizadas en 2010 y una en 2011), para terminar con el diagnóstico de la calidad del agua, y las conclusiones y recomendaciones del vaso de la presa Valle de Bravo.

El Capítulo 2 “Fundamentos de la percepción remota y los sistemas de información geográfica” presenta los fundamentos de la PR y los sistemas de información geográfica (SIG), conceptos que además permiten comprender la metodología desarrollada en el Capítulo 3 de la presente publicación.

El Capítulo 3 “Metodología para la evaluación de la calidad del agua usando percepción remota” incluye: las aplicaciones de la percepción remota a la evaluación de la calidad del agua, definición de sitios de muestreo, planeación de los estudios de campo, generación de modelos de calidad y determinación del grado de ajuste, además de la generación de mapas de calidad del agua para el vaso de la presa Valle de Bravo, a partir de los modelos matemáticos.

Esta publicación difunde los resultados de la investigación, pero también pretende servir como material de estudio para los alumnos de la licenciatura en ingeniería civil (área de sanitaria y ambiental), especialización en ingeniería sanitaria (opción administración de la calidad del agua) y la maestría en ingeniería ambiental (calidad del agua).

CAPÍTULO 1

EVALUACIÓN TRADICIONAL DE LA CALIDAD DEL AGUA

En la primera parte de este capítulo se describen las actividades principales relacionadas con la evaluación tradicional de la calidad del agua, las cuales incluyen la planeación de los estudios de calidad, las actividades que se desarrollan en campo y laboratorio, y finalmente una metodología para evaluar la calidad del agua.

En la segunda parte de este capítulo se presentan las actividades desarrolladas como parte del proyecto PAPIIT IN107710 “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota”, en lo que se refiere a la generación de información mediante tres campañas de muestreo de calidad del agua en el vaso de la presa Valle de Bravo, información que fue requerida para desarrollar la aplicación de la percepción remota. Las campañas se realizaron en abril y octubre de 2010 y la tercera en marzo de 2011; se llevaron a cabo diversas actividades consistentes en la obtención de información de gabinete, campo y laboratorio.

En la parte correspondiente al estudio de calidad del agua se recopiló la información documental de la zona de estudio, se obtuvieron las imágenes satelitales del vaso de la presa Valle de Bravo correspondientes a las fechas de los muestreos, y se planearon y desarrollaron los trabajos de campo (muestreo) y análisis en campo y laboratorio correspondientes a las épocas de estiaje y de lluvias.

CALIDAD DEL AGUA



Figura 1.1 Estudiar la calidad que presentan los cuerpos de agua es de suma importancia, ya que permite obtener información útil en la administración y explotación de los mismos

1.1 EVALUACIÓN TRADICIONAL DE LA CALIDAD DEL AGUA

1.1.1 Usos del agua y su calidad

El agua es un recurso natural indispensable para la vida, así como para el desarrollo de diversas actividades, de acuerdo con las Estadísticas del Agua en México (CONAGUA, 2007), los usos más importantes del agua incluyen: la agricultura con 77%, el uso público con 14%, la energía eléctrica 5%, y la industria con 4%, Figura 1.2.

Dada la importancia que tiene el agua para la vida y para el desarrollo de diversas actividades, es necesario protegerla para evitar su contaminación (Figura 1.3) y garantizar la calidad para los diferentes usos. Por otra parte, el agua debe usarse de manera responsable y eficiente, ya que en algunas regiones del país su baja disponibilidad dificulta el abastecimiento y propicia que las pocas fuentes de agua sean sobreexplotadas.

Con base en el artículo 30 de la Ley de Aguas Nacionales, el Cuadro 1.1 presenta la terminología y conceptos de usos que se le dan al agua en México.

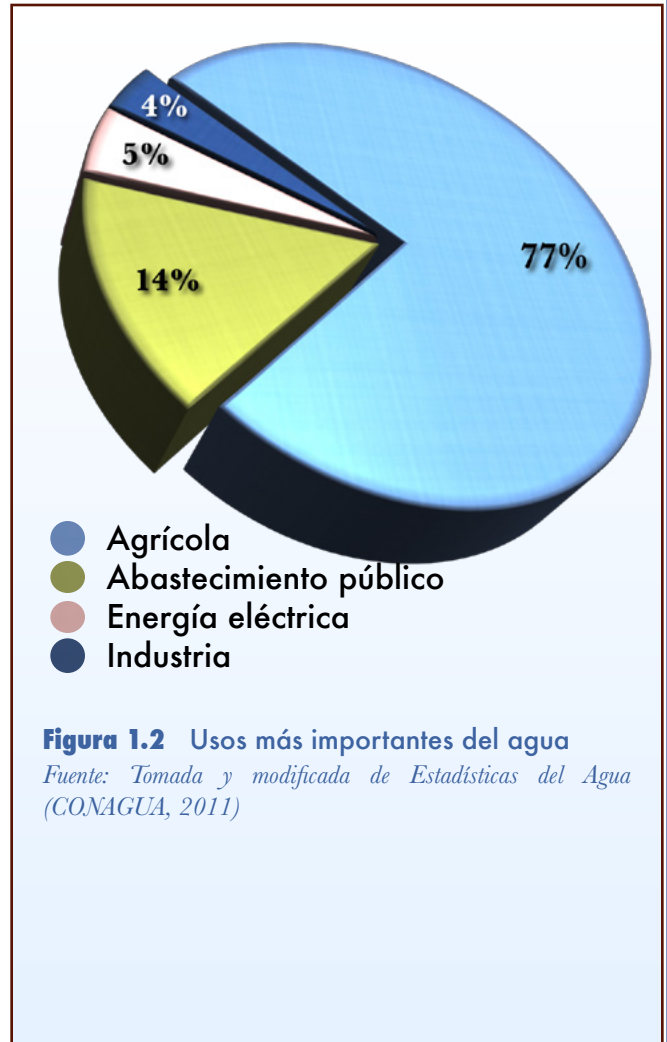


Figura 1.3 Contaminación antropogénica del embalse Valle de Bravo



Cuadro 1.1 Terminología y conceptos de usos del agua

TÉRMINO	CONCEPTO
Uso	Aplicación del agua a una actividad que implique el consumo, parcial o total de ese recurso.
Uso agrícola	La aplicación de agua nacional para el riego destinado a la producción agrícola y la preparación de ésta para la primera enajenación, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial.
Uso ambiental o Uso para conservación ecológica	El caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo corrientes de diversa índole o embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero, que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema.
Uso consuntivo	El volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga, y que se señalan en el título respectivo.
Uso doméstico	La aplicación de agua nacional para el uso particular de las personas y del hogar, riego de sus jardines y de árboles de ornato, incluyendo el abrevadero de animales domésticos que no constituya una actividad lucrativa, en términos del Artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
Uso en acuicultura	La aplicación de aguas nacionales para el cultivo, reproducción y desarrollo de cualquier especie de la fauna y flora acuáticas.
Uso industrial	La aplicación de aguas nacionales en fábricas o empresas que realicen la extracción, conservación o transformación de materias primas o minerales, el acabado de productos o la elaboración de satisfactores, así como el agua que se utiliza en parques industriales, calderas, dispositivos para enfriamiento, lavado, baños y otros servicios dentro de la empresa, las salmueras que se utilizan para la extracción de cualquier tipo de sustancias y el agua aun en estado de vapor, que sea usada para la generación de energía eléctrica o para cualquier otro uso o aprovechamiento de transformación.
Uso pecuario	La aplicación de aguas nacionales para la cría y engorda de ganado, aves de corral y otros animales, y su preparación para la primera enajenación siempre que no comprendan la transformación industrial; no incluye el riego de pastizales.
Uso público urbano	La aplicación de agua nacional para centros de población y asentamientos humanos, a través de la red municipal.

Fuente: Artículo 30 de la Ley de Aguas Nacionales (publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1° de diciembre de 1992, con última reforma publicada el 20 de junio de 2011)

Los diferentes usos que pueden darse al agua dependen de su calidad, es decir, de acuerdo al uso para el que se requiera el agua, se evalúa la calidad de la misma a través de la determinación de varios parámetros físicos, químicos y biológicos, con lo que se evalúa si el agua es apta para una determinada actividad o uso.

El 13 de diciembre de 1989, se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE – CCA – 001/89), formulados por la entonces, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, con base en los citados criterios el Cuadro 1.2 incluye las condiciones generales de calidad del agua para los diferentes usos.

Cuadro 1.2 *Condiciones generales de calidad del agua para diferentes usos*

CALIDAD DEL AGUA	CONDICIONES GENERALES DE CALIDAD DEL AGUA
Calidad para la protección de la vida de agua dulce	Grado de calidad del agua, requerido para mantener las interacciones e interrelaciones de los organismos vivos, de acuerdo al equilibrio natural de los ecosistemas de agua dulce continental.
Calidad para la protección de la vida de agua marina	Grado de calidad del agua, requerido para mantener las interacciones e interrelaciones de los organismos vivos, de acuerdo al equilibrio natural de los ecosistemas de agua marina.
Calidad para uso en la acuicultura	Grado de calidad del agua, requerido para las prácticas de acuicultura que garantiza el óptimo crecimiento y desarrollo de las especies cultivadas, así como para proteger su calidad para el consumo humano.
Calidad para riego agrícola	Grado de calidad del agua, requerido para llevar a cabo prácticas de riego sin restricción de tipos de cultivo, tipos de suelo y métodos de riego.
Calidad para uso como fuente de abastecimiento de agua potable	Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada como abastecimiento de agua para consumo humano, debiendo ser sometida a tratamiento, cuando no se ajuste a las disposiciones sanitarias sobre agua potable.
Calidad para uso pecuario	Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada como abastecimiento de agua para consumo por los animales domésticos, que garantiza la protección de su salud y la calidad de los productos para consumo humano.
Calidad para uso recreativo con contacto primario	Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada en actividades de esparcimiento, que garantiza la protección de la salud humana por contacto directo.

Adicionalmente existen normas en las que se establecen límites permisibles de cada parámetro, para poder considerar que el agua es apta para un uso, por ejemplo: la NOM – 127 – SSA1 – 1994, que establece los límites permisibles de calidad del agua para uso y consumo humano, la NOM – 003 – SEMARNAT – 1997, en la que se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Fuente: *Criterios ecológicos de calidad del agua (CE – CCA – 001/89), DOF 13 de diciembre de 1989*

1.1.2 Planeación de estudios de campo

La evaluación de los parámetros de calidad del agua es muy importante, y el monitoreo de la calidad de los cuerpos de agua permite conocer las características de los sistemas hídricos y los posibles focos de contaminación. La evaluación mediante métodos convencionales se practica comúnmente en nuestro país. Dichos métodos incluyen la realización de muestreos en campo, análisis de calidad del agua en campo y laboratorio, y evaluación de la calidad del agua. Se presentan a continuación los aspectos más relevantes que deberán considerarse en la planeación de un estudio de campo.

a) **Definición clara del objetivo del estudio.** Es preciso definir claramente el objetivo, con lo que se podrá establecer cuáles serán las actividades que se llevarán a cabo para cumplirlo.

b) **Recopilación de la información disponible.** La recopilación de información, ayudará a conocer mejor el área de estudio. Esta información incluye los usos del agua, la ubicación de puntos de interés para el estudio y saber si existen estudios previos en la misma zona.

c) **Definición de posibles localizaciones de los puntos de muestreo.** Teniendo en cuenta la información recabada, el objetivo del estudio y los recursos para realizarlo, se determinan los posibles puntos de muestreo (Figura 1.3). La ubicación de los sitios de muestreo debe proporcionarse en forma tal que sea fácil de identificar y que en caso de ser necesario, cualquier persona pueda realizar muestreos en los mismos sitios posteriormente. De preferencia es recomendable disponer de un receptor de posicionamiento global GPS. En la norma NMX – AA – 014 – 1980 Cuerpos receptores-muestreo, se establece que para muestreo en cuerpos receptores debe haber una red de muestreo que represente las condiciones particulares del cuerpo receptor. A continuación, se presentan las recomendaciones de muestreo en ríos y en lagos y embalses.

c.1) **En ríos.** Se debe muestrear aguas arriba de la descarga, a una distancia tal que, no se manifieste la influencia de esta; en la descarga, lo más próximo posible a su desembocadura al cuerpo receptor; se recomienda muestrear a una distancia tal que el cuerpo receptor haya absorbido el efecto de la descarga, para apreciar el grado de recuperación del cuerpo receptor, y en aquellos sitios en que se aprecien cambios fuertes de sección, caídas, zonas cubiertas de lirio u otros organismos eutroficantes.

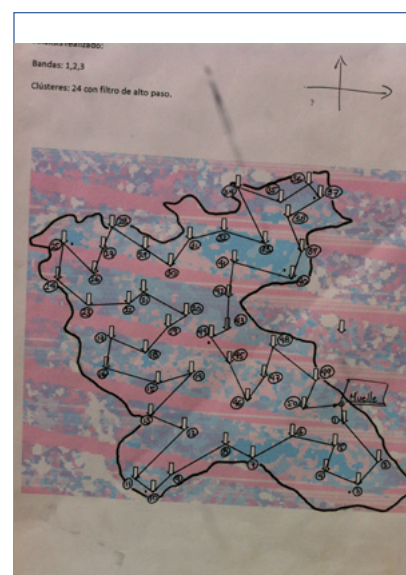


Figura 1.3 Planeación de sitios y ruta de muestreo para el embalse Valle de Bravo

c.2) **En lagos, lagunas, presas y embalses.** Debe muestrearse en los efluentes antes de desembocar al cuerpo receptor (Figura 1.4), dentro de él, donde se aprecie una mezcla uniforme con los efluentes y en las salidas del cuerpo receptor.

d) **Determinación de la frecuencia del muestreo.** Para determinar la frecuencia y número de muestras que se deberán tomar es necesario definir las épocas de precipitación pluvial y de estiaje, y, en la medida de lo posible, saber en dónde se ubican las descargas de industrias, la localización de los ríos tributarios, ubicación de poblaciones, etcétera. Con base en toda esta información, determinar cada cuánto se realizará el muestreo y el número de muestras que se incluirán en el estudio. En cuanto al tipo de muestra que se tomará, dependerá de la característica que se desea investigar y puede ser una muestra simple o una compuesta.

Muestra simple. Es aquella que se toma en un punto y en un momento determinado. Este tipo de muestras proporcionan características instantáneas del cuerpo de agua del que proceden, su uso es recomendable cuando se desean conocer los efectos de una descarga puntual, las características extremas, conocer las variaciones de la composición de una descarga (en función del tiempo), y cuando el agua que se desea investigar fluye solo intermitentemente.

Muestra compuesta. Es la muestra que se forma por la composición de 2 ó más muestras simples; la muestra puede ser compuesta respecto al tiempo; es decir, que se obtiene al combinar 2 ó más muestras tomadas en el mismo sitio, pero en diferentes instantes de tiempo. Puede ser compuesta respecto al espacio, es decir, que se obtiene al combinar muestras tomadas en diferentes puntos de un cuerpo de agua, durante un mismo intervalo de tiempo. Y puede ser compuesta en función del caudal, que es la que se obtiene al combinar varias muestras tomadas en cantidad proporcional al caudal de cada muestra. El muestreo compuesto se realiza cuando se desea conocer la calidad promedio de un cuerpo de agua, de una descarga y cuando se incluya un análisis de variaciones de flujo del cauce o descarga estudiados.

e) **Establecimiento de los parámetros que se medirán.** Esto dependerá del fin específico del estudio de calidad y de los recursos económicos, de material y de equipo con los que se cuente para su realización.



Figura 1.4 Los lugares en donde desembocan corrientes en un embalse son sitios importantes para considerar en un muestreo

f) **Elaboración de la lista de material, equipo y reactivos que se utilizarán en el estudio de campo.** Deberá prepararse una lista de material, equipo y reactivos necesarios para realizar el estudio de campo, revisar que se cuente con la cantidad suficiente de ellos y que se encuentren en buen estado para poder realizar cada actividad.

g) **Necesidades de personal.** Verificar que se cuente con el personal necesario y asegurarse que esté capacitado para realizar las actividades asignadas, o en caso de ser necesario reciba la capacitación necesaria para realizarlas.

h) **Establecimiento de medidas de seguridad.** Son fundamentales pues debe protegerse al personal durante el traslado a los sitios de muestreo, durante la toma de muestras y el traslado al laboratorio; también debe haber medidas de seguridad para la protección y preservación de las muestras y de los equipos que se vayan a utilizar.

i) **Definición de los medios de transporte.** Decidir el medio de transporte y la ruta que se utilizarán para llegar al sitio de estudio y para volver al laboratorio en el que posteriormente se harán las pruebas. Es muy importante considerar este aspecto, pues se requiere preservar las muestras recolectadas. No debe excederse el tiempo recomendado entre el muestreo y análisis y deben utilizarse los métodos de preservación que se presentan en el Cuadro 1.3. Desde el gabinete deberá definirse también el medio de transporte que se utilizará hacia el sitio y en él (en caso de ser necesario) para recolectar las muestras en los lugares previamente seleccionados.

Cuadro 1.3 Resumen de parámetros a muestrear en cuerpos de agua, sus características para la toma de muestra, preservación y tiempo de análisis

Parámetro	Volumen mínimo requerido (mL)	Recipiente	Preservación	Tiempo máximo de análisis
Oxígeno disuelto	---	---	Analizar inmediatamente	---
Temperatura del agua	---	---	Analizar inmediatamente	---
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	1,000	Plástico	4°C	48 horas
Cloruros	100	Plástico	4°C	7 días
Coliformes fecales y totales	150	Bolsa o frasco de vidrio estéril	Previamente con EDTA+ Na2S2O3, 4°C	24 horas
Conductividad eléctrica	---	---	Analizar inmediatamente	---
Dureza como CaCO3	250	Plástico	HNO3, pH<2, 4°C	180 días
Alcalinidad como CaCO3	100	Plástico	4°C	7 días
Potencial de hidrógeno (pH)	---	---	Analizar inmediatamente	---
Grasas y aceites	1,000	Vidrio, boca ancha	HCl pH<2, 4°C	28 días
Sólidos suspendidos	1,000	Plástico	4°C	7 días
Sólidos disueltos	500 - 1,000	Plástico	4°C	7 días
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	500	Plástico	H2SO4, pH<2, 4°C	7 días
Nitratos	200	Plástico	H2SO4, pH<2, 4°C	7 días
Nitrógeno amoniacal	200	Plástico	H2SO4, pH<2, 4°C	7 días
Fósforo total	1000	Plástico	4°C	28 días
Color verdadero	200	Plástico	4°C	2 días
Turbiedad	200	Plástico	4°C	1 a 2 días

En negritas. Parámetros medidos in situ. 1/ EDTA.- Sal tetrasódica de ácido etilén-diamino-tetraacético, al 15%; Na2S2O3.- Tiosulfato de sodio al 10%; HCl.- ácido clorhídrico concentrado; HNO3.- ácido nítrico concentrado; H2SO4.- ácido sulfúrico concentrado; NaOH.- Hidróxido de sodio.

Fuente: Tomado de Unidad didáctica para la aplicación de la nmx-aa-014-1980, cuerpos receptores- muestreo, SEMARNAT, CNA, IMTA, 2004.

j) **Visita de reconocimiento al sitio de muestreo.** Es recomendable realizar una visita de reconocimiento al sitio de muestreo, pues permitirá conocer información que podría ser de utilidad para realizar el estudio, seleccionar la ruta de acceso y con base en lo observado durante la visita podría modificarse el plan de muestreo.

k) **Estimación del costo del estudio de campo.** Es importante saber el monto de los recursos económicos con los que se cuenta y a qué conceptos se destinarán. Los principales conceptos a considerar incluyen: adquisición de equipo, materiales, reactivos, análisis de laboratorio, el número de muestras y parámetros que se medirán. Es decir, los recursos económicos limitarán los alcances del estudio de calidad del agua.

1.1.3 Actividades de gabinete y en campo

Como parte de estas actividades, se realiza la recopilación de información de la cuenca a la que pertenece el sitio de estudio, sus características sociales, económicas, hidrológicas, los sitios en donde hay descargas de contaminantes y los usos del agua. Con base en la información recabada, se seleccionan los sitios de muestreo, los cuales podrían modificarse si al realizar una visita de reconocimiento se considera conveniente aumentar o disminuir estos sitios. Esta visita servirá para obtener información adicional a la documental obtenida en gabinete, ubicar y verificar los sitios en los que hay descargas de desechos, determinar si los sitios que previamente fueron seleccionados para muestrear son de fácil acceso (si deben incluirse en el estudio), hacer una estimación del tiempo que se requiere para realizar la recolección de muestras y la medición de parámetros. Esto es importante porque hay que preservar las muestras para obtener datos que sean representativos de las condiciones en las que se encuentra el cuerpo de agua que se estudia.

Se realizará la medición de algunos parámetros en campo (Figura 1.6), y la toma de muestras que se etiquetarán para poder saber el punto en el que fueron recolectadas y el tipo de análisis de laboratorio que se les aplicará. También se tomarán las medidas necesarias para preservarlas adecuadamente hasta su análisis en laboratorio.

A continuación se presentan las recomendaciones de algunas normas técnicas mexicanas en cuanto a la preservación, recolección y almacenamiento de muestras.



Figura 1.5 Descarga directa en el embalse Valle de Bravo. La visita de reconocimiento permite identificar información adicional que es muy difícil de obtener por otros medios, como son descargas, puntos de fácil y difícil acceso, y otros aspectos del embalse

Análisis de sólidos

NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.

Deben tomarse un mínimo de 500 ml de muestra en envases de polietileno y taparse inmediatamente después de la colecta. Pueden utilizarse muestras compuestas o simples. Debe preservarse la muestra a 4 °C hasta su análisis.

El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 7 días. Sin embargo, se recomienda realizar el análisis dentro de las 24 horas posteriores a su colecta.

NMX-AA-004-SCFI-2000. Análisis de agua – Determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.

Colectar un volumen de muestra homogéneo y representativo superior a 1000 ml en un frasco de polietileno o vidrio con tapa, teniendo siempre en cuenta que el material en suspensión no debe adherirse a las paredes del recipiente.

No se recomienda la adición de agentes preservadores. Transportar la muestra y mantenerla a 4 °C hasta realizar el análisis. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 7 días. Sin embargo, se recomienda realizar el análisis dentro de las 24 horas posteriores a su colecta.

Análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

NMX – AA – 028 – SCFI – 2001. Análisis de agua – Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas – Método de prueba.

En el caso de aguas naturales debe tomarse un mínimo de 1000 ml de muestra en un envase de polietileno o vidrio. En el caso de aguas residuales (DBO5 mayores a 50 mg/L) deben tomarse mínimo 100 mL. Pueden utilizarse muestras simples o compuestas. No se debe agregar ningún preservador a las muestras. Solo deben conservarse a 4°C hasta su análisis. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 24 horas.



Figura 1.6 Algunos parámetros pueden determinarse en el sitio del muestreo gracias a medidores como el que se muestra en la imagen

Análisis de coliformes fecales y totales

NMX-AA-042-1987. Calidad del agua determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva.

El procedimiento para la recolección de las muestras de agua para el análisis bacteriológico depende del tipo de agua que se desee muestrear. Las muestras para el análisis bacteriológico, se deben tomar en frascos muestreadores que se hayan lavado con extremo cuidado y esterilizado. En su interior se coloca previo a la esterilización, 0.1cm³ de solución de Tiosulfato de Sodio al 1% con el propósito de inhibir la acción del cloro que pueda contener la muestra, cubriendo además el tapón del frasco hasta el cuello con papel aluminio. El análisis bacteriológico de la muestra debe practicarse inmediatamente después de su recolección. Es por ello que se recomienda que de no efectuarse así el análisis, se inicie dentro de las dos horas próximas a la recolección de la muestra y, en ningún caso, este lapso debe exceder de 24 horas para agua potable y de 6 horas en caso de otros tipos de agua para que sea válido el resultado del análisis. Durante el periodo que transcurra del muestreo al análisis, se debe conservar la muestra a 4°C, con objeto de inhibir la actividad bacteriana para no obtener resultados falsos o dudosos.

NMX-AA-102-SCFI-2006. Calidad del agua detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva – Método de filtración en membrana.

El análisis bacteriológico de la muestra debe practicarse inmediatamente después de su recolección, es por ello que se recomienda que de no efectuarse así, el análisis se inicie dentro de las seis horas próximas a la recolección de la muestra y, en ningún caso, este lapso debe exceder de 24 horas. Durante el periodo que transcurre del muestreo al análisis, se debe conservar la muestra a 4°C, con objeto de inhibir la reproducción bacteriana.

Análisis de turbiedad

NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.

La muestra debe de ser colectada en frascos de vidrio o polietileno de boca ancha, cierre hermético y tapa inerte. Debe contener un volumen mínimo de 100 ml. Las muestras deben de mantenerse en refrigeración durante el transporte al laboratorio. Las muestras deben de analizarse lo antes posible y mientras permanezcan en el laboratorio deben conservarse en refrigeración a 4°C.

1.1.4 Actividades de laboratorio

Las actividades de laboratorio son parte fundamental de un estudio de calidad del agua, ya que permiten obtener los valores de parámetros que no es posible realizar en campo por el material y equipo que se necesita o por el tiempo que se requiere.

Los métodos utilizados para realizar análisis de laboratorio incluyen los siguientes:

Análisis gravimétricos que dependen del peso de los sólidos obtenidos directamente al pesar una muestra que ha pasado por evaporación, filtración o precipitación.

Análisis volumétricos que dependen de la medición de volúmenes de un reactivo líquido de concentración conocida.

Análisis colorimétricos se basan en la formación de un producto completamente soluble con un color estable y la solución coloreada debe cumplir con la Ley de Beer, la cual establece que: la absorción de la luz aumenta exponencialmente con la concentración de la solución absorbente, y con la Ley de Lambert que dice: la intensidad de la luz transmitida es inversamente proporcional a la longitud de onda de la solución. El color producido se puede medir por métodos visuales o instrumentales. Análisis instrumentales se basan en la medición del potencial eléctrico mediante el uso de electrodos para ciertos iones específicos.

Análisis biológicos pueden ser de cuenta directa de organismos, microorganismos o bioensayos.

Dependiendo de los recursos con los que se cuente y de los fines para los que se elabore el estudio las actividades de laboratorio que deberán realizarse en un estudio de calidad del agua son muy diversas.

Para la realización de los análisis de laboratorio existen normas mexicanas que establecen el control de calidad que deben tener los laboratorios que realicen las pruebas, con relación a los materiales, equipos, reactivos, y procedimientos; aspectos que deben considerarse durante la recolección, preservación y almacenamiento de las muestras.



Parámetros físicos de calidad del agua

La medición de los parámetros físicos de la calidad del agua en muchos casos es relativamente fácil, algunas de estas características pueden percibirse a través de los sentidos. Los parámetros organolépticos normalmente tienen poco significado para la salud. Los siguientes son algunos de los parámetros físicos de calidad del agua.

Color

El color en el agua puede deberse al contenido natural de metales o iones metálicos en disolución, humus, residuos orgánicos, plancton o desechos industriales.

El color que se produce en el agua debido a materia suspendida y disuelta es el color aparente, y el que permanece una vez que se ha eliminado la materia suspendida es el color verdadero. En general, el término color se refiere a este último.

La unidad de color es el color producido por un mg/l de Platino, en la forma de ion Cloroplatinato; se denominan unidades de color en la escala Platino – Cobalto (UC Pt – Co). El color puede determinarse por comparación visual de la muestra con soluciones coloridas de concentraciones conocidas o con discos de vidrio de colores previamente calibrados.

Potencial Hidrógeno

El pH indica la concentración de iones Hidrógeno $[H^+]$ en una disolución acuosa, ecuación (1.1)

$$pH = -\log_{10} [H^+] = \log_{10} \frac{1}{[H^+]} \quad \dots (1.1)$$

La escala del pH puede tomar valores de 0 a 14, el pH=7 corresponde a una disolución neutra, mientras que un pH menor a 7 indica que se trata de una disolución ácida, un pH superior a 7 indica que se trata de una disolución alcalina. La actividad biológica se restringe a valores de pH entre 6 y 8.

Temperatura

La temperatura del agua afecta otras propiedades como: la solubilidad de los gases, la cinética de las reacciones químicas y bioquímicas, el crecimiento de los microorganismos, entre otras.

Conductividad

Es la capacidad del agua para permitir el paso de la electricidad. Depende de la concentración de sustancias en solución, cuya disociación genera iones capaces de transmitir la energía eléctrica. Debido a que en el agua el valor de la conductividad es pequeño, se expresa en $\mu\text{mhos/cm}$ o en $\mu\text{siemens/cm}$, $1 \text{ mho} = 1 \text{ siemens}$.

Turbiedad

Es la expresión de la propiedad óptica de una muestra de agua que provoca que al pasar a través de ella los rayos de luz sean dispersados y absorbidos, en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra. La turbiedad en el agua puede ser causada por partículas suspendidas y disueltas, como arcilla y limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, descargas de agua residual, desechos industriales o la presencia de numerosos microorganismos.

La unidad de turbiedad fue definida como “la obstrucción óptica de la luz, causada por una parte por millón de sílice en agua destilada”

1 unidad de turbiedad nefelométrica (UTN)= 7.5 ppm de SiO₂

Actualmente, la unidad utilizada es la UTN, unidad de turbiedad nefelométrica y que equivale a:

1UTN = 1ppm de formazina estándar

La turbiedad también puede determinarse en campo empleando el disco de Secchi (Figura 1.7) que es un instrumento de medición de la penetración luminosa, y por ello de la turbiedad en el agua. Se usa particularmente en cuerpos lénticos como: lagos, embalses y el mar, mide 30 centímetros de diámetro y está dividido en cuadrantes en blanco y negro alternativamente, para mejorar el contraste; está sostenido por una cadena que tiene la longitud marcada. Se introduce el disco en el agua lentamente hasta que se pierde de vista, y esta operación se repite al menos en 3 ocasiones y se anotan las tres mediciones de las cuales es posible obtener una media.

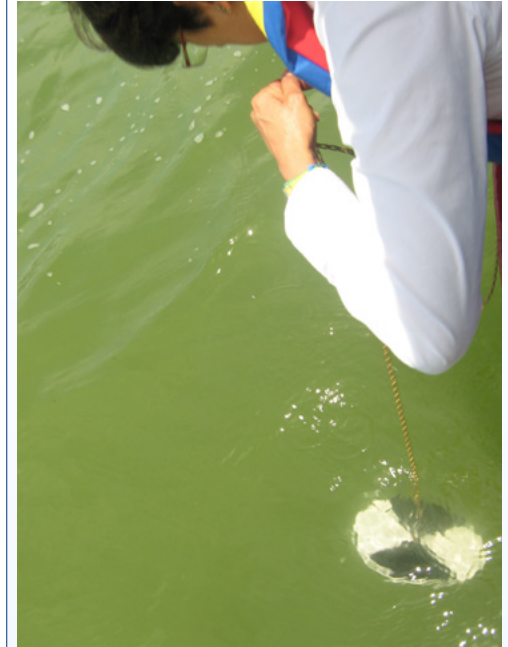


Figura 1.7 Las condiciones de turbiedad generalmente varían entre la época de estiaje y la de lluvias en un cuerpo de agua

Sólidos

Los sólidos (Figura 1.8) pueden estar en suspensión, solución o ambos y se dividen en materia orgánica e inorgánica. Los sólidos totales son el residuo que permanece después de la evaporación y secado a 103 °C de un volumen determinado de muestra, equivalen a la suma de los sólidos suspendidos y los disueltos, o bien, a la suma de los sólidos fijos y volátiles, y se miden en mg/l.

Los sólidos suspendidos o residuos no filtrables, son la materia que queda retenida en un filtro de fibra de vidrio con una porosidad de 2 µm o menor, se miden en mg/l. Los sólidos disueltos o filtrables son sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas en el agua que no son retenidas en un elemento filtrante; se pueden determinar directamente secando y evaporando una muestra, previamente filtrada, a 103 °C o por diferencia entre los sólidos suspendidos y los sólidos totales, sus unidades de medición son mg/l.

Los sólidos volátiles son la materia que se volatiliza por efecto de la calcinación a 550 °C, mientras que los sólidos fijos son aquellos que no se volatilizan a 550 °C. Los sólidos volátiles se asocian con material orgánico, mientras que los fijos se asocian con material inorgánico, la unidad de medición de estos sólidos es mg/l.

Los sólidos sedimentables son aquellos que se sedimentan por acción de la gravedad en un cono Imhoff al cabo de una hora, y que son medidos en ml/l.



Figura 1.8 Algunas etapas de la determinación de sólidos. La prueba se centra en determinar mediante diferencia de pesos el material contenido en un crisol o una cápsula de porcelana que se encuentre en la muestra analizada

Parámetros químicos y compuestos orgánicos de calidad del agua

Los parámetros químicos de calidad del agua están relacionados con la capacidad del agua para disolver diversas sustancias, que pueden ser de origen natural o por contaminación, y los efectos que estas sustancias pueden causar a la salud humana, a la flora y fauna del lugar, dependerán de su concentración en el agua.

Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad para reaccionar con iones hidrógeno (H^+). La alcalinidad es causada principalmente por los carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) e hidróxidos (OH^-) presentes en solución; contribuyen también a la alcalinidad la presencia de boratos, fosfatos y silicatos.

La alcalinidad en las aguas naturales y residuales es muy útil, ya que proporciona un amortiguamiento para resistir los cambios en el pH y se expresa como la concentración equivalente de iones Hidroxilo en mg/l, o la cantidad equivalente de $CaCO_3$, en mg/l.

Cloruros

Los cloruros proporcionan al agua un sabor salobre (los asociados al sodio) que varía dependiendo de los demás componentes en el agua. Los cloruros se encuentran en mayores concentraciones en las aguas residuales, debido al contenido de cloruro en la orina y las heces. Dado que algunas actividades humanas generan residuos con grandes concentraciones de cloruro, su presencia en las aguas es un buen indicador de afectación antrópica. Los cloruros en concentraciones razonables no son peligrosos para la salud.

Cloro residual

El cloro residual es la cantidad de cloro remanente después de un periodo de contacto especificado, protege al agua de contaminaciones posteriores. En el proceso de cloración se producen dos tipos de cloro residual, el cloro libre residual y el cloro combinado residual, que se forma cuando el agua tiene amoníaco y productos orgánicos.

Nitrógeno

Es importante, ya que las reacciones biológicas sólo pueden ocurrir en presencia de suficiente nitrógeno. La química del nitrógeno es compleja debido a los diferentes estados de valencia que puede tener este elemento y a que los cambios de valencia pueden efectuarlos organismos vivos.

En los ambientes acuáticos el nitrógeno puede presentarse en varias formas:

- Nitrato
- Nitrito
- Amoniacó
- Amonio
- Óxido Nitroso
- Nitrógeno molecular
- Nitrógeno orgánico disuelto: péptidos, purinas, aminas, aminoácidos.

Oxígeno disuelto

El oxígeno es esencial para mantener las formas superiores de vida biológica, desafortunadamente es poco soluble en el agua y aunque las aguas superficiales limpias están saturadas de oxígeno, la demanda de este elemento de los desechos orgánicos puede consumirlo rápidamente. El oxígeno disuelto depende de varios factores, tales como: la temperatura, la altitud, el movimiento del cuerpo receptor, entre otros.

Fosfatos

El fósforo es un nutriente esencial para los organismos vivos, su determinación es importante debido a la influencia que tiene en el proceso de eutroficación. Los fosfatos pueden provenir de diversas fuentes, como los detergentes, algunos procesos industriales, fertilizantes, escurrimientos superficiales y agua de uso de retorno agrícola.

El fósforo se encuentra principalmente en dos formas: ortofosfatos y polifosfatos. Las siguientes son las formas de ortofosfatos más comunes :

- Fosfato Trisódico (Na_3PO_4)
- Fosfato Disódico (Na_2HPO_4)
- Fosfato Monosódico (NaH_2PO_4)
- Fosfato de Amonio [$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$]

Las formas más comunes de polifosfatos son:

- Hexametafosfato de sodio [$\text{Na}_3(\text{PO}_5)_6$]
- Tripolifosfato de sodio ($\text{Na}_3\text{P}_5\text{O}_{10}$)
- Pirofosfato Trisódico

Demanda bioquímica de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable, bajo condiciones aerobias. Generalmente se determina la DBO_{5, 20}; si el agua está poco cargada de bacterias, se deberá inocular el agua y si los valores de DBO son elevados, entonces la solubilidad del oxígeno en el agua es limitado, por lo que deberán hacerse diluciones.

El agua de dilución se prepara con nutrientes que son necesarios para la actividad biológica y además se airea para saturarla de oxígeno antes de mezclarla con el agua de muestra. Las diluciones que se utilizan en ausencia de datos previos se presentan en el Cuadro 1.4.

La DBO se obtiene como la diferencia de oxígeno disuelto (Figura 1.9) inicial en el agua, menos el oxígeno disuelto final, sobre el porcentaje de dilución expresado en decimales.

$$DBO_{5,20} = \frac{OD_{inicial} - OD_{final}}{\%dilución} \quad \dots (1.2)$$

Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO) es una medida de la cantidad de oxígeno en mg/L consumida en la oxidación de las sustancias reductoras presentes en el agua; en un cuerpo de agua se entiende como la cantidad de materia orgánica e inorgánica susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte.

Esto se lleva a cabo por medio de la acción de agentes fuertemente oxidantes en un medio ácido y se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg O₂/l). La materia orgánica se oxida hasta dióxido de carbono y agua, mientras el nitrógeno orgánico se convierte en amoníaco. La oxidación usualmente se lleva a cabo químicamente mediante el uso del dicromato de potasio en una solución ácida.

Cuadro 1.4 Diluciones recomendadas para la prueba de la DBO

0% - 1%	Residuos industriales fuertes
1% - 5%	Aguas residuales sedimentadas o crudas
5% -25%	Efluente tratado bacteriológicamente
25% - 100%	Aguas superficiales contaminadas.

Fuente: NMX-AA-028-SCFI-2001



Figura 1.9 Titulación para la determinación de oxígeno disuelto durante la prueba de DBO

Análisis bacteriológicos

Indicadores de contaminación

La realización de análisis bacteriológicos en el agua es muy importante para el control de la calidad microbiológica, estos análisis están orientados a la detección de organismos patógenos, que causan enfermedades y se encuentran en el agua debido a la contaminación de la misma; sin embargo, la detección de estos patógenos es costosa, requiere de mucho tiempo y de laboratorios especializados, por lo que se realiza la detección de organismos indicadores, ya que la presencia de estos implica que los microorganismos patógenos también están presentes, pero su detección es más fácil, rápida y económica.

Las características que debe cumplir un microorganismo para ser considerado como indicador son las siguientes:

- No debe ser patógeno
- Debe estar presente cuando exista una contaminación fecal
- Debe ser fácil de aislar
- Estar presente en las heces de animales de sangre caliente
- Su tiempo de supervivencia debe ser igual o un poco superior al de los patógenos
- Debe formar parte de la flora intestinal de un individuo sano

La selección de un organismo indicador depende del tipo de contaminación que se está buscando.

Coliformes totales y fecales

Los coliformes son un grupo de bacterias consideradas un indicador de contaminación bacteriana en el agua, ya que se encuentran principalmente en el intestino de los humanos y de los animales de sangre caliente, permanecen en el agua por más tiempo que las bacterias patógenas y se comportan de manera similar a ellas en los sistemas de desinfección.

Los microorganismos que forman parte del grupo de los coliformes totales son: *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Edwardsiella* y *Citrobacter*; son bacilos Gram negativos, no esporulados, aerobios o anaerobios facultativos, a 35° C fermentan la lactosa con producción de gas, algunos pueden ser fermentadores tardíos como *Citrobacter*, o no fermentadores como *Serratia*.

Los coliformes fecales son un subgrupo de los coliformes totales formados por *Escherichia Coli* y ciertas especies de *Klebsiella*, fermentan la lactosa a 44.5° C, son un buen indicador de contaminación por materia fecal, ya que se encuentran en las heces de animales de sangre caliente. Los coliformes fecales se desarrollan a una temperatura superior a la de los coliformes totales.

1.1.5 Evaluación de la calidad del agua

Con el fin de evaluar la calidad o grado de contaminación del agua se han desarrollado diversos índices de calidad tanto generales como de uso específico. En México se emplea el llamado Índice de Calidad del Agua (ICA), que agrupa de manera ponderada algunos parámetros indicadores del deterioro de la calidad del líquido (León, 1991). El índice toma valores en una escala de 0 a 100, indicando el grado de contaminación; así, un agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a 0, en tanto que en el agua en excelentes condiciones el valor del índice será cercano a 100 (SARH 1979). El ICA se calcula a partir de una ponderación de 18 parámetros físicoquímicos, Cuadro 1.5.

Es importante mencionar que aunque el índice de calidad del agua es una herramienta muy útil en la evaluación de su calidad, ya que simplifica la interpretación de los resultados, se debe tener cuidado especial al utilizarlo, pues podrían cometerse errores al considerar únicamente el valor de este índice para evaluar la calidad de un agua, sin analizar cada parámetro individualmente, para corroborar que se cumple con lo establecido en la normatividad para un uso determinado.

Este índice de calidad de agua tiene como características que el valor del grado de contaminación determina el uso a que puede destinarse el agua de la cuenca hidrológica en estudio. El ICA puede ser calculado con la expresión 1.3.

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \dots (1.3)$$

Donde:

- ICA = Índice de calidad del agua global
- I_i = Índice de calidad para el parámetro i
- W_i = Valor de la importancia relativa del parámetro i
- n = Número total de parámetros

Para el cálculo del ICA se obtienen los índices de calidad de los parámetros a analizar con las ecuaciones que se presentan en el Cuadro 1.6. Cada parámetro tiene una importancia relativa o peso ponderando mostrado en el Cuadro 1.7; posteriormente se calcula el índice general de calidad del agua y se compara con el Cuadro 1.8 para obtener la calificación del agua en función del ICA.

Cuadro 1.5 Parámetros usados para determinar el ICA

Parámetros usados para determinar en Índice de Calidad del Agua (ICA)
Alcalinidad (ALC)
Cloruros (CLO)
Coliformes fecales (COF)
Coliformes totales (COT)
Color (COL)
Conductividad eléctrica (CON),
Demanda Bioquímica de Oxígeno (BDO5)
Detergentes (SAAM)
Dureza (DUR)
Fosfatos (P04)
Grasas y aceites (GyA),
Nitratos (NO3)
Nitrógeno amoniacal (N-NH3)
Oxígeno Disuelto (OD)
Potencial de hidrogeno (pH)
Sólidos disueltos (SDT)
Sólidos suspendidos (SST)
Turbiedad (TUR)

Fuente: Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, 2002.

Cuadro 1.6 Índice de Calidad individual para cada parámetro

Parámetro	Ecuación	Unidades
Alcalinidad	$I_A = 105 \cdot A^{-0.186}$	mg/l
Cloruros	$I_{Cl} = 121 \cdot Cl^{-0.223}$	mg/l
Coliformes fecales	$I_{CF} = 97.5 \cdot (5 \cdot CF)^{-0.27}$	NMP/ml
Coliformes totales	$I_{CT} = 97.5 \cdot CT^{-0.27}$	NMP/ml
Color	$I_C = 123 \cdot A^{-0.295}$	Unidades de color escala de Platino - Cobalto
Conductividad eléctrica	$I_{CE} = 540 \cdot CE^{-0.375}$	µS/cm
DBO	$I_{DBO} = 120 \cdot DBO^{-0.0673}$	mg/l
Detergentes	$I_{SAAM} = 100 - 16.678 \cdot SAAM - 0.1587 \cdot SAAM^2$	mg/l
Dureza total	$I_D = 10^{1.974 - 0.00174D}$	[mg/l] como CaCO ₃
Fosfatos totales	$I_{PO_4} = 34.215 \cdot PO_4^{-0.46}$	mg/l
Grasas y aceites	$I_{GyA} = 87.25 \cdot GyA^{-0.298}$	mg/l
N amoniacal	$I_{NH_3} = 45.8 \cdot NH_3^{-0.343}$	mg/l
N de nitratos	$I_{NO_3} = 162.2 \cdot NO_3^{-0.343}$	mg/l
Oxígeno disuelto	$I_{OD} = 100 \cdot \frac{OD}{OD_{sat}}$	mg/l
pH	Si pH < 6.7 $I_{pH} = 10^{0.2335pH + 0.440}$	Plástico
	Si 6.7 < pH < 7.3 $I_{pH} = 100$	Plástico
	Si pH > 7.3 $I_{pH} = 10^{4.22 - 0.293pH}$	Plástico
Sólidos disueltos	$I_{SD} = 109.1 - 0.0175 \cdot SD$	mg/l
Sólidos suspendidos	$I_{SS} = 266.5 \cdot SS^{-0.37}$	mg/l
Turbiedad	$I_T = 108 \cdot T^{-0.78}$	UTJ

Fuente: Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, 2002.

Cuadro 1.7 Importancia relativa o peso ponderado de cada parámetro

Parámetro	Peso (W)	Parámetro	Peso (W)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	5.0	Nitrógeno en nitratos (NO)	2.0
Oxígeno disuelto	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliformes fecales	4.0	Color	1.0
Coliformes totales	3.0	Dureza total	1.0
Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)	3.0	Potencial de Hidrógeno (pH)	1.0
Conductividad eléctrica	2.0	Sólidos suspendidos	1.0
Fosfatos totales (PO)	2.0	Cloruros (Cl)	0.5
Grasas y aceites	2.0	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal (NH)	2.0	Turbiedad	0.5

Fuente: Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, 2002.

Cuadro 1.8 Calificación del Agua en función del ICA

ICA		USOS DEL AGUA					
Valor	Criterio General	Abastecimiento o Público	Recreación General	Pesca y Vida Acuática	Industrial y Agrícola	Navegación	Transporte Desechos Tratados
100	No contaminado	No requiere purificación	Aceptable para cualquier deporte acuático	Aceptable para todos los organismos	No requiere purificación	Aceptable	Aceptable
90	Aceptable	Ligera purificación			Ligera purificación		
80		Mayor necesidad de tratamiento	Aceptable pero no recomendable	Excepto especies muy sensibles	Sin tratamiento para la industria		
70	Poco contaminado			Dudoso para especies sensibles			
60	Contaminado	Dudoso	Dudoso para el contacto directo	Solo Organismos muy resistentes	Con tratamiento en la mayor parte de la industria		
50			Sin contacto con el agua				
40	Altamente Contaminado	Inaceptable	Uso muy restringido	Inaceptable	Uso muy restringido	Restringido	
30			Inaceptable		Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable
20							
10	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable			
0					Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable

Nota: Los intervalos de las categorías del ICA son: 0-29, Altamente contaminado; 30-49, Contaminado; 50-69, Poco contaminado; 70-84, Aceptable; 85-100, No contaminado. La escala actual incluye diferencias tanto en algunos intervalos como en las denominaciones de algunas categorías respecto de las que se publicaron en la edición anterior de esta obra, lo cual obedece a que se busca tanto describir técnicamente de mejor manera lo que en la naturaleza ocurre, como lograr una mejor interpretación de la calidad del agua en el ámbito nacional. **Fuente:** Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, 2002.

El índice de calidad del agua también puede calcularse con el método de Dinius (1974) modificado por el Instituto de Ingeniería UNAM (1987), ecuación 1.4.

$$ICA = \prod_{i=1}^n Q_i^{W_i} \quad \dots (1.4)$$

Donde:

W_i = pesos específicos asignados a cada parámetro

Q_i = es la calidad del parámetro

Π = operación multiplicativa de las variables Q elevadas a la w

El ICA, calculado de esta forma, da como resultado un número entre 0 y 100 que permite calificar la calidad del agua y en función de su uso puede estimarse el grado de contaminación. El Cuadro 1.9 muestra las unidades de los parámetros y los valores de los pesos específicos W_i para el método de Dinius.

Cuadro 1.9 Pesos específicos de los parámetros para el método de Dinius

Parámetro	Unidad	Peso (W_i)
Oxígeno disuelto	% sat	0.103
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/l	0.096
Demanda Química de Oxígeno	mg/l	0.053
pH	u pH	0.063
Sólidos suspendidos	mg/l	0.033
Coliformes totales	#/100	0.083
Coliformes fecales	#/100	0.143
Nitratos	mg/l	0.053
N amoniacal	mg/l	0.043
Fosfatos	mg/l	0.073
Fenoles	µg/l	0.033
Diferencia de temperatura	°C	0.043
Alcalinidad	mg/l CaCO ₃	0.055
Dureza	mg/l CaCO ₃	0.058
Cloruros	mg/l	0.068

Fuente: Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, 2002.

1.2 ESTUDIO DE CASO: PRESA VALLE DE BRAVO

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación **PAPIIT IN107710 “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota”**, el cual tiene como uno de sus productos principales la generación de una metodología para el monitoreo de la calidad del agua, a través de la obtención de modelos matemáticos que correlacionan mediciones de radiancia y datos de calidad obtenidos en campo, dicha metodología fue probada a través de un caso estudio, el vaso de la presa Valle de Bravo.

1.2.1 Información de la zona de estudio

Localizada al poniente del Estado de México, a 85 km de la Cd. de Toluca y a 145 km de la Cd. de México, en los 19°21'30" latitud Norte y 100°11'00" de longitud Oeste, el embalse de Valle de Bravo es un cuerpo de agua originalmente concebido con fines de generación hidroeléctrica y actualmente es una presa multipropósito: aporta 6 m³/s al caudal del Sistema Cutzamala que abastece a la Cd de México (38% de todo el sistema); es un vaso regulador de avenidas; y es un destino turístico atractivo, consolidándose como la presa para uso recreativo más importante del país. La figura 1.10 muestra la localización de la presa Valle de Bravo.



El embalse se localiza al poniente del Estado de México, y su uso principal es el de abastecer al Sistema Cutzamala, además de representar un destino turístico muy importante en la región central del país

Figura 1.10 Localización del vaso de la Presa Valle de Bravo

El gasto que aporta es conducido hacia la planta potabilizadora Los Berros, la más grande potabilizadora de agua superficial en el país. Este embalse pertenece a la cuenca Valle de Bravo-Amanalco, que tiene una superficie total de 61,548.47 ha. Los niveles de precipitación varían entre los 1310.9 mm (cortina, en el extremo poniente) hasta los 1500 mm (extremo oriente). El clima es típico del Altiplano Mexicano: árido en invierno, húmedo y lluvioso durante el verano. En toda la cuenca abundan los cauces perennes de aguas limpias y cristalinas, alimentados por manantiales, los cuales existen en toda la cuenca (oriente, centro y sur), en especial en las áreas boscosas, a diferentes niveles de altura. Estos son comúnmente contaminados por descargas de aguas residuales, detergentes, agroquímicos y sedimentos originados por la erosión de la cuenca (Martínez, 2002).

La presa Valle de Bravo se inauguró en 1947 como parte del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, tiene una capacidad de almacenamiento de 394.4 Mm³ y un tirante medio de 21.1 m. Cubre una superficie de 1855 ha, y su altitud promedio es de 1821 msnm.

En 1982 la presa cambió su uso y pasó a formar parte del Sistema Cutzamala. Este conjunto de características hacen de Valle de Bravo un cuerpo de agua de gran importancia y objeto de diversos estudios de calidad del agua.

La cuenca Valle de Bravo cubre en su totalidad el municipio de Amanalco y la mayor parte del municipio de Valle de Bravo. Además, incluye áreas significativas de los municipios de Donato Guerra, Villa de Allende, Villa Victoria y Temascaltepec. Contiene también superficies menores (exclusivamente forestales) de los municipios de Almoloya de Juárez y Zinacatepec.

Esta cuenca pertenece a la Región Hidrológica 18, correspondiente a la cuenca Río Balsas y dentro de esta a la cuenca del Río Cutzamala, y así a la subcuenca Río Tiloxtoc.

Los ríos que confluyen en la Presa Valle de Bravo junto con sus principales características se aprecian en el cuadro 1.10 y su ubicación se muestra en la Figura 1.11.

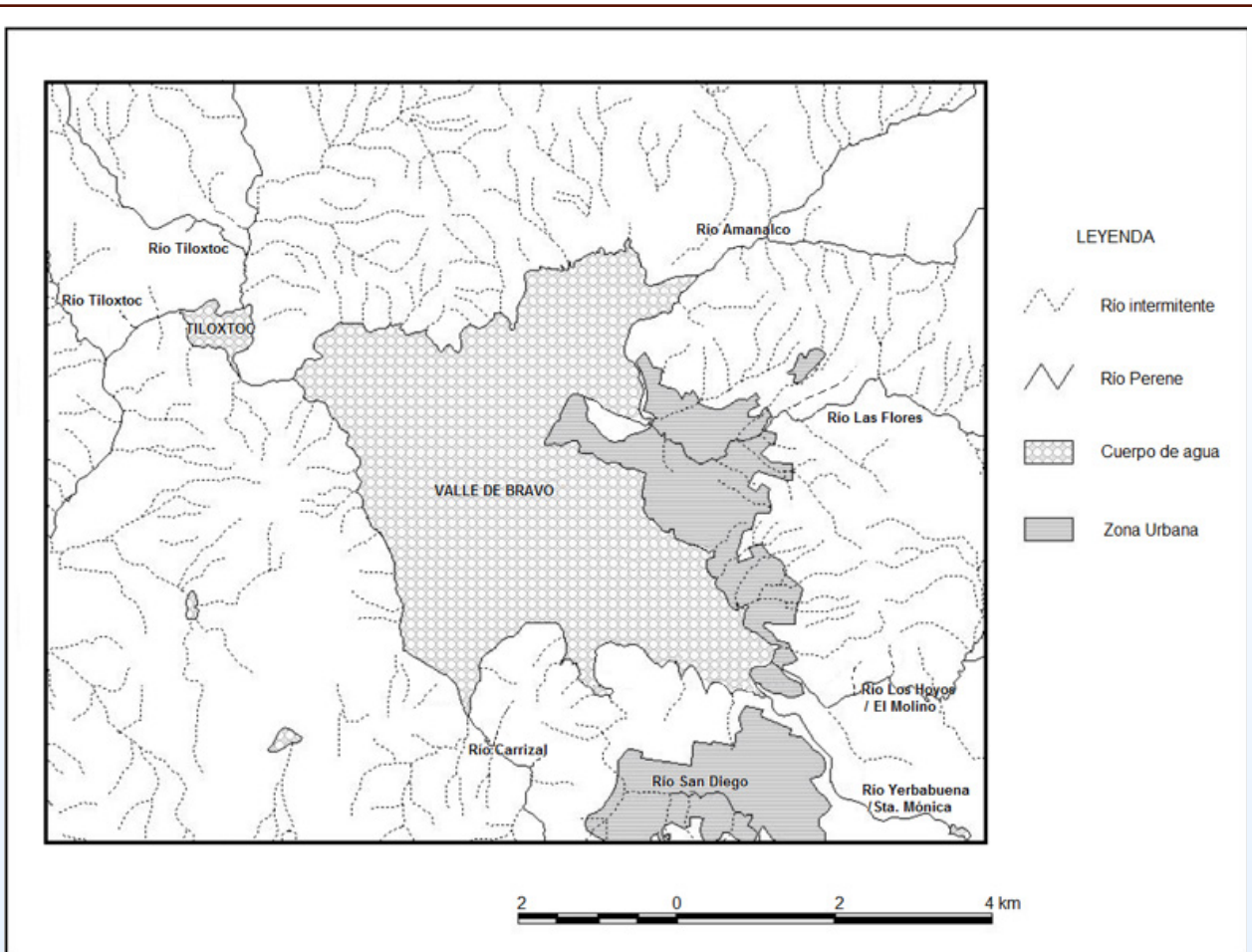


Figura 1.11 Ríos principales de la cuenca

Fuente: Calidad del agua en la Cuenca Valle de Bravo Amanalco, una propuesta para su manejo.

Cuadro 1.10 Nombre de los Ríos que confluyen a la presa Valle de Bravo y sus Características

Río	Características
La Yerbabuena o Santa Mónica	Nace en las faldas de los cerros San Agustín y Sacametate, inicialmente su dirección es hacia el este, posteriormente hacia el noroeste hasta llegar a la presa. Tiene una microcuenca de 13.22 km
San Diego	Se origina en el cerro La Escalerilla a 2550 msnm. La microcuenca del río es de 40.19 km
Ladera oriente de Cuatenco	La microcuenca está formada por escurrimientos de poca longitud que vierten sus aguas directamente a la presa. Tiene una extensión de 3.4 km
Calderones o El Cerrillo	Su microcuenca es de solo 2.3 km a 2300 msnm en las elevaciones vecinas a la presa.
Carrizal	Los escurrimientos que forman a esta microcuenca de 30.38 km cerro de Los Colorines a 2300 msnm. La corriente, con un rumbo norte, es pequeña y vierte sus aguas a la presa.
Los Hoyos o El Molino	Los escurrimientos que forman este río provienen del cerro San Antonio a 3300 msnm. La corriente tiene una dirección suroeste, cruza el poblado llamado El Naranja, más adelante confluye con el río El Temporal que nace en el cerro El Coporito. Después se une con el río Alameda que desciende del cerro Piedra Herrada y a lo largo de su trayectoria se unen a él, las aguas del río Ojo de Agua que se origina en el cerro Trompillos. El río Chiquito se une más adelante para llegar a la presa Valle de Bravo. La subcuenca tiene un área de 155.92 km Alameda, El Fresno y Arroyo Chiquito.
Amanalco	Nace en la ladera sur del cerro San Antonio, en su curso alto se le conoce como río Alto. La corriente fluye en dirección oeste, pasa por el poblado de San Bartolo y Santa María Pipioltepec hasta llegar a la presa Valle de Bravo. La subcuenca tiene una superficie de 227.9 km Salto, Agua Bendita y la Candelaria, forman parte de esta subcuenca.
San Gaspar	La subcuenca comprende la vertiente sur del cerro de San Gaspar y tiene una superficie de 9.71 km Los escurrimientos cortos llegan por la ladera norte del cerro.
La Cascada	En la parte sur de la cabecera municipal de Valle de Bravo, está constituido por escurrimientos pequeños que inician en las cimas de Monte Alto. Desemboca directamente a la presa.
Las Flores	La subcuenca de este río, al noroeste de la presa Valle de Bravo, tiene 21.62 km suroeste del cerro Los Reyes (2900 msnm). Cruza el poblado de Rincón de Estrada y El Temporal. La subcuenca presenta varios escurrimientos directos a la presa, y debido a los desechos urbanos, genera mayor contaminación.
Tiloxtoc	Se origina a 37.5 Km al noreste de Zitácuaro, a una elevación aproximada de 2700 msnm. En esta ubicación se le conoce como El Ramal, que vierte a la presa Villa Victoria, a partir de este punto toma el nombre de Malacatepec.
Los Quelites	Parte de la subcuenca Temascaltepec, el río nace en Mesa de Palomas, en la ladera oeste del Nevado de Toluca a 3000 msnm. El río desciende con dirección suroeste, hasta la confluencia con el Arroyo colorado, a partir de la cual se llama Temascaltepec. La extensión de la subcuenca es de 12.25 km
El Campanario	Forma parte de la Subcuenca del Río Temascaltepec. Inicia a 2600 msnm en el Cerro del Capulín. La subcuenca tiene una extensión de 12.25 km
Pinar de Osorio	Los escurrimientos que forman el río nacen en los cerros El Astillero y El Pinar, 2450 msnm, y son captados por la presa Pinar de Osorio. La extensión de la subcuenca de 6.33 km
Los Confitos	Inicia en las inmediaciones de los Cerros Sacametate y El Pedregal. La subcuenca tiene 9.43 km la parte sur de la zona de estudio.

Fuente: <http://www.educacionambiental.org.mx/atlas/territF3.html>

El ámbito de cobertura del servicio de agua potable en la cuenca se encuentra entre el 92.46% para Valle de Bravo y el 59.25% en Donato Guerra. El promedio dentro de la cuenca Valle de Bravo - Amanalco es de 72.48%. Las localidades con menor número de habitantes son las que no cuentan con este servicio. En localidades conectadas a la red de agua potable, hay zonas con servicio parcial debido a la intermitencia en el suministro.

En el año 2000 las localidades con un porcentaje bajo de este servicio se encontraban en municipios como Villa Victoria, donde de 251 viviendas dentro de la cuenca en solo 5 viviendas contaban con este servicio. Esta situación se repetía en localidades de Villa de Allende y Donato Guerra.

Amanalco ha registrado mayor incremento en el número de viviendas desde 1980. En municipios como Donato Guerra y Villa de Allende, que dependen del bombeo para el suministro de agua potable, se ven afectados por el funcionamiento efectivo de las bombas utilizadas. Valle de Bravo es el municipio con mayor cobertura de este servicio, aunque existen algunas comunidades en donde hay una carencia casi total de suministro de agua potable.

El drenaje es el servicio menos atendido en la cuenca. Hay también ausencia de letrinas secas y la población se ve obligada a excavar en terrenos aledaños a sus casas. Esto ocasiona que haya una filtración de los desechos debido a las condiciones de suelo poroso que existe, con la consecuencia del arrastre de desechos al filtrarse las aguas de lluvia que contaminan los manantiales (Cuadro 1.11).

Cuadro 1.11 *Coordenadas y ubicación en sitio de los puntos de muestreo*

Estación	1980			1990			2000		
	Total viviendas	Con drenaje	%	Total viviendas	Con drenaje	%	Total viviendas	Con drenaje	%
Amanalco	2,348	122	5.19	2,876	439	15.3	4,238	939	22.2
Donato Guerra	891	38	4.04	1351	175	13.0	2,064	304	14.7
Temascaltepec	27	-	-	32	6	18.7	50	13	26.0
Valle de Bravo	6,301	3457	54.9	6,935	4,405	63.5	12,518	8,472	67.6
Villa de Allende	220	3	1.4	302	2	0.66	727	80	11.0
Villa Victoria	230	3	1.30	23	0	0	251	11	4.38
TOTAL	10,017	3,623	36.2	11,519	5,027	43.6	19,848	9,819	49.5

Fuente: Programa de Ordenamiento Ecológico de la Cuenca Valle de Bravo – Amanalco

Actividades económicas

Entre las actividades económicas primarias destacan:

- Árboles frutales silvestres, de los cuales se pueden obtener: tejocotes, ciruelas, peras, manzanas, cítricos (mandarina, naranja, toronja y limón), durazno, zarzamoras.
- Producción en pequeña escala de forraje para algunos animales de autoconsumo.
- Dentro del grupo de las zonas agrícolas de temporal, se presenta maíz, chilacayote y haba, principalmente para venta y consumo dentro de la misma región.

- En las zonas de riego se produce chícharo, papa, haba, maíz, guayaba, frambuesas, mamey, cilantro, perejil, ajo, rábano, pápalo, col, coliflor, brócoli, lechuga, berros, y otras hortalizas de alta calidad debido al agua proveniente de manantiales.
- La floricultura es una actividad importante para la región y en ella se producen: claveles, gladiolas, rosas y aves del paraíso.
- Algunas áreas producen cultivos de alta tecnología en invernaderos.
- En las actividades ganaderas se crían algunos animales pero para la venta en la región o para autoconsumo únicamente, siendo el borrego el principal tipo de animal para crianza. Por otro lado, las actividades piscícolas constan principalmente de la crianza de trucha.
- Los usos de suelo forestal son utilizados en la producción de maderas para venta inclusive fuera de la región. Otra parte de las zonas forestales son conservadas para fines recreativos, lo cual atrae considerablemente al turismo, y conservación del medio ambiente. También estas zonas son importantes para evitar la erosión de los suelos y con ello el azolve del vaso de la presa de Valle de Bravo, por lo que la conservación de los bosques es importante en la región.

Actividades económicas secundarias:

Adquieren su mayor importancia las industrias eléctrica y de la construcción en el municipio de Valle de Bravo. Fuera de este municipio, predominan las empresas dedicadas a la fabricación de cerámica y a la fabricación de muebles de madera.

Existen en menor escala centros agroindustriales productores de hongos, licor, mermelada, aderezos, conservas, quesos y en general actividades de producción artesanal.

Actividades económicas terciarias:

La actividad comercial ha tenido un gran impulso por el crecimiento de la región como polo de atracción turística. Dentro de estas actividades existe una gran diversidad de comercios establecidos, aunque la mayor parte de la infraestructura terciaria está localizada en la cabecera municipal del Municipio de Valle de Bravo, existiendo hoteles y restaurantes en la zona.

El turismo es una de las vocaciones históricas de Valle de Bravo, especialmente en la cabecera municipal, donde se registra una afluencia importante de visitantes para la recreación y el esparcimiento de fin de semana. Los visitantes llegan a ser tanto nacionales como extranjeros, por lo que el flujo de capital en este municipio es el más importante de la región.

1.2.2 Sitios de muestreo

Uno de los grandes problemas de cualquier estudio de calidad del agua en un embalse es que a diferencia de un río, los sitios de muestreo no son sencillos de determinar. Generalmente se establecen de modo intuitivo en función de factores como descargas o sitios de interés (CONAGUA, 2005). Para el caso de este embalse, existen 7 corrientes que aportan al mismo: Río Amanalco, Río Molino, y arroyos Yerbabuena, Las Flores, El Carrizal, San Diego y Laderas. Comúnmente se estudian parámetros como oxígeno disuelto, fosfatos, nitrógeno como nitrógeno amoniacal, nitrógeno como nitratos, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, profundidad del disco de Secchi, etc.

Otro de los productos del proyecto PAPIIT IN107710 “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota” es la generación de una metodología para la determinación de los sitios de muestreo a partir de un análisis digital de imágenes satelitales correspondientes a la zona del embalse, este tema se desarrolla en el Capítulo 3 “Metodología para la evaluación de la calidad del agua usando percepción remota” de este trabajo.

Durante las tres campañas se tomaron muestras en 50 estaciones, en 44 sitios se determinaron 15 parámetros de calidad del agua (temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad, SDT, salinidad, presión atmosférica, turbiedad disco Secchi y UTN, sólidos suspendidos totales, entre los principales), en 6 de esos sitios se determinaron 22 parámetros (DBO, nitrógeno amoniacal, nitratos, fosfatos y coliformes totales y fecales). Además, se trazaron isolíneas de concentración de diversos parámetros mediante el uso del software SURFER, con el fin de obtener mapas de varios parámetros de calidad del agua para el embalse. Este programa interpola los valores para obtener mapas bidimensionales que dan una idea de la distribución espacial de concentraciones o valores de los distintos parámetros obtenidos en campo.

El Cuadro 1.12 presenta las coordenadas correspondientes a la primera, segunda y tercera campañas de los sitios de muestreo, obtenidos mediante el análisis digital de imágenes y la Figura 1.12 muestra su localización en el embalse.

Cuadro 1.12 *Coordenadas y ubicación en sitio de los puntos de muestreo*

Estación	Coordenadas	Estación	Coordenadas	Estación	Coordenadas
1	19° 11 '13 "N - 100	18	19° 11 '22 "N - 100	35	19° 12 '35 "N - 100
2	19° 11 '01 "N - 100	19	19° 11 '33 "N - 100	36	19° 12 '29 "N - 100
3	19° 10 '41 "N - 100	20	19° 11 '34 "N - 100	37	19° 12 '43 "N - 100
4	19° 10 '45 "N - 100	21	19° 11 '49 "N - 100	38	19° 12 '45 "N - 100
5	19° 10 '51 "N - 100	22	19° 11 '53 "N - 100	39	19° 13 '11 "N - 100
6	19° 10 '30 "N - 100	23	19° 11 '53 "N - 100	40	19° 13 '02 "N - 100
7	19° 10 '35 "N - 100	24	19° 12 '13 "N - 100	41	19° 13 '13 "N - 100
8	19° 10 '47 "N - 100	25	19° 12 '03 "N - 100	42	19° 13 '06 "N - 100
9	19° 10 '58 "N - 100	26	19° 11 '57 "N - 100	43	19° 12 '55 "N - 100
10	19° 11 '03 "N - 100	27	19° 12 '14 "N - 100	44	19° 12 '39 "N - 100
11	19° 11 '11 "N - 100	28	19° 12 '08 "N - 100	45	19° 12 '42 "N - 100
12	19° 11 '33 "N - 100	29	19° 12 '06 "N - 100	46	19° 12 '25 "N - 100
13	19° 11 '50 "N - 100	30	19° 12 '20 "N - 100	47	19° 12 '30 "N - 100
14	19° 11 '42 "N - 100	31	19° 12 '18 "N - 100	48	19° 11 '19 "N - 100
15	19° 11 '27 "N - 100	32	19° 12 '36 "N - 100	49	19° 11 '04 "N - 100
16	19° 11 '35 "N - 100	33	19° 12 '35 "N - 100	50	19° 11 '13 "N - 100
17	19° 11 '40 "N - 100	34	19° 12 '44 "N - 100		

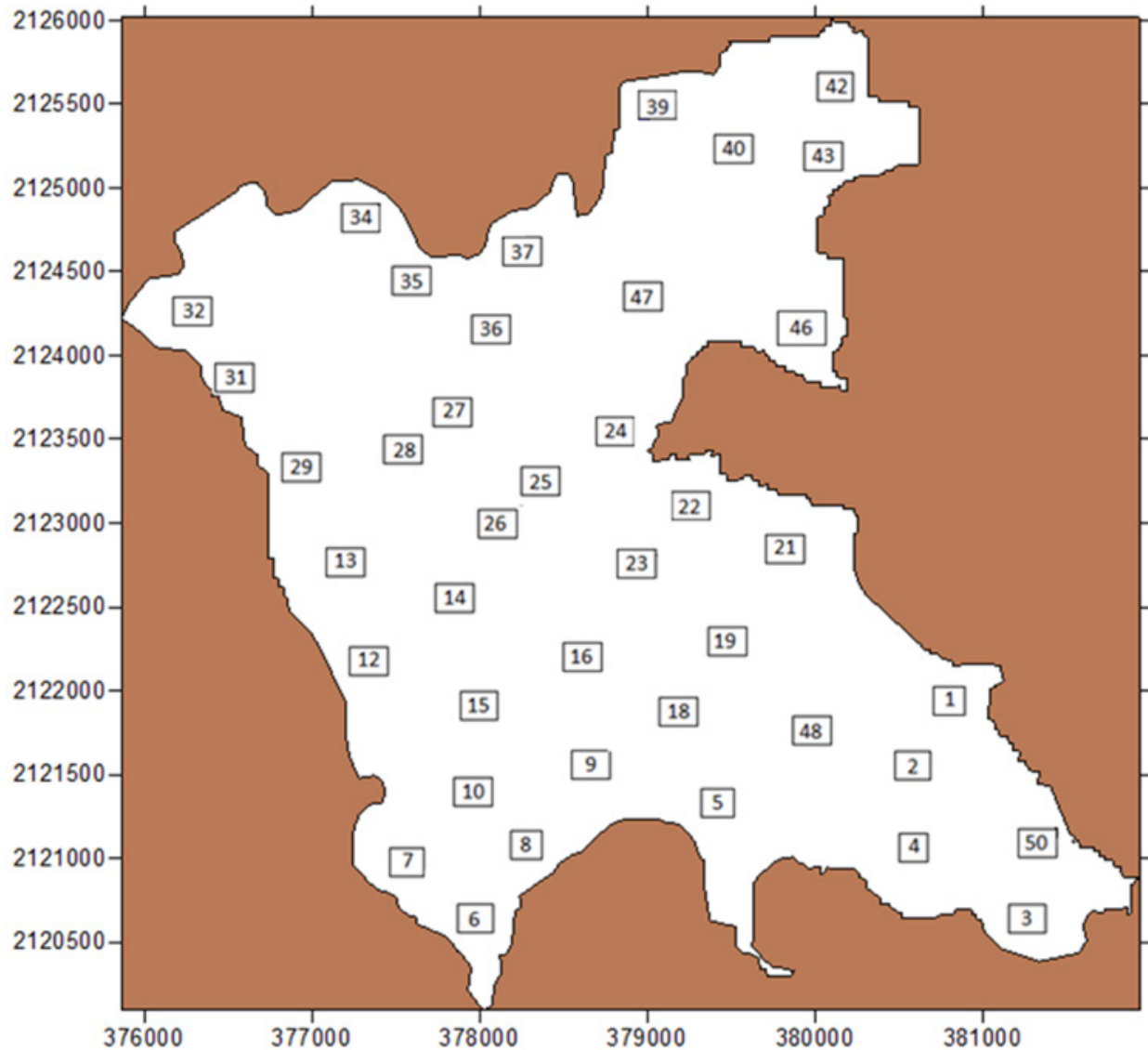


Figura 1.12 Localización de los sitios de muestreo en el vaso de la presa Valle de Bravo en coordenadas UTM

1.2.3 Técnicas de muestreo, preservación de muestras y análisis

Se incluyen las recomendaciones relativas al muestreo y análisis, las cuales se aplicaron en el estudio de caso.

Muestreo

Para la determinación de los análisis físico-químicos, las muestras deberán recolectarse en envases limpios. Para la determinación de análisis bacteriológicos, se recomienda tomar las muestras en frascos Winkler, previamente estériles y declorados.



Figura 1.13 Recolección de muestras simples para análisis físico-químicos

Procedimiento de toma de muestras

Para llevar a cabo la toma de muestras para análisis físico-químicos, debe enjuagarse el envase con el agua del cuerpo a estudiar, antes de tomar la muestra (Figura 1.13). En el caso de los frascos destinados para los análisis bacteriológicos no se realiza este procedimiento debido a que contienen tiosulfato de sodio como declorante. Se introduce el frasco bajo la superficie, teniendo especial cuidado en evitar que el agua que entra al frasco toque primero las manos de quien toma la muestra, pues eso provocaría la contaminación de dicha muestra; una vez que se obtiene el volumen deseado (aproximadamente al hombro de la botella), este se tapa. Cada muestra debe identificarse, para poder relacionarla con el sitio de muestreo, por ejemplo, en el estudio se asoció a datos almacenados en el medidor multiparamétrico con GPS, que registra coordenadas y hora del muestreo, así como otros parámetros. La Figura 1.14 muestra el procedimiento de toma de muestras para análisis microbiológicos.



Figura 1.14 Obtención de muestras con el frasco Winkler

Preservación

Una vez tomadas las muestras, los frascos deben ser cerrados, etiquetados y conservados en hielo hasta su llegada al laboratorio, en donde se realizan los análisis correspondientes o bien, se les coloca en refrigeración hasta ser analizadas.

Análisis de campo y laboratorio

En el vaso de la presa Valle de Bravo se determinaron los siguientes parámetros:

- Temperatura
- pH
- OD
- Conductividad
- Resistividad
- Sólidos disueltos totales
- Salinidad
- Presión atmosférica
- Turbiedad



Figura 1.15 Medidor multiparamétrico con GPS

Parámetros determinados con el medidor multiparamétrico con GPS

Los parámetros antes mencionados, con excepción de la turbiedad, fueron obtenidos empleando el medidor multiparamétrico con GPS. La Figura 1.15 muestra el medidor multiparamétrico con GPS, adquirido con recursos del proyecto PAPIIT.

La información que proporciona el GPS del medidor multiparamétrico permite ubicar los sitios de muestreo en un mapa. Este aparato está provisto de una sonda multisensor que incluye distintos electrodos, gracias a la cual pueden medirse varios parámetros entre los se incluyen: el porcentaje de oxígeno disuelto con respecto al de saturación teórico, conductividad, pH, temperatura, etc.

Para cada uno de los parámetros que pueden medirse con el equipo se puede realizar una calibración diferente, o bien hay una calibración rápida para todos los parámetros. Cuando se utiliza el medidor multiparamétrico en campo, es conveniente y práctico realizar la calibración rápida, pues requiere únicamente de una solución de calibración. La forma de realizar la calibración se describe detalladamente en el manual del instrumento.

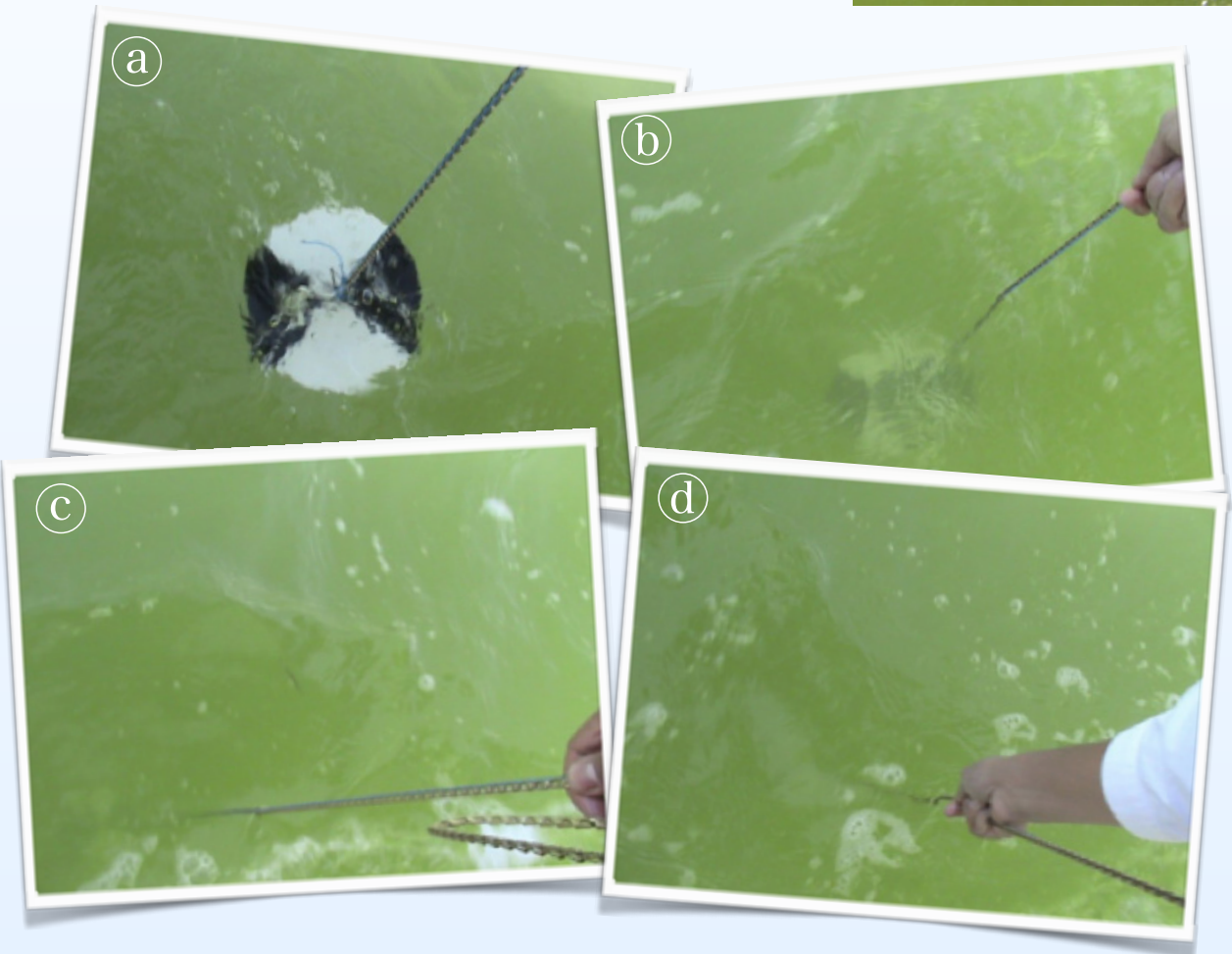
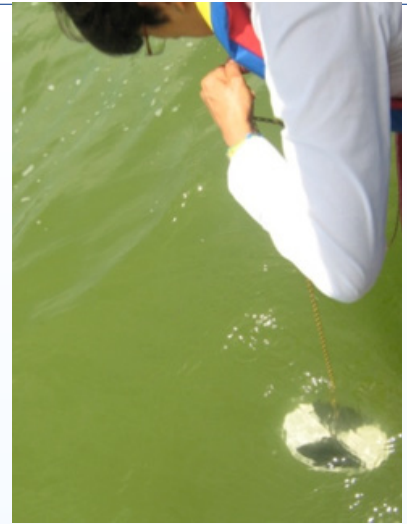
Para realizar las mediciones basta con conectar la sonda al medidor, fijar el capuchón protector a la sonda y sumergirla a la profundidad deseada en donde se tomará la muestra. Las lecturas de los parámetros se visualizarán en el medidor y pueden guardarse en el mismo para revisarlas posteriormente.

Medición de turbiedad en campo

La determinación de la turbiedad en campo se realiza haciendo uso de un disco Secchi. Se introduce este disco en el agua del sitio del muestreo y se mide la longitud de la cadena (sujeta al disco) para la cual el disco deja de ser visible. En la Figura 1.16 se muestran imágenes del procedimiento de medición.

Figura 1.16 Determinación de turbiedad por medio del disco Secchi

El disco Secchi se introduce en el cuerpo de agua en estudio (a) y (b), y se sumerge lentamente (c) hasta que deje de ser visible (d), para hacer la medición de la longitud sumergida en la cadena (d). Usualmente está graduada en unidades convenientes (cada 0.5 metros, por ejemplo)



Análisis de muestras en campo

Para el estudio de caso el muestreo duró en promedio 7 horas. Durante la noche del mismo día en el que se realizó y la madrugada del día siguiente, se determinaron los siguientes parámetros: fosfatos, nitrógeno amoniacal y nitratos.

Para la realización de estos análisis se usó un espectrofotómetro para análisis de campo. Este aparato tiene programas almacenados, que permiten realizar la medición de parámetros. Para cada medición se selecciona el programa y se sigue el procedimiento tal y como se indica en el manual; para realizar estas mediciones debe agregarse uno o, en algunos casos, dos reactivos a la muestra, agitar y esperar un tiempo de reacción, limpiar las celdas e introducir las en el espectrofotómetro, para la medición del parámetro correspondiente en mg/l. La Figura 1.17 muestra el espectrofotómetro usado en campo.



Figura 1.17 Operación de espectrofotómetro

Análisis de muestras en laboratorio

Las tres campañas de muestreo se iniciaron el día del paso del satélite y concluyeron con los trabajos del laboratorio durante el día siguiente. Los análisis realizados en laboratorio incluyeron los siguientes análisis: coliformes totales y fecales, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales y turbiedad.

Determinación de coliformes totales y fecales

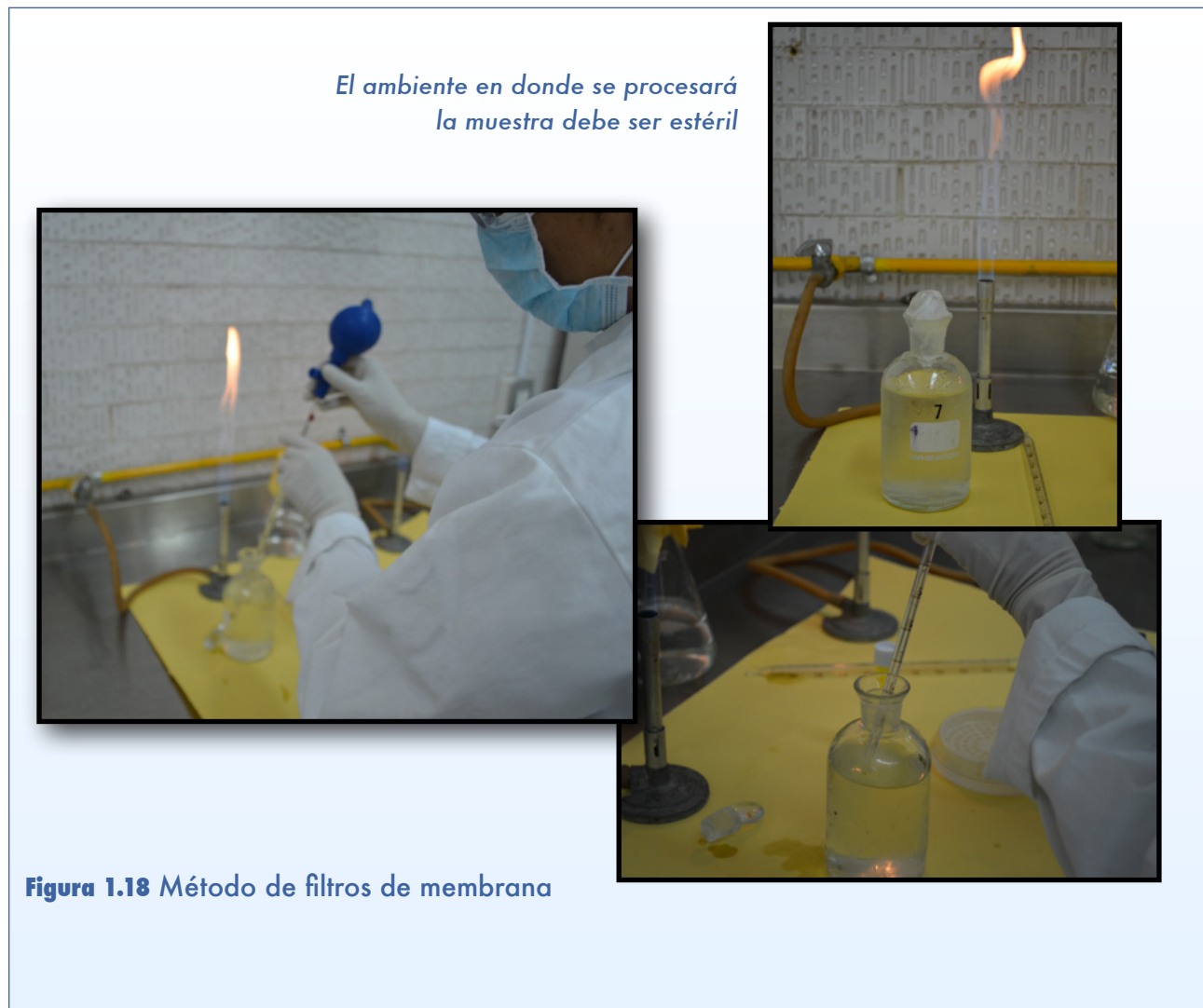
Para la determinación de coliformes fecales y totales se utilizó el método de filtros de membrana que consiste en hacer pasar volúmenes específicos de la muestra a través de una membrana porosa. Por lo general, está compuesta de ésteres de celulosa, típicamente con diámetros de poro de 0,45 micrómetros, los cuales retienen los coliformes totales y otras clases de bacterias presentes en la muestra.

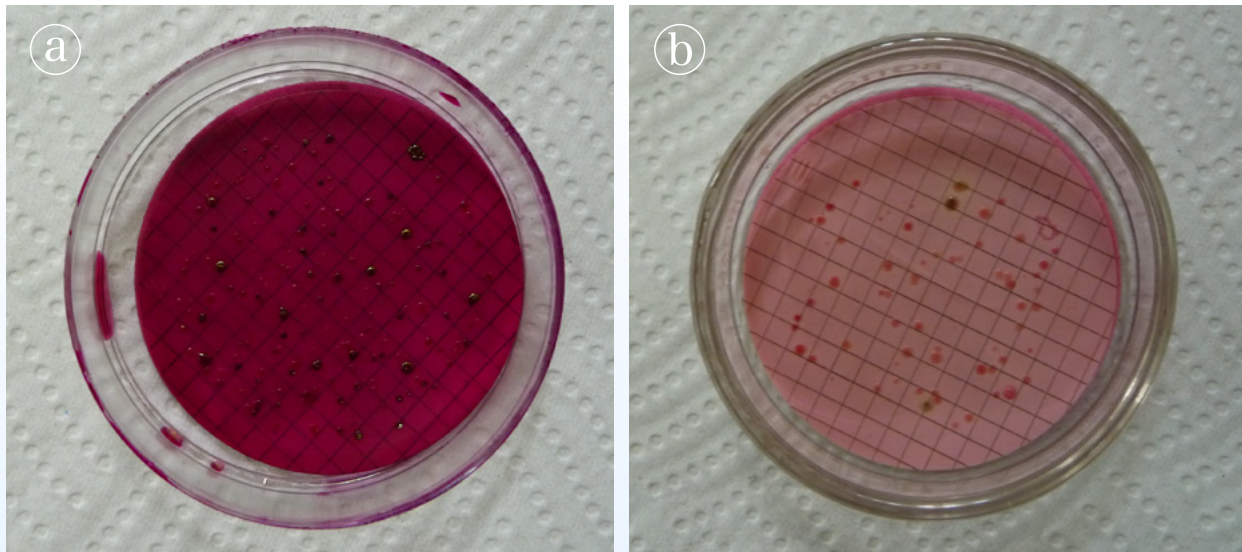
Para realizar este análisis es necesario contar con un área de trabajo estéril, razón por la cual se recomienda colocar dos mecheros encendidos en la mesa en que se trabaje, el material empleado debe esterilizarse y evitar el habla mientras se realiza el procedimiento, para no contaminar las muestras.

Se realizaron dos diluciones (10 y 50 ml de muestra en 100 ml de agua de dilución estéril). Se colocó un soporte de borosilicato en la boca de un matraz Kitasato. Utilizando unas pinzas se sacó un papel filtro y se colocó sobre el soporte. En la parte superior del matraz Kitasato se colocó un matraz invertido y después se agregaron en este los 100 ml de muestra previamente diluida, haciéndose pasar a través del filtro mediante una bomba de vacío.

Una vez que se había filtrado todo el volumen seleccionado, el filtro se retiró y se colocó con la cuadrícula hacia arriba en una caja de Petri, en la que previamente se añadió sobre un cojín absorbente el medio de cultivo ENDO, para coliformes totales, o el medio de cultivo MFC para coliformes fecales.

La caja de Petri, previamente marcada, se cerró y se colocó en la incubadora a 35°C con el cojín absorbente y el papel filtro hacia arriba, durante 24 horas. Una vez transcurrido este tiempo la caja de Petri se revisó para realizar el conteo de las colonias que se formaron. Imágenes del procedimiento de filtro de membrana se muestra en la Figura 1.18. Algunos de los resultados se muestran en la Figura 1.19.





Resultados finales de coliformes (a) totales y (b) fecales

Figura 1.19 Método de filtros de membrana

Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

El método empleado consiste en determinar la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica contenida en el agua, por diferencia entre el oxígeno disuelto inicial ($OD_{inicial}$) y el oxígeno disuelto luego de 5 días de incubación a 20 °C (OD_{final}), entre el porcentaje de dilución, ecuación 1.2.

Para la determinación de este análisis se hicieron dos diluciones (5 y 10 %) para cada muestra. El agua de dilución se preparó añadiendo 1 ml de cada una de los siguientes nutrientes: Sulfato de Magnesio, Cloruro de Calcio, Cloruro Férrico y solución amortiguadora, por cada litro de agua de dilución, además esta agua fue aireada para saturarla de oxígeno antes de mezclarla con el agua de la muestra.

Dado que para la determinación de la DBO₅ es necesario conocer el oxígeno disuelto de la muestra, primero se fijó el oxígeno, para lo cual se agregó a la muestra contenida en el frasco Winkler 2 ml de Sulfato Manganeso y luego 2 ml de Alkali – Yoduro – Nitruro, se tapó la botella, se agitó y se dejó sedimentar.

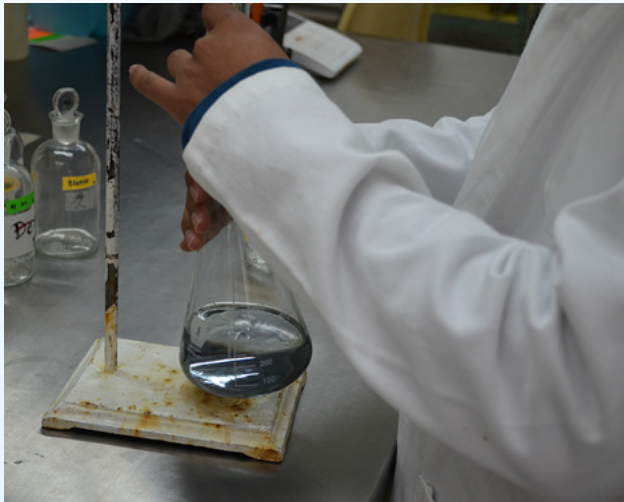
Cuando el precipitado llegó al hombro de la botella, se mezcló nuevamente, se agregaron 2 ml de Ácido Sulfúrico 2N (Figura 1.20), se mezcló nuevamente hasta que el precipitado se disolvió. Entonces se midieron, con ayuda de una probeta, 200 ml de la muestra, y se colocaron en un matraz Erlenmeyer.

Se le agregaron unas gotas de almidón como indicador; se llenó una bureta con Tiosulfato de Sodio 0.025N hasta la marca de cero, se colocó el matraz debajo de la bureta y se dosificó el Tiosulfato de Sodio a la muestra, mientras se agitaba, hasta que la muestra regresó a su color original. Los mililitros de Tiosulfato usados corresponden a la concentración de oxígeno disuelto inicial en mg/l de la muestra.

Para conocer el oxígeno disuelto final de la muestra, fue necesario realizar el procedimiento antes descrito luego de 5 días de incubación a 20 °C. En la Figura 1.20 se muestra parte del procedimiento de la prueba.



Aplicación de Ácido Sulfúrico en el precipitado



Titulación para la determinación de DBO₅



Muestras iniciales con oxígeno disuelto fijado (amarillas) y muestras diluidas para introducirse a la incubadora (transparentes)

Figura 1.20 Determinación de DBO₅

Determinación de sólidos suspendidos totales (SST)

Se filtraron 100 ml de la muestra haciendo pasar el agua a través de un crisol Gooch, al que previamente se le ha puesto a peso constante conteniendo un filtro de fibra de vidrio y un papel Whatman, para la aplicación de vacío. Una vez que la muestra se filtró, el crisol se colocó en la estufa a una temperatura de 105°C durante una hora. Una vez transcurrido este tiempo, se dejó enfriar en un desecador para posteriormente registrar su peso. El contenido de sólidos suspendidos totales se obtuvo con el uso de la ecuación 1.5.

$$SST [mg / l] = \frac{W_{SST} [mg] - W_{CG+F} [mg]}{V_m [l]} \quad \dots (1.5)$$

Donde:

SST = Sólidos Suspendidos Totales

W_{SST} = Peso total del crisol Gooch con contenidos de sólidos suspendidos

W_{CG+F} = Peso del crisol Gooch más el filtro

V_m = Volumen de la muestra

Las Figuras 1.21 y 1.22 muestran imágenes del procedimiento para la determinación de sólidos suspendidos.



Muestras colocadas en la estufa

Figura 1.21 Determinación de SST



Colocación de crisoles en el desecador



Pesado de crisoles con muestra

Figura 1.22 Determinación de SST

Determinación de la turbiedad

La determinación de la turbiedad se llevó a cabo en laboratorio empleando un nefelómetro o turbidímetro (Figura 1.23); este instrumento utiliza varios ámbitos para medir la turbiedad de una muestra, dependiendo de los requerimientos de dicha muestra. Tiene cuatro patrones con los que se compara la muestra y esto permite seleccionar el patrón con el que se calibrará el instrumento. Los intervalos varían de: 0- 0.2, 0 – 1, 0 – 10, 0 – 100 y 0 – 1000 UTN.



Figura 1.23. Turbidímetro de laboratorio

Este aparato opera dirigiendo un haz de luz desde la parte inferior de la celda de cristal que contiene la muestra. Cuando este haz ilumina las partículas de la muestra, es descubierto un tubo fotomultiplicador sensible a 90°C del haz de luz incidente. La cantidad de luz recibida por el tubo fotomultiplicador es proporcional a la turbiedad de la muestra, Figura 1.24.

Para la determinación de la turbiedad se encendió el tubo fotomultiplicador 30 minutos antes de usarlo para calentarlo. Mientras el aparato estaba apagado se ajustó al cero mecánico con el tornillo, se comparó el agua de muestra con los patrones que incluye el mismo aparato y se seleccionó el patrón con el que se calibró el aparato. Una vez que el aparato estaba calibrado se introdujo la celda que contenía el agua de la muestra a analizar, se tapó con el capuchón y se leyó en la escala correspondiente el valor de turbiedad en UTN, siempre teniendo cuidado de limpiar las celdas con una tela especial antes de introducir las muestras.

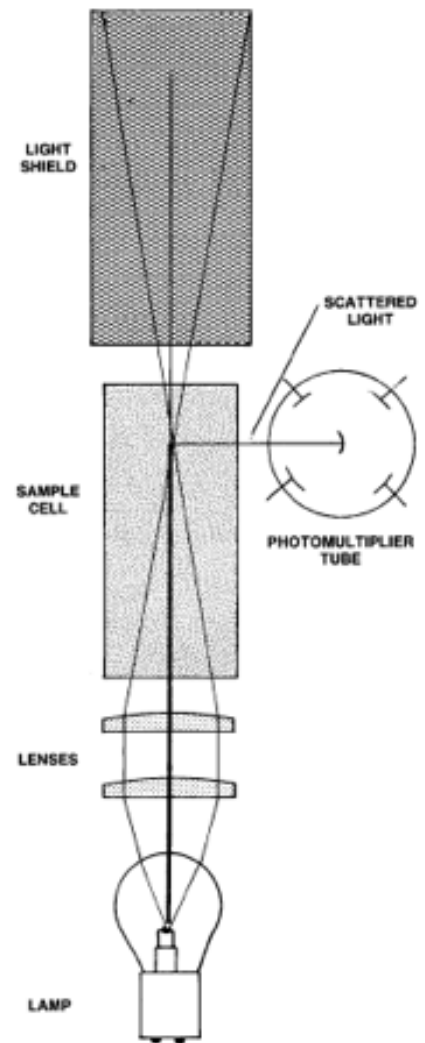


Figura 1.24 Tubo fotomultiplicador
Fuente: Manual del instrumento

1.2.4 Resultados

Los Cuadros 1.13, 1.14, 1.15, presentan los resultados de parámetros físicos y químicos de calidad del agua, obtenidos en las tres campañas de muestreo de calidad del agua en el Vaso de la presa Valle de Bravo, realizadas en abril y octubre de 2010 y en marzo de 2011.

Cuadro 1.13 *Datos de parámetros físicos y químicos de calidad del agua obtenidos en campo y laboratorio correspondientes a la primera campaña (abril de 2010)*

No.	Coordenada X	Coordenada Y	°C	pH	pH mV	ORP	OD %	OD ppm	µS/cm	µS/cm A	MOhm-cm	TDS ppm	Salinidad	mbar	PDS	TSI	Turb	SST
1	380791,54	2121841,92	21,92	9,44	-128,4	-564,3	103,7	7,37	138	130	0,0073	69	0,06	827,1	1,00	60,00	8,0	14,90
2	380608,45	2121535,69	22,27	9,45	-129,3	-580,6	103,4	7,30	138	131	0,0073	69	0,06	827,9	1,00	60,00	11,0	9,20
3	381042,43	2120893,43	23,79	9,40	-127,0	-572,9	102,8	7,05	144	141	0,0069	72	0,07	828,1	1,00	60,00	7,1	1,50
4	380397,12	2120931,44	23,02	9,48	-131,3	-569,1	102,3	7,12	143	138	0,0070	72	0,07	827,9	1,10	58,62	8,2	6,30
5	379542,55	2120684,95	21,69	9,49	-131,2	-560,1	103,1	7,36	145	136	0,0069	73	0,07	827,8	1,08	58,89	11,0	36,50
6	379887,33	2120252,30	22,42	9,36	-124,2	-564,0	93,1	6,55	151	144	0,0066	76	0,07	827,6	1,07	59,02	11,0	1008,70
7	379464,15	2120756,17	21,99	9,46	-129,6	-543,1	103,4	7,33	141	133	0,0071	71	0,07	827,4	1,09	58,76	11,0	410,20
8	379612,86	2121161,00	22,58	9,51	-132,9	-542,8	110,0	7,72	139	132	0,0072	69	0,06	827,2	1,21	57,25	11,0	0,90
9	379758,02	2121470,54	22,59	9,41	-127,4	-530,2	108,7	7,61	144	138	0,0069	72	0,07	826,9	1,23	57,01	11,0	6,40
10	379463,46	2121540,11	22,55	9,57	-136,2	-525,9	109,7	7,69	146	139	0,0069	73	0,07	826,8	1,14	58,11	11,0	8,90
12	378360,12	2121218,45	22,13	9,48	-130,8	-527,0	108,9	7,67	121	115	0,0082	61	0,06	823,4	1,10	58,62	11,0	5,50
13	377771,47	2121428,34	22,28	9,49	-131,6	-524,4	110,2	7,69	134	127	0,0075	67	0,06	818,2	1,28	56,44	11,0	8,90
14	378132,80	2121736,43	21,91	9,53	-133,7	-504,2	112,3	7,88	142	134	0,0070	71	0,07	817,2	1,05	59,30	11,0	6,70
15	378483,95	2121832,48	21,92	9,53	-133,3	-502,8	109,9	7,70	144	136	0,0069	72	0,07	816,5	1,10	58,62	11,0	4,40
16	378739,06	2121981,43	21,88	9,52	-133,2	-495,2	109,5	7,67	145	136	0,0069	72	0,07	815,5	1,11	58,49	11,0	1,50
18	379254,43	2122177,85	22,37	9,51	-132,6	-495,5	111,6	7,73	148	141	0,0068	74	0,07	814,7	1,03	59,57	11,0	4,60
19	379807,62	2122352,52	22,27	9,54	-134,0	-493,1	111,7	7,75	150	142	0,0067	75	0,07	814,2	1,14	58,11	12,0	5,60
21	380086,49	2123011,65	22,68	9,53	-133,9	-483,8	113,5	7,82	150	144	0,0067	75	0,07	814,3	1,09	58,76	12,0	10,50
22	379490,27	2122951,00	22,35	9,49	-131,4	-479,1	109,4	7,58	152	145	0,0066	76	0,07	814,0	1,06	59,16	12,0	9,20
23	379273,82	2122903,24	22,47	9,52	-133,3	-467,9	112,3	7,76	155	148	0,0065	78	0,07	813,9	1,00	60,00	12,0	791,30
24	379004,65	2123277,00	22,53	9,52	-133,2	-469,7	112,0	7,73	152	145	0,0066	76	0,07	813,8	0,83	62,69	12,0	3,80
25	378585,91	2123113,76	22,53	9,54	-134,2	-467,3	115,4	7,96	155	148	0,0065	77	0,07	813,5	0,91	61,36	11,0	12,50
26	378331,35	2123044,74	22,44	9,56	-135,6	-460,6	113,4	7,84	156	148	0,0064	78	0,07	813,3	1,07	59,02	11,0	11,40
27	377766,06	2123245,26	22,18	9,56	-135,6	-466,9	112,1	7,78	150	142	0,0067	75	0,07	813,1	0,72	64,74	11,0	45,60
28	377521,14	2123308,38	21,93	9,56	-135,4	-465,2	112,5	7,85	151	142	0,0066	75	0,07	813,1	1,10	58,62	11,0	6,20
29	376920,41	2123447,68	21,49	9,56	-135,1	-473,5	108,1	7,61	150	140	0,0067	75	0,07	813,0	1,15	57,98	11,0	1,90
30	376842,71	2123620,36	21,53	9,55	-134,4	-471,1	107,8	7,58	154	144	0,0065	77	0,07	813,0	0,95	60,74	11,0	6,00
31	376525,25	2123751,61	21,78	9,53	-133,3	-464,2	109,5	7,66	156	146	0,0064	78	0,07	813,0	1,00	60,00	12,0	9,30
32	376270,07	2124023,87	21,82	9,58	-136,2	-453,4	115,8	8,10	157	148	0,0064	79	0,07	813,1	0,92	61,20	12,0	9,30
33	376665,95	2124260,99	21,68	9,57	-135,6	-458,8	114,5	8,03	157	148	0,0064	79	0,07	813,4	1,00	60,00	11,0	7,90
34	377077,62	2124676,32	22,37	9,52	-133,4	-466,3	108,5	7,50	156	148	0,0064	78	0,07	813,3	1,00	60,00	10,0	8,40
35	377631,83	2124574,23	22,79	9,51	-132,8	-459,9	112,3	7,70	155	149	0,0065	77	0,07	813,3	1,03	59,57	10,0	5,40
36	378046,07	2124503,84	22,55	9,48	-131,0	-446,1	111,6	7,70	161	154	0,0062	81	0,08	813,4	1,00	60,00	11,0	16,50
37	378579,09	2124727,79	22,18	9,50	-131,8	-452,1	113,4	7,88	157	149	0,0064	79	0,07	813,5	1,05	59,30	12,0	9,90
39	379746,46	2125491,71	22,54	9,45	-129,3	-448,9	107,6	7,43	158	151	0,0063	79	0,07	813,8	0,86	62,18	12,0	9,10
40	380050,65	2125563,50	22,93	9,49	-131,7	-442,4	114,9	7,87	161	155	0,0062	80	0,08	813,9	0,89	61,68	13,0	27,80
42	380407,58	2125216,85	23,31	9,51	-133,1	-437,4	118,8	8,07	161	156	0,0062	80	0,08	813,7	0,88	61,84	12,0	109,60
43	380175,73	2125043,13	23,24	9,49	-132,2	-445,4	117,0	7,96	159	154	0,0063	80	0,07	813,6	0,80	63,22	11,0	7,90
46	379651,11	2124314,91	22,56	9,54	-134,2	-440,2	116,1	7,99	157	149	0,0064	78	0,07	812,9	1,00	60,00	11,0	8,30
47	379155,57	2124016,90	22,35	9,52	-133,1	-431,5	113,3	7,84	159	151	0,0063	79	0,07	812,9	1,00	60,00	11,0	7,30
50	381102,69	2121627,78	22,62	9,55	-134,8	-430,3	115,6	7,97	158	151	0,0063	79	0,07	814,5	0,86	62,18	10,0	16,30

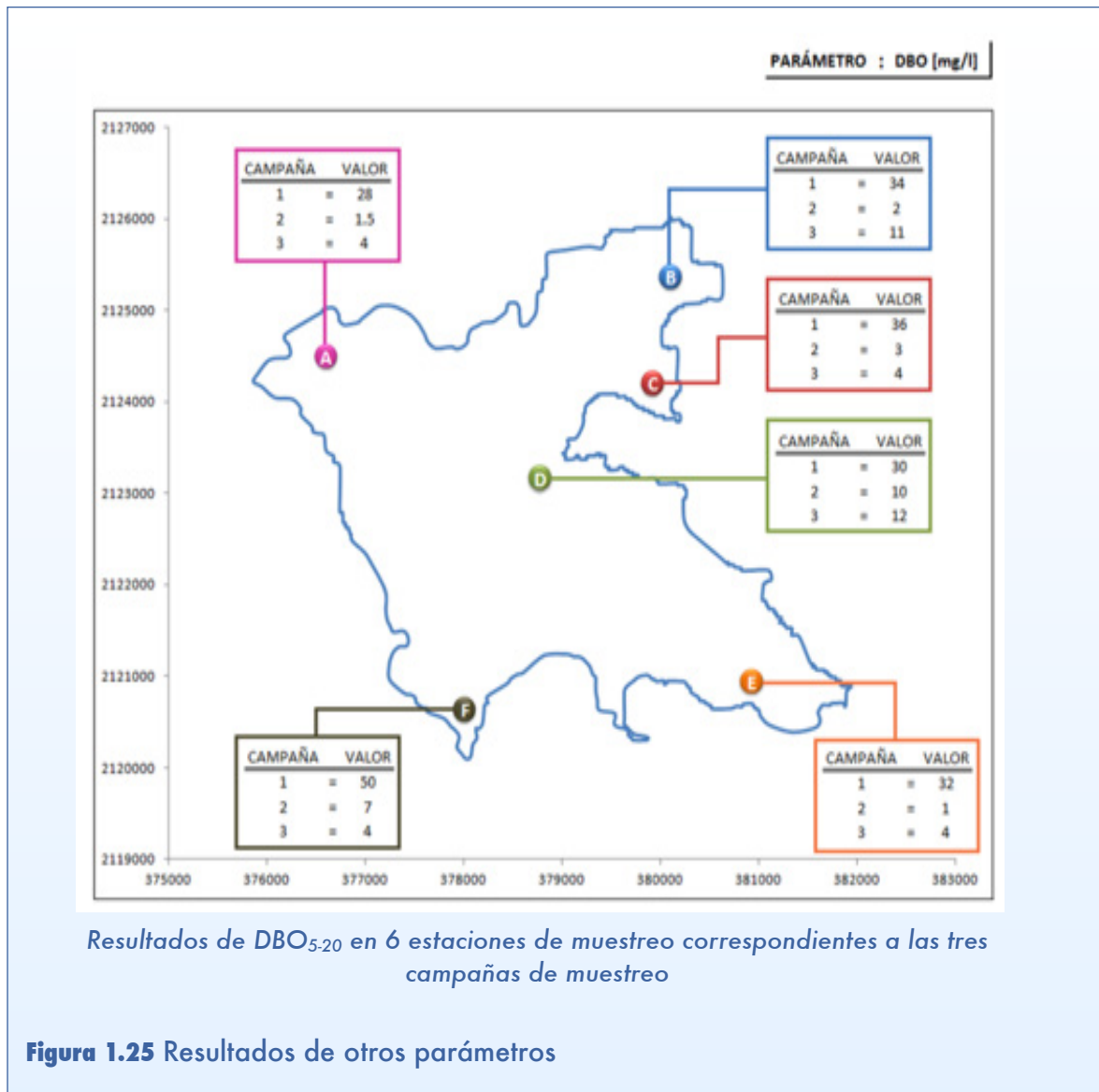
Cuadro 1.14 Datos de parámetros físicos y químicos de calidad del agua obtenidos en campo y laboratorio correspondientes a la segunda campaña (octubre de 2010)

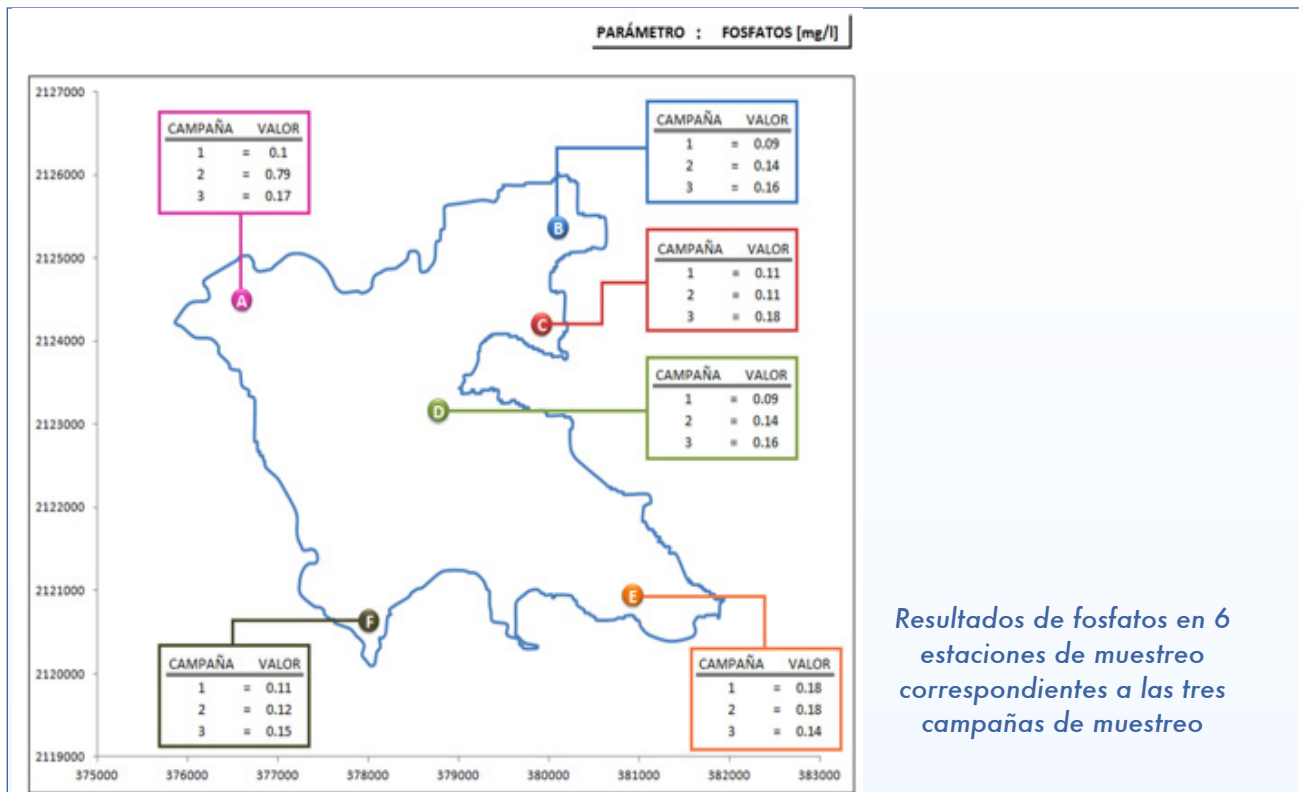
No.	Coordenada X	Coordenada Y	°C	pH	pH mV	ORP	OD %	OD ppm	µS/cm	µS/cm A	MOhm·cm	SDT	Salinidad	mbar	PDS	TSI	Turb	SST
2	381315,45	2121103,78	22,41	9,06	-109,7	-442,1	94,9	6,60	167	159	0,0060	83	0,08	828,60	1,94	50,44	4,5	0
3	380889,68	2120762,23	22,26	9,09	-111,3	-445,1	101,8	7,08	163	154	0,0061	81	0,08	828,60	2,03	49,79	5,0	0
4	380461,46	2120943,32	22,03	9,10	-111,5	-438,0	94,9	6,60	165	155	0,0061	82	0,08	828,80	1,57	53,49	5,0	24
5	380567,24	2121486,77	22,42	9,08	-110,8	-436,4	91,4	6,36	161	153	0,0062	80	0,08	828,80	1,97	50,22	4,5	1
6	379769,95	2121507,35	22,35	9,12	-113,0	-424,7	86,2	6,00	161	153	0,0062	81	0,08	828,10	1,94	50,44	4,5	7
7	379429,29	2121229,83	22,27	9,12	-112,6	-421,7	108,7	7,56	161	153	0,0062	80	0,08	827,70	1,86	51,05	5,5	1
9	378228,04	2121124,03	22,44	9,15	-114,3	-424,1	88,0	6,12	161	153	0,0062	80	0,08	827,30	1,88	50,89	4,5	1
10	377996,71	2120599,87	22,62	9,12	-113,1	-414,0	89,7	6,24	162	155	0,0062	81	0,08	827,10	1,69	52,43	5,5	1
11	377764,00	2120745,91	22,49	9,11	-112,4	-422,0	96,6	6,72	160	152	0,0063	80	0,07	826,60	1,77	51,76	4,5	19
12	378406,56	2121614,72	22,32	9,14	-113,8	-441,1	188,0	13,08	152	145	0,0066	76	0,07	826,10	1,69	52,43	5,0	14
13	377885,27	2121848,76	22,40	9,12	-112,6	-427,9	103,5	7,20	159	151	0,0063	80	0,07	825,30	1,74	52,01	5,0	15
14	378454,39	2122659,65	22,42	9,14	-113,7	-423,6	101,8	7,08	160	152	0,0062	80	0,07	824,20	1,78	51,68	5,0	12
15	378005,43	2122349,06	22,39	9,10	-111,4	-408,5	112,1	7,80	164	156	0,0061	82	0,08	816,60	1,71	52,26	5,0	27
16	377334,55	2122485,73	22,34	9,13	-113,1	-413,1	124,2	8,64	162	154	0,0062	81	0,08	815,20	1,96	50,29	5,0	15
17	377353,27	2123100,45	22,30	9,09	-111,3	-415,8	103,5	7,20	157	149	0,0064	78	0,07	814,40	1,82	51,36	5,0	9
18	377876,97	2122795,68	22,43	9,15	-114,4	-425,4	139,7	9,72	158	150	0,0063	79	0,07	813,70	1,83	51,28	5,0	9
19	378058,49	2123298,65	22,38	9,14	-113,7	-419,4	112,1	7,80	160	152	0,0063	80	0,07	812,80	1,80	51,52	5,5	8
20	378298,81	2123423,09	22,55	9,15	-114,4	-406,2	117,3	8,16	161	153	0,0062	80	0,08	812,50	1,69	52,43	5,5	19
21	377804,82	2123801,44	22,44	9,13	-113,3	-404,4	120,7	8,40	164	156	0,0061	82	0,08	811,90	1,83	51,28	5,0	16
22	377555,47	2123637,10	22,34	9,15	-114,2	-407,6	127,6	8,88	162	154	0,0062	81	0,08	811,40	1,91	50,66	4,5	11
23	376959,16	2123564,24	22,37	9,11	-112,0	-398,9	119,0	8,28	165	157	0,0061	82	0,08	811,10	1,79	51,60	4,5	17
24	376532,33	2123936,02	22,26	9,14	-113,8	-404,5	113,8	7,92	165	156	0,0061	82	0,08	810,80	1,58	53,40	5,5	18
25	376565,39	2124507,61	22,12	9,13	-113,3	-398,6	120,7	8,40	165	156	0,0061	82	0,08	811,00	1,70	52,34	5,5	13
26	377151,91	2123996,41	22,21	9,10	-111,8	-404,6	120,7	8,40	163	154	0,0061	81	0,08	810,80	1,88	50,89	5,0	19
27	377193,05	2124469,57	22,22	9,11	-112,0	-393,9	119,0	8,28	162	154	0,0062	81	0,08	810,80	1,81	51,44	5,0	21
28	377332,06	2124729,95	22,58	9,11	-112,3	-386,3	125,9	8,76	164	157	0,0061	82	0,08	810,80	1,88	50,89	5,5	21
29	377794,65	2124465,55	22,38	9,11	-112,4	-403,5	129,3	9,00	159	151	0,0063	80	0,07	810,90	1,48	54,34	5,0	14
30	378155,47	2124266,39	22,28	9,12	-112,6	-391,4	132,8	9,24	165	157	0,0061	83	0,08	811,00	1,73	52,09	4,5	13
31	378377,30	2124686,09	22,21	9,10	-111,3	-410,6	129,3	9,00	160	151	0,0063	80	0,07	811,20	1,96	50,29	5,0	38
32	378885,65	2124713,46	22,29	9,13	-113,4	-396,7	134,5	9,36	162	154	0,0062	81	0,08	811,20	1,80	51,52	5,0	10
33	379422,71	2124666,87	22,57	9,17	-115,4	-387,5	144,9	10,08	164	157	0,0061	82	0,08	811,20	1,56	53,58	4,5	12
34	379151,20	2125566,34	22,50	9,08	-110,5	-403,8	144,9	10,08	165	157	0,0061	82	0,08	811,40	1,83	51,28	5,0	11
35	379555,19	2125271,63	22,56	9,15	-114,30	-402,70	141,42	9,84	160	153	0,0062	80	0,07	811,50	1,59	53,31	4,5	14
36	379972,14	2125616,27	22,57	9,08	-110,80	-393,30	137,97	9,60	166	158	0,0060	83	0,08	812,10	1,67	52,60	5,0	13
37	380116,66	2125387,83	22,62	9,13	-113,50	-397,40	141,42	9,84	165	157	0,0061	82	0,08	812,20	1,61	53,13	5,5	13
38	379804,59	2125005,60	22,58	9,15	-114,40	-415,80	139,70	9,72	160	153	0,0062	80	0,08	812,50	1,58	53,40	5,5	8
39	379938,96	2124565,10	22,67	9,18	-116,00	-398,30	150,04	10,44	164	157	0,0061	82	0,08	812,70	1,38	55,35	5,5	13
40	379915,66	2124128,71	22,63	9,16	-115,10	-385,40	146,59	10,20	164	157	0,0061	82	0,08	813,20	1,38	55,35	5,0	31
41	379101,38	2124214,00	22,51	9,17	-115,50	-394,80	146,59	10,20	163	155	0,0061	81	0,08	812,40	1,43	54,84	5,0	17
42	379074,87	2123737,67	22,52	9,15	-114,40	-388,40	150,04	10,44	163	156	0,0061	82	0,08	812,50	1,49	54,25	4,5	24
44	378793,48	2123143,13	22,38	9,14	-114,10	-394,10	148,32	10,32	164	156	0,0061	82	0,08	813,10	1,61	53,13	5,5	23
45	378957,21	2122727,02	22,21	9,11	-112,0	-389,9	148,3	10,32	162	153	0,0062	81	0,08	813,00	1,65	52,78	5,0	17
47	379490,40	2122526,76	22,22	9,13	-113,1	-382,9	155,2	10,80	164	155	0,0061	82	0,08	813,00	1,43	54,84	5,0	15
49	380542,04	2122101,78	22,51	9,14	-114,0	-386,6	158,7	11,04	163	155	0,0061	81	0,08	812,70	1,49	54,25	5,0	16
50	380914,24	2121844,19	22,30	9,10	-111,7	-387,2	155,2	10,80	163	154	0,0061	81	0,08	812,70	1,60	53,22	5,0	14

Cuadro 1.15 Datos de parámetros físicos y químicos de calidad del agua obtenidos en campo y laboratorio correspondientes a la tercera campaña (marzo de 2011)

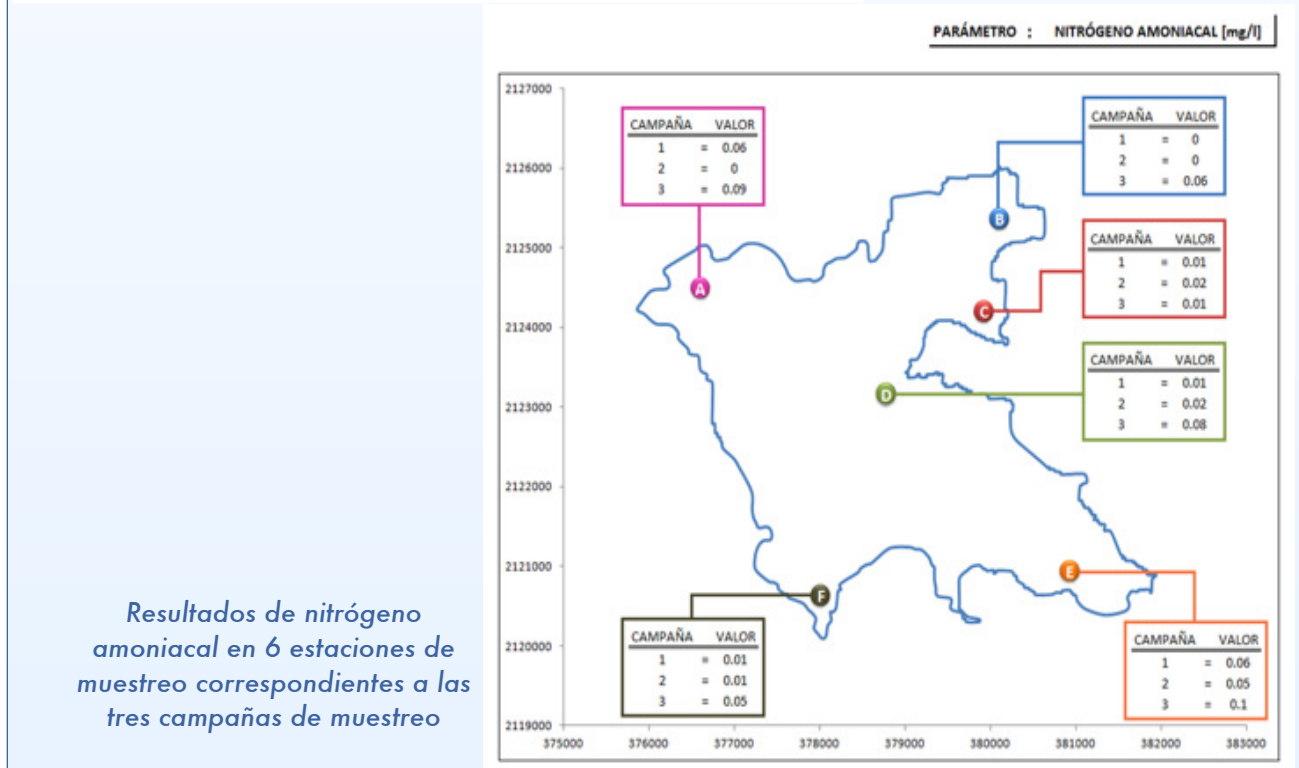
No.	Coordenada	Coordenada	°C	pH	pH mV	ORP	OD %	CO ppm	µS/cm	µS/cm A	MOhm-cm	SDT	Salinidad	mbar	PDS	TSI	TUR	SST
1	380716,04	2121910,34	21,03	9,06	-113,6	-499,0	125,9	9,10	155	143	0,0065	77	0,07	827,1	1,78	51,68	2,4	20
2	381444,76	2121225,91	21,28	9,14	-117,8	-420,2	122,1	8,77	166	154	0,0060	83	0,08	826,0	1,71	52,26	3,2	31
3	380902,38	2120918,93	21,07	9,18	-119,8	-405,1	116,8	8,42	164	152	0,0061	82	0,08	825,7	1,95	50,37	2,9	33
4	380462,20	2121057,36	20,79	9,19	-120,7	-400,8	118,9	8,61	164	151	0,0061	82	0,08	824,8	1,96	50,29	3,5	8
5	380526,71	2121542,37	21,06	9,21	-121,9	-394,7	118,0	8,50	166	154	0,0060	83	0,08	824,5	2,13	49,09	2,8	5
6	379770,79	2121636,46	20,64	9,21	-121,6	-400,0	118,1	8,57	162	149	0,0062	81	0,08	823,9	1,89	50,82	2,6	2
7	379406,98	2121251,49	20,82	9,19	-120,5	-392,8	114,0	8,24	167	154	0,0060	84	0,08	823,7	2,00	50,00	3,1	11
8	379056,87	2121453,83	20,71	9,19	-120,5	-395,0	114,5	8,29	166	153	0,0060	83	0,08	823,5	1,89	50,82	2,8	8
9	378257,21	2121117,89	20,60	9,21	-121,6	-393,1	118,3	8,58	168	154	0,0060	84	0,08	823,2	2,04	49,71	3,7	12
10	378014,16	2120587,46	20,61	9,16	-118,8	-393,1	116,8	8,47	167	153	0,0060	83	0,08	823,1	1,93	50,51	3,1	13
11	377764,10	2120761,28	20,47	9,15	-118,2	-399,3	116,5	8,61	167	153	0,0060	84	0,08	822,8	1,95	50,37	3,4	11
12	378447,47	2121617,52	20,74	9,21	-121,5	-412,1	119,3	8,62	166	152	0,0060	83	0,08	822,5	2,10	49,30	2,5	5
13	377891,29	2121876,38	21,02	9,17	-119,7	-397,8	119,4	8,58	167	154	0,0060	83	0,08	822,3	2,27	48,17	2,6	7
14	378468,66	2122610,36	20,82	9,37	-130,4	-397,0	119,5	8,62	167	153	0,0060	83	0,08	822,4	2,28	48,11	2,7	10
15	378025,88	2122348,32	20,64	9,22	-122,3	-403,0	119,7	8,66	165	152	0,0060	83	0,08	822,2	2,06	49,57	3,1	3
16	377267,91	2122566,11	20,51	9,21	-121,4	-402,6	119,4	8,67	169	155	0,0059	85	0,08	822,1	2,14	49,02	2,5	18
17	377329,84	2123091,39	20,41	9,20	-121,1	-395,1	115,5	8,40	168	154	0,0059	84	0,08	822,0	2,18	48,76	2,7	4
18	377853,71	2122811,21	20,58	9,21	-121,7	-395,6	117,9	8,54	169	155	0,0059	84	0,08	821,8	1,82	51,36	2,7	19
19	378078,85	2123286,21	20,83	9,21	-121,8	-394,8	116,7	8,41	172	159	0,0058	86	0,08	821,9	2,30	47,98	2,7	10
20	378339,95	2123459,71	21,05	9,22	-122,0	-390,1	116,8	8,39	171	158	0,0059	85	0,08	821,9	2,37	47,55	2,9	7
21	377807,78	2123807,57	20,78	9,18	-120,0	-398,0	113,6	8,20	169	155	0,0059	84	0,08	821,9	2,14	49,02	3,0	19
22	377543,81	2123640,25	20,74	9,17	-119,2	-395,0	114,9	8,30	169	155	0,0059	84	0,08	821,8	2,17	48,82	3,1	3
23	376967,92	2123564,18	20,57	9,20	-120,8	-420,4	117,3	8,50	165	151	0,0061	82	0,08	821,7	2,30	47,98	2,7	2
24	376558,49	2123917,40	20,82	9,20	-121,2	-409,2	113,4	8,18	166	153	0,0060	83	0,08	821,8	2,10	49,30	3,0	0
25	376577,07	2124507,53	20,67	9,16	-118,8	-402,8	112,9	8,16	168	154	0,0060	84	0,08	821,8	2,00	50,00	3,8	4
26	377145,98	2123984,16	20,83	9,18	-120,1	-414,7	112,2	8,09	165	152	0,0061	82	0,08	822,0	1,88	50,89	2,6	10
27	377143,26	2124448,39	20,85	9,17	-119,6	-408,3	113,1	8,15	166	153	0,0060	83	0,08	822,1	1,94	50,44	3,0	7
28	377291,26	2124742,52	21,13	9,19	-120,5	-403,3	113,3	8,13	169	166	0,0059	84	0,08	822,4	1,87	50,97	2,9	9
29	377762,32	2124435,02	21,22	9,20	-121,0	-406,2	112,5	8,06	166	154	0,0060	83	0,08	822,5	1,83	51,28	2,7	12
30	378114,42	2124242,07	21,04	9,18	-120,1	-407,0	113,4	8,14	167	154	0,0060	83	0,08	822,3	1,92	50,59	3,0	5
31	378368,64	2124701,52	20,83	9,19	-120,7	-401,1	114,8	8,28	167	154	0,0060	84	0,08	822,2	1,84	51,20	3,0	1
32	378918,01	2124750,13	21,03	9,20	-121,2	-404,4	115,2	8,28	167	154	0,0060	84	0,08	822,4	2,08	49,43	3,5	6
33	379428,41	2124645,32	21,16	9,19	-120,6	-411,0	117,8	8,45	170	157	0,0059	85	0,08	823,1	1,74	52,01	3,6	8
34	379019,71	2125554,91	21,70	9,17	-120,0	-403,7	118,2	8,39	168	157	0,0060	84	0,08	823,3	1,68	52,52	3,9	7
35	379589,75	2125265,38	21,34	9,19	-121,0	-405,0	117,9	8,43	167	156	0,0060	84	0,08	823,4	1,53	53,86	4,2	4
36	379989,16	2125607,07	21,67	9,16	-119,4	-400,7	113,7	8,07	171	160	0,0059	85	0,08	823,4	1,60	53,22	3,8	17
37	380113,70	2125381,70	21,66	9,19	-121,1	-396,4	116,6	8,29	172	161	0,0058	86	0,08	823,2	1,44	54,74	3,6	10
38	379717,23	2125043,07	21,33	9,20	-121,2	-398,1	117,3	8,38	171	169	0,0058	86	0,08	822,5	1,44	54,74	3,5	6
39	379938,80	2124540,51	21,64	9,21	-121,9	-398,4	118,8	8,36	171	160	0,0058	86	0,08	815,5	1,62	53,04	3,7	11
40	379909,65	2124104,16	21,54	9,22	-122,7	-395,9	118,6	8,35	169	158	0,0059	85	0,08	814,5	1,51	54,05	3,5	27
41	378982,07	2124279,35	20,87	9,21	-121,7	-412,8	117,2	8,35	164	151	0,0061	82	0,08	813,4	1,79	51,60	3,2	7
42	378972,76	2123753,72	21,11	9,22	-122,2	-407,9	116,1	8,23	166	154	0,0060	83	0,08	813,2	1,81	51,44	2,9	6
43	378921,92	2123133,06	21,06	9,21	-121,5	-409,2	115,7	8,21	165	152	0,0061	82	0,08	812,7	2,09	49,36	2,6	8
44	378784,84	2123161,83	21,03	9,23	-122,6	-394,9	114,4	8,11	168	155	0,0060	84	0,08	812,4	1,78	51,68	2,8	8
45	378998,12	2122729,83	20,81	9,23	-122,8	-390,5	116,6	8,31	167	154	0,0060	83	0,08	812,1	1,78	51,68	3,9	9
46	379228,16	2122181,10	20,80	9,26	-124,2	-399,3	117,3	8,35	169	156	0,0059	85	0,08	811,8	1,79	51,60	2,4	12
47	379490,46	2122535,98	21,04	9,21	-121,9	-392,7	116,4	8,25	168	156	0,0059	84	0,08	811,5	1,84	51,20	2,7	7
48	379598,81	2123024,07	21,51	9,21	-121,9	-397,3	115,6	8,12	166	155	0,0060	83	0,08	811,9	1,78	51,68	4,7	1
49	380194,54	2122562,11	21,33	9,24	-123,4	-398,8	116,9	8,24	166	154	0,0060	83	0,08	811,7	1,72	52,18	2,7	14
50	380048,21	2122071,19	20,96	9,23	-123,0	-399,4	118,2	8,39	169	156	0,0059	84	0,08	811,4	1,71	52,26	2,7	2

Las Figuras 1.25, 1.26, 1.27 y 1.28 presentan los resultados de las seis estaciones donde se determinaron parámetros adicionales (DBO, fosfatos, nitrógeno amoniacal, nitratos, coliformes totales y coliformes fecales) a los físicos y químicos obtenidos en las tres campañas de muestreo de calidad del agua en el Vaso de la presa Valle de Bravo, realizadas en abril y octubre de 2010 y en marzo de 2011. Las seis estaciones fueron seleccionadas por estar cerca de las descargas y una estación se ubicó en el centro del embalse, veáse Figura 1.11.



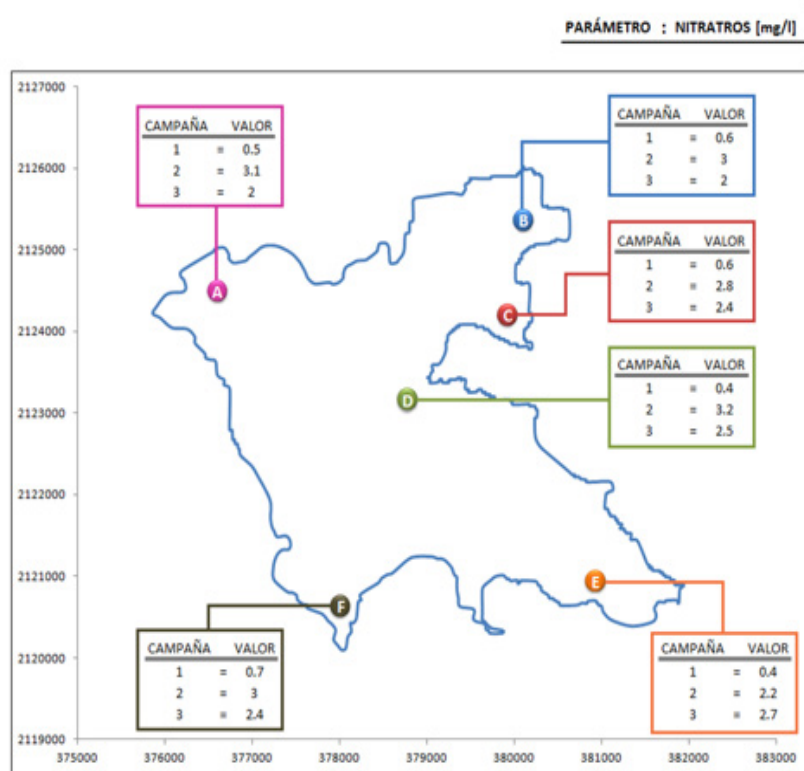


Resultados de fosfatos en 6 estaciones de muestreo correspondientes a las tres campañas de muestreo



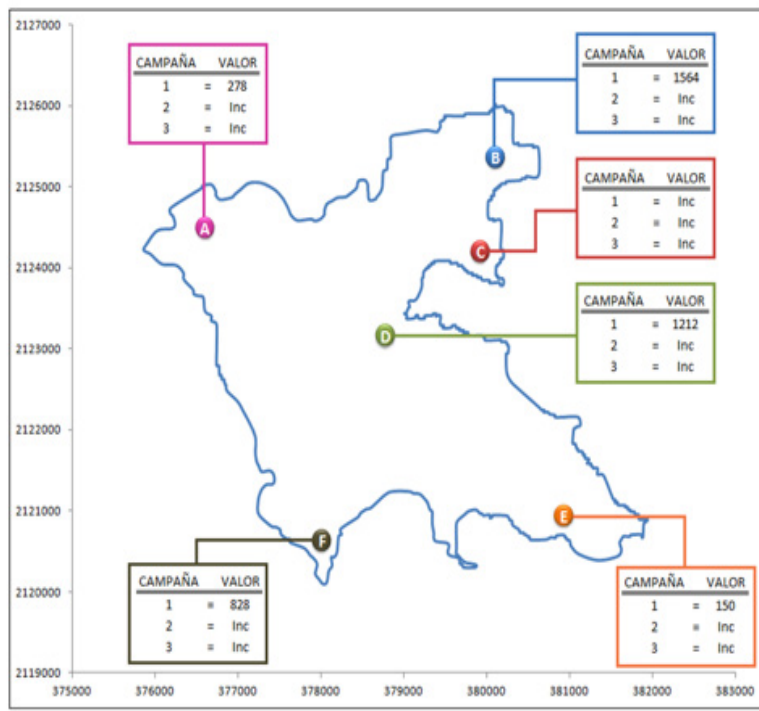
Resultados de nitrógeno amoniacal en 6 estaciones de muestreo correspondientes a las tres campañas de muestreo

Figura 1.26 Resultados de otros parámetros



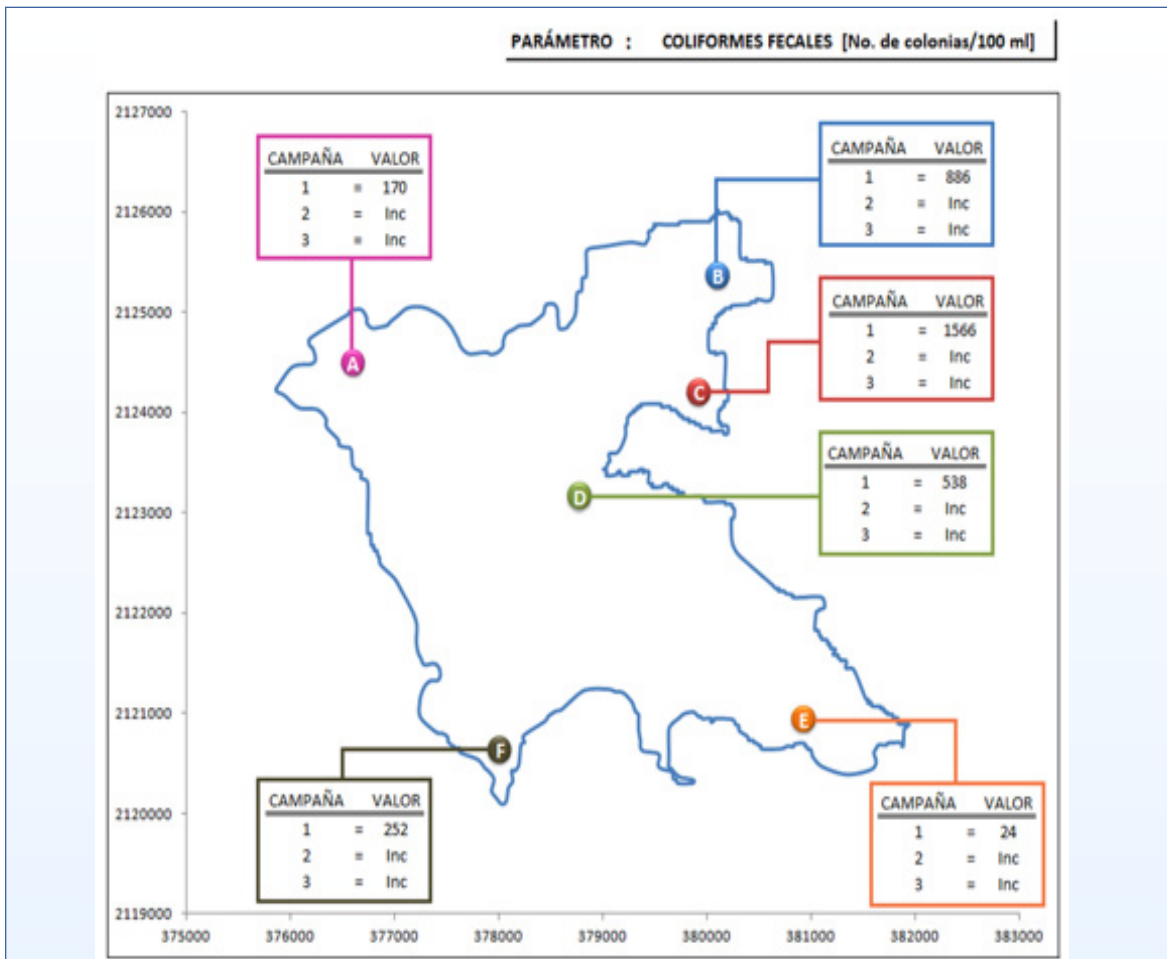
Resultados de nitratos en 6 estaciones de muestreo correspondientes a las tres campañas de muestreo

PARÁMETRO : COLIFORMES TOTALES [No. de colonias/100 ml]



Resultados de coliformes totales en 6 estaciones de muestreo correspondientes a las tres campañas de muestreo

Figura 1.27 Resultados de otros parámetros



Resultados de coliformes fecales en 6 estaciones de muestreo correspondientes a las tres campañas de muestreo

Figura 1.28 Resultados de otros parámetros

1.2.5 Análisis y discusión de resultados

Para el análisis de los datos de calidad del agua se graficó la variación espacial de los resultados de: temperatura, pH, turbiedad, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales y oxígeno disuelto, utilizando el programa SURFER 8. Las Figuras 1.29, 1.30 y 1.31 muestran la distribución espacial de la concentración de los parámetros arriba mencionados.

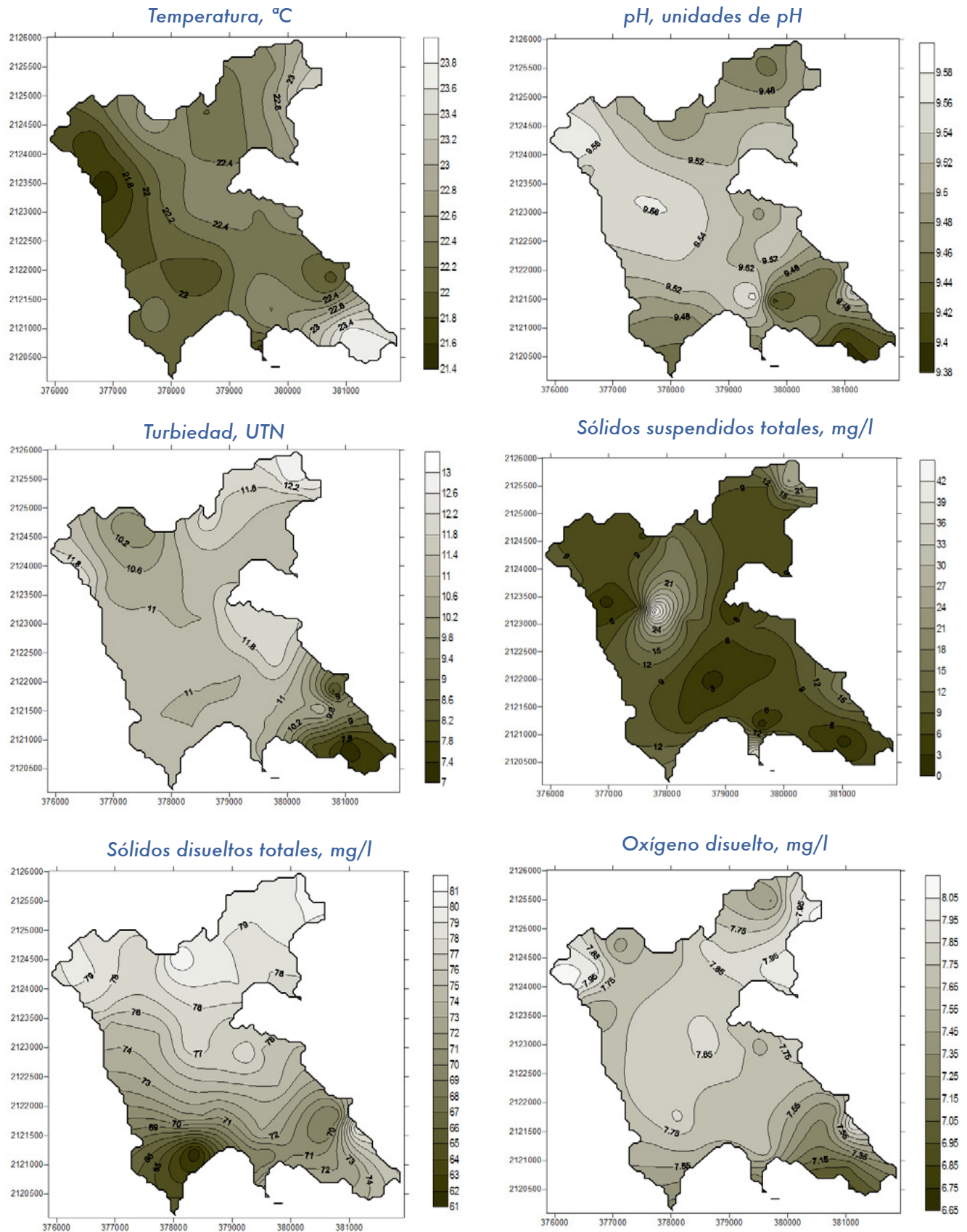


Figura 1.29 Distribución espacial de la concentración de los parámetros: temperatura, pH, turbiedad, SST, SDT y oxígeno disuelto para la primera campaña de muestreo, abril de 2010

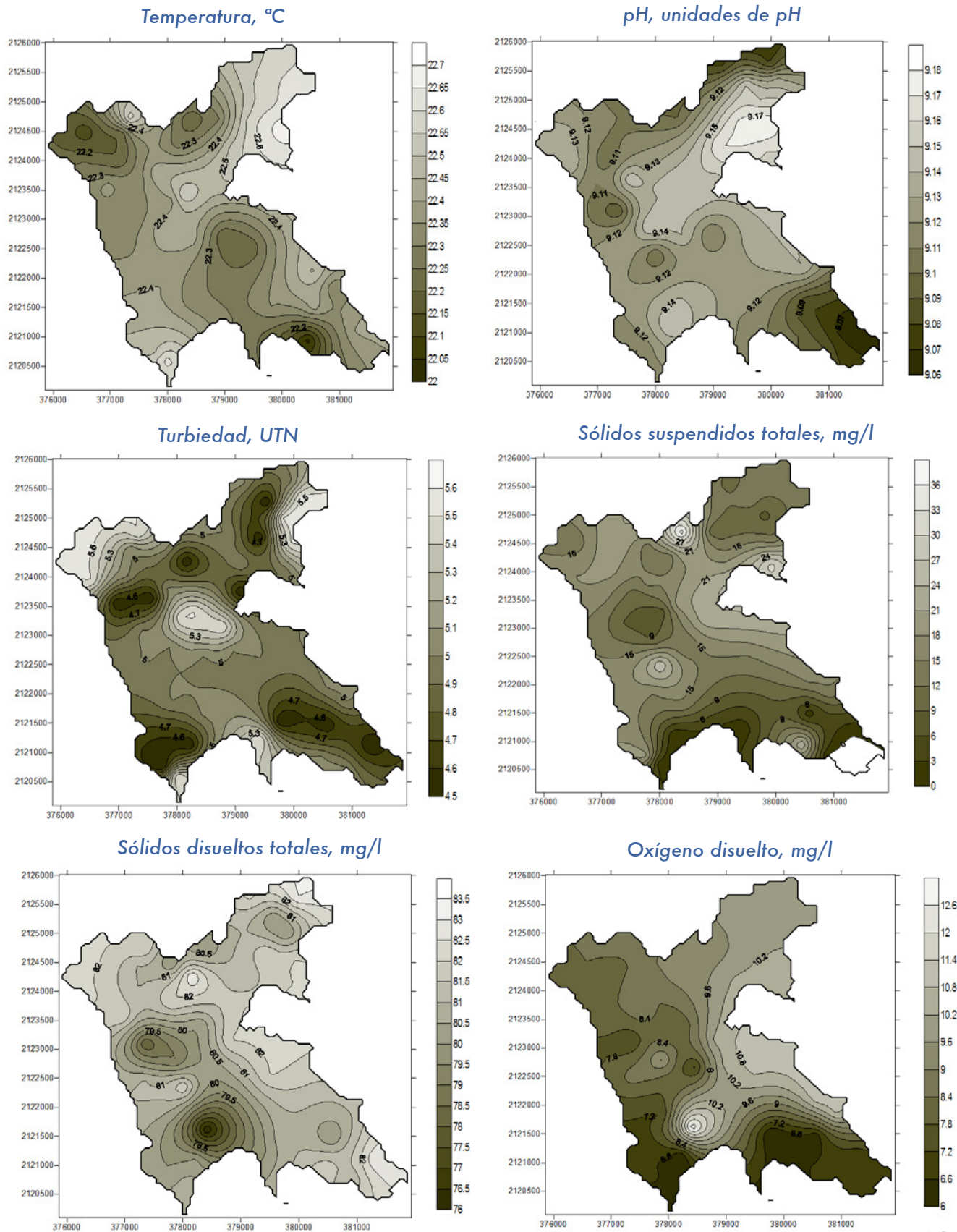


Figura 1.30 Distribución espacial de la concentración de los parámetros: temperatura, pH, turbiedad, SST, SDT y oxígeno disuelto para la segunda campaña de muestreo, octubre de 2010

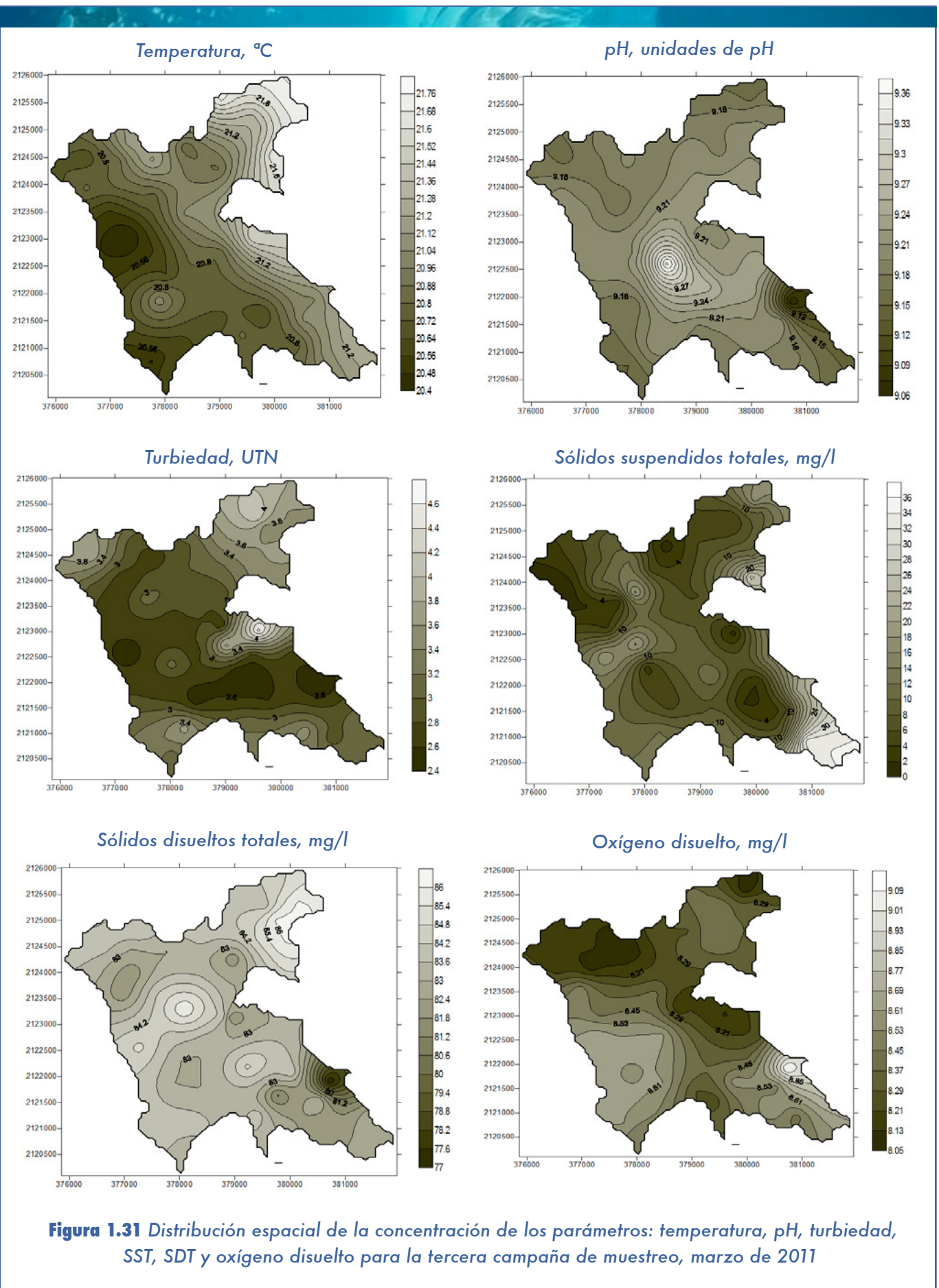


Figura 1.31 Distribución espacial de la concentración de los parámetros: temperatura, pH, turbiedad, SST, SDT y oxígeno disuelto para la tercera campaña de muestreo, marzo de 2011

Índice de Calidad del agua

Con los parámetros obtenidos en campo se determinó el Índice de Calidad del Agua (ecuación 1.3) correspondiente a las tres campañas, para 44 estaciones de muestreo donde fueron determinados 15 parámetros. La Figuras 1.32, 1.33 y 1.34 muestran la distribución espacial del índice de calidad del agua para las campañas realizadas en la presente investigación.

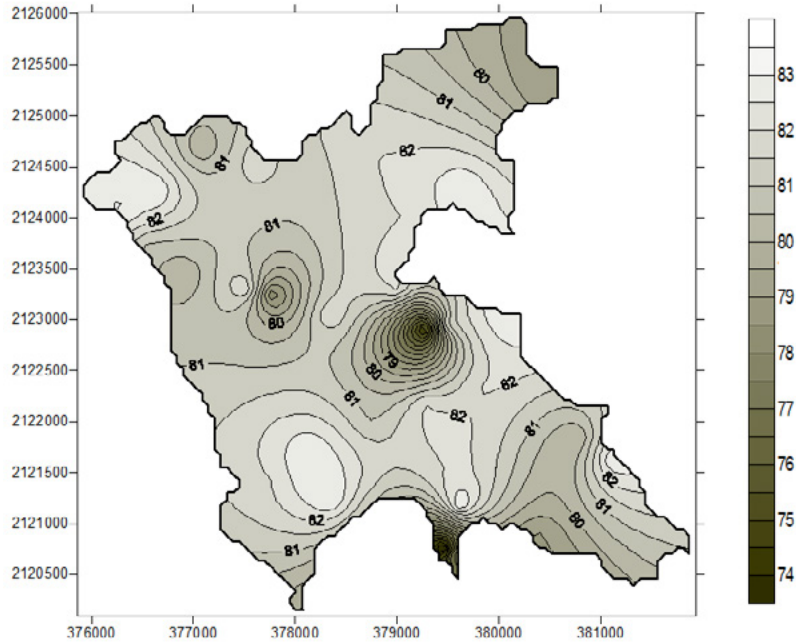


Figura 1.32 Distribución espacial del índice de calidad del agua ICA correspondientes a la primera campaña de muestreo, abril de 2010

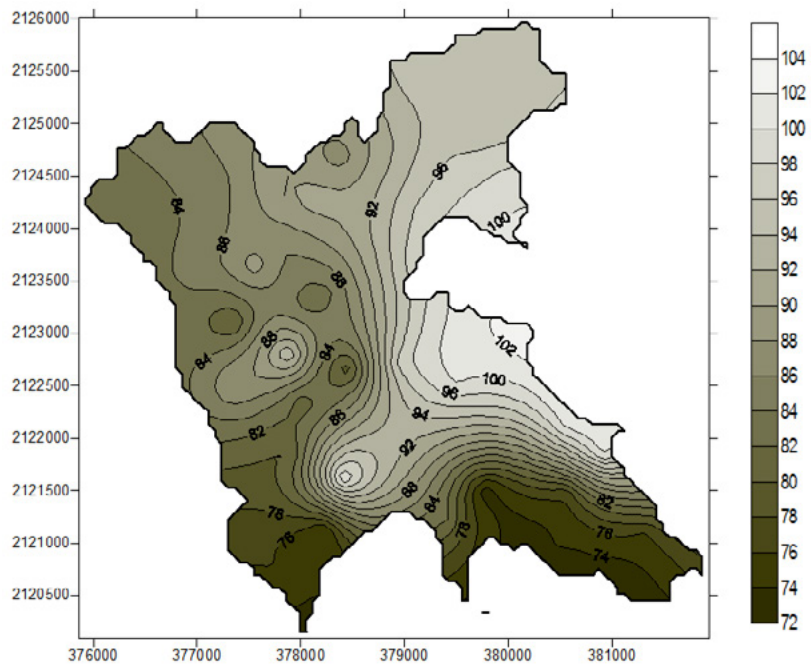


Figura 1.33 Distribución espacial del índice de calidad del agua ICA correspondientes a la segunda campaña de muestreo, octubre de 2010

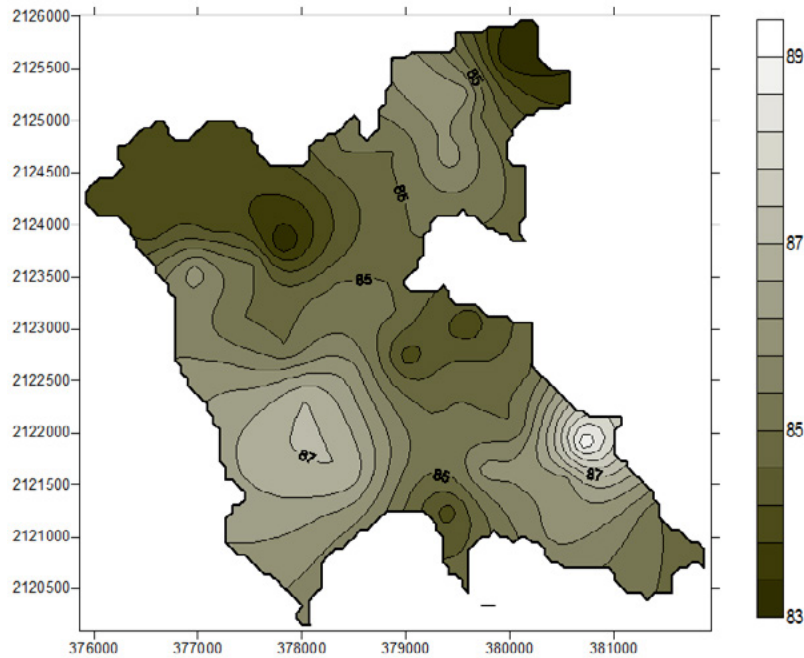


Figura 1.34 Distribución espacial del índice de calidad del agua ICA correspondientes a la tercera campaña de muestreo, marzo de 2011

La Figura 1.35 muestra el índice de calidad del agua con un total de 22 parámetros, para las seis estaciones donde se determinaron parámetros adicionales (DBO, fosfatos, nitrógeno amoniacal, nitratos, coliformes totales y coliformes fecales).

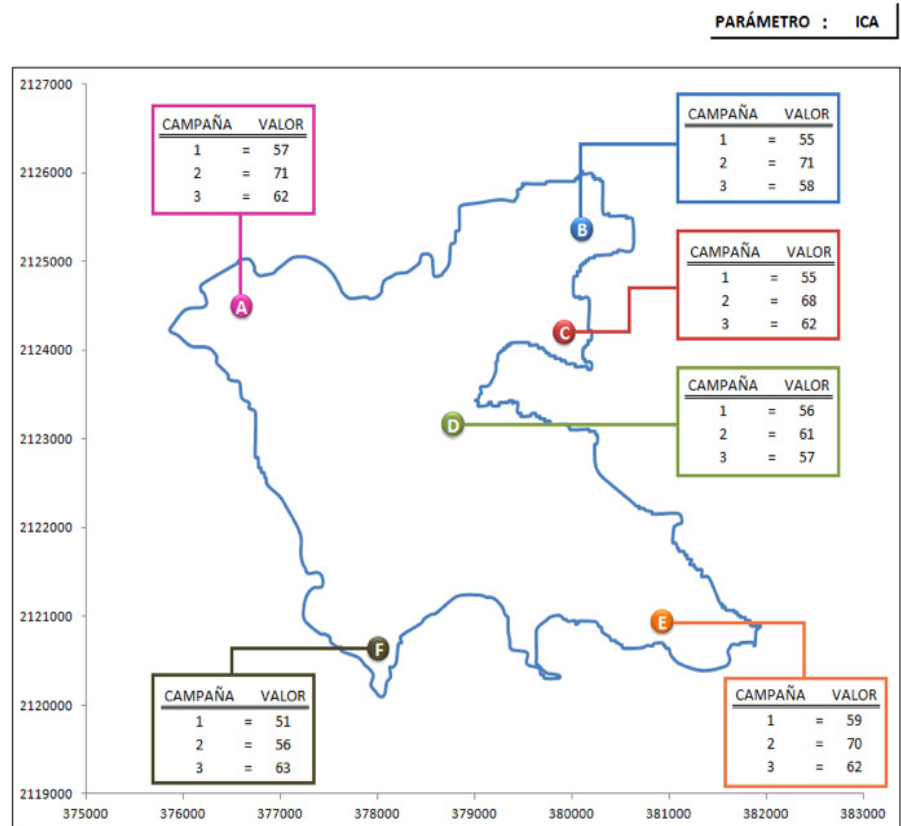


Figura 1.35 Índice de calidad del agua para las seis estaciones de muestreo donde fueron determinados 22 parámetros, correspondientes a las tres campañas de muestreo

Discusión de resultados

Por parámetros

Temperatura. De las tres campañas de muestreo, la máxima temperatura medida en el agua superficialmente correspondió a la época de estiaje con 23.8 °C (abril de 2010), seguida de la máxima de la época de lluvias 22.7 °C (octubre de 2010) y la máxima de la época de estiaje con 21.76 °C (marzo de 2011). Las máximas diferencias de temperatura (máxima y mínima) en el embalse se presentaron en la primera campaña (abril de 2010) con 2.4 °C, seguida de la tercera campaña (marzo de 2011) con 1.36 °C y la mínima correspondiente a la segunda campaña (octubre de 2010) con 0.7 °C. Se puede concluir que en la época de lluvias el embalse estaba bastante mezclado y por tanto prácticamente uniforme en su temperatura con una diferencia que no llega ni a 1 °C. Por otro lado, se observó que las mayores temperaturas medidas en el embalse para las tres campañas de muestreo se presentan en la cercanía de las descargas de los ríos Amanalco, Las Flores, Los Hoyos y Yerbabuena.

pH. De las tres campañas de muestreo, el máximo valor medido en el agua superficialmente correspondió a la época de estiaje con 9.58 unidades de pH (abril de 2010), seguida de la máxima de la época de estiaje con 9.36 unidades de pH (marzo de 2011) y el máximo de la época de lluvias con 9.18 unidades de pH (octubre de 2010). Las condiciones del pH para las tres campañas son de carácter alcalino; sin embargo, el menor valor de pH registrado correspondió a la época de lluvias siempre en condiciones alcalinas (9.18 a 9.06 unidades de pH). Se puede concluir que en la época de lluvias el embalse estaba bastante mezclado, presentándose la mínima diferencia de unidades de pH en el embalse (0.12 unidades de pH). No cumple con el ámbito de pH recomendado por la *NOM- 127- SSA-1994 “Salud Ambiental Agua para Uso y Consumo Humano- Límites Máximos Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización”*, de 6.5 -8.5, por lo que el agua del vaso de la presa Valle de Bravo requiere neutralización.

Turbiedad. En general el agua estuvo bastante transparente en las tres campañas de muestreo. La más alta turbiedad correspondió a la época de estiaje de 2010 (13-7 UTN), seguida de la época de lluvias de 2011 (5.6-4.5 UTN) y la época de estiaje de 2011 (4.6-2.4 UTN). La época de lluvias, si bien arrastró gran cantidad de sedimentos, contribuyó a diluir tanto, que en el estiaje de 2011 la gran aportación de lluvias del año anterior logró disminuir significativamente la turbiedad si se le compara con la misma época del año anterior. Se aprecia que la mayor concentración de turbiedad para las tres campañas, se presenta en la descarga del río Amanalco.

Sólidos suspendidos totales, SST. La más alta concentración de los sólidos suspendidos se presentó en la época de estiaje de 2010 (42 mg/l), la época de lluvias del mismo año y de estiaje del 2011 presentaron prácticamente la misma concentración (36 mg/l), esto debido a la dilución que se presentó por las lluvias extraordinarias del 2010. Para las tres campañas, la menor concentración de sólidos suspendidos espacialmente se presenta cercana a la cortina de la presa.

Sólidos disueltos totales, SDT. Las concentraciones de SDT no presentaron variaciones significativas para la época de estiaje y lluvias. Puede apreciarse una mayor concentración de los SDT en las descargas de los ríos Amanalco, Las Flores, Los Hoyos y Yerbabuena. Cumple con la concentración máxima permisible de SDT establecida en la *NOM- 127- SSA-1994 “Salud Ambiental Agua para Uso y Consumo Humano- Límites Máximos Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización”*, de 1000 mg/l.

Oxígeno Disuelto, OD. En los ecosistemas acuáticos el OD está presente gracias a la reaireación y a la fotosíntesis. En el vaso de la presa de Valle de Bravo la concentración de OD siempre fue muy satisfactoria para el desarrollo de vida acuática, la máxima concentración correspondió a la época de lluvias de 2010 (12.6 mg/l), seguida de la época de estiaje del 2011 (9.09 mg/l) y la de estiaje del 2010 (8.05 mg/l).

Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO₅₋₂₀. Con base en la información que se presenta en la Figura 1.21, las máximas concentraciones de DBO₅₋₂₀ se obtuvieron en la campaña de abril de 2010, con concentraciones de 34 mg/l (cerca a la descarga del río Amanalco), 36 mg/l (cerca a la descarga del río las Flores), 32 mg/l (cerca a la descarga del río los Hoyos), 50 mg/l (cerca al río Carrizal), 30 mg/l al centro de la presa y de 28 mg/l (cerca a la cortina de la presa). En la campaña de muestreo correspondiente a la época de lluvias (octubre de 2010) y debido al efecto de mezcla y dilución se tuvo una concentración promedio de 4 mg/l (obtenida a partir de las concentraciones de los seis puntos mostrados en la Figura 1.25). El efecto de dilución se percibió aún en la época de estiaje del 2011, en donde la concentración promedio fue de 6.5 mg/l para los seis puntos mostrados en la Figura 1.25. El aporte de materia orgánica está relacionado con descargas de aguas residuales, aportes ganaderos y de actividad piscícola.

Fosfatos, PO₄. Las concentraciones de fosfatos fueron elevadas en todas las campañas de muestreo y en las seis estaciones consignadas en la Figura 1.26, considerando que en todos los casos se rebasó la concentración establecida en los *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89, Diario Oficial de la Federación, Miércoles 13 de diciembre de 1989*, relativa a que los fosfatos totales, medidos como fósforo, no deberán exceder de 0.025 mg/l dentro del lago o embalse, para prevenir el desarrollo de especies biológicas indeseables y para controlar la eutrofización acelerada. Las máximas concentraciones se presentaron en la época de lluvias debido al arrastre de abonos en tierras agrícolas, escorrentía de áreas sujetas a tala y desde luego al aporte de aguas residuales. Por otro lado, tampoco se cumple con la recomendación de los *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89* relativos a la máxima concentración de fosfatos en aguas que se utilizan como fuente de abastecimiento de agua potable (0.1 mg/l).

Nitrógeno amoniacal, NH₃. Para las tres campañas de muestreo y para las seis estaciones que se muestran en la Figura 1.26, las concentraciones de NH₃ son bajas (0-0.09 mg/l), se cumple con *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89* relativos a la concentración para la protección de la vida acuática en agua dulce (0.06 mg/l) ya que sólo en una estación y en una de las campañas se registró la concentración de 0.09 mg/l. Cumple con la concentración máxima permisible de NH₃ establecida en la *NOM- 127- SSA-1994 “Salud Ambiental Agua para Uso y Consumo Humano- Límites Máximos Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización”*, de 0.5 mg/l.

Nitratos, NO₃. Con base en la Figura 1.27, sus concentraciones oscilan entre 0.4-0.7 mg/l para abril de 2010, entre 2.2 y 3.1 mg/l para octubre de 2010, y entre 2-2.7 mg/l para marzo de 2011. Se aprecia un incremento en la concentración asociado a la época de lluvias; sin embargo, no rebasa la concentración máxima permisible establecida en la *NOM- 127- SSA-1994 “Salud Ambiental Agua para Uso y Consumo Humano- Límites Máximos Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización”*, de 10 mg/l. de SDT establecida en la *NOM- 127- SSA-1994 “Salud Ambiental Agua para Uso y Consumo Humano- Límites Máximos Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización”*, de 1000 mg/l.

Coliformes Totales y Fecales. La *NOM- 127- SSA-1994 “Salud Ambiental Agua para Uso y Consumo Humano- Límites Máximos Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización”* establece que los Coliformes Totales y Fecales deben estar ausentes o no ser detectables, en las tres campañas de muestreo y en los seis sitios de muestreo, como puede verse en las Figuras 1.27 y 1.28, se tuvo incontable número de colonias usando la técnica de filtros de membrana y diluciones. La presencia de Coliformes Totales y Fecales está asociada con la contaminación de desechos humanos y animales de sangre caliente, por lo que el agua requiere desinfección.

Por ICA

Considerando las Figuras 1.32, 1.33 y 1.34 donde se muestra la distribución espacial del ICA calculado con 15 parámetros para las tres campañas de muestreo, puede concluirse que, en general, la calidad del agua es aceptable para cualquier deporte acuático y para el sostenimiento de la mayoría de las especies acuáticas, sin embargo, para uso en abastecimiento de agua potable requiere un tren de potabilización.

Con base en la Figura 1.35 donde se muestra la calificación del ICA para las seis estaciones donde se determinaron 22 parámetros, para las tres campañas de muestreo, el ICA oscila entre 51-71. Por lo que puede concluirse que: para uso general el agua está contaminada, para uso potable requiere mayor necesidad de tratamiento de potabilización, es adecuada para deportes acuáticos excepto aquellos que impliquen inmersión, y no es apta para criar y cultivar especies acuáticas sensibles.

1.2.6 Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

1. Los ríos Amanalco, Las Flores, Los Hoyos, Yerbabuena y el Carrizal aportan contaminantes a la presa de manera significativa al vaso de la presa Valle de Bravo. También es importante la contaminación que genera el club de Yates.
2. La presencia de coliformes totales y fecales confirma la descarga de desechos humanos y animales al vaso de la presa. Los desechos humanos llegan a través de descargas de aguas residuales sin tratamiento y debido al arrastre de desechos depositados al suelo en aquellas zonas donde no se dispone de drenaje. La actividad ganadera también contribuye a este tipo de contaminación por el arrastre de desechos hacia el vaso.
3. El agua del vaso de la presa Valle de Bravo presenta un pH en condiciones alcalinas.

4. Aunque sólo en algunas zonas del vaso se observó la presencia de malezas acuáticas, es importante controlar el aporte de nutrientes, particularmente fosfatos.
5. Un aspecto positivo de calidad del agua del vaso es la concentración por arriba de la de saturación del oxígeno disuelto, aspecto fundamental para el sostenimiento de la vida acuática y que sugiere presencia de algas e intensa reaireación .
6. Las descargas de aguas residuales, el arrastre de materia orgánica proveniente del suelo, y la que proviene de las piscifactorías contribuyen a la considerable concentración en el vaso de materia orgánica, expresada como DBO₅₋₂₀.
7. De los parámetros analizados que no cumplen con la NOM- 127- SSA-1994, se incluyen el pH y los Coliformes Totales y Fecales.
8. Los problemas que existen dentro de la Cuenca de Valle de Bravo afectan a la región y fuera de ella, ya que sus recursos hidráulicos son muy importantes para el abastecimiento de agua potable a la zona más poblada del país, la Ciudad de México.

Recomendaciones

1. Es necesario controlar el crecimiento demográfico dentro de la cuenca, ya que el enfoque turístico que tiene la zona ha permitido el desarrollo de diversos fraccionamientos residenciales, que crean a su vez la necesidad de más servicios y fomentan la migración de personas al interior de la cuenca.
2. Es indispensable emprender acciones para la conservación de los suelos, la conservación de las áreas boscosas y el saneamiento en general de la región, así como cuidar y limpiar canaletas y arroyos que conducen a los afluentes.
3. Es necesario vigilar y controlar la carga y descarga de combustibles para las lanchas y en general de los vehículos acuáticos del embalse, y el mal estado de conservación que presenten, con la intención de reducir la contaminación con grasas, aceites e hidrocarburos en general.. Hay contaminantes que por ser no convencionales pudieran no ser removidos mediante el tratamiento de potabilización ya establecido, por lo que sería deseable restringir el tipo de actividades que se realizan en el vaso de la presa o controlarlas.
4. Dentro de las actividades recreativas se practica el esquí, el cual implica la sumersión en el agua. Dada la calidad del agua en términos de la presencia de Coliformes Totales y Fecales debería informarse sobre esta condición de calidad del agua, para protección de la salud de las personas. Debería restringirse la actividad deportiva acuática.

CAPÍTULO 2

PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Uno de los objetivos rectores del Programa Nacional Hídrico 2007-2012 es procurar para la nación agua en cantidad y calidad suficiente. La evaluación de los parámetros de calidad del agua es muy importante y el monitoreo de los cuerpos de agua permite conocer las características de los sistemas hídricos, posibles focos de contaminación, etc. La evaluación de la calidad del agua mediante métodos convencionales se practica comúnmente en nuestro país. Como ha quedado establecido en el Capítulo 1 el muestreo y análisis tiene algunas limitaciones: es necesario un laboratorio equipado para determinar los distintos parámetros de calidad, acudir al sitio de estudio para obtener las muestras; además, la toma de muestras y su análisis requiere un tiempo considerable que se incrementa en proporción directa al tamaño del cuerpo de agua.

Por otro lado, México enfrenta el reto de administrar y preservar las aguas nacionales para lograr su uso sustentable, con la corresponsabilidad de los tres órdenes de gobierno y la sociedad en general. Sin duda, el cuidado y preservación de las cuencas y acuíferos es fundamental para asegurar el desarrollo económico y social del país. Este reto toma mayor relevancia si se consideran los crecientes problemas que han deteriorado la cantidad y calidad del agua: sobrexplotación en regiones donde el recurso es escaso, contaminación de las fuentes de abastecimiento, invasión de zonas de alto riesgo para la población, así como una creciente demanda del agua para usos diversos, que conlleva al surgimiento de conflictos sociales por un mayor acceso al recurso. Para enfrentar el reto que se ha planteado, México requiere destinar importantes recursos técnicos y financieros asociados con el monitoreo de sitios para la evaluación tradicional de la calidad del agua, por estas razones el objetivo principal del proyecto *PAPIIT IN107710 “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota”* es establecer una metodología que permita diseñar modelos de calidad del agua mediante el uso de la Percepción Remota (PR) y datos de campo, para que a partir de aquéllos pueda monitorearse la calidad del agua fundamentalmente a partir de imágenes satelitales. Por tal motivo, este Capítulo aborda los fundamentos de la PR y los sistemas de información geográfica (SIG), conceptos que además permitirán comprender la metodología desarrollada en el Capítulo 3 de la presente publicación.

2.1 PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

2.1.1 Concepto de Percepción Remota

La percepción remota (PR) es la técnica que permite obtener información, mediante sensores instalados en plataformas espaciales, de los objetos situados sobre la superficie terrestre. El proceso para la obtención de información a distancia de los objetos, está gobernado por las leyes de la física, y es gracias a la radiación electromagnética que el sensor obtiene las características del objeto remoto. Los principales elementos en el proceso de colección de datos en la PR son: el objeto a ser estudiado, el sensor y la radiación electromagnética que hay entre ambos. En todas las etapas del proceso de colección de datos y análisis en PR participa la radiación electromagnética. Lo anterior se muestra en la Figura 2.1, donde las flechas indican el flujo de información en un sistema de PR.

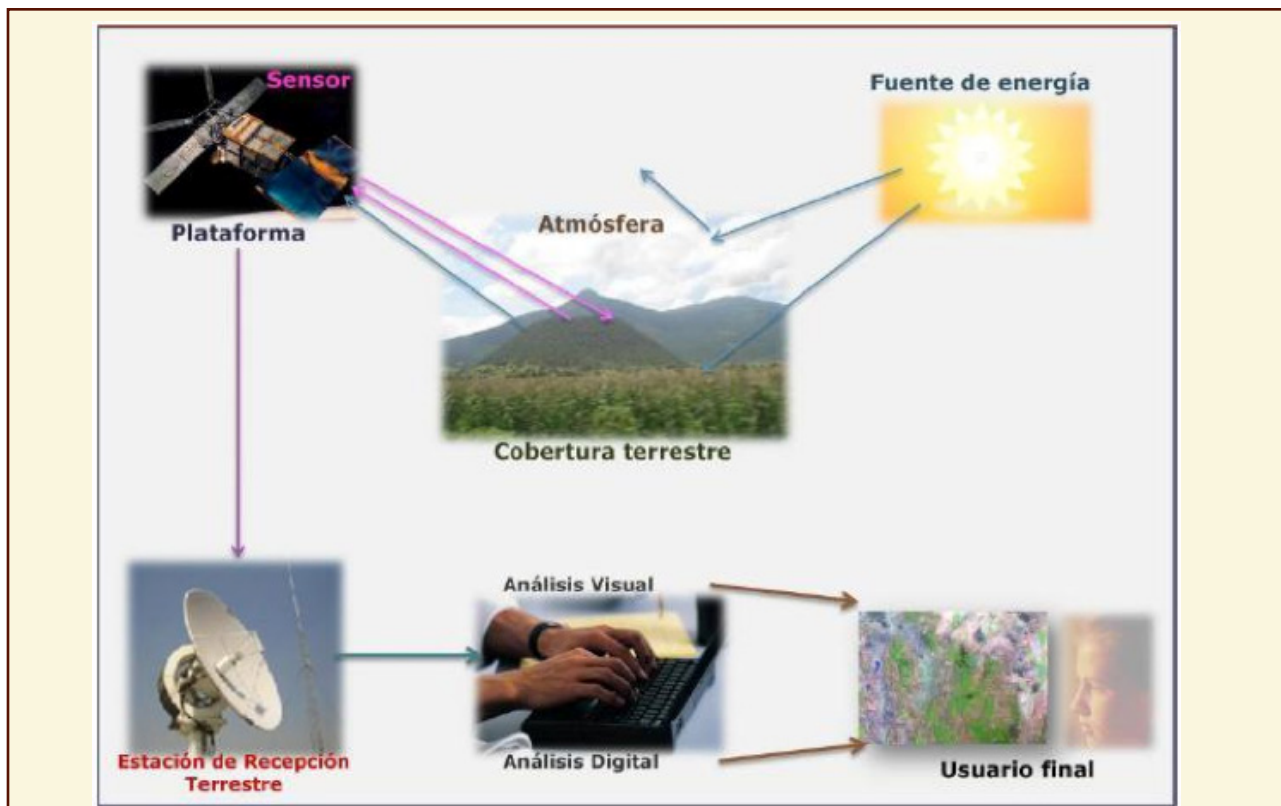


Figura 2.1 Flujo de información en un sistema de percepción remota

Fuente: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/ImgSatelite/Elementos.aspx>

Adicionalmente puede observarse de la Figura 2.1 que otros componentes del proceso de percepción remota son: la fuente natural de energía electromagnética (el Sol); la atmósfera con la cual interactúa la radiación electromagnética; el sistema de recepción que es donde se recibe la energía registrada por el sensor y donde se graba como archivo digital para su posterior distribución, se requiere también la interpretación visual y/o digital por parte de personal con conocimiento en el análisis temático y cuantitativo empleando un software de sistemas de información geográfica; y finalmente el usuario, quien aplicará la información obtenida sobre un objeto de estudio como ayuda para la resolución de un problema particular.

2.1.2 Modelos de Radiación Electromagnética

Para explicar las propiedades de la radiación electromagnética se han propuesto dos modelos: el de la teoría ondulatoria y el de la teoría del movimiento de las partículas. Ambas teorías se complementan, pues se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo con ambos patrones.

Modelo Ondulatorio

Al transmitirse la energía electromagnética de un lugar a otro sigue un comportamiento armónico y continuo a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: el eléctrico y el magnético (Chuvieco 1990), Figura 2.2. Las características de este flujo energético son definidas por dos elementos: la longitud de onda (λ) y la frecuencia (F).

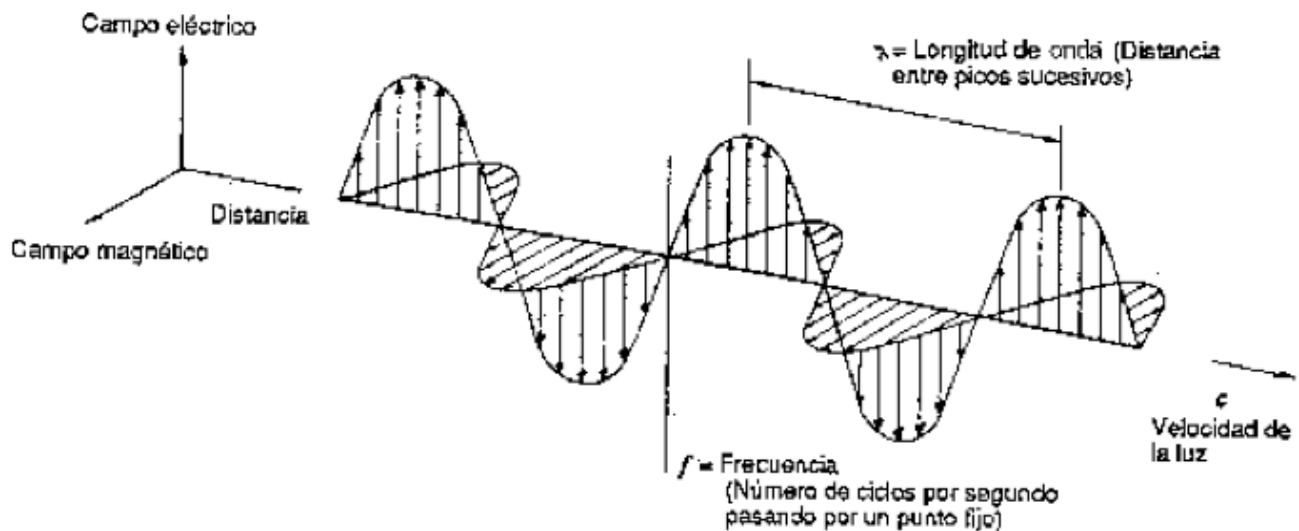


Figura 2.2 Esquema de una onda electromagnética

Fuente: Tomada de: *Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas, Manual Introductorio. Depósito de Documentos de la FAO, 1990*

Longitud de onda

Corresponde a los ciclos repetitivos del campo eléctrico en el espacio. Es la distancia ocupada por un ciclo completo o distancia entre dos picos sucesivos de una onda y se denota con λ . La longitud de onda es medida en metros (m), centímetros (cm), micrómetros (μm) o nanómetros (nm), (Belward, Valenzuela 1990).

Frecuencia

Número de ciclos pasando por un punto fijo en la unidad de tiempo; se denota con F y es medida en s^{-1} .

La velocidad de la onda a través del espacio es constante y está relacionada con la longitud de onda y la frecuencia, como se muestra en la ecuación 2.1.

$$c = \lambda F \quad \dots (2.1)$$

donde c es la velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

De la ecuación (2.1) puede concluirse que a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa. Por ello basta con mencionar sólo λ o F para identificar apropiadamente el tipo de energía mencionado.

Espectro electromagnético

Como se ha establecido, cualquier tipo de energía radiante puede ser descrita por su longitud de onda o por su frecuencia. Es común que se use la longitud de onda para describir el espectro electromagnético, Figura 2.3. Aunque la sucesión de valores de la longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar.

El espectro electromagnético incluye desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos x en nm), hasta las kilométricas (telecomunicaciones en cm o m).

Las bandas del espectro electromagnético usadas en PR son principalmente: la visible, la infrarroja y la de microondas. Cada una de estas formas de radiación electromagnética transporta diferente información de un mismo objeto. Por ejemplo, la banda visible podría describir su color, la infrarroja la temperatura, y la de microondas podría describir la rugosidad de su superficie. El Cuadro 2.1 describe con más detalle las bandas del espectro electromagnético más usadas en PR.

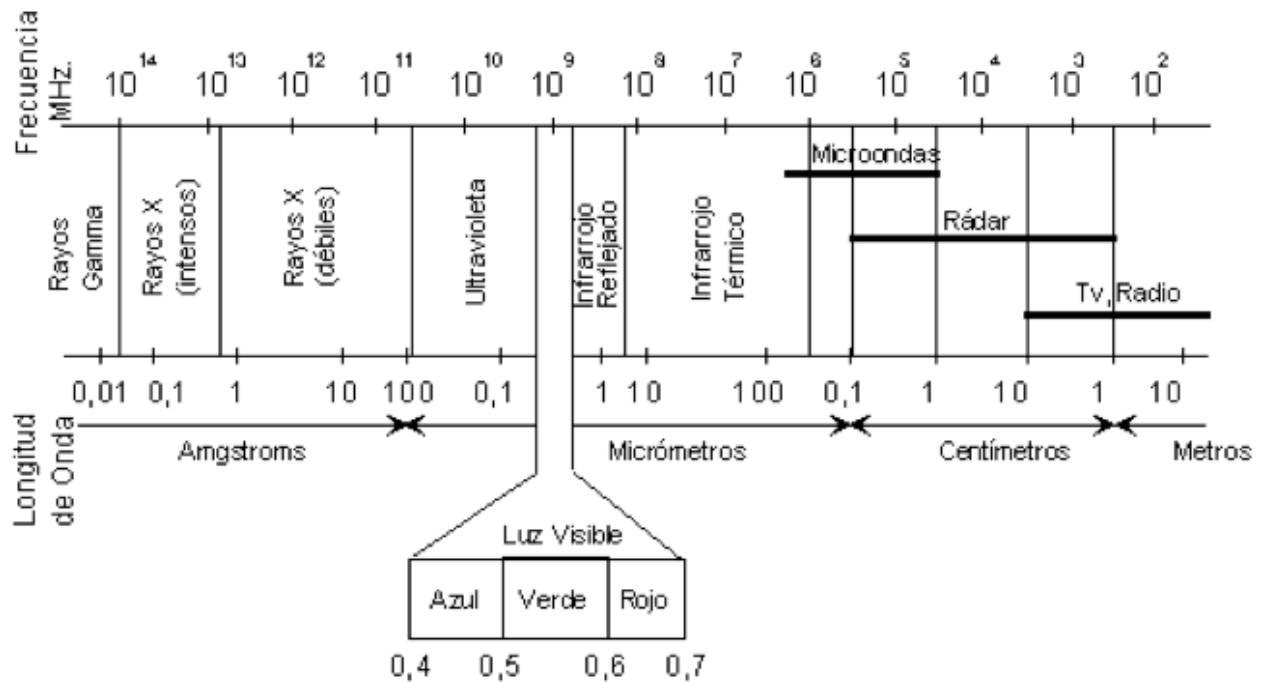


Figura 2.3 Espectro electromagnético

Tomada de: Apuntes del Curso Agua y Futuro, Iniciación a la Teledetección. Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale

Cuadro 2.1. Principales bandas del espectro electromagnético usadas en percepción remota

Nombre de la Banda	Características Principales
Visible	0,4 μ m - 0,7 μ m Única radiación electromagnética percibida por nuestros ojos; la radiación solar es máxima banda. Bandas elementales: Azul: 0,4 a 0,5 μ m Verde: 0,5 a 0,6 μ m Rojo: 0,6 a 0,7 μ m
Infrarrojo Próximo denominado, también infrarrojo reflejado y fotográfico	0,7 - 1,3 μ m Detectado a partir de films dotados de emulsiones especiales. Permite discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
Infrarrojo Medio	1,3 - 8 μ m Se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y la emisión de la superficie terrestre.
Infrarrojo Térmico o Lejano	8 - 14 μ m Incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
Microondas	1 cm - 20 cm Energía muy transparente a la cubierta de las nubes.

Modificado de: Apuntes Sistema de Información Ambiental para el Desarrollo Integral Regional, INEGI

Modelo del movimiento de partículas o cuántico

Describe el movimiento de energía como el de una corriente de partículas. Estas partículas son llamadas fotones y tienen masa cero. La energía llevada por cada fotón depende de la radiación electromagnética que ha producido el fotón (Belward, Valenzuela 1990). La cantidad de energía transportada por un fotón se expresa como:

$$Q = hF \quad \dots (2.2)$$

donde:

Q = es la energía radiante de un fotón, en julios;

F = es la frecuencia; y

h = es la constante de Planck (6.626×10^{-34} Js)

Sustituyendo (2.1) en (2.2), se tiene:

$$Q = \frac{hc}{\lambda} \quad \dots (2.3)$$

Puede apreciarse que, por ejemplo, un fotón del infrarrojo térmico tiene menos energía que un fotón de la banda visible, debido a que λ es mayor en el infrarrojo térmico que en la región visible, lo que lleva a obtener un valor más pequeño de Q . Esto implica que la radiación en longitudes largas es más difícil de detectar que las longitudes cortas, por lo que la tecnología para detectar ondas largas es más compleja.

2.1.3 Leyes de radiación

Radiación de Planck

La ecuación de Planck establece que cualquier objeto por encima del cero absoluto (-273°C) radia energía, y que ésta se incrementa con la temperatura. Además, a mayor temperatura ese objeto radiará con más intensidad en longitudes de onda más cortas. La ecuación de radiación de Planck es una forma de obtener la máxima cantidad de energía que puede ser emitida por un objeto en una longitud de onda en particular.

$$M_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)} \quad \dots (2.4)$$

Donde:

M_λ es la emitancia radiante espectral del objeto $Wm^{-2} \mu m^{-1}$

T es la temperatura absoluta en K

$$C_1 = 3.78 \times 10^8 Wm^{-2} \mu m^{-4}$$

$$C_2 = 1.44 \times 10^4 \mu m K$$

De la ecuación (2.4) puede verse que M_λ representa el índice de energía que es emitida por unidad de área superficial del objeto en una longitud de onda particular. Es la representación gráfica de la ecuación (2.4), en la que puede apreciarse que la temperatura de los objetos afecta el nivel de energía emitida en una longitud de onda dada.

Stefan-Boltzmann

Para todas las longitudes de onda puede integrarse la emitancia radiativa espectral a partir de la ecuación (2.4), y obtener el valor de la emitancia radiativa M. Ésta se medirá en Wm^{-2} y es la energía total que radia un objeto por unidad de superficie, lo cual se expresa por la ley de radiación de Stefan-Boltzmann.

$$M = \sigma T^4 \quad \dots (2.5)$$

donde:

M es emitancia radiante del objeto medida en Wm^{-2}

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$$

T es la temperatura en K

La emitancia radiativa M_λ se incrementa rápidamente con la temperatura y corresponde al área bajo las curvas de la Figura 2.4.

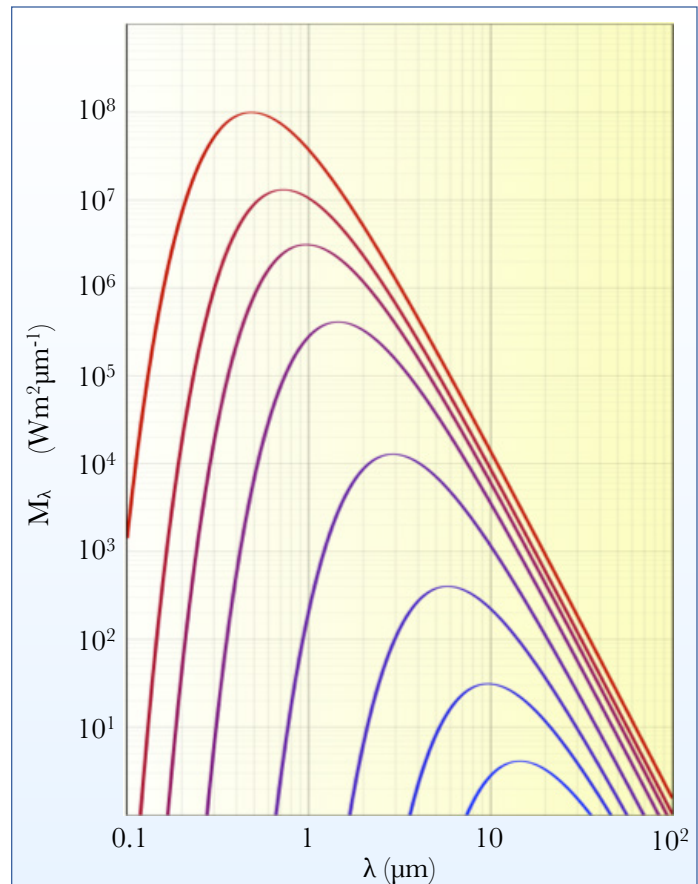


Figura 2.4 Relaciones entre M_λ y λ para objetos a diferentes temperaturas

Desplazamiento de Wien

La ecuación del desplazamiento de Wien establece que la longitud de onda a la que se produce la máxima emitancia puede determinarse si se conoce la temperatura del cuerpo.

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{A}{T} \quad \dots (2.6)$$

$A = 2898 \mu\text{mK}$

$\lambda_{m\acute{a}x}$ es la longitud de onda máxima (a la que se produce la máxima emitancia)

T es la temperatura del cuerpo en K

La Ley de Wien permite seleccionar la banda más conveniente para detectar un objeto de estudio a partir de su temperatura. Por ejemplo, en el caso de los incendios forestales, teniendo en cuenta que la temperatura de combustión se sitúa entre $275 \text{ }^\circ\text{C}$ y $420 \text{ }^\circ\text{C}$, la Ley de Wien permite determinar la banda del infrarrojo medio (5.28 y $4.30 \mu\text{m}$), como la más adecuada para su detección. Otro caso es el de la temperatura radiante aproximada 5700°C que presenta su emitancia máxima en la región del espectro visible (0.4 a $0.7 \mu\text{m}$). En conclusión, cuanto más caliente esté el objeto emisor, radiará a longitudes de onda más cortas (Belward, Valenzuela 1990).

2.1.4 Terminología y unidades de medida

Energía radiante (Q). Total de energía radiada en todas direcciones. Se mide en julios (J).

Flujo radiante (Φ). Total de energía radiada en todas direcciones por unidad de tiempo. Se mide en Watts (W), el cual es Js^{-1} .

Emitancia radiante (M y M_λ). Total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo. M es la emitancia radiante, medida en Wm^{-2} . M_λ es la emitancia radiante espectral medida en $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$.

Irradiancia (E y E_λ). Energía total radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo. Tiene las mismas unidades que la emitancia radiante (M) en W/m^2 o emitancia radiante espectral (M_λ) en $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$, pero la irradiancia se refiere a la energía incidente como (E) irradiancia o (E_λ) irradiancia espectral. Cuando la energía es emitida por la superficie del Sol es descrita usando a la emitancia radiante (M), cuando esta energía ha incidido en la superficie de la Tierra es descrita usando la irradiancia (E), y finalmente cuando la energía es reflejada por la Tierra nuevamente es descrita por emitancia radiante (M).

Radiancia (L o L_λ). Energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. El ángulo sólido es un ángulo tridimensional, relativo a la sección completa de la energía transmitida y se mide en estéreo radianes (Fig. 2.5). La energía radiada (L) es medida en $Wm^{-2}sr^{-1}$. L_λ es la radiancia espectral en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida, cuyas unidades son $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$. La radiancia es importante porque es lo que mide el sensor. El satélite observa en una dirección específica a la superficie y su detector define un ángulo sólido definido. Por tanto, el número digital registrado en la imagen de satélite corresponde a L y no a M o a Q. Las características físicas del objeto que está siendo medido por el sensor están dadas por M_λ y E_λ , así que es necesario entender cómo éstas se relacionan con las mediciones de L.

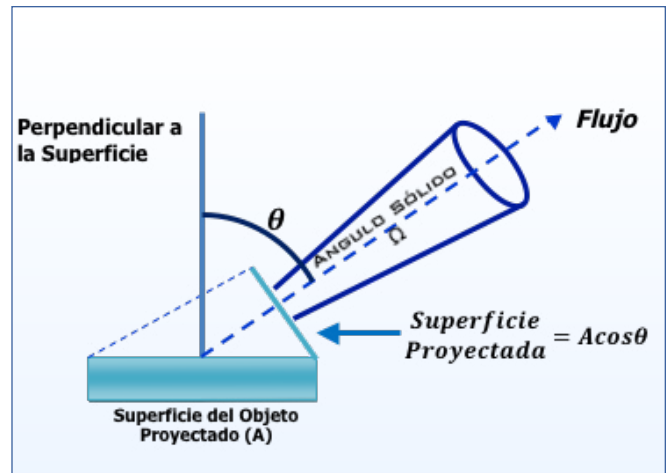


Figura 2.5 Diagrama de un ángulo sólido
Tomada de: Chuvieco Emilio, Fundamentos de Teledetección Espacial, 1990

Transmisividad (τ). Es la relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

Reflectancia (ρ). Es una propiedad física del objeto e independiente de las condiciones de iluminación, es la relación entre el flujo reflejado por la superficie y el incidente, (ecuación 2.7)

$$\rho = \frac{M}{E} \quad \dots (2.7)$$

y la reflectancia espectral está dada por

$$\rho_\lambda = \frac{M_\lambda}{E_\lambda} \quad \dots (2.8)$$

Cuantitativamente el valor de reflectancia siempre es menor que la unidad, debido a que es imposible que sea mayor la energía reflejada que la que incidió en el objeto. La reflectancia es una propiedad muy útil porque describe la característica única de un objeto. Por tanto, es deseable encontrar una relación entre reflectancia ρ y la radiancia L medida por el satélite.

2.1.5 Reflexión especular y difusa

La cantidad de energía que llega al sensor depende del ángulo con que la superficie refleje la energía incidente, así como del que formen el haz incidente con la posición del sensor. Las leyes geométricas de reflexión están relacionadas con la rugosidad que presenta la superficie del objeto.

Reflexión especular. Una superficie lisa y brillante conduce a una reflexión especular de la radiación, es decir refleja la energía con el mismo ángulo del flujo incidente, Figura 2.6. Este tipo de reflexión sería de uso limitado en percepción remota ya que el satélite y el Sol tendrían que estar exactamente en ángulos iguales al objeto. Esto usualmente sólo pasa cuando el Sol es reflejado por el agua dentro del campo de visión del sensor.

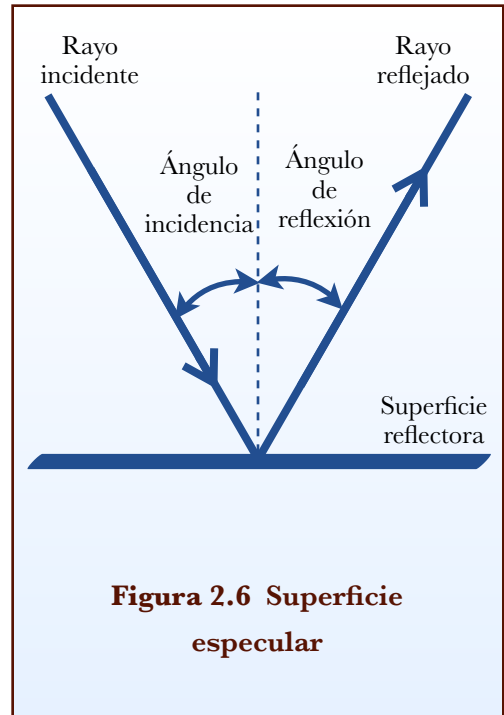


Figura 2.6 Superficie especular

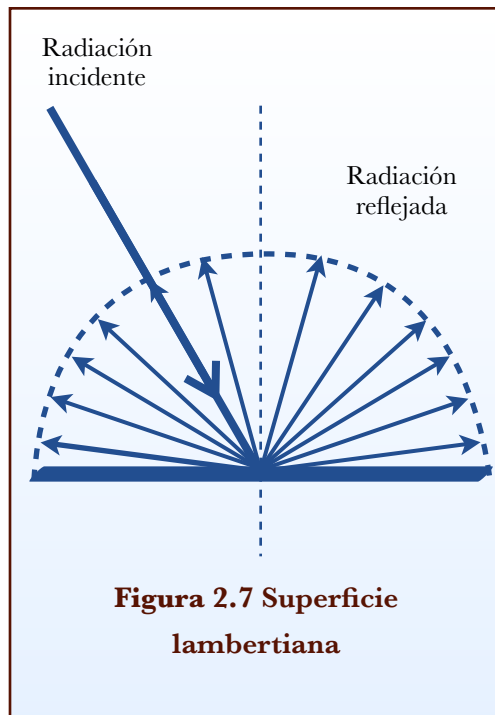


Figura 2.7 Superficie lambertiana

Reflexión difusa. Son aquellas superficies que reflejan la radiación en todas direcciones. Una superficie de reflexión difusa perfecta es aquella donde la radiancia L desde la superficie es constante para cualquier ángulo de observación. Esto es conocido como superficie lambertiana (Fig. 2.7) y es la situación ideal en percepción remota, donde es preferible para la radiancia de un objeto ser independiente del ángulo de observación y de su localización a través de la banda de la imagen.

2.1.6 Radiancia y Reflexión

Para una superficie lambertiana es posible obtener una relación entre la radiancia y la reflectancia. Por integración del flujo de salida Φ desde un punto sobre un hemisferio y dividiendo este por el flujo entrante, (Belward, Valenzuela 1990), se tiene:

$$\rho = \frac{\pi L}{E} \quad \dots (2.9)$$

y en consecuencia que:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda}}{E_{\lambda}} \quad \dots (2.10)$$

Si el Sol se encuentra a un ángulo θ de la superficie, entonces la ecuación queda:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda}}{E_{\lambda} \cos \theta} \quad \dots (2.11)$$

Las ecuaciones (2.10) y (2.11) permiten calcular la reflectancia de una superficie a partir de la imagen de satélite (Rees 1990). Se requiere conocer los coeficientes de calibración de cada una de las bandas que dependen del sensor, lo cuales son proporcionados por el distribuidor de la imagen. En cuanto a la irradiancia, es posible calcular el valor para E_{λ} para un día en particular, en virtud de que las características y movimiento del Sol son conocidos. Por lo tanto, para una superficie Lambertiana y despreciando los efectos atmosféricos, la ecuación (2.11) puede usarse para medir la reflectancia de un objeto a partir de la imagen de satélite.

2.1.7 Irradiancia solar

El Sol

El Sol es la principal fuente de energía en PR. Por una parte la energía solar es la fuente de potencia eléctrica de los satélites, y suministra además la radiancia para las imágenes en el visible e infrarrojo próximo y medio. La iluminación solar influye en la temperatura de la Tierra, lo cual proporciona radiación en la banda del térmico infrarrojo.

El Sol tiene un diámetro efectivo de 1.4×10^6 km y se encuentra a una distancia promedio de la Tierra de 150×10^6 km. La distancia entre el Sol y la Tierra cambia a lo largo del año, de ahí que el valor de E_{λ} también cambie. La temperatura radiante del Sol se encuentra próxima a los 6000 K, lo que implica, de acuerdo con la Ley de Wien, que su máxima emitancia espectral M_{λ} se produzca en torno a los $0.48 \mu\text{m}$, que coincide con el color verde apreciado por nuestros ojos. La constante solar se define como la cantidad de irradiancia en una superficie plana normal a la dirección de los rayos solares en el espacio libre y a la distancia media entre el Sol y la Tierra. El valor de la constante solar es de 1375 Wm^{-2} .

Intensidad Radiante

La intensidad radiante (I) es el flujo radiante Φ que procede de la fuente por unidad de ángulo sólido y en una dirección en particular. Por lo tanto, la intensidad radiante se mide en vatios por estéreo-radián Wsr^{-1} . Esta definición lleva a la ecuación (2.12), donde Ω es el ángulo sólido, (Rees 1990).

$$\Phi = I\Omega \quad \dots (2.12)$$

Si el área A es iluminada por el flujo radiante, entonces se tiene:

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{I\Omega}{A} \quad \dots (2.13)$$

El ángulo sólido se define como el área de un objeto iluminado dividida por el cuadrado de la distancia del objeto a la fuente (Rees 1990). Por tanto:

$$\Omega = \frac{(A \cos \theta)}{S^2} \quad \dots (2.14)$$

donde θ es el ángulo entre la superficie normal al objeto y en la dirección de la fuente. Sustituyendo (2.14) en (2.13), se tiene:

$$E = \frac{(I \cos \theta)}{S^2} \quad \dots (2.15)$$

La ecuación (2.15) significa que

$$E \propto \frac{1}{S^2} \quad \dots (2.16)$$

De la ecuación (2.16) puede observarse que E disminuye si la distancia Tierra - Sol se incrementa. Si S se duplica entonces E disminuye por un factor de 4. Esto explica los cambios en E y E_λ a lo largo del año conforme cambia la distancia entre el Sol y la Tierra (Rees 1990).

Sin embargo, la constante solar es conocida, por lo que es posible calcular E a partir de la ecuación (2.16) para otros valores de S. La ecuación (2.15) conduce a la siguiente regla:

$$E \propto \cos \theta \quad \dots (2.17)$$

de donde se puede concluir que E disminuye si θ se incrementa. De otra forma, la irradiancia solar decrece al incrementarse el ángulo solar del zenit, llevando al Sol a la parte más baja del cielo. Nuevamente, si la constante solar es conocida, entonces E puede ser vuelta a calcular para cualquier ángulo solar del zenit (Barret, Curtis, 1982).

Estas ecuaciones junto con la ecuación de radiación de Planck permiten calcular el valor de E para una imagen de satélite, de fecha y hora conocidas, de manera que el ángulo solar del zenit y la distancia del Sol a la Tierra pueden calcularse.

2.1.8 La atmósfera

En este apartado se discutirán los efectos de la atmósfera en la P.R. La atmósfera es el medio a través del cual viaja la radiación electromagnética entre el sensor y la superficie terrestre.

Absorción

La absorción es un mecanismo por el que, para ciertas longitudes de onda, la radiación electromagnética es atenuada por la atmósfera. Esta absorción en la atmósfera es debida a la presencia de tres gases: vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂) y ozono (O₃). El Cuadro 2.2 muestra los efectos de estos gases en la absorción. La atmósfera es por lo tanto opaca a ciertas longitudes de onda y transparente a otras. Aquellas bandas del espectro para las cuales la atmósfera es transparente se conocen como "ventanas atmosféricas", y son aquellas donde la transmisividad de la atmósfera es alta.

Cuadro 2.2 Gases que atenúan la radiación electromagnética en la atmósfera y sus efectos

Gas	Efecto
Ozono (O ₃)	Se encuentra en una capa de 20 km y 50 km por encima de la Tierra. Absorbe energía electromagnética en una estrecha banda entre 9 μm y 10 μm en el infrarrojo térmico. Debido a la altitud de la capa O ₃ operan a no más de 10 km. Su efecto en las operaciones de satélite sí es importante
Vapor de Agua (H ₂ O)	Su distribución decrece exponencialmente con la altitud, y el el clima controla la cantidad de agua que puede ser mantenida como gas en la atmósfera. Produce una fuerte absorción entre los 6 μm y 7 μm.
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Es el 0.03% de la atmósfera y está distribuido uniformemente arriba de una altitud de aproximadamente 100 km. Absorbe el infrarrojo térmico (8μm a 14 μm) y causa efectos importantes en el infrarrojo medio (2.5 μm a 3 μm).

Elaborado con base en Belward y Valenzuela, Remote Sensing and Geographical information Information Systems for Resources Management in Developing Countries, 1990

Dispersión

Es la interacción entre la radiación electromagnética y los gases, partículas de polvo o gotas de agua. Esta interacción implica un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre (radiancia difusa). Los principales tipos de dispersión son: Rayleigh, Mie y la no selectiva.

La dispersión Rayleigh se presenta cuando la longitud de onda λ de la radiación es más grande que el diámetro de las moléculas de gas responsables de la dispersión. La dispersión Rayleigh es inversamente proporcional a la longitud de onda a la cuarta potencia (Belward, Valenzuela 1990).

$$\sigma \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad \dots (2.18)$$

Esto significa que las longitudes de onda cortas son más fuertemente dispersadas. La mayor dispersión en longitudes de onda corta explica el color azul del cielo, ya que la luz del Sol interactúa con la atmósfera, la cual dispersa longitudes de onda corta (azul) más que otras longitudes de onda visibles; en consecuencia el cielo se ve azul.

La dispersión llamada Mie se presenta cuando la longitud de onda de la radiación es similar al tamaño de la partícula de vapor de agua, polvo y aerosoles que producen la dispersión. El tamaño de las partículas varía entre 0.1 μm a 10 μm y pueden ser detritos de suelo, roca, fuegos forestales, volcánicos y contaminación atmosférica. Estas partículas están suspendidas en capas bajas de la atmósfera y el viento controla su movimiento y distribución. Al igual que en el caso de la dispersión Rayleigh, la dispersión Mie decrece al aumentar la longitud de onda de la radiación. Lo anterior genera que las imágenes del área de estudio sean más claras en longitudes de onda larga, mientras que la región visible del espectro es "ruidosa".

La dispersión no selectiva ocurre cuando la longitud de onda de la radiación es más pequeña que el diámetro de las partículas (gotas de agua). Las gotas de agua normalmente tienen un diámetro en el ámbito de 5 μm a 100 μm y la dispersión se da igualmente en todas las longitudes de onda, por lo que es una dispersión no selectiva respecto a la longitud de onda. En el caso de las microondas, debido a que las longitudes de onda son considerablemente mayores que el tamaño de partículas atmosféricas, el efecto de la dispersión no es importante en esta parte del espectro.

El Cuadro 2.3 muestra un resumen de las longitudes de onda del espectro en función de las ventanas atmosféricas y de sus características de absorción y dispersión de la radiación electromagnética. La percepción remota de la superficie de la Tierra no es posible fuera de estas ventanas.

Cuadro 2.3 Características de absorción y dispersión de las longitudes de onda del espectro, y ventanas atmosféricas

Longitudes de onda	Características Absorción y Dispersión
Menor que 0.3 μm	Toda la radiación es absorbida por la capa de ozono responsable de la radiación ultravioleta por abajo de 0.3 μm .
0.3 μm a 0.4 μm	La radiación ultravioleta es transmitida a través de la atmósfera, pero severamente afectada por la dispersión Rayleigh.
0.4 μm a 1.3 μm	La atmósfera es transparente, pero la dispersión Rayleigh y Mie pueden afectar la imagen con nubes y niebla. Muchos satélites utilizan esta ventana.
1.3 μm a 1.5 μm	El vapor de agua causa absorción de la radiación.
1.5 μm a 1.8 μm	Ventana atmosférica usada por Landsat 7. La dispersión Mie puede ocurrir.
1.8 μm a 2.0 μm	El vapor de agua causa absorción de la radiación.
2.0 μm a 2.5 μm	Ventana atmosférica usada por el Landsat TM. La dispersión Mie puede ocurrir.
2.5 μm a 3.0 μm	El vapor de agua y el dióxido de carbono causan absorción.
3.0 μm a 5.0 μm	Ventana atmosférica usada por los satélites meteorológicos United States National Oceanic and Atmospheric Administration. En estas longitudes de onda pueden detectarse objetos con alta temperatura (227°C). Ventana que tiene aplicaciones militares.
5.0 μm a 8.0 μm	Vapor de agua causa absorción de la radiación. El satélite Meteosat usa esta banda para obtener imágenes de la distribución de vapor de agua en la atmósfera.
8 μm a 14 μm	Ventana atmosférica usada por muchos sensores. La dispersión por partículas grandes es importante, y existe absorción por el vapor de agua y dióxido de carbono.
14 μm a 1 μm	Vapor de agua y dióxido de carbono causará absorción.
Mayor que 1 μm	Ventana atmosférica para la percepción remota por microondas. Las nubes son también transparentes en esta ventana.

Elaborado con base en Belward y Valenzuela, *Remote Sensing and Geographical Information Information Systems for Resources Management in Developing Countries*, 1990

Correcciones atmosféricas

El análisis para las correcciones atmosféricas es complejo. Sin embargo, existen programas de computadora que permiten relacionar propiedades físicas absolutas del objeto de estudio con la radiancia medida por el sensor. No siempre se requiere determinar las correcciones atmosféricas. Una forma común de análisis de datos es la interpretación visual de la imagen, la corrección atmosférica no se requiere si la interpretación está limitada a una imagen, ya que la información obtenida así es esencialmente cualitativa.

Si la imagen analizada va a ser comparada con otra imagen, entonces la corrección atmosférica sí se requiere; esto es debido a que la irradiancia solar, el ángulo del zenit y las condiciones atmosféricas cambian de una imagen a otra. La corrección es necesaria si los números absolutos son extraídos de cada imagen y comparados, o si es llevada a cabo la clasificación de dos imágenes juntas. Sin embargo, si solamente se requieren las diferencias relativas de números, entonces pueden aplicarse técnicas de procesamiento de imágenes para suprimir el efecto atmosférico. Lo anterior es válido también cuando una imagen es comparada con otra; en términos relativos, tales técnicas de procesamiento incluyen la sustracción y la obtención de histogramas. Esto balancea los ámbitos en los niveles de gris en las imágenes.

Interacción de la radiación electromagnética con la superficie de la Tierra

Entender cómo interactúa la radiación electromagnética con la superficie de la Tierra es un importante aspecto de la percepción remota.

De acuerdo con la ley de la conservación de la energía, la radiación electromagnética que recibe la Tierra puede expresarse con (Belward, Valenzuela 1990):

$$\Phi_{i\lambda} = \Phi_{r\lambda} + \Phi_{t\lambda} + \Phi_{a\lambda} \quad \dots (2.19)$$

donde:

$\Phi_{i\lambda}$ es el flujo de radiación incidente

$\Phi_{r\lambda}$ es el flujo de radiación reflejado

$\Phi_{t\lambda}$ es el flujo de radiación transmitido

$\Phi_{a\lambda}$ es el flujo de radiación absorbido

Conviene expresar la ecuación (2.19) en unidades relativas, para ello se divide entre $\Phi_{i\lambda}$:

$$1 = \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} + \alpha_{\lambda} \quad \dots (2.20)$$

Donde ρ , t y α son la reflectancia, transmitancia y absorbancia, respectivamente.

2.1.9 Curvas espectrales

La reflectancia espectral ρ_λ es un indicador del tipo y condición del objeto estudiado. Pueden construirse gráficas que relacionan reflectancia espectral contra longitud de onda. Estas gráficas muestran el modo peculiar con el que una determinada cubierta refleja la energía a distintas longitudes de onda, lo que se conoce como "firma espectral". Pueden modificarla los factores atmosféricos y de irradiancia solar; es decir, en torno a un comportamiento tipo denominado firma espectral, cada cubierta presenta una cierta variabilidad espectral, que puede dificultar su discriminación de otras superficies. Sin embargo, las curvas de reflectividad son muy útiles para hacer una adecuada interpretación de la imagen, además permiten seleccionar las bandas más convenientes para la detección de las cubiertas terrestres en estudio.

Características espectrales del agua, suelo y vegetación

La Figura 2.7 muestra curvas típicas de reflectancia espectral de tres tipos de características terrestres: la vegetación, el suelo y el agua en el ámbito del visible al infrarrojo medio.

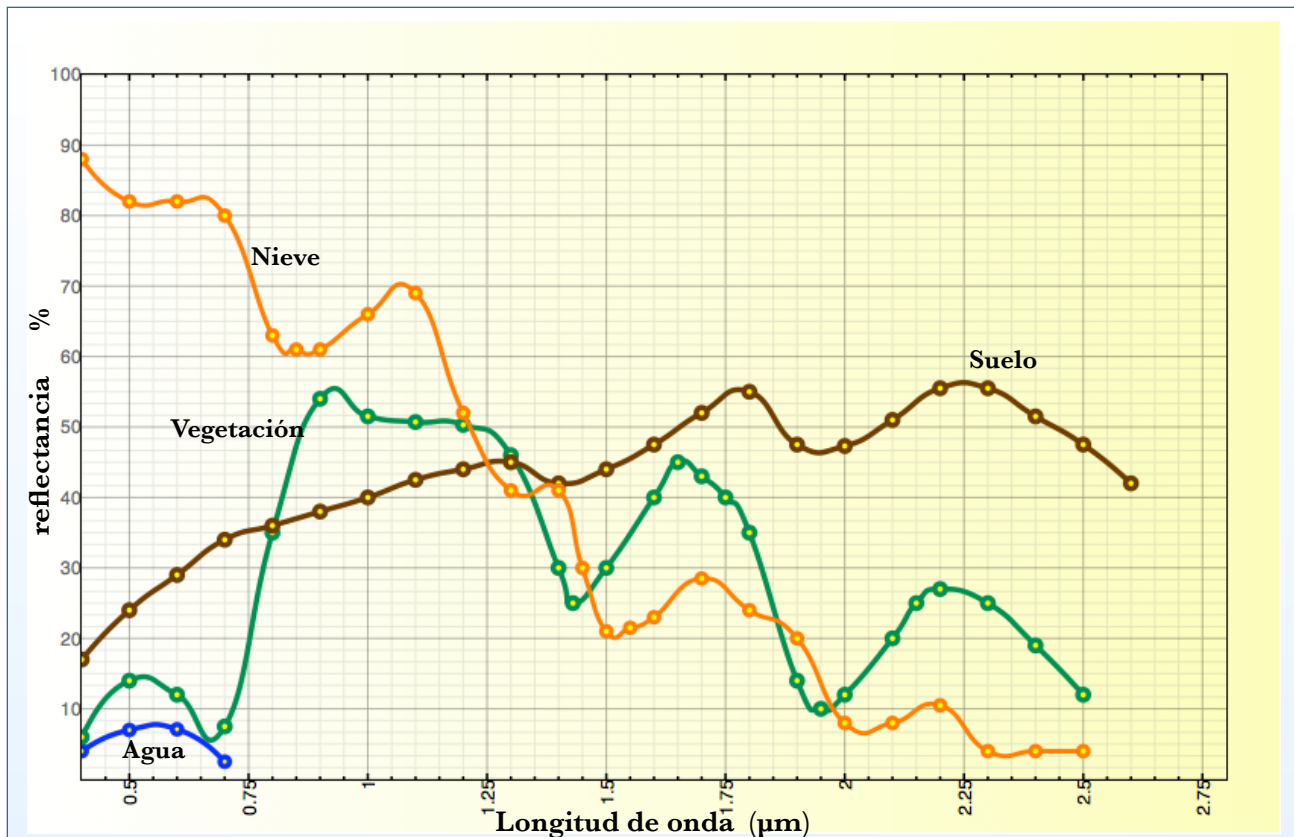


Figura 2.7 Curvas espectrales de vegetación, suelo y agua

El agua tiene características que pueden explicarse haciendo referencia a la ecuación (2.19). La absorbancia del agua asciende rápidamente en el infrarrojo cercano, donde la reflectancia y transmitancia son pequeñas. La señal del agua recibida por el sensor en el cercano infrarrojo usualmente puede atribuirse al patrón de radiancia atmosférica, más que a la reflexión desde la superficie. Los cuerpos de agua clara y profundos absorben efectivamente todas las longitudes de onda, especialmente más allá del visible, lo cual conduce a que el agua tenga una muy baja reflectancia. En el visible apenas asciende al 5%. La transmisión de la radiación visible a través del agua significa que si el cuerpo de agua es poco profundo la radiación puede ser reflejada por el fondo, transmitida de regreso a través del agua y detectada por el sensor. Entonces, no puede determinarse, a partir de la imagen visible, si la respuesta espectral corresponde al agua o al fondo. Sin embargo, la revisión de la imagen en el infrarrojo cercano resolverá este problema, ya que la superficie sumergida no será detectada porque la transmisión no ocurre.

El suelo tiene varias características diferentes con respecto al agua, su reflectancia espectral ρ_λ se incrementa con las longitudes de onda en el infrarrojo, lo cual explica el color del suelo percibido por el ojo humano como rojo o café. El nivel de reflectancia del suelo en el visible es del orden del 20% y 30% en el infrarrojo cercano. Por esta razón, la frontera entre suelo y agua es simple de identificar en una imagen de satélite.

La curva espectral de la vegetación verde es más compleja que la del suelo o agua. En la parte azul y roja del espectro la absorbancia es alta debido a la presencia de clorofila en la planta, mientras que la reflectancia es baja. Como se espera, la reflectancia espectral asciende en la parte verde del espectro y puede alcanzar un nivel de alrededor del 10%. Esto es bastante claro por el hecho de que el ojo humano aprecia la vegetación con color verde.

La reflectancia de la vegetación alcanza su máximo en el infrarrojo cercano donde asciende a más del 50%. El valor de la reflectancia depende de las especies particulares de vegetación y disminuye con el incremento de onda en el infrarrojo medio (1.4 μm a 1.9 μm), lo cual es causado por el agua en la planta. Sin embargo, a partir de 1.8 μm no hay ventana atmosférica, por lo que esto no puede detectarse por el sensor del satélite.

2.1.10 Percepción remota activa y pasiva

Sensores pasivos

Los sensores pasivos pueden dividirse en tres categorías generales: sensores fotográficos, óptico electrónico y de antena. En el primer grupo se incluyen las cámaras fotográficas; en el segundo, los exploradores de barrido y de empuje, y las cámaras de vidicón; por último, los sensores pasivos de antena se conocen con el nombre de radiómetros de microondas.

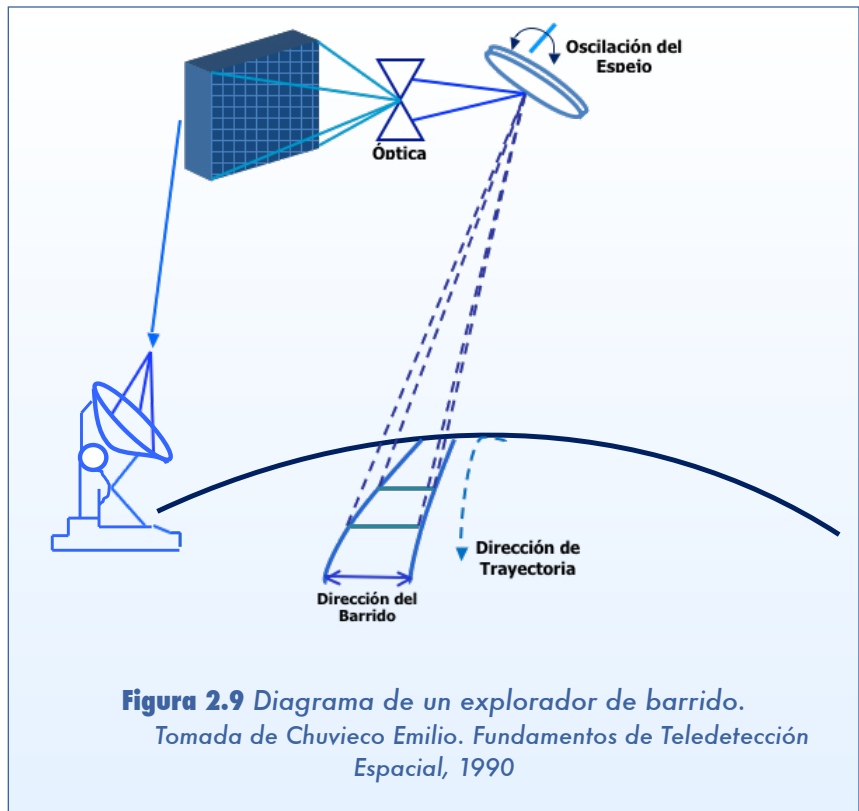
Sensores fotográficos

Las cámaras fotográficas han sido usadas con éxito en plataformas aéreas. Actualmente siguen siendo el medio más utilizado en P.R. Su funcionamiento está basado en la impresión de un objeto sobre películas fotosensibles, con el apoyo de un sistema óptico que permite controlar las condiciones de exposición.

Exploradores de barrido

Los exploradores de barrido combinan una óptica similar a la fotografía, con un sistema de detección electrónica que permite una cobertura sistemática de la superficie terrestre, ya que facilita la transmisión a distancia de las imágenes captadas.

En forma perpendicular a la dirección de la trayectoria del satélite, oscila un espejo móvil, permitiendo explorar una franja de terreno hacia ambos lados. La radiancia recibida por este componente óptico se envía a detectores que la amplifican y convierten en una señal eléctrica, que se transforma a un valor numérico el cual se almacena a bordo o se transmite a antenas receptoras (Figura 2.9).



La señal enviada por el equipo óptico a los detectores se graba en valor numérico a intervalos regulares. Este intervalo marca el tamaño de la unidad mínima de información adquirida por el sensor, denominada pixel; esta señal está íntimamente relacionada con el tipo de cubierta observada.

Los exploradores de barrido multispectral descomponen la señal recibida en varias longitudes de onda, cada una de las cuales se envía a un tipo especial de detector sensible a este tipo de energía.

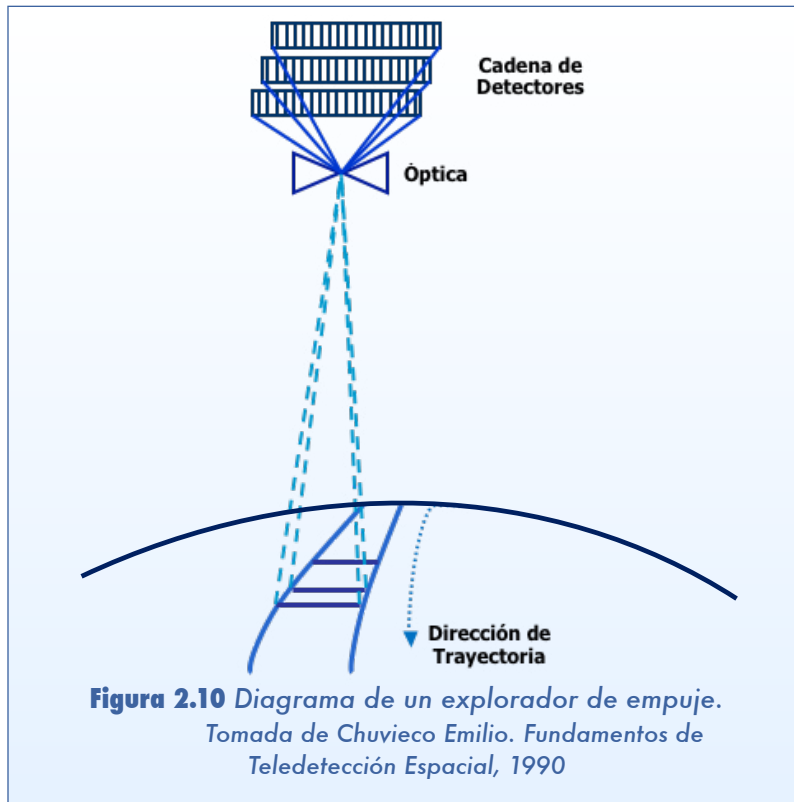
Algunas ventajas de los equipos de barrido multispectral con respecto a los sensores fotográficos son:

- Permiten ampliar la banda de espectro detectada a longitudes de onda mayores del visible (incluyendo el infrarrojo medio y térmico);
- Proporcionan coberturas sistemáticas y de grandes áreas;
- Disponen de grabación digital de la información, lo que permite el tratamiento con computadora; y
- Ofrecen facilidad de calibración y corrección de datos.

Sin embargo, la resolución espacial de los equipos de barrido con respecto a los sistemas fotográficos es menor, aunque en los últimos años se han tenido grandes progresos.

Exploradores de Empuje

En estos equipos se dispone de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor, eliminándose la necesidad del espejo oscilante (Figura 2.10).



Los detectores sólidos que forman un explorador de empuje se denominan “dispositivos de acoplamiento por carga” (CCD, por sus siglas en inglés). A diferencia de los exploradores de barrido, que envían la señal a los detectores por pixel, los de empuje lo hacen por línea, lo que agiliza la detección y emisión de datos. Además, al eliminar la parte móvil se reducen problemas geométricos, debido a la falta de sincronía entre el movimiento del espejo y el de la plataforma.

Sin embargo, la calibración de la cadena de detectores en los exploradores de empuje es compleja, ya que se requieren complicados mecanismos de ajuste que permitan traducir de la misma forma la señal recibida. Otra restricción de los exploradores de empuje es que están limitados al espectro visible e infrarrojo reflejado, no incluyendo el infrarrojo medio y térmico.

Tubos de vidicón

Es un sistema análogo a la cámara de televisión, que puede trabajar en forma pancromática (blanco y negro) o multibanda. La imagen es enfocada sobre un foto-conductor, construyéndose una réplica electrónica de la imagen original (Chuvienco 1990).

Radiómetros de microondas

Son sensores que operan en longitudes de onda larga, normalmente 1 y 100 mm. Los radiómetros están compuestos de un elemento direccional, un receptor que permite la recepción y amplificación de microondas y un detector. Su mayor desventaja se debe a la pobre resolución espacial que proporciona.

Sensores activos

Los sensores activos pueden dividirse en: radar y lidar.

Radar

El radiómetro activo de microondas trabaja en una banda comprendida entre 0.1 cm y 1 m. Puede trabajar en cualquier condición atmosférica. La principal desventaja es la pobre resolución espacial, además de que las imágenes se graban en película para su interpretación visual, o su conversión posterior a formato numérico (Rees 1990).

Lidar

El lidar (Light Detection and Ranging) consiste en un láser de pulso que se emplea como transmisor en la atmósfera. La señal interactúa con las partículas atmosféricas, causando dispersión en función del tipo de elemento encontrado. La energía de retorno se recoge por un telescopio, que a su vez la transmite a un filtro óptico y a un foto-detector. Esta señal eléctrica se graba y se almacena en una computadora. Existen tres tipos de sistemas lidar: de resonancia, de absorción diferencial y de fluorescencia inducida (Rees 1990).

2.1.11 Satélites para la observación de recursos terrestres

Las primeras fotografías espaciales de la superficie terrestre fueron tomadas por los satélites de los Estados Unidos: Mercury, Géminis y Apolo. Esas fotografías fueron tomadas por curiosidad y publicidad, y gracias a los resultados brillantes que proporcionaron, más tarde se usaron para el estudio de los recursos de la Tierra. La agencia espacial norteamericana (NASA) desarrolló una serie de satélites experimentales para la observación de los recursos de la Tierra con el fin de evaluar la utilidad de imágenes obtenidas desde satélites no tripulados.

El primer satélite en esta serie, muy similar al satélite meteorológico NIMBUS, fue lanzado en 1972 con dos tipos de sensores, un sistema de barrido multispectral de 4 bandas denominado MSS (Multispectral Scanner) y 3 cámaras de televisión de vidicon RBV (Return Beam Vidicon). Este fue llamado ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) y a partir del segundo lanzamiento, en 1975, fue llamado LANDSAT-1. Este satélite operó por casi 6 años hasta enero de 1978; durante este periodo dos sucesores casi idénticos, LANDSAT 2 y LANDSAT, fueron lanzados en 1975 y 1978, respectivamente.

El primer programa LANDSAT MSS proporcionó una cobertura territorial de 32 000 millones de km², cifrándose en unas 385 000 imágenes adquiridas por estaciones estadounidenses y en 560 000 las recibidas por estaciones foráneas (Brasil, Canadá, China, Italia, Suecia, Japón, India, Argentina, Sudáfrica y Australia). Cada imagen MSS cubría un área de 185 km por 185 km a una resolución de 79 m, y proporcionaba datos en cuatro bandas espectrales (inicialmente identificadas como 4, 5, 6 y 7, las tres bandas que fueron RBV 1, 2 y 3), cubriendo el verde, rojo y dos partes del cercano infrarrojo.

El LANDSAT también tuvo una banda operando en el térmico infrarrojo (conocida como banda 8). Para asegurar la continuidad en la serie de datos, se ha mantenido el MSS en los dos últimos LANDSAT, con características similares a los satélites anteriores.

En julio de 1982 fue lanzado el primero de los llamados de la “Segunda Generación de Satélites de Observación Terrestre”: el LANDSAT 4. En esta segunda generación las cámaras son sustituidas por un nuevo explorador de barrido denominado TM (Thematic Mapper), que proporciona mayor resolución espacial y espectral que los satélites previos MSS. En febrero de 1983, debido a las persistentes fallas técnicas de transmisión del TM, el LANDSAT 4 termina su operación. La operación del MSS, sin embargo, se mantiene, y en marzo de 1984 se lanza el LANDSAT 5 TM.

En 1986 fue lanzado el satélite francés SPOT-1 (Système Probatoire d l’Observation de la Terre), mientras que el segundo se puso en órbita en 1990. Los satélites transportan dos equipos de exploración por empuje denominados HRV (Haute Resolution Visible). Estos sensores permiten obtener imágenes en dos modalidades: pancromático y multibanda.

2.1.12 Satélites meteorológicos

Los satélites meteorológicos se han usado por más tiempo que los satélites para observación de los recursos de la Tierra. El principal uso de los datos colectados por estos sensores ha sido el estudio y predicción del clima en periodos cortos, usualmente horas o días.

La primera generación de estos satélites operó de 1960 a julio de 1966. A esta primera generación le siguieron los instrumentos de la segunda y tercera generaciones, que actualmente están en uso. La tercera generación de estas series incluye los satélites llamados Tiros-N y NOAA-6 al NOAA-13. Estos tienen características orbitales similares al Landsat en cuanto a que su órbita es heliosíncrona, polar, a una altitud de 830 km. Estos satélites transportan el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) que debido a su amplia cobertura y bajo costo se ha usado en el pronóstico del clima y también en aplicaciones ambientales como mapeo de temperaturas en la superficie del mar, estudios de desertificación y en incendios forestales de gran magnitud. Se ha explorado también el uso de las bandas roja e infrarroja cercana para estudios globales de vegetación y cubierta de suelo a escala continental.

2.1.13 Características de los sistemas sensores

Las características de un sistema sensor son: 1) tipo de órbita; y 2) resoluciones radiométrica, espacial, espectral y temporal.

Características orbitales

La selección de la órbita del sensor está relacionada con los patrones de observación que se pretenden llevar a cabo, por ejemplo: monitoreo continuo, cubierta repetitiva a periodos diferentes y mapeo global. Las posiciones orbitales pueden ser geosíncrona (geoestacionaria) y heliosíncrona (polares ecuatoriales). La gran mayoría de las plataformas de percepción remota han sido colocadas dentro de órbitas circulares, las más importantes son órbitas geoestacionarias y polares.

Órbitas geoestacionarias

El caso más importante de órbita geosíncrona es la órbita geoestacionaria. Este propósito se consigue cuando el satélite se sitúa en una órbita circular de gran altitud (35,800 km), localizados arriba del ecuador. El satélite se sincroniza con el movimiento terrestre debido a que la velocidad del satélite compensa la velocidad de rotación de la Tierra y pareciera estar fijo en el cielo. En otras palabras, los satélites geoestacionarios observan permanentemente la misma porción de la superficie terrestre. Por supuesto, ninguno de los satélites geoestacionarios pueden observar por completo la superficie terrestre. Dos satélites geoestacionarios colocados en dos lados opuestos del planeta podrían proporcionar una visión de toda la Tierra. Sin embargo, la resolución podría ser burda en los extremos de observación del disco de la Tierra; por lo tanto, para lograr mejorar la resolución en las imágenes se necesitarían más de dos satélites. Es importante enfatizar que independientemente de que muchos satélites se coloquen en órbitas geoestacionarias, nunca se obtendrá una resolución aceptable hacia y sobre las regiones polares.

Las órbitas geostacionarias son utilizadas por los satélites de telecomunicaciones y también por los satélites meteorológicos que tienen como propósito cubrir la Tierra entre los 60oN a 60oS. En la actualidad están en operación los satélites GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) oeste y este de la NASA, Meteosat de Europa y GMS del Japón.

Órbitas polares heliosíncronas

Los satélites de observación de la Tierra operan en órbitas cercanas al polo, circulares y cíclicas, con la excepción de áreas polares sobre aproximadamente 81°, proporcionando una cobertura casi global si el plano de la órbita del satélite gira a la misma velocidad de la Tierra alrededor del Sol, y el ángulo entre el plano de la órbita y la línea que conecta el centro de la Tierra con el centro del Sol permanece constante. Si la órbita es heliosíncrona el Sol proporciona iluminación constante en el área observada todo el año. Esto se muestra en la Figura 2.11. Los satélites con órbita heliosíncrona y polar son Landsat, SPOT y NOAA.

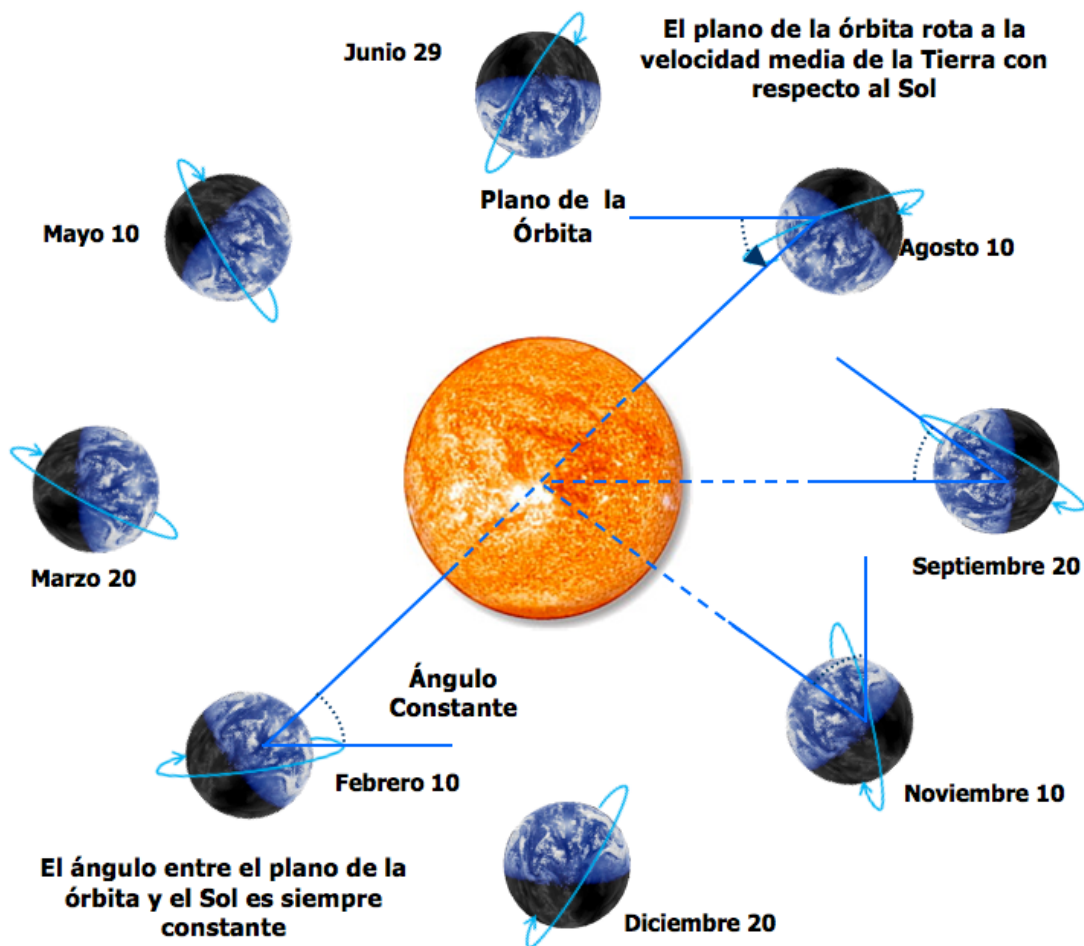


Figura 2.11 Características de la órbita heliosíncrona polar
 Adaptada de Belward y Valenzuela. *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries*

Resolución de un sensor

La resolución de un sistema sensor es su habilidad para discriminar la información de detalle. El concepto de resolución implica cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

Resolución espacial

Las características espaciales de un sensor se refieren al área cubierta en una escena y al detalle que puede ser visto dentro de ella. El área cubierta por una escena depende de la velocidad de exploración, número de detectores y las características orbitales del sensor, de tal forma que los satélites geoestacionarios pueden observar la mitad de la Tierra en una única escena, y los de órbita polar lo hacen en imágenes por fila. En cuanto al objeto más pequeño que puede distinguirse en una imagen se define al pixel que corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen. La resolución espacial de los sensores de observación terrestre varía en un amplio ámbito. Por ejemplo, los satélites de recursos naturales, destinados a obtener información sobre áreas muy heterogéneas, pueden tener resoluciones de cierto detalle: desde 10 m x 10 m (sensor SPOT - HRV (P)) hasta los 80 m x 80 m (sensor Landsat - MSS). Otro grupo de satélites orientado hacia aplicaciones más globales, como NIMBUS - CZCS, NOAA - AVHRR, tienen un tamaño de pixel comprendido entre 500 y 1100 m por lado. El caso extremo correspondería a los satélites meteorológicos de órbita geoestacionaria (METEOSAT, GOES, GMS) que manejan tamaño de pixel de hasta 5 km.

Resolución espectral

Se refiere al número y amplitud de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Mientras mayor número de bandas proporcione un sensor será más fácil la caracterización espectral de los tipos de cubierta. Por otra parte, es deseable tener bandas estrechas, ya que bandas amplias registran un valor promedio, lo que dificulta la diferenciación espectral de las cubiertas de interés.

Dependiendo de los objetivos de aplicación, los sensores operan con un número y amplitud de bandas específicos. Por ejemplo, un sensor para fines meteorológicos incluirá una sola banda en el visible, ya que no existen diferencias cromáticas en las nubes, una o dos bandas en el térmico, que permitan conocer la temperatura de las nubes, y otra en el infrarrojo medio, en donde pueda apreciarse el contenido de humedad de la atmósfera.

Resolución radiométrica

Es la capacidad del sensor para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. Por ejemplo, en el caso de los sistemas fotográficos, la resolución radiométrica se indica por el número de niveles de gris recogidos en la película. Los sensores óptico - electrónicos convierten la radiancia recibida en un valor digital. El número de niveles digitales de la imagen se identifica con la resolución radiométrica del sensor. Inicialmente los Landsat - MSS ofrecían un ámbito de 128 niveles de codificación por pixel. En la actualidad, la mayor parte de los sistemas ofrecen 256 niveles por pixel (de 0 a 255), con la excepción del NOAA - AVHRR que opera con 1024 niveles. La interpretación de la imagen será mejor mientras mayor sea la resolución radiométrica. Sin embargo, es conveniente mencionar que si la interpretación es visual, el ojo humano difícilmente percibe más de 64 niveles de gris, y no más de 20 000 tonalidades.

Se considera que para lograr un análisis visual adecuado basta con 16 niveles por color (4096 tonalidades), por lo que parece excesivo contar con 256 niveles digitales por banda (16 millones en una combinación coloreada de tres bandas). Sin embargo, si se realiza una clasificación digital, la resolución radiométrica puede aprovecharse mejor.

Resolución temporal

La resolución temporal se refiere a la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. Esto depende de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación), así como del diseño del sensor (ángulo de observación y abertura).

Nuevamente dependiendo de los objetivos de aplicación del sensor, varía la frecuencia de cobertura. Por ejemplo, los satélites meteorológicos observan fenómenos de rápido cambio, por lo que se requieren imágenes frecuentes. Satélites geoestacionarios como el METEOSAT proporcionan una imagen cada 30 minutos; los de órbita polar, como el NOAA cada 12 horas; mientras que los satélites de recursos naturales como el Landsat tienen una periodicidad de 16 días, y el SPOT de 26 días.

Al aumentar la resolución espacial, espectral y radiométrica de los sensores (últimos satélites) hay un incremento considerable en el volumen de datos que no es posible grabar a bordo y es preciso que el satélite esté continuamente conectado a la red de satélites de comunicación (Tipo TDRSS), a través de los cuales se envían las imágenes a las antenas receptoras. La Figura 2.12 muestra las relaciones entre resolución espectral y espacial para varios sensores.

Al aumentar la resolución espacial, espectral y radiométrica de los sensores (últimos satélites) hay un incremento considerable en el volumen de datos que no es posible grabar a bordo y es preciso que el satélite esté continuamente conectado a la red de satélites de comunicación (Tipo TDRSS), a través de los cuales se envían las imágenes a las antenas receptoras. La Figura 2.12 muestra las relaciones entre resolución espectral y espacial para varios sensores.

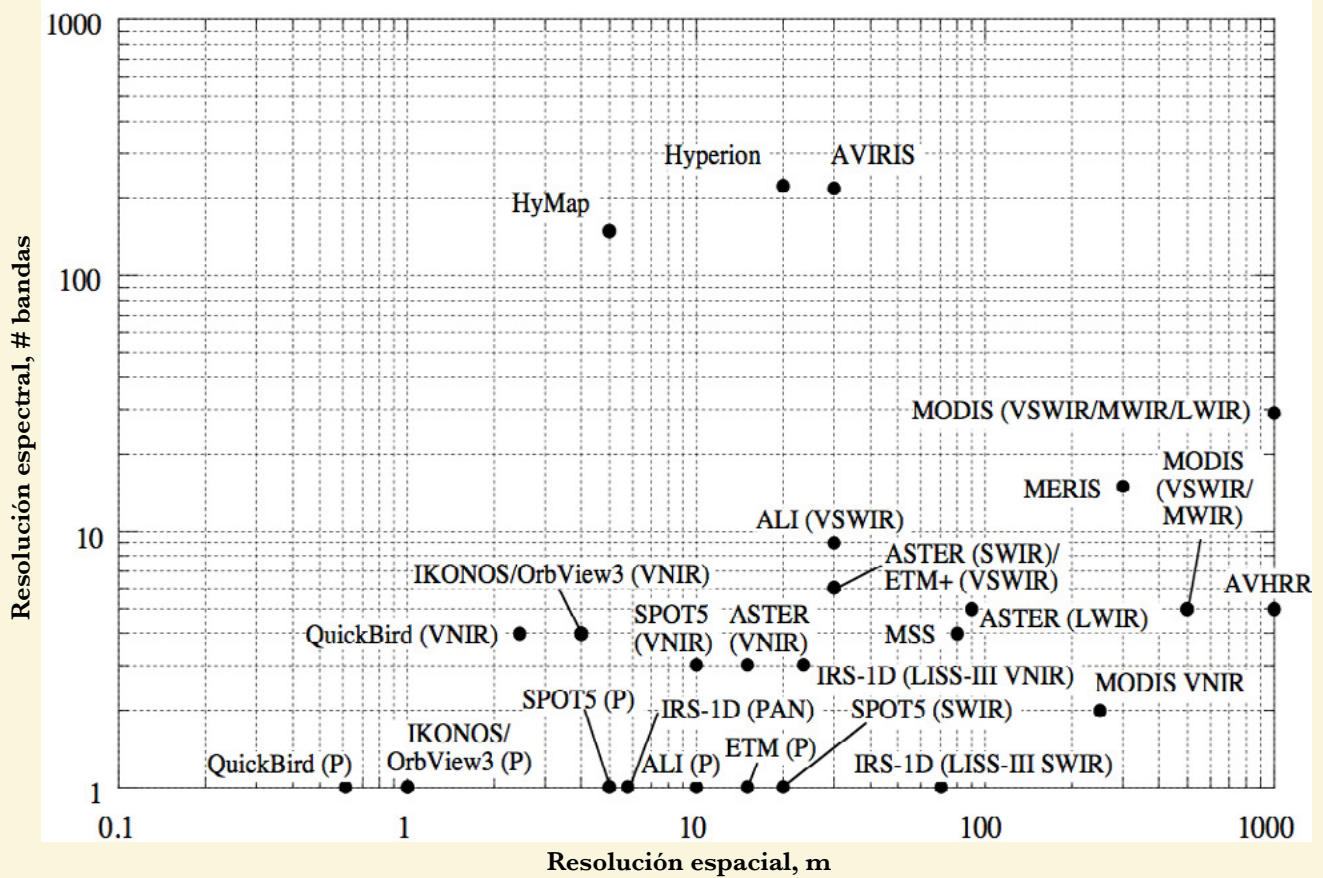


Figura 2.12 Algunos sensores en función de su resolución espacial y espectral

Tomado de Schowengerdt 2007

2.2 CONCEPTO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Es común al referirse a un SIG hacer referencia a tres conceptos distintos: como software, como proyecto o como disciplina. Como software un SIG es un programa de una computadora, con sus funciones propias. Hay varios software de SIG como: ARCINFO, ILWIS, IDRISI, ARCGIS, por citar algunos. Estos programas permiten manipular conjuntamente cartografía y bases de datos para hacer análisis y generar nueva cartografía. Como proyecto, un SIG es la aplicación de la herramienta a diversos campos, tales como: gestión y monitoreo ambiental, planes de ordenamiento territorial, urbanismo, entre otros. Como disciplina, el concepto es mucho más amplio, una de las definiciones más completas en este sentido es la que se establece en el manual del Centro Nacional de Información Geográfica y Análisis de Estados Unidos de Norteamérica: “un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y representar datos geo-referenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación”.

2.2.1 Componentes de un SIG

Los elementos necesarios para poder implantar esta herramienta en cualquier actividad son los siguientes (Figura 2.13):

Base de datos

Información espacial alfanumérica y cartográfica, que es requerida.

Software

Programa con funciones especializadas de captura, almacenamiento, transformación, modelización, análisis y presentación de datos espaciales, para la resolución de problemas de naturaleza geográfica.

Hardware

El equipo de cómputo requerido para poder emplear el software.

Procedimientos

Modelos y prácticas operativas exclusivas en cada organización, proyecto y/o aplicación, bien definidos y consistentes, para producir los resultados deseados.

Liveware o Recursos Humanos

Personal capacitado para manipular y conjuntar los cuatro elementos anteriores.

En los SIG la representación y modelación del espacio puede hacerse utilizando dos tipos de formatos: el raster y el vectorial.

2.2.2 Modelo raster y vectorial

El modelo raster establece las diferencias en las entidades en función de las propiedades, para después proceder a la localización de los elementos. La entidad se divide en elementos discretos (celdas o píxeles) que tienen un único valor respecto al atributo correspondiente.

El modelo de datos vectorial tiende a la representación de la entidad lo más fielmente posible, y utiliza 3 tipos de objetos espaciales (puntos, líneas y polígonos).

La decisión entre emplear un modelo u otro debe establecerse a partir del tipo de estudio o enfoque que se quiera hacer, pero también del software y fuentes de datos disponibles.

Hay que tener claro que las superficies se representan más eficientemente en formato raster y sólo pueden representarse en formato vectorial mediante los modelos híbridos que no resultan adecuados para la realización de posteriores análisis, ya que todas las operaciones que permite el modelo raster resultarán mucho más lentas con el modelo vectorial. En general, cualquier tipo de modelación física de procesos naturales que se base en SIG requiere un modelo de datos de tipo raster.

Tradicionalmente se ha considerado que para la representación de los objetos resulta más eficiente la utilización de un formato vectorial, ya que ocupa menos espacio en disco duro (aunque este último problema puede compensarse mediante diversos sistemas de compresión y en todo caso es cada vez menos relevante debido a que últimamente los discos duros tienen mayor capacidad) y los ficheros se manejan de forma más rápida si lo que se quiere es simplemente visualizar la capa. Sin embargo, el formato vectorial es más lento que el raster para la utilización de herramientas de análisis espacial y consultas acerca de posiciones geográficas concretas. En el caso de las variables cualitativas estaríamos en un caso intermedio entre los dos anteriores.

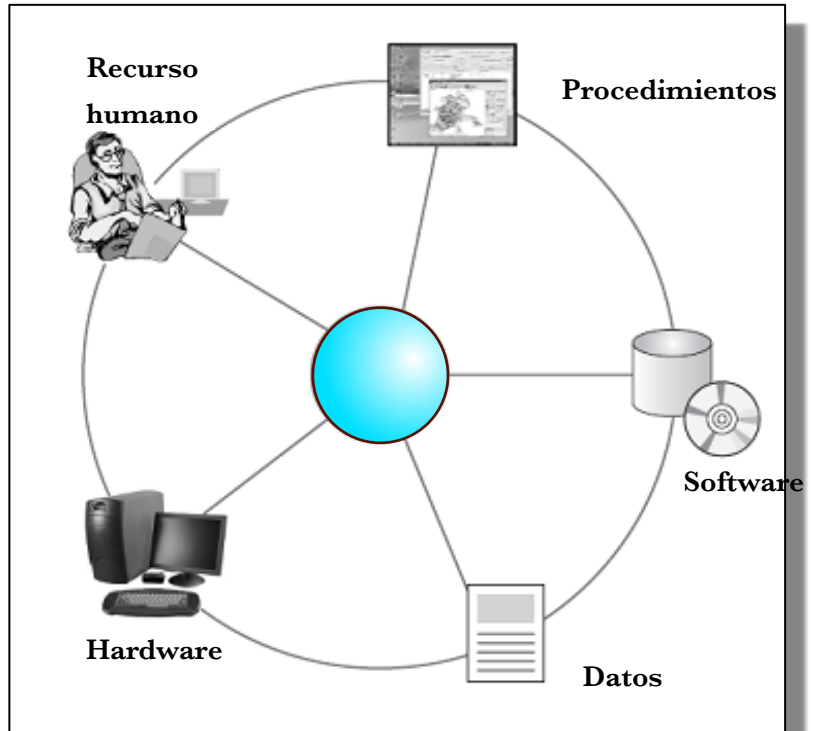
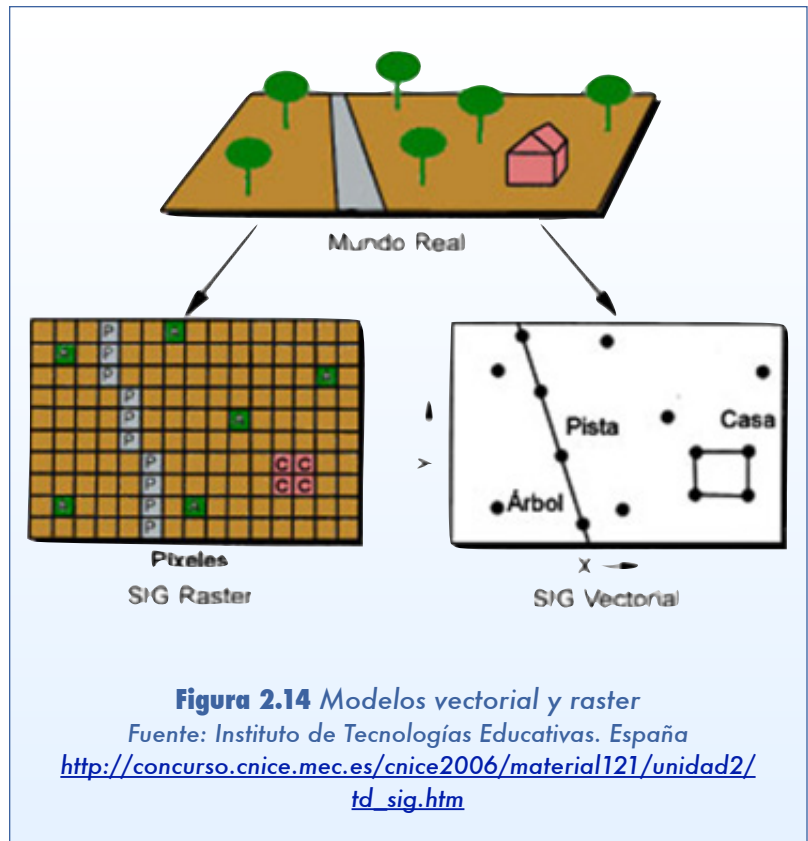


Figura 2.13 Componentes de un SIG
Modificado de Kemp 2008

La accesibilidad de los datos raster puede ser un problema importante y tal vez la mayor desventaja de un SIG raster en comparación con un SIG vectorial. Sin embargo, existen métodos para convertir datos del vector a raster. Un modelo de vectores, por el contrario, a menudo requiere la compilación de tiempo y dinero de mapas digitales, mientras que los mapas son parte integral de los datos recopilados por un modelo raster.

A pesar de la simplificación excesiva desde un punto de vista funcional, los datos vectoriales se pueden considerar más adecuados para la documentación, mientras que los datos raster son más expertos en mostrar la variación geográfica de los fenómenos. Otra posible simplificación podría ser que los datos vectoriales son preferibles para las presentaciones de “líneas”, mientras que los datos raster son superiores para las presentaciones de “zona”.

Hasta la fecha, el modelo vectorial ha sido mayormente dominante en las implantaciones comerciales de SIG. El modelo raster, por otra parte, se ha utilizado con mayor frecuencia en la planificación de los recursos naturales y la gestión porque es más fácil de explicar y utilizar. Muchos de los nuevos SIG pueden manipular ambos modelos. Con capacidad dual, un SIG puede aprovechar las ventajas respectivas de ambos. La Figura 2.14 muestra la representación de un espacio utilizando el modelo raster y el vectorial.



2.2.3 Funciones de los SIG

Las funciones básicas de un SIG son el almacenamiento, análisis, visualización y consulta de datos espaciales, mientras que un uso algo más avanzado sería la utilización de un SIG para la toma de decisiones o para la modelación de procesos o posibles escenarios.

Conviene establecer los alcances de los SIG con el objetivo de utilizar convenientemente esta herramienta, la Figura 2.15 resume las funciones de un SIG.

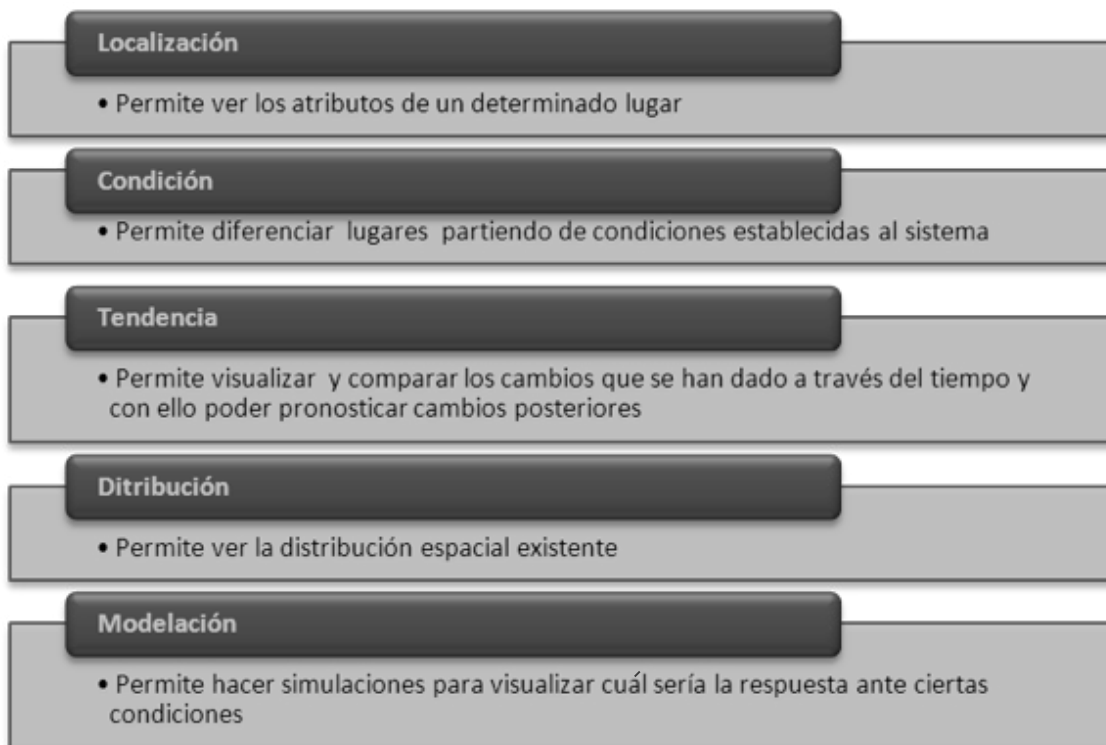


Figura 2.15 Funciones de los SIG

2.2.4 Estructura de los SIG y capas temáticas

Los SIG permiten representar la realidad de una forma abstracta y estratificada a través de capas temáticas, Figura 2.16, cada una de las cuales representa una variable temática y se definen a través de objetos espaciales (puntos, líneas, áreas, celdas, etc.).

Las capas temáticas de un SIG mantienen una estrecha relación al tener en común la misma localización para cada punto, con ello se pueden realizar superposiciones entre las capas. Con esto se suma otra cualidad a los SIG, que permiten llevar a cabo operaciones espaciales entre las diferentes variables temáticas.

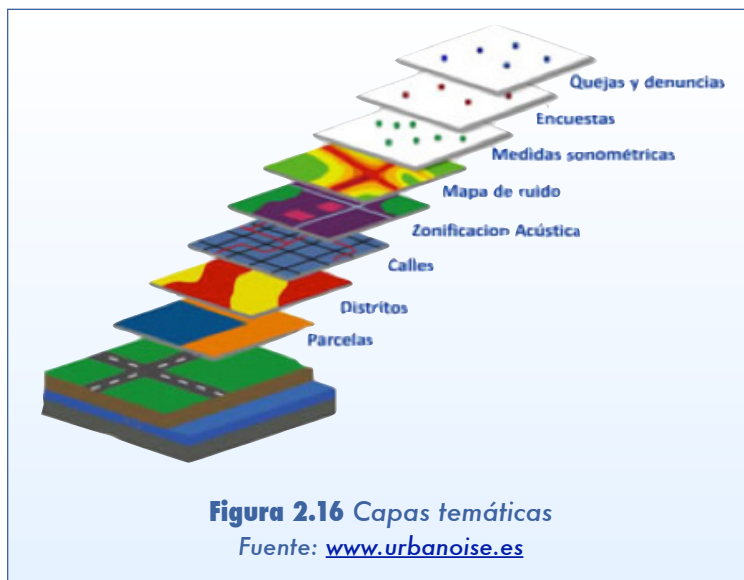


Figura 2.16 Capas temáticas
Fuente: www.urbanoise.es

Objetos espaciales

El arreglo con el cual se define el modelo del mundo real determina qué datos deben ser adquiridos. El soporte básico de información es el objeto espacial, que se define como un fenómeno del mundo real que no es divisible en los fenómenos del mismo tipo, es decir, la abstracción y discretización máxima posible de la información acerca de un fenómeno.

En la interfaz de un software de SIG, los objetos espaciales se definen a partir de las siguientes características particulares: su posición, tipología, atributos y relaciones topológicas.

La posición se refiere a la localización absoluta del objeto en el espacio, dada en coordenadas x, y; es definida a través de la geo-referenciación. A través de la tipología se busca definir a los objetos espaciales para evitar la ambigüedad entre ellos en un mismo fenómeno o al interactuar con otros, es decir, que cada objeto sea identificable o diferenciable de los demás.

Cada tipo de objeto espacial cuenta con uno o más atributos que describen sus características temáticas fundamentales. Tales atributos pueden ser cualitativos o cuantitativos; los primeros se tratan de variables o características cualitativas que no tienen nada que ver con el espacio, pero que se relacionan con el objeto; pueden ser constantes o variables en el tiempo, como por ejemplo, cada lago en una región puede ser descrito en términos de su nombre, potabilidad, actividad biológica, color, etc. Por otro lado, los atributos cuantitativos son variables medidas en magnitudes espaciales que indican algún aspecto de la extensión espacial de los objetos. Finalmente, las relaciones topológicas, las cuales nos indican la localización relativa con relación a otros objetos espaciales. Algunos ejemplos de estas relaciones pueden ser la conectividad, contigüidad, inclusión entre los objetos, etc. Aunque tales relaciones nos parezcan obvias en los mapas convencionales, el sistema no lo puede intuir, por lo tanto requiere que se le provea de información, descripción o instrucciones acerca de cómo puede ser compilado.

Introducción de datos

Los SIG permiten el ingreso de información gráfica y alfanumérica. En el primer caso puede hacerse a través de mapas o planos impresos, o bien, por fotogrametría, percepción remota, topografía e información de campo georreferenciada; todo lo anterior en formato digital. En el segundo caso se introduce la información alfanumérica mediante la importación de archivos de datos.

2.2.5 PR y SIG

La PR y los SIG surgen en principio como tecnologías independientes. Sin embargo, uno de los objetivos del primer SIG, el Sistema de Información Geográfica de Canadá (CSIG), desarrollado por Roger Tomlinson en los sesenta, fue el almacenamiento y procesamiento de fotografía aérea.

En los años setenta, cuando se difunden las primeras imágenes de los satélites Landsat, se concibe la posibilidad de integrar información cartográfica con imágenes de satélite. El aumento de resolución permite una mayor capacidad de discriminación de objetos y clases por lo que ya pueden utilizarse, por ejemplo, para obtener mapas de usos del suelo. Sin embargo, esta clasificación de las imágenes no resulta sencilla y se beneficia de la incorporación de toda la información que sea posible.

En los años 80 se empieza a considerar a la PR como una fuente de información para un SIG, especialmente útil para su actualización. Ya no sería necesario hacer campañas de campo intensivas para determinar el estado de la vegetación sino que bastaría con procesar una serie de imágenes.

Así, mientras los SIG son una herramienta idónea de almacenamiento y gestión medioambiental, la PR brinda al sistema una de sus fuentes de información más precisas. Los SIG más modernos poseen la capacidad de combinar imágenes de percepción remota (formato raster) con datos vectoriales. Además, los modelos digitales de elevación del terreno (MDE), mejoran notablemente la capacidad de visualización del territorio

Esta convergencia de SIG y PR se ha visto favorecida por su desarrollo en el mismo tipo de entornos de trabajo y por similares requerimientos en cuanto a hardware y software; en definitiva ambas tratan con información espacial geo-referenciada de la que se pretenden extraer conclusiones relevantes desde un punto de vista medioambiental o de planificación.

2.3 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES CON EL USO DE SOFTWARE DE SIG

En este apartado se presentan los principios y las técnicas más usadas en el procesamiento y análisis digital de imágenes.

2.3.1 Estructura básica de una imagen digital

Captura y digitalización de la imagen

El sistema de sensores de los satélites es un dispositivo óptico y electrónico, que convierte las mediciones de radiancia recibidas por el sensor (para una determinada superficie terrestre y banda del espectro) en una señal eléctrica que genera un nivel digital (ND), representado en un pixel (unidad visual más pequeña que aparece en la imagen). Por lo tanto, el ND consiste en un valor digital que puede traducirse a una intensidad visual (nivel de gris), mediante cualquier convertidor digital analógico (Rees 1990).

En resumen, la unidad mínima de información en una imagen digital se denomina pixel y está definido por un número entero ND, que puede convertirse en una intensidad luminosa a nivel de gris.

El sistema sensor separa los componentes de la radiancia en las longitudes de onda del espectro electromagnético. Estos componentes separados (7 en el caso del LANDSAT) y transformados a señales eléctricas que generan ND son los “valores de canales” para un pixel en particular. Para cada canal o banda se produce un número binario en la digitalización, comúnmente en el ámbito de 0 - 255, así que 8 bits pueden usarse para almacenar los valores de un canal (ND correspondiente a cada pixel). Por convención, las medidas más intensas están codificadas en blanco y las más débiles en negro. En la Figura 2.16 se observan distintos tonos de grises y sus correspondiente ND.

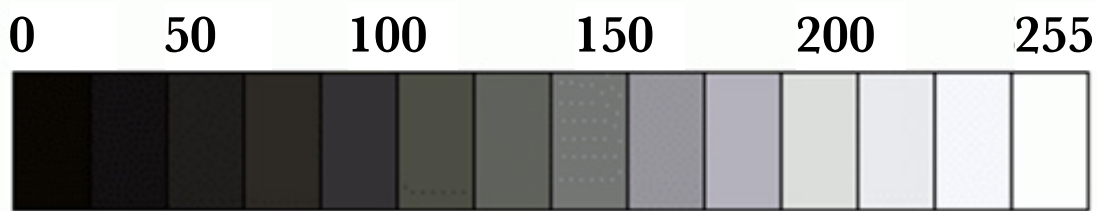


Figura 2.17 Distintos tonos de grises y su valor de ND correspondiente

Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea), 2011

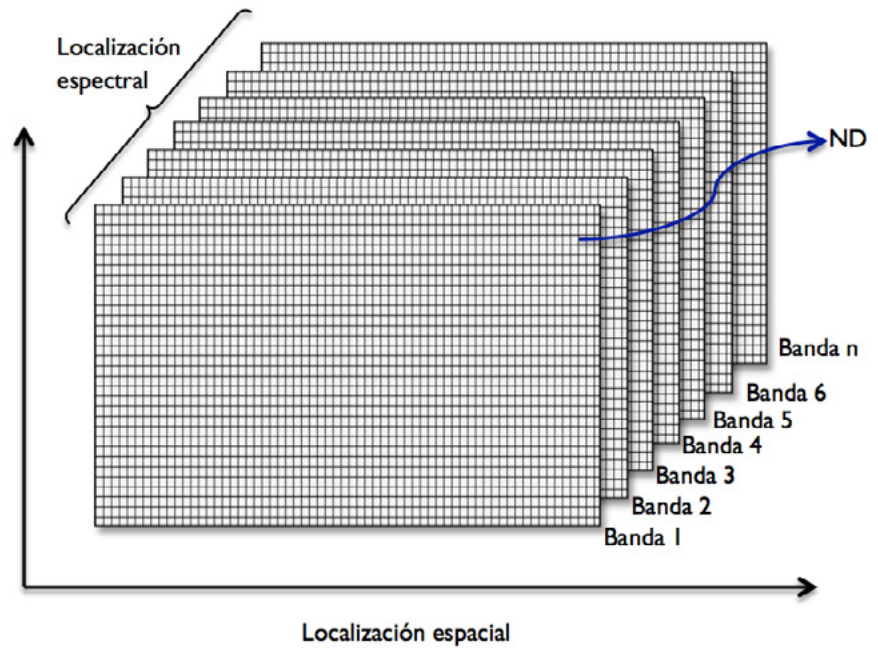
Formación de una imagen y principio de visualización

El sistema de sensores de los satélites explora la superficie terrestre y muestrea las radiancias en espacios terrestres sucesivos simultáneamente en todas la bandas, formando una imagen digital multiespectral (Belward, Valenzuela 1990).

Entonces, una imagen multiespectral está constituida de k matrices llamadas “canales”. La Figura 2.18 muestra la organización de una imagen digital TM; en la figura puede apreciarse que se trata de matrices numéricas de 3 dimensiones. Las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras que la tercera se refiere a su dimensión espectral. Las filas de la matriz (líneas) expresan la dirección Norte - Sur, en cambio las columnas indican la orientación Oeste - Este. En estas matrices el origen de las coordenadas está en la esquina superior izquierda (línea 1, columna 1); esto se debe a la secuencia de adquisición de imágenes (Norte - Sur), de acuerdo con la traza del satélite.

Existen varios formatos de grabación para la información de una imagen digital dentro de los distintos dispositivos de almacenamiento de datos de una computadora (cintas magnéticas, discos, etc.), se organiza como una corriente continua de bits; la mayor parte de los sensores emplean grupos de 8 bits para almacenar el valor digital correspondiente a un pixel, por lo que podemos determinar que cada pixel es definido por un byte, lo que equivale a un rango de 256 niveles (28, de 0 a 255). El Cuadro 2.4 contiene la descripción de los formatos de grabación más habituales.

Figura 2.18 Organización de una imagen satelital
Adaptada de Chuvieco 1990



Cuadro 2.4 Formatos de grabación más usuales

Formato	Descripción	Ilustración
Banda secuencial	Los ND de cada banda se disponen uno seguido del otro hasta terminar con el total de pixeles de una banda, a continuación se colocan los ND de la siguiente banda, y así sucesivamente hasta completar el conjunto de bandas espectrales con las que se cuenta de la imagen.	<p>The diagram shows a horizontal bar representing a bit stream. It is divided into sections: 'Banda 1 - Línea 1' containing 'Pixel 1', 'Pixel 2', and '...'; 'Banda 1 - Línea 2' containing '...'; and 'Banda 2' containing '...'. An arrow points to the right, labeled 'Corriente continua de bits'.</p>
Banda intercalada por línea	Los ND son ordenados de acuerdo a la línea a la que pertenecen, disponiéndose consecutivamente los correspondientes a todas las bandas, para cada línea, antes de comenzar la línea siguiente.	<p>The diagram shows a horizontal bar representing a bit stream. It is divided into sections: 'Línea 1 - Banda 1' containing 'Pixel 1', 'Pixel 2', and '...'; 'Línea 1 - Banda 2' containing '...'; and 'Línea 2' containing '...'. An arrow points to the right, labeled 'Corriente continua de bits'.</p>
Banda de pixeles intercalados	Los ND son organizados con base al pixel, es decir, para el pixel 1 se colocan consecutivamente los ND de cada una de sus bandas, a continuación se hace lo mismo para el pixel 2, y así sucesivamente hasta completar con el total de pixeles que integran la imagen digital.	<p>The diagram shows a horizontal bar representing a bit stream. It is divided into sections: 'Pixel 1 - Línea 1' containing 'Banda 1', 'Banda 2', and '...'; 'Pixel 2 - Línea 1' containing '...'; and 'Pixel 3' containing '...'. An arrow points to the right, labeled 'Corriente continua de bits'.</p>

Las imágenes satelitales también incluyen normalmente un archivo de cabecera en donde se almacena el formato con el que están grabados, tipo de sensor, localización de la escena, día, elevación y azimut solar, así como el tipo de correcciones aplicadas por la estación.

2.3.2 Preprocesamiento y rectificación de imagen

Las imágenes adquiridas a través de sensores remotos presentan algunas alteraciones debidas a errores ocurridos en el proceso de captación de datos. Esta es la razón por la que es necesario preprocesar los datos captados por el sensor antes de analizarlos.

La rectificación de imágenes permite hacer correcciones de distorsión, degradación y ruido introducido durante el proceso de captación de esas imágenes. Algunos de estos problemas se resuelven rutinariamente en los centros encargados de la recepción o venta de imágenes. Otros, sin embargo, persisten, y hacen precisa la aplicación de una serie de técnicas de ajuste.

Distorsiones y correcciones radiométricas

Las distorsiones radiométricas son aquellas que afectan la radiometría de los objetos en la imagen, mientras que las correcciones radiométricas son las técnicas que modifican los ND originales con objeto de aproximarse a los que habría presentes en la imagen en el caso de una recepción ideal. Las distorsiones radiométricas incluyen las provocadas por la atmósfera, así como aquellas derivadas de un mal funcionamiento del sensor. A continuación se presentan algunos de los problemas más comunes y los procedimientos para minimizarlos.

Restauración de líneas o pixeles perdidos

El mal funcionamiento de un sensor o de la antena receptora puede ocasionar que una línea o pixel aparezca con valores muy bajos o nulos, mostrándose en la imagen como líneas negras o blancas, o pixeles aislados de aspecto similar. La forma de estimar los ND de los pixeles perdidos es considerando los ND de los pixeles vecinos, ya que muchas variables tienden a presentar una fuerte asociación en el espacio. Por lo tanto, los valores de radiancia provenientes de una superficie terrestre tienden a correlacionarse con áreas terrestres vecinas. Existen varias formas de introducir este criterio de vecindad. La más sencilla es sustituir el ND de cada línea o pixel por el de los precedentes o posteriores (Chuvienco 1990).

$$ND_{i,j} = ND_{i-1,j} \quad \dots (2.21)$$

donde:

$ND_{i,j}$ es el ND de la línea i (defectuosa) y columna j ;

$ND_{i-1,j}$ es el ND del pixel situado en la línea precedente.

En el caso de la sustitución de líneas defectuosas por las posteriores se incluiría el subíndice $i + 1$.

Un segundo método para restaurar líneas o píxeles perdidos consiste en promediar los valores de las líneas anterior y posterior a la defectuosa. Así,

$$ND_{i,j} = ent \left\{ \frac{(ND_{i-1,j} + ND_{i+1,j})}{2} \right\} \quad \dots (2.22)$$

en donde $ent \{ \}$ se refiere a que el resultado debe aproximarse al número entero más cercano.

Corrección del bandeo de la imagen

En los sensores de barrido la exploración se realiza en varias líneas simultáneamente, por lo que requiere varios detectores por banda. Es importante que todos ellos traduzcan uniformemente la señal detectada, para que la misma radiancia recibida no se codifique en ND distintos. Un mal calibrado entre los detectores que forman el sensor puede producir un efecto de bandeo en la imagen final, especialmente notable en zonas de baja radiancia (como sombras o superficie marina). Este efecto es periódico, ya que cada detector registra una de cada n líneas, siendo n el número de detectores por banda.

En el caso de tener detectores bien calibrados, la señal detectada por cada uno de ellos tendería a presentar histogramas similares (ND versus frecuencia). Por lo tanto, para ajustar la señal detectada para cada detector, y corregir el efecto de bandeo, se requiere calcular el histograma para cada uno, calculando independientemente la frecuencia de los n grupos de líneas (Barret 1982). Enseguida se elige un histograma de referencia que es el relativo al conjunto de la imagen, es decir, el formado por todas las líneas que la componen. Se calculan la media y la desviación estándar de cada histograma parcial y del histograma de referencia para después ajustar el primero con respecto al segundo. Esto es, se calculan coeficientes de ajuste para después aplicar una función que permita el ajuste de los histogramas parciales. Los coeficientes de ajuste son:

$$a_i = \frac{S}{S_i} \quad \dots (2.23)$$

y

$$b_i = \overline{ND} - a_i \overline{ND}_i \quad \dots (2.24)$$

donde:

S es la desviación estándar del histograma de referencia;

S_i es la desviación estándar del histograma parcial;

ND es la media del histograma de referencia; y

ND_i es la media del histograma parcial.

El valor corregido se calcula con la función

$$ND'_{i,j} = a_i ND_{i,j} + b_i \quad \dots (2.25)$$

Corrección atmosférica

Los efectos atmosféricos en imágenes de sensores remotos son debidos especialmente a la atenuación que sufre la radiación de la atmósfera y a la dispersión en dicha radiación, siendo el segundo factor el más significativo. Por ello la radiancia detectada por el sensor no corresponde sólo a la de la superficie terrestre, sino que su valor ha sido incrementado debido al efecto dispersor de la atmósfera.

El efecto de dispersión es dependiente de la longitud de onda, y también de la presencia de vapor de agua y aerosoles que varían en el tiempo y en el espacio. En relación con esto último, la dispersión atmosférica no es constante en una imagen, sino que puede haber zonas más afectadas que otras.

Mientras menor es la longitud de onda, mayor es el efecto de dispersión; por esta razón las imágenes multiespectrales presentan menos contraste en las bandas correspondientes al azul y al verde, y aumenta en las bandas del infrarrojo. Uno de los métodos para corregir la radiancia atmosférica es el denominado corrección del histograma por sus valores mínimos. Se considera que áreas correspondientes a zonas de sombra o agua clara deben presentar una radiancia muy cercana a cero.

En la práctica, el histograma de los ND siempre presenta un mínimo superior a ese valor, lo que es atribuido al efecto de dispersión atmosférica. En consecuencia, con el método del histograma por sus valores mínimos se resta a todos los ND de cada banda, el ND mínimo de esa misma banda, situando el histograma en cero.

2.3.3 Distorsiones y correcciones geométricas

Los datos obtenidos por P.R. son afectados por distorsiones geométricas que pueden ser debidas al diseño del sensor, exploración e inestabilidad de la plataforma, rotación de la Tierra y su curvatura. Algunas de estas distorsiones son corregidas por los centros de recepción y venta de imágenes y otras pueden ser corregidas referenciando las imágenes a mapas existentes de la zona. Las imágenes sin tratamiento obtenidas por P.R. contienen la localización de los datos no referenciados. De tal forma que se pretende transformar las coordenadas de la imagen en coordenadas cartográficas (UTM u otras proyecciones), de manera que la imagen resultante pueda superponerse usando mapas convencionales. Por otro lado, cuando se pretenden realizar estudios multi-temporales también se busca corregir geoméricamente para lograr ajustar dos o más imágenes entre sí.

La corrección de todas las distorsiones geométricas a la vez se realiza con una transformación, basada en funciones numéricas. Esta transformación está dada en los siguientes polinomios:

$$x = a_0 + a_1 r_n + a_2 c_n \quad \dots (2.26)$$

$$y = b_0 + b_1 r_n + b_2 c_n \quad \dots (2.27)$$

donde:

r_n es el número de renglón;

c_n es el número de columna; y

x y y son las coordenadas del mapa.

Para definir la transformación es necesario calcular los coeficientes de los polinomios (a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 y b_2), para lograrlo deberán seleccionarse varios puntos que puedan localizarse exactamente en un mapa georeferenciado (x , y), y que además sean identificables en la imagen raster (renglón, columna). Es conveniente que sean puntos claramente identificables en la imagen y en el mapa, como rasgos físicos de carácter antropogénico no sujetos a cambios temporales, por ejemplo: cruces de carreteras, presas, vías de ferrocarril, etc. El número mínimo de puntos requerido para el cálculo de los coeficientes de los polinomios es de tres para una función de ajuste de primer grado, seis para una de segundo grado y nueve para una de tercer grado. Pero conviene seleccionar más puntos que el mínimo para obtener una transformación óptima con el más pequeño error en la posición de los puntos seleccionados. Los errores pueden deberse a una posición errónea del mouse en la imagen y por una denominación equivocada de las coordenadas en el mapa. La exactitud general de la transformación está indicada por el promedio de los errores en los puntos de referencia, llamado error medio cuadrático (RMS) o Sigma, y puede valorarse comparando las coordenadas estimadas por la transformación con las reales, para cada punto de control.

Un alto RMS para un punto de control, indica que ese punto no se ajusta convenientemente a la transformación imagen/mapa. El promedio de los RMS para todos los puntos de control facilita una evaluación de la calidad general del ajuste. Si ese valor no es satisfactorio, pueden eliminarse aquellos puntos con un valor de RMS alto, ya que se considera que su localización no es correcta. A continuación se calcula de nuevo la ecuación de ajuste y los RMS para cada punto. El proceso termina cuando todos los puntos de control presentan un RMS por debajo de cierta condición que haga que el RMS general esté dentro de márgenes tolerables, establecidos de acuerdo a la escala y a la precisión con la que se pretenda obtener los resultados.

Si la precisión de la transformación es aceptable, entonces ésta relaciona las coordenadas del mapa con los renglones y columnas de la imagen para cada pixel, así la imagen está geo-referenciada. Después de geo-referenciar una imagen, tendrá coordenadas para cada pixel, pero su geometría no estará corregida por las distorsiones geométricas, ni adaptada al mapa de referencia. Se requiere corregirla geoméricamente, para ello es necesario transformar los ND de la imagen original a la posición correcta. Esto da como resultado una nueva imagen donde los pixeles son almacenados en una nueva geometría, la cual está relacionada con la geo-referencia (contiene información de coordenadas y tamaño del pixel). Esta nueva imagen se crea por medio de un “re-muestreo”, por aplicación de un método de interpolación. Este método se usa para calcular los valores radiométricos de los pixeles en la nueva imagen basada en los valores de los ND de la imagen original (Figura 2.19).

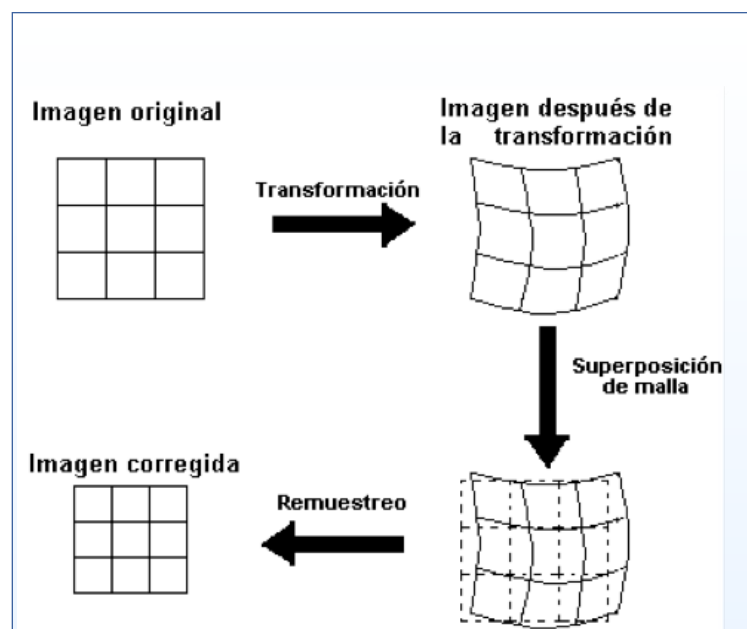


Figura 2.19 Proceso de corrección geométrica
 Tomada de Ilwis Department, International Institute for
 Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The
 Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows

Existen tres métodos de interpolación:

- Vecino más próximo;
- Bi - lineal; y
- Convolución cúbica.

Vecino más próximo

En este método el valor para un pixel (ND) en la imagen corregida es determinado por el valor del pixel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y la que implica menor transformación de los ND originales (Chuvieco 1990), Figura 2.20. Su principal inconveniente es la distorsión que se produce en rasgos lineales de la imagen (carreteras, fracturas), que pueden aparecer en la imagen corregida como líneas quebradas.

Bilineal

Se calcula el promedio ponderado de los niveles digitales correspondientes a los cuatro pixeles más cercanos en la imagen original, Figura 2.21. Su principal inconveniente es que tiende a difuminar los contrastes espaciales de la imagen original.

Convolución cúbica

Se calcula el nivel digital a partir de los 16 pixeles más próximos. La imagen corregida no se distorsiona, pero requiere de un mayor volumen de cálculo, Figura 2.22.

2.3.4 Realce de la imagen

Para mejorar la interpretación visual de la imagen, haciendo más evidentes los rasgos de interés que presenta, se requieren técnicas de realce.

Las técnicas de realce de imagen pueden clasificarse de muchas formas. El realce de contraste, también llamado realce global, transforma el conjunto de datos de la imagen usando el cálculo estadístico. Ejemplos de las técnicas de realce de contraste son: expansión lineal del contraste, expansión del histograma ecualizado, expansión especial del contraste. Contrario a esto, el realce espacial o local toma en consideración condiciones locales solamente, y estas pueden variar considerablemente en una imagen. Ejemplos de las técnicas de realce espacial son: suavizamiento y definición de imágenes.

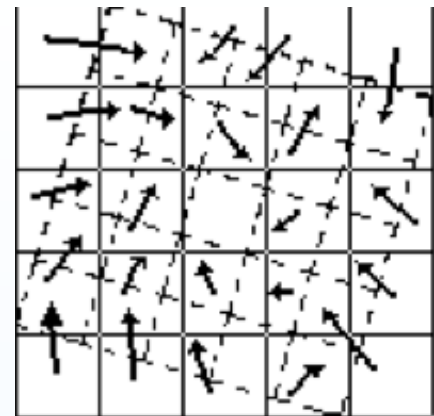


Figura 2.20 Método de interpolación "vecino más próximo"
Tomada de Chuvieco, 1990

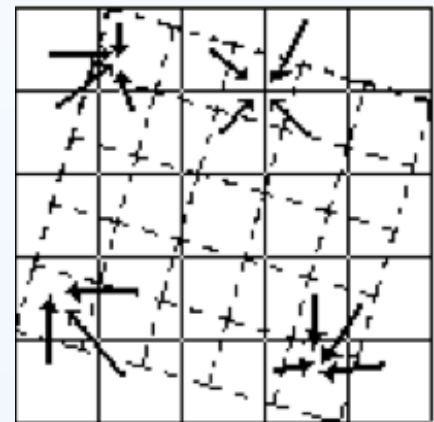


Figura 2.21 Método de interpolación Bilineal
Tomada de Chuvieco, 1990

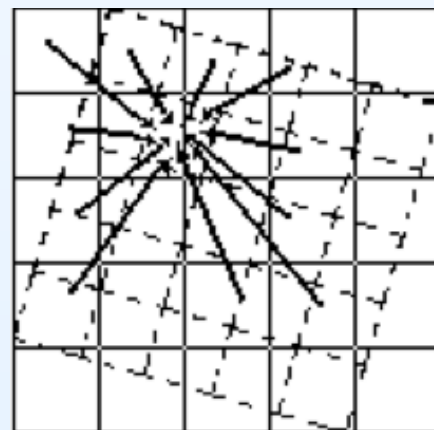


Figura 2.22 Método de convolución cúbica
Tomada de Chuvieco, 1990

Realce de contraste

Los sensores abordo de los satélites han sido diseñados de tal forma que puedan detectar un amplio ámbito de características de luminosidad, bajo muy variadas condiciones de iluminación. Muy pocas escenas terrestres muestran un ámbito de luminosidad que utilice el ámbito completo de los detectores de los satélites. El objetivo del realce de contraste es mejorar la interpretación visual de una imagen, incrementando la distinción aparente entre las características en la escena. Aunque el cerebro humano es excelente para distinguir e interpretar características espaciales en una imagen, el ojo es más bien pobre en la discriminación de diferencias sutiles en reflectancia que representan tales características. Usando las técnicas de realce de contraste, estas pequeñas diferencias son ampliadas logrando que sean fácilmente observables. La expansión del contraste se usa también para minimizar el efecto de “neblina”. La luz dispersada que llega al sensor directamente de la atmósfera, sin que tenga interacción con los objetos en la superficie terrestre, es llamada neblina. La neblina produce en general valores altos de los ND y su efecto aditivo resulta en una reducción del contraste en la imagen. Recuérdese que el efecto de neblina es diferente para cada banda espectral; es muy alto en el azul y muy bajo en la banda del infrarrojo del espectro electromagnético.

Las técnicas utilizadas para el realce de contraste son: expansión lineal e histograma ecualizado. Para el realce de ámbitos específicos de datos, mostrando cierto tipo de cubiertas terrestres, se usa la expansión especial de contraste.

Un monitor de computadora es capaz de desplegar una imagen de satélite en 256 niveles de gris (0 - 255). Esto corresponde a la resolución de la mayoría de las imágenes de satélite, ya que sus números digitales también varían en el ámbito completo de luminosidad del monitor (desde el negro al blanco, pasando por una variedad de tonos de grises).

La expansión lineal es el realce de contraste más simple. Un valor de ND mínimo del histograma original se asigna al negro extremo (0) y el ND máximo se asigna al blanco extremo (255); el resto de los valores se distribuyen linealmente entre ambos extremos. Un inconveniente de la expansión lineal, es que asigna muchos niveles visuales o de pantalla a los valores de ND -que raramente se presentan-, como si ocurrieran frecuentemente. Sin embargo, usar el ND mínimo en cero y el máximo en 255 todavía produce, en la mayoría de los casos, una imagen bastante oscura. Incluso aunque todos los tonos de gris de la pantalla sean utilizados, la mayoría de los pixeles son desplegados en gris medio. Esto es debido a la distribución más o menos normal dentro de los valores mínimo y máximo de las colas de distribución. Por esta razón es común fijar las colas del histograma en los valores extremos del ámbito (valor más alto y más bajo) y los valores intermedios repartidos en la escala.

La técnica del histograma ecualizado es una expansión no lineal. Los ND son redistribuidos considerando su frecuencia. Es decir, aquellos ND con mayor número de pixeles serán los que, proporcionalmente, ocupen un mayor ámbito de visualización en el monitor. Esta técnica ofrece mejores resultados que la expansión lineal, especialmente si la imagen original presenta una distribución gaussiana.

La expansión espacial de contraste es muy similar a la expansión lineal, la diferencia radica en restringir el contraste a un ámbito específico de ND, en donde se manifieste con mayor claridad una cubierta de interés. Este método es muy usado cuando se quiere resaltar solamente cierto tipo de cubierta, por ejemplo agua. Los valores de ND para esta característica están en el ámbito de 5 a 18 y con el fin de ser factible discriminar tanto como sea posible, es adecuado usar todos los niveles disponibles de gris sólo para esta característica. De esta manera aparecerán diferencias detalladas en la característica de interés, donde las características que quedan se asignan a un único tono de gris. La Figura 3.7 muestra las principales técnicas de realce de contraste.

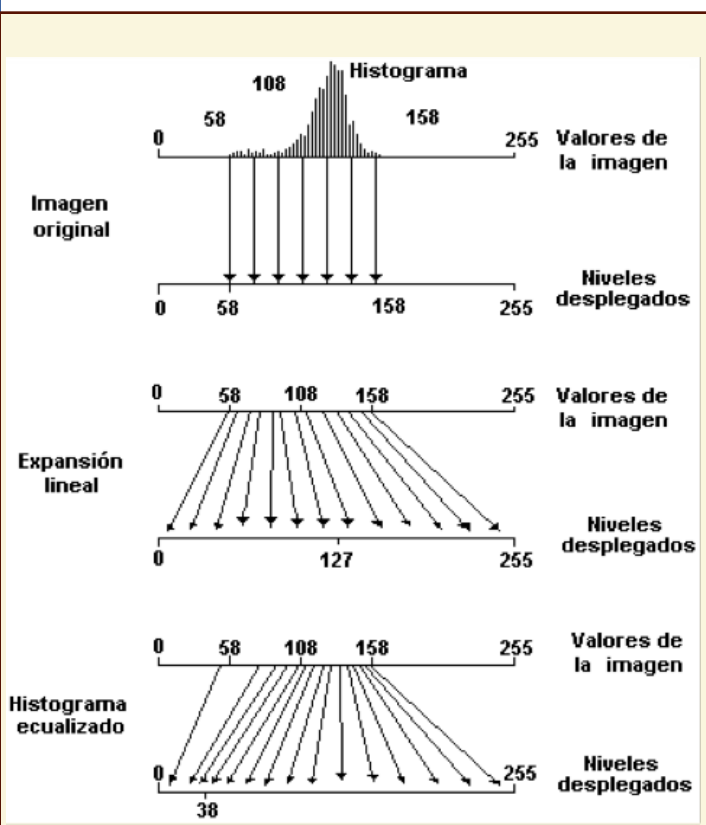


Figura 2.23 Principio de realce de contraste

Tomada de Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows.

Realce espacial

Los procedimientos de realce espacial producen una modificación de un valor de un pixel en una imagen, basado en los valores de pixeles en su vecindad inmediata (realce local). Comúnmente se usan filtros para corregir y restaurar imágenes afectadas por un mal funcionamiento del sistema; también se usan para realzar las imágenes para una interpretación visual y extraer características. En todos los procedimientos de realce, el objetivo es crear nuevas imágenes a partir de los datos de la imagen original, en cierto orden para incrementar la cantidad de información que puede interpretarse visualmente.

Filtros de frecuencia espacial

Simplemente llamados filtros espaciales, pueden enfatizar o suprimir datos de la imagen de varias frecuencias espaciales. La frecuencia espacial se refiere a la desigualdad en las variaciones de los ND en una imagen. En áreas de frecuencia espacial alta, los ND pueden cambiar abruptamente sobre un relativo número pequeño

de pixeles (por ejemplo, a través de carreteras, límites de campos, líneas de costa y tierra). Las áreas de imágenes iguales o suaves se caracterizan por una frecuencia espacial baja, donde los ND solamente cambian gradualmente sobre un gran número de pixeles (por ejemplo, grandes campos agrícolas homogéneos, cuerpos de agua, etc.). Los filtros de bajo paso son usados para enfatizar las características de baja frecuencia y suprimir los componentes de la imagen de alta frecuencia. Los filtros de alto paso hacen justamente lo contrario.

Ambos tipos de filtrado se abordan de manera similar. Para lograr poner los pixeles de la imagen en relación con sus vecinos, ya sea para homogenizarlos o diferenciarlos, es necesario realizar una serie de operaciones aritméticas entre cada uno de ellos y sus vecinos. La forma de efectuar este proceso es aplicar sobre los ND originales una matriz móvil de coeficientes de filtraje (CF), los cuales son factores de ponderación. Esta matriz es denominada Kernel y puede tener un tamaño variable en función del número de pixeles vecinos que se quieran implicar en el proceso. Lo habitual es una matriz de 3 x 3 CF, que se aplica a todos los pixeles de la imagen. También pueden usarse matrices de filtraje mayores, por ejemplo, de 5 x 5 ó 7 x 7 pixeles. Mientras mayor sea la matriz de CF el efecto de suavizado o realce espacial será más intenso, al considerar un mayor número de pixeles vecinos.

Es pertinente insistir en que sólo se modifica el ND del pixel central entre los que son afectados por la matriz de filtraje. Si los CF tienden a ponderar el valor central en detrimento de los externos, el pixel refuerza sus diferencias frente a los vecinos (filtro paso alto); por el contrario, si los CF favorecen a los pixeles externos, el central se asemejará más a los adyacentes (filtro de bajo paso).

El procedimiento matemático del filtraje consiste en relacionar cada pixel con sus vecinos, con base en CF determinados por el usuario, los cuales marcan las consecuencias del filtraje (Chuvieco 1990). La ecuación genérica queda:

$$ND'_{i,j} = \frac{\sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 ND_{i+p,j+q} CF_{f+p,c+q}}{\sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 CF_{f+p,c+q}} \quad \dots (2.28)$$

en donde:

ND_{i,j} es el ND original del pixel i, j;

ND'_{i,j} es el ND de salida para ese mismo pixel;

CF es el coeficiente de filtraje;

F y C son la fila y columna centrales de la matriz de filtraje.

Se denomina convolución a la operación en la que cada valor del pixel se multiplica por su correspondiente CF, para después sumar los nueve valores resultantes (si se trata de una matriz de filtrado de 3 x 3), cuyo valor se sustituye por el valor original del pixel central (Chuvieco 1990).

Filtros de bajo paso

Aplicar un filtro de bajo paso tiene el efecto de filtrar las frecuencias altas y medias y la imagen resultante tiene una apariencia homogénea o suave. Por eso, este procedimiento es llamado también suavizamiento de imagen y el filtro de bajo paso es llamado filtro suavizante. Es fácil suavizar una imagen; el problema básico es hacerlo sin perder características, por esta razón se da mayor énfasis en suavizar los bordes.

El filtro de bajo paso se ha utilizado para restaurar los errores aleatorios que pueden presentarse en los ND de la imagen y para reducir la variabilidad espacial de algunas categorías, como paso previo a la clasificación. Un ejemplo de esto son las zonas urbanas, en donde se mezclan distintos tipos de cubierta en un espacio reducido.

En el filtro de bajo paso pueden usarse diversas matrices. Las más usuales son:

1	1	1	0.25	0.5	0.25	1	1	1
1	1	1	0.5	1	0.5	1	2	1
1	1	1	0.25	0.5	0.25	1	1	1

La primera matriz es un simple promedio de los 9 píxeles que componen la ventana de filtraje; las otras dos matrices ponderan el valor central para evitar una pérdida excesiva de detalle.

Un filtro de bajo paso sirve para filtrar frecuencias altas, obteniendo como resultado una imagen con apariencia suave y homogénea (Figura 2.24).

Filtros de alto paso

Algunas veces pueden observarse cambios bruscos en los ND de un área a otra. Esto es representado por un gradiente exagerado en los valores de los ND. Los límites de este tipo son conocidos como bordes (rasgos lineales como carreteras, parcelas, accidentes geológicos, etc.). Estos ocupan solamente una pequeña área y son así características de alta frecuencia. Los filtros de alto paso se designan para enfatizar frecuencias altas y suprimir frecuencias bajas. Cuando se aplica un filtro de alto paso se tiene el efecto de realce de bordes. De aquí que los filtros de alto paso son también llamados filtros de realce de bordes.

Se distinguen dos clases de filtros de alto paso: filtros gradiente (o direccional) y filtros laplacianos (o no direccionales). Los filtros gradiente son direccionales y se usan para realzar direcciones lineales específicas. Están diseñados para realzar los bordes que corren en cierta dirección (por ejemplo: horizontal, vertical o diagonal). Algunos ejemplos de matrices de filtraje para lograr un análisis direccional son:

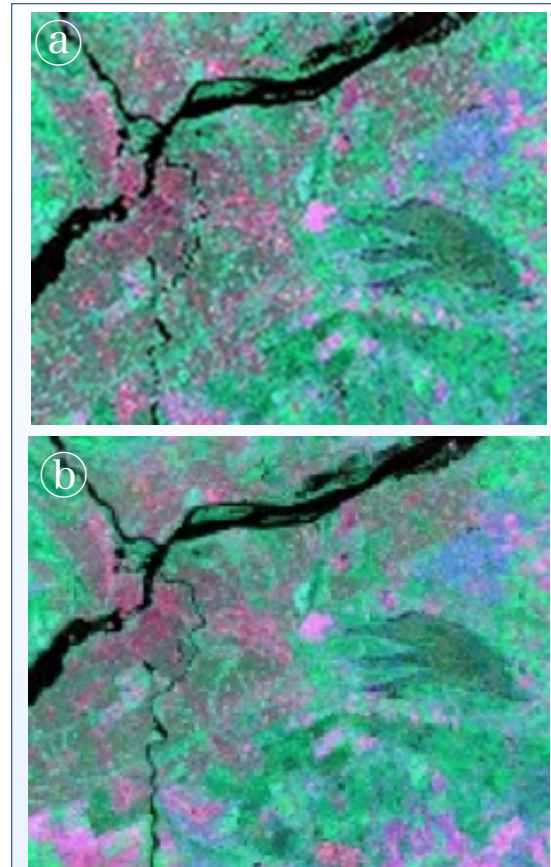


Figura 2.24 Imagen antes (a) y después (b) de ser sometida al filtro de bajo paso
Fuente: "Fundamentals of Remote Sensing" Canada Center for Remote Sensing. 2012

Norte			Sur			Este			Oeste		
1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1
1	-2	1	1	-2	1	1	-2	1	1	-2	1
-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1

Noreste			Sureste			Suroeste			Norroeste		
1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1
1	-2	1	1	-2	1	1	-2	1	1	-2	1
-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	-1

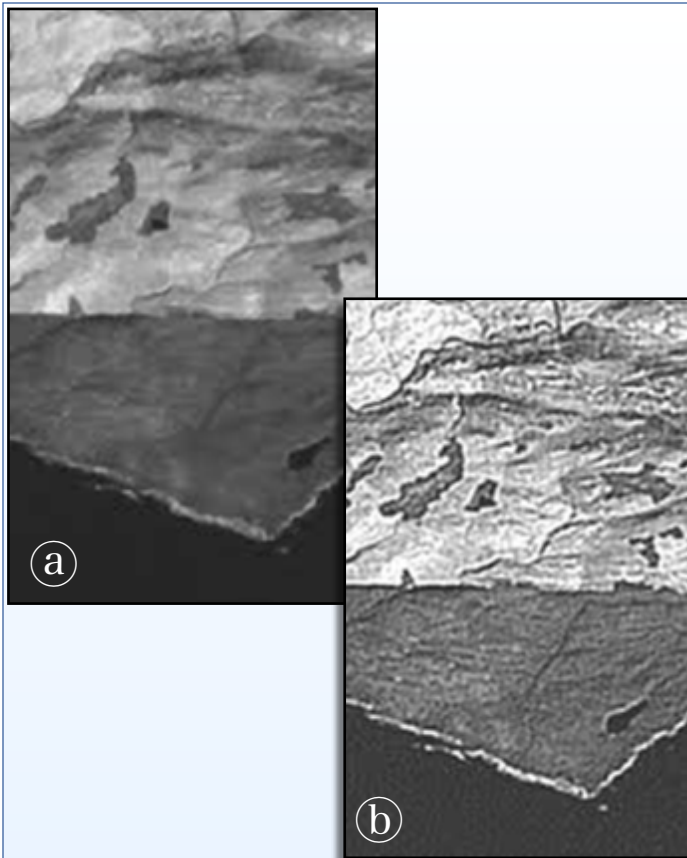


Figura 2.25 Imagen antes (a) y después (b) de ser sometida al filtro de alto paso

Fuente: "Fundamentals of Remote Sensing" Canada Center for Remote Sensing, 2012

Los filtros laplacianos son no direccionales porque realzan características que no tienen ninguna dirección en la imagen. Algunos ejemplos de matrices de filtraje para un análisis no direccional, son:

-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

La Figura 2.25 muestra una imagen sometida a filtro de alto paso.

2.3.5 Visualización en imágenes multibanda

La información espectral almacenada en bandas separadas puede integrarse, por combinación de aquéllas, en una composición de color. Es posible hacer muchas combinaciones de bandas. La información espectral se combina para desplegar cada banda individual en una sola de los tres colores primarios: rojo, verde y azul.

La llamada Composición de Falso Color (CFC) es una combinación específica de bandas usada para crear una imagen de composición en color. En la CFC, el color rojo se asigna a la banda del cercano infrarrojo; el verde, a la banda de rojo visible; y el azul, a la banda visible del verde. En esta combinación la vegetación aparecerá rojiza, el agua azulosa, y el suelo descubierto en tonos de marrón y gris. Para las imágenes multiespectrales de SPOT, las bandas 1, 2 y 3 se despliegan respectivamente en azul, verde y rojo. Mientras que para las imágenes TM una combinación muy usada frecuentemente es aquélla que despliega en rojo, verde y azul las bandas 5, 4 y 3 respectivamente. Algunas combinaciones producen colores de salida muy parecidos a los colores naturales: el agua se despliega en azul, el suelo descubierto como rojo y la vegetación en verde. De aquí que esta combinación ha sido denominada composición de color pseudo natural o también pseudo color.

Usando la técnica de composición de color, pueden combinarse bandas de diferentes imágenes (correspondientes a diferentes sistemas de imágenes o fechas diferentes) o capas creadas a partir de cálculo entre bandas o análisis de componentes principales.

Composición de color

Las composiciones de color son creadas y desplegadas en la pantalla, por combinación de valores centrales de tres bandas individuales. Cada banda es desplegada usando uno de los colores primarios. En la Figura 2.26 se presenta el cubo de color con los aditivos primarios (rojo, verde y azul) que dan los colores sustractivos (amarillo, magenta y cian). Una combinación de píxeles con altos valores de ND para las bandas individuales producen un color claro, mientras que una combinación de píxeles con bajos ND produce un color oscuro. Dependiendo de la contribución específica de rojo, verde y azul, cada punto dentro del cubo genera un color diferente.

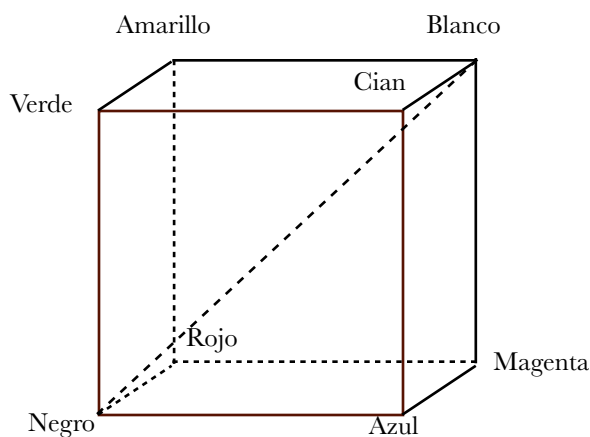


Figura 2.26 Cubo de color
Tomada de Ilwis Department, International
Institute for Aerospace Survey and Earth Science
Enschede, The Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows

Las relaciones entre los valores de los píxeles de las imágenes multibanda y los colores asignados a cada píxel se almacenan en una representación, por ejemplo los valores para el rojo, verde y azul; y el valor para cada color representa la intensidad relativa, en un ámbito de 0 a 255. Las tres intensidades juntas definen el color final (por ejemplo, la intensidad de rojo = 255, verde = 0 y azul = 0, resulta en un color rojo brillante). Los valores de los píxeles de las 3 imágenes de entrada son usados para definir los valores correspondientes a los píxeles en la composición. Una de las bandas originales da los valores para el rojo, otra los valores para el verde y la tercera para el azul (ver Figura 2.27).

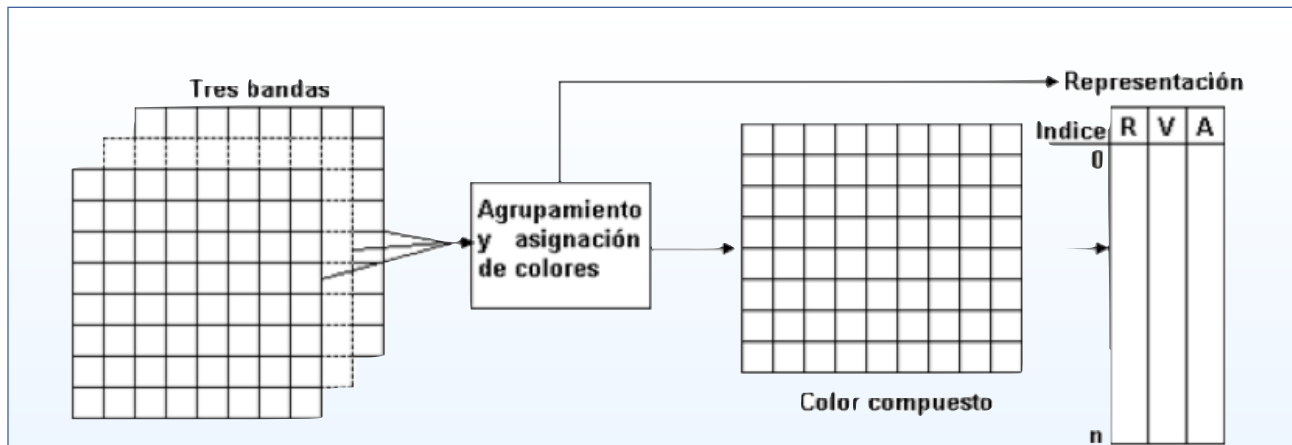


Figura 2.27 Relación entre las imágenes originales, la representación y la composición de color
 Tomada de Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows

2.3.6 Transformaciones de la imagen

Uno de los más importantes aspectos de las imágenes de satélite es su calidad multispectral. Las características terrestres tienen diferentes reflectividades en los diversos canales espectrales y algunas bandas son mejores en la discriminación de ciertos tipos de cubiertas. El carácter multispectral permite un excelente tratamiento de la información de la superficie terrestre. Sin embargo, es difícil ver seis bandas diferentes de una imagen al mismo tiempo. Por lo tanto, es útil formar algún tipo de imagen compuesta que reduzca las bandas espectrales originales de seis o siete a una o dos, pero al mismo tiempo preservar la información visual útil de todas las bandas; o hacer combinaciones entre las bandas originales con objeto de mejorar la discriminación de algunos aspectos temáticos en la imagen. Existen varios métodos para hacer esto, pero en el presente trabajo nos concentraremos en aquellos usados comúnmente en P.R. y que han dado buenos resultados.

Estadísticas Multibanda

La distribución de los valores de los datos en una sola banda podría representarse gráficamente usando un histograma y matemáticamente por las estadísticas de la varianza, la cual resume las diferencias entre todos los valores de los píxeles y el valor medio de la banda (el ámbito de valores en una banda indica la variación del canal, pero no indica la forma en cómo los valores se distribuyen entre el mínimo y el máximo). La correlación entre dos o más bandas puede mostrarse gráficamente mediante un gráfico de dispersión y matemáticamente por las estadísticas de la covarianza. Un gráfico de dispersión tiene dos dimensiones, con un eje horizontal de valores de una banda y un eje vertical de valores de la segunda banda. Los puntos en el gráfico indican los valores de los píxeles. Los valores en una matriz de covarianza indican también la correlación: grandes valores negativos indican una fuerte correlación negativa, grandes valores positivos muestran una clara relación positiva, y valores de covarianza cercanos al cero indican una débil o nula correlación. La Figura 2.28 muestra un ejemplo de gráficos de dispersión (a) con covarianza fuertemente positiva y (b) con varianza cero.

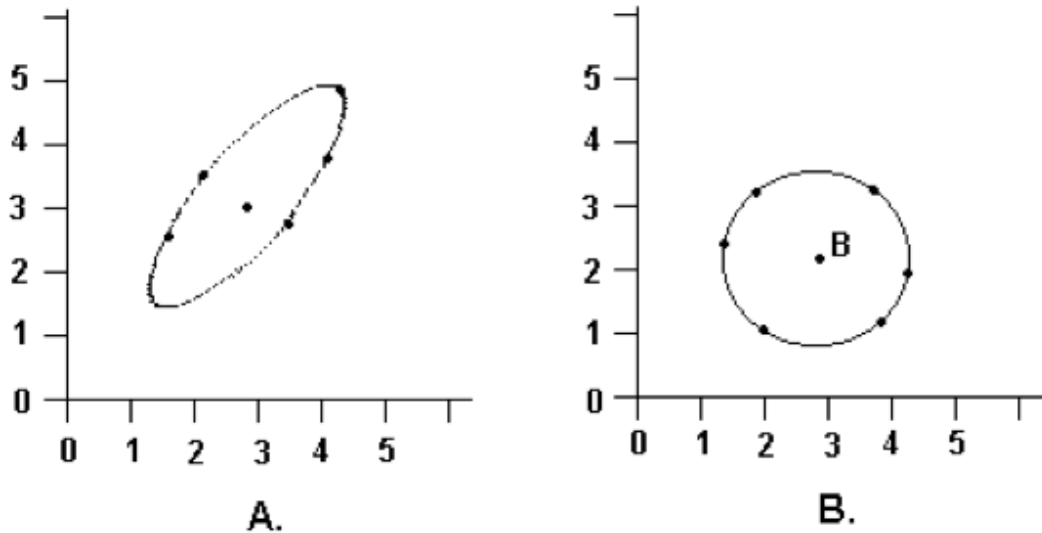


Figura 2.28 Gráficos de dispersión mostrando (A) una fuerte covarianza positiva media: 3.0, 3.0, y (B) covarianza con media 3.0, 2.3

Tomada de Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows

Al observar los gráficos de dispersión puede establecerse que los valores de covarianza indican el grado de dispersión o la forma del grupo espectral y la principal dirección. De la Figura 3.28 (A) se deduce una elipse como forma del grupo y una fuerte correlación positiva (un incremento en el valor de un canal está relacionado con un incremento en el valor del otro canal); y la Figura 3.28 (B) muestra una forma del grupo espectral en círculo, teniendo correlación cero.

Las bandas individuales de una imagen multispectral tienen muy alta correlación frecuentemente, lo cual implica que hay redundancia en los datos y la información se está repitiendo. Para evaluar el grado de correlación entre bandas individuales puede usarse una matriz de correlación. Esta matriz es de covarianza y tiene valores en el ámbito de -1 a 1, representando una fuerte correlación negativa a una fuerte correlación positiva respectivamente, donde los valores cercanos al cero representan una pequeña correlación. Si se usan los coeficientes de correlación de la matriz, las bandas que muestren la menor correlación pueden seleccionarse y por tanto la mayor cantidad de información de la imagen será incluida en una composición multibanda.

Análisis de componentes principales (ACP)

El ACP puede ser aplicado para sintetizar las bandas originales creando nuevas bandas no correlacionadas con las otras (componentes principales de la imagen), que recogen la mayor parte de la información original. Esta síntesis resulta muy conveniente cuando se pretende hacer un análisis multitemporal, o cuando se desea hacer una composición de color a partir de las tres bandas más adecuadas. Los componentes se ordenan en función de la cantidad de varianza, los primeros dos o tres componentes llevarán la mayor parte de la información del conjunto de bandas originales, mientras que el resto de los componentes solamente describe variaciones menores (algunas veces solamente ruido). Por lo tanto, al mantener sólo los primeros componentes se conserva la mayor parte de la información. Estos componentes pueden usarse para generar una composición de color RGB, en la cual el componente 1 se despliega en rojo, el componente 2 y el 3 en verde y azul, respectivamente. Tal imagen, obtenida a partir de esa combinación de color, contiene más información que ninguna otra combinación de tres bandas espectrales originales.

Como se ha establecido en el apartado anterior, la elipse que limita la nube de puntos de los ND de las bandas consideradas, expresa gráficamente la fuerza de la correlación entre las dos bandas. Tanto mayor cuanto más se aproxime a una recta. La Figura 2.29 muestra una correlación positiva con dos ejes de variación: el primero en el sentido A y el segundo perpendicular a A, en el sentido B. Gráficamente puede deducirse que una rotación de ejes x y y en las direcciones A y B, mejorará la disposición original de los datos, y probablemente también la separación entre los grupos de ND homogéneos en la imagen. La rotación puede obtenerse con una función del tipo mostrado en la ecuación (2.29).

$$CP_1 = a_{11}ND_i + a_{12}ND_j \quad \dots (2.29)$$

Donde:

CP1 es el valor correspondiente al primer componente principal, obtenido a partir de los ND originales de las bandas i y j, después de aplicarles los coeficientes a_{11} y a_{12} . De modo similar podría expresarse el segundo componente, ya que existen tantos componentes principales como bandas originales, la Figura 2.29 muestra dos componentes principales.

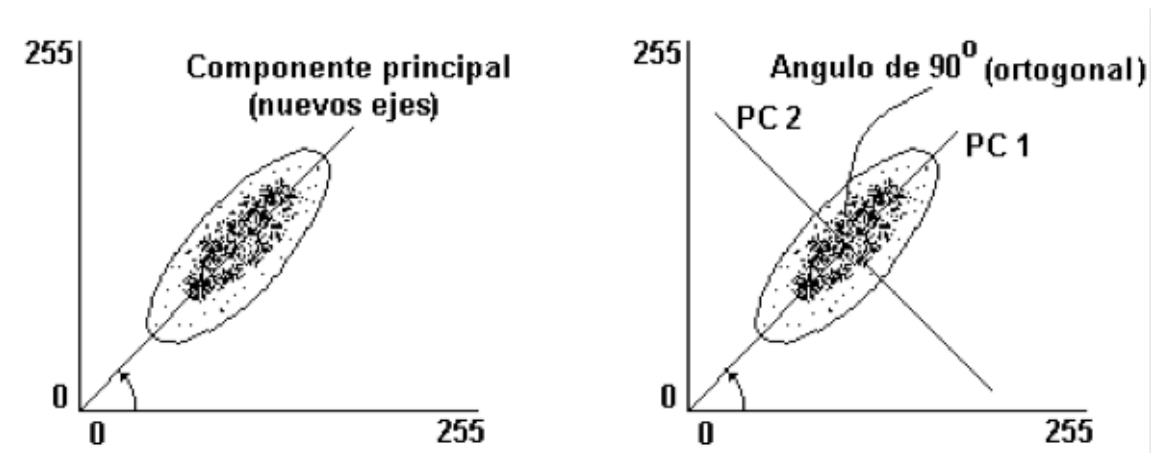


Figura 2.29 Primera (izquierda) y segunda (derecha) componentes

Tomada de Ilwis Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science Enschede, The Netherlands. Ilwis 2.1 for Windows

El proceso de ACP inicia a partir de la matriz de varianza-covarianza, de donde se extraen los eigenvalores para cada uno de los componentes (λ_p). Los eigenvalores expresan la longitud de cada uno de los nuevos componentes, y en última instancia, la proporción de información original que retienen. Ya se ha establecido que el ACP deduce tantos componentes como bandas originales, por tanto el eigenvalor va disminuyendo progresivamente, del primero a los últimos, pues se maximiza la variancia extraída en el análisis. La varianza para cada componente (V_p) se determina como la proporción de su eigenvalor con respecto a la suma de los eigenvalores (Chuvieco 1990), esto es:

$$V_p = \frac{\lambda_p \cdot 100}{\sum_{p=1}^m \lambda_p} \quad \dots (2.30)$$

Además de la longitud de cada eje, resulta también de gran interés conocer su dirección (eigenvector). El eigenvector indica la ponderación que debe aplicarse a cada una de las bandas originales para obtener el nuevo componente principal. Dicho de otra forma, equivale a los coeficientes de regresión en una transformación lineal estándar, siendo las bandas de la imagen las variables independientes, y los componentes principales las dependientes. A partir de los eigenvectores, se calcula la matriz de correlación entre componentes principales y bandas de la imagen, lo que permite conocer el sentido espectral de estos componentes. Para ello el coeficiente de correlación entre el componente p y la banda k ($r_{p,k}$) está definido por:

$$r_{p,k} = \frac{a_{p,k} \sqrt{\lambda_p}}{S_k} \quad \dots (2.31)$$

Donde:

$a_{p,k}$ es el eigenvector del componente p en la banda k;

λ_p es el eigenvector del componente p; y

S_k es la desviación típica de la banda k.

Por último se obtiene la imagen de los componentes principales, midiendo en la matriz de eigenvectores ($a_{p,k}$) la relación lineal de cada componente principal y las bandas originales (Chuvieco 1990). El cálculo de las nuevas bandas o componentes principales se realiza como:

$$CP_{i,j,p} = \sum_{k=1}^n a_{p,k} \cdot ND_{i,j,k} \quad \dots (2.32)$$

Donde:

n es el número de bandas;

$CP_{i,j,p}$ es el valor de la imagen del componente principal p para las coordenadas i, j;

$a_{p,k}$ son los eigenvectores para el componente en cada una de las bandas;

$ND_{i,j,k}$ es el ND de esa misma banda y para las mismas coordenadas.

La imagen de los componentes principales puede representarse en blanco y negro o color, obteniéndose así una nueva visualización de la zona en estudio.

2.3.7 Clasificación digital

El objetivo de la clasificación digital es generar una imagen donde se muestren las clases o categorías que pueden describir diversos tipos de cubierta (variable nominal o categórica) o intervalos de una misma categoría (variable original), a partir de la asignación de los ND de los pixeles originales a la categoría a la que pertenecen. Es la última fase del procesamiento digital de imágenes y es una caracterización particular, válida para una determinada imagen que representa la condición de un territorio concreto en una fecha determinada. En la clasificación digital se distinguen tres fases: de entrenamiento; de asignación; y comprobación y verificación de resultados.

Fase de entrenamiento

La clasificación digital se inicia definiendo con rigor cada una de las categorías que pretenden discriminarse, teniendo en cuenta su propia variabilidad en la zona de estudio, a esto se le conoce como fase de entrenamiento. Como se trata de una clasificación numérica se busca obtener el ámbito de ND que identifica a cada categoría, para todas las bandas que intervienen en la clasificación.

Esta diferenciación de categorías es posible, ya que diversos factores introducen una cierta dispersión en torno al comportamiento espectral medio de cada cubierta, con lo que se establece que las distintas categorías se definen por una serie de ND más o menos próximos entre sí, y no por un solo ND.

El objetivo central de esta fase es generar los resultados más confiables posibles con el mínimo costo; es decir, identificar debidamente las categorías, reduciendo a lo imprescindible los trabajos de campo.

De acuerdo con el modo en que se obtienen las estadísticas de entrenamiento, se dispone de dos métodos de clasificación, el supervisado y el no supervisado. El primero parte de un conocimiento previo del terreno, a partir del cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías, mientras que el segundo procede de una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen (clases espectrales). Cabe señalar que ninguno de los dos métodos da una solución inmediata a toda la problemática que implica la clasificación digital, por ello la elección entre uno y otro método dependerá de los datos y medios disponibles y del objetivo que se persigue en el estudio.

Clasificación supervisada

Parte del conocimiento previo de la zona de interés o de estudio, ya sea por trabajos de campo o por experiencia previa, por ello se pueden delimitar sobre las imágenes áreas piloto que son consideradas suficientemente representativas de las categorías de interés, a estas áreas se les conoce comúnmente como campos de entrenamiento. Así que el especialista cuenta con elementos para establecer el número de clases o categorías a diferenciar y las características estadísticas de cada clase. Es el método más utilizado en el análisis cuantitativo de datos de percepción remota.

Los diversos algoritmos que se utilizan están basados en que cada clase espectral puede ser descrita por un modelo de distribución probabilística en el espacio multiespectral. De acuerdo con Richards para llevar a cabo una clasificación empleando el método supervisado, independientemente del algoritmo que se escoja para procesar la información, se deberá:

1. Decidir los tipos de cubierta en los que se desea segmentar la imagen;
2. Elegir píxeles representativos de cada una de las clases a diferenciar;
3. Utilizar dichos píxeles para estimar los parámetros del algoritmo de clasificación que se va a utilizar.
Al conjunto de parámetros de una clase dada se le llama *signatura* o *respuesta espectral* de la clase;
4. Clasificar todos los píxeles de la imagen dentro de uno de los tipos definidos (clases de información);
5. Elaborar tablas o mapas con los resultados de la clasificación.

Clasificación no supervisada

Es un método por el cual los píxeles de una imagen son asignados a clases espectrales sin que el especialista tenga conocimiento de la naturaleza de dichas categorías o áreas de entrenamiento. Los algoritmos que se utilizan son clusters o agrupamientos, y, que equivalen a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo por lo que se establece que definen una clase temática de interés en particular.

El procedimiento para definir los agrupamientos espectrales se desarrolla de la siguiente forma:

1. Selección de las bandas espectrales que intervendrán en la clasificación o análisis, ya sean éstas originales o fruto de alguna transformación;
2. Selección de un criterio para medir la similitud o distancia entre los píxeles que componen la imagen, cada uno de ellos definido por tantos ND como bandas intervienen en el análisis;
3. Selección de un criterio para agrupar los casos similares.

El criterio más utilizado para medir la distancia entre píxeles es el de distancia euclidiana:

$$D_{a,b} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{a,k} - ND_{b,k})^2} \quad \dots (2.33)$$

donde:

$ND_{a,b}$: indica la distancia entre dos píxeles cualquiera a y b;

$ND_{a,k}$ y $ND_{b,k}$: indican los niveles digitales de esos píxeles en la banda k;

m: indica el número de bandas.

En cuanto al algoritmo de agrupamiento, uno de los más empleados es el denominado ISODATA (Duda y Hart 1973). El proceso de dicho algoritmo se muestra en la Figura 2.30 y se describe a continuación.

- a) Se señala una serie de centros de clase, de acuerdo al número y forma indicados por el operador;
- b) Se asignan todos los píxeles de la imagen al centro de clase más próximo;
- c) Se calculan nuevamente los centros de clase, teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que se le hayan incorporado en la fase anterior;
- d) Se vuelven a asignar todos los píxeles al centro más cercano, el cual no tiene por qué coincidir con la anterior asignación realizada;
- e) Se vuelven a calcular los centros de clase, teniendo en cuenta las nuevas incorporaciones, y se retorna a la fase d).

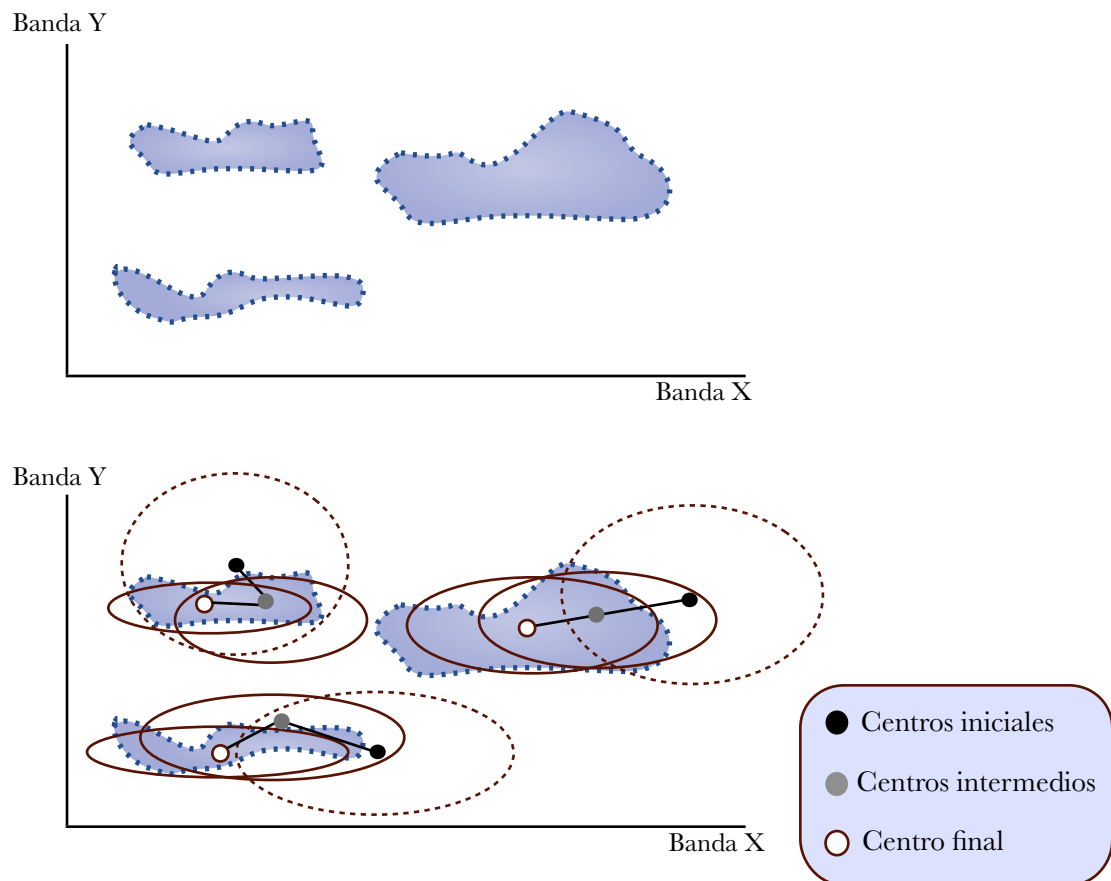


Figura 2.30 Fundamentos del análisis no supervisado

Basado en Chuvieco, 1990

El proceso se repite hasta que el centro no se desplace significativamente, indicándose con ello, un buen ajuste.

El clustering tiene múltiples aplicaciones, por ejemplo, en la segmentación de imágenes para dividir la imagen en regiones homogéneas (según alguna característica de interés como la intensidad, color o textura) o para la clasificación de imágenes satelitales en zonas (urbana, descampados, bosques, ríos).

Clasificación mixta

El método supervisado y el no supervisado cuentan con diferentes ventajas y desventajas, por ello se han buscado diversas alternativas en donde se combinan ambos métodos. Pueden agruparse como:

1. Aquellos en los que se emplea el método supervisado para “guiar” el no supervisado. En este caso, el conocimiento del especialista se utiliza para orientar la búsqueda de esos grupos espectrales homogéneos.
2. Aplicando separadamente ambos métodos para después sintetizar las medidas extraídas por ambos.

Análisis de las estadísticas de entrenamiento

Antes de continuar con el proceso de clasificación digital, es importante evaluar la viabilidad de que las categorías seleccionadas puedan emplearse sin grave riesgo de error. Si se observa que dos o más son muy similares, habrá una gran probabilidad de confusión entre ellas.

Existen tanto métodos gráficos como numéricos para evaluar las estadísticas de entrenamiento. Entre los más comúnmente utilizados está el diagrama de signatura, Figura 2.31. En la Figura las abscisas representan las bandas que intervienen en el análisis y en las ordenadas los ND medios de cada categoría. Es importante resaltar que este diagrama no se trata de las curvas espectrales tratadas en el tema 3.9 *Curvas espectrales*.

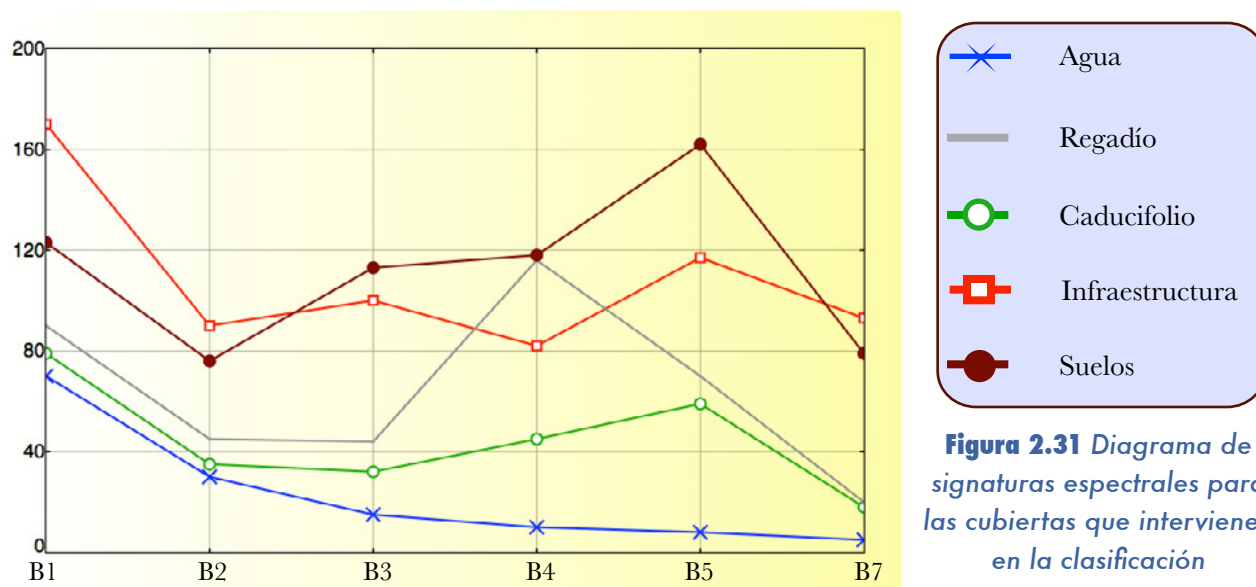


Figura 2.31 Diagrama de signaturas espectrales para las cubiertas que intervienen en la clasificación
Basado en Chuvieco, 1990

En la Figura 2.31 pueden identificarse las bandas en las que se manifiesta un comportamiento peculiar respecto a las clases vecinas, además, las líneas paralelas y próximas indican una probable confusión entre las categorías, mientras las intersecciones entre líneas manifiestan las bandas donde es más probable separar a las categorías que representan.

Fase de asignación

En esta fase se lleva a cabo la asignación de cada uno de los píxeles de la imagen a una de las categorías previamente establecidas. Se obtendrá una imagen en la que cada píxel resultante es asignado a una categoría si los valores espectrales del píxel son suficientemente similares a la categoría; si no, se asignará a una categoría con etiqueta “no conocida”. La decisión de si los píxeles son suficientemente similares a las categorías dependerá del método que se elija para llevar a cabo la asignación

A continuación se describen los criterios más comunes, los cuales definen un área de dominio en torno al centro de cada categoría, mediante un conjunto de funciones discriminantes. Entonces, tales funciones pueden considerarse como las fronteras que definen la categoría, es decir, el píxel será asignado a una categoría si sus ND se encuentran dentro del área de dominio asignado a ella.

Clasificador de mínima distancia

Es el criterio más sencillo puesto que asigna cada píxel a la categoría más cercana, es decir, en aquella que minimice la distancia entre el píxel y el centroide de la categoría. Cabe aclarar que se trata de una distancia espectral, que resulta de comparar los ND de cada píxel con los del centro de las distintas categorías, para todas las bandas que participan en el análisis, Figura 2.32 A.

$$d_{x,A} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{x,k} - \overline{ND}_{A,k})^2} \quad \dots (2.34)$$

donde,

$d_{x,A}$: indica la medida de la distancia entre el píxel x y la categoría A;

$ND_{x,k}$: indica el ND del píxel x para la banda k;

$\overline{ND}_{A,k}$: indica el ND medio de la categoría A para la banda k.

Clasificador de paralelepípedos

Un modo relativamente sencillo de asignación es utilizar el método de los paralelepípedos, en el cual se definen una serie de rectángulos, que establecen las fronteras de cada clase. La definición de cada uno de los paralelepípedos debe hacerse teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos de reflectividad para cada una de las bandas. Con este método pueden aparecer píxeles sin asignar o píxeles asignados a varias clases, Figura 2.32 B.

Otro problema es que un paralelepípedo no es una forma adecuada de modelar la dispersión de las áreas de entrenamiento, especialmente teniendo en cuenta la elevada correlación entre bandas que supone que los píxeles de las áreas de entrenamiento se dispongan como líneas oblicuas en el espacio de variables.

Esquemáticamente, el pixel x será asignado a la clase A si:

$$\overline{ND}_{A,k} - R_{A,k} < ND_{x,k} < \overline{ND}_{A,k} + R_{A,k} \quad \dots (2.35)$$

Donde:

k : indica la variación desde 1 hasta el número de bandas,

$R_{A,k}$: indica la desviación estándar para cada categoría y en cada banda.

Clasificador Gaussiano de máxima verosimilitud

Puesto que se tiene la media y la desviación típica de cada una de las categorías, se puede utilizar algún modelo de distribución de probabilidad. El clasificador de máxima verosimilitud (o máxima probabilidad) asume que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un pixel cualquiera pertenezca a cada una de las clases. El pixel se asigna de este modo a la clase a la que es más probable que pertenezca.

Este método puede usarse de forma automática o puede establecerse algún criterio que permita asignar píxeles a una clase, sólo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral. Permite por otro lado, definir algún tipo de criterio para medir la calidad de la asignación, por ejemplo la diferencia entre la máxima probabilidad y la siguiente.

En la Figura 2.32 C aparecen una serie de elipses rodeando a cada uno de los centroides, se trata de líneas de isoprobabilidad, por tanto el pixel se clasificará como perteneciente a la clase en la que sus valores resulten más probables.

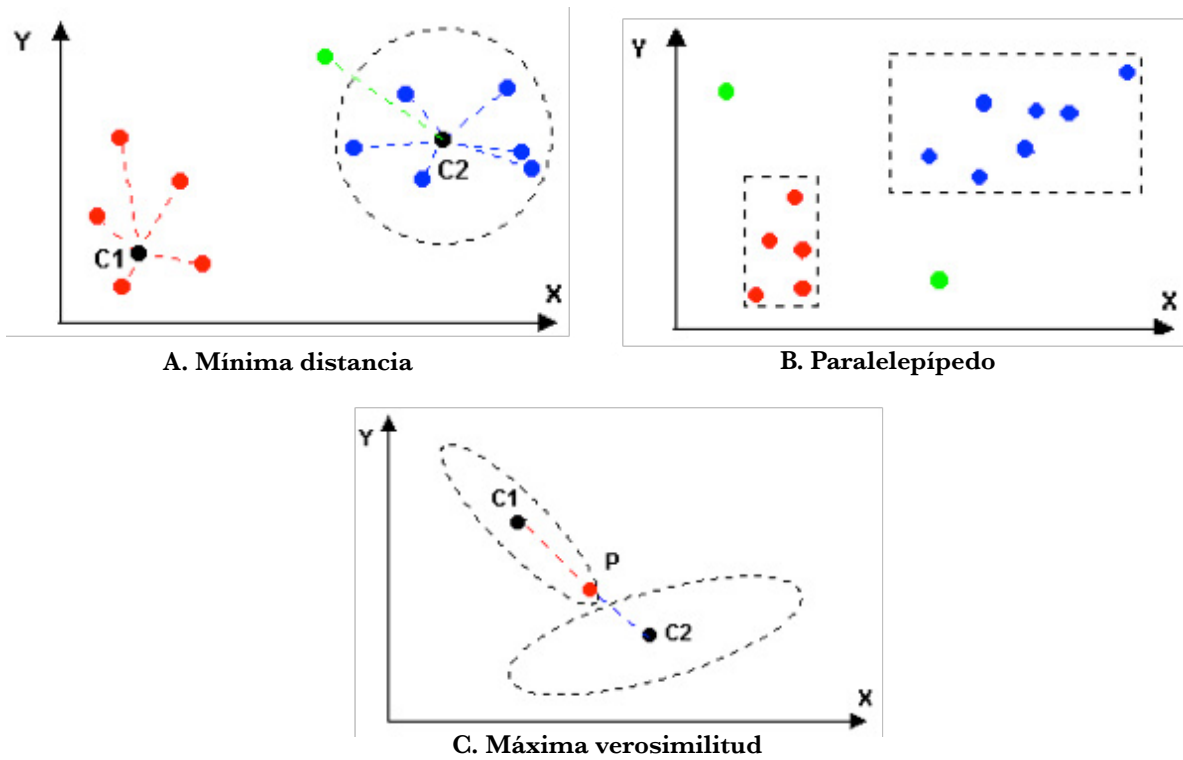


Figura 2.32 Algoritmos para llevar a cabo la asignación de los pixeles a una categoría

Fuente: <http://www.innovanet.com.ar>

Presentación y verificación de resultados

Al llevar a cabo la clasificación digital se genera una nueva imagen, la cual es similar a las originales, en cuanto a su estructura y tamaño, pero con la diferencia de que el ND de cada pixel no corresponde a un valor de reflectividad, sino a la categoría a la que se asignó en la fase anterior. Tal imagen puede generar dos tipos de productos: cartográficos, en los cuales se convierte la imagen clasificada en un mapa; y, estadísticos, los cuales tratan de realizar un inventario a partir de los ND que componen esa imagen.

La precisión de un mapa temático depende, en gran medida, de la metodología adoptada y de la calidad de los datos sobre los que se aplica. Por ello, es importante identificar las posibles fuentes de error de una clasificación. En razón del elemento principal con que se relacionan se pueden agrupar de la siguiente manera: i) relacionados con el terreno que se analiza, ii) con el nivel de precisión requerido al llevar a cabo la categorización, iii) con la adquisición de la imagen, y, iv) con factores medioambientales externos.

Ahora bien, la exactitud alcanzada por la imagen generada puede estimarse a través de diversos criterios:

- **Comparación del inventario de la clasificación con el obtenido por otras fuentes convencionales:** Se calculan las diferencias entre el inventario ofrecido por la clasificación y por otras fuentes que se consideren fiables. Esta medida únicamente indica el porcentaje de error, pero no su localización en el mapa.
- **Confiabilidad en la clasificación de las áreas de entrenamiento:** Permite saber la precisión con la que se identifica a un determinado tipo de cubierta. De tal forma que si los píxeles se asignan a otras clases, es conveniente definir nuevos campos de entrenamiento.
- **Selección de áreas de verificación para las que realmente se conoce la cubierta terrestre:** En este método se lleva a cabo un muestreo en el área de estudio, teniendo como finalidad obtener medidas de campo con las que se verifiquen los resultados de la clasificación. Al llevar a cabo el muestreo, se presenta un incremento en el costo del proyecto, no para aumentar su fiabilidad sino para cuantificarla.

Diseño y desarrollo del muestreo

La correcta planificación del muestreo resulta de gran importancia ya que es un elemento primordial en el proceso de verificación. La principal cualidad de un muestreo realizado óptimamente, es seleccionar adecuadamente una parte de la imagen clasificada, de tal forma que, siendo tan pequeña como sea posible, sea lo suficientemente representativa del conjunto, esto último es con el objeto de reducir los costos del proceso de verificación. Los factores a considerar para lograr realizar un buen muestreo son, primordialmente: el método de selección de la muestra (Figura 2.32), tamaño y distribución, y el nivel de confianza otorgado a la estimación.

Métodos de selección de la muestra

Aleatorio simple. Los elementos que serán verificados se eligen de forma que todos cuenten con igual probabilidad de ser seleccionados y que la elección de uno no influya en el subsecuente. Este muestreo presenta problemas en su aplicación espacial, por cuanto puede suponer elevados costos en el desplazamiento en las tomas de las muestras. Así también existe cierta probabilidad de no recoger adecuadamente la variación espacial presente en la imagen clasificada.

Aleatorio estratificado. La muestra se selecciona dividiendo la población en regiones o estratos, de acuerdo con una variable auxiliar (altitud, por ejemplo). Su diseño es más complejo que el anterior, pero aporta información sobre subconjuntos de la población y si la variable auxiliar se elige correctamente se reduce el error de muestreo.

Sistemático. El muestreo se realiza o distribuye a intervalos regulares, a partir de un punto de origen señalado aleatoriamente. Con ello se garantiza un muestreo completo de la zona, pero pueden generarse estimaciones erróneas si existe algún tipo de patrón periódico en el área observada, aunado a eso, no existe aleatoriedad en la selección de las observaciones.

Sistemático no alineado. Se basa y ofrece lo mismo que el método anterior, pero introduce una variación aleatoria en una de las dos coordenadas, con lo que se reduce el sesgo debido a la periodicidad. Por ello resulta ser el método más ampliamente usado en la verificación de clasificaciones.

Por conglomerados. Como unidad de muestra se selecciona un grupo de observaciones, denominado conglomerado o clusters, en lugar de muestreos aislados, es decir, en cada punto a verificar se toman varias muestras, en puntos cercanos al seleccionado aleatoriamente, y de acuerdo a un esquema prefijado. Con este método se reducen los costos pero resulta menos preciso que los anteriores.

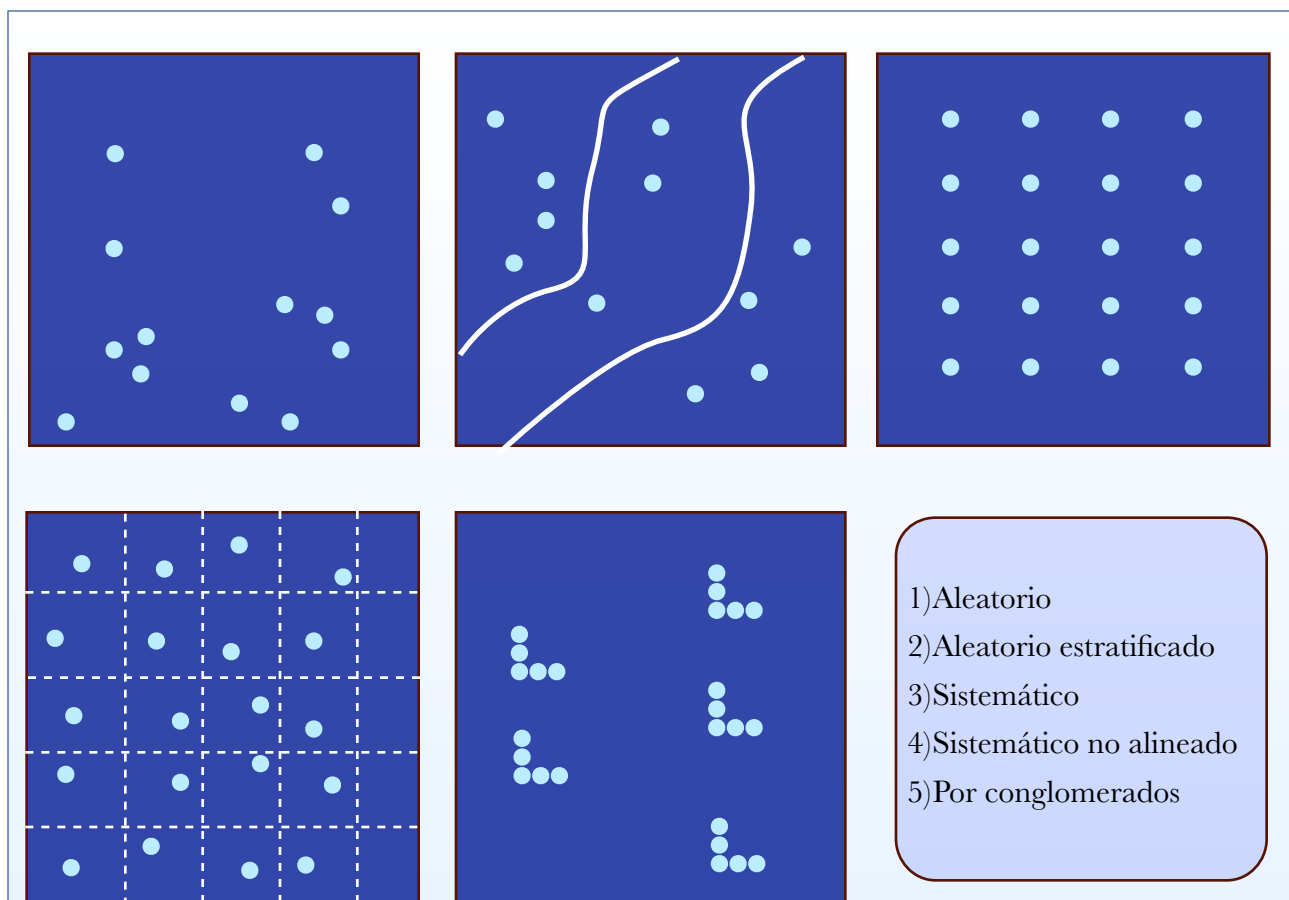


Figura 2.33 Tipos de muestreo aplicados a la verificación

Tomado de Chuvieco, 1990

Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra depende del nivel de confianza que quiera otorgarse a la estimación, así como la propia variabilidad de la imagen considerada. Puede calcularse con la fórmula:

$$n = \frac{z^2 pq}{E^2} \quad \dots (2.36)$$

donde,

z: es la abcisa de la curva normal para un nivel determinado de probabilidad;

p: indica el porcentaje de aciertos estimado;

q: indica el porcentaje de errores (q = 1- p);

E: indica el nivel permitido de error.

Matriz de confusión

A partir de la realización del muestreo puede construirse una tabla o matriz de confusión, en donde se resuman los acuerdos y desacuerdos entre los datos obtenidos de la clasificación y del muestreo. Esta matriz puede analizarse estadísticamente, con el objeto de obtener una serie de medidas sobre la fiabilidad del trabajo global y para cada una de las categorías.

Se trata de una matriz bidimensional, en donde las filas se ocupan por las clases de referencia, mientras que las columnas, por las categorías deducidas de la clasificación. Lógicamente ambas tendrán el mismo número y significado; se trata, en suma, de una matriz cuadrada, n x n, donde n indica el número de categorías, Figura 2.34.

		Clasificación Verificada (Terreno)											Total	ExU	ESA
		Ar	Au	E	Bn	Bp	Ca	M	P	Sd	A				
Clasificación (Imagen)	Ar	3											3	100,0	0,0
	Au		3										3	100,0	0,0
	E			2									2	100,0	0,0
	Bn				4	1							5	80,0	20,0
	Bp					6							6	100,0	0,0
	Ca						2						2	100,0	0,0
	M					1		16	1				18	88,89	11,1
	P								7				7	100,0	0,0
	Sd									2			2	100,0	0,0
	A								1			8	9	88,9	11,1
	Total	3	3	2	4	8	2	16	8	2	8	57			
ExP	100,0	100,0	100,0	100,0	75,0	100,0	100,0	77,8	100,0	100,0					
ESE	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	0,0	0,0	22,2	0,0	0,0					

Figura 2.34 Ejemplo de una matriz de confusión entre clases

Fuente: <http://www2.scielo.org.ve>

La diagonal de la matriz indica el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (muestreo y clasificación), mientras los marginales suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la confiabilidad global de la clasificación. Los residuales en las filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en la clasificación, mientras que los residuales en columnas implican cubiertas que no se ajustan a la realidad; es decir, representan los errores de omisión y de comisión respectivamente.

Análisis estadístico de la matriz de confusión

Medidas globales de fiabilidad

A partir de la matriz de confusión pueden desarrollarse toda una serie de medidas estadísticas que concluyan el proceso de validación. La más simple consiste en calcular la fiabilidad global de la clasificación, relacionando los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados:

$$F_m = \frac{\sum X_i}{\sum \sum X_{ij}} \cdot 100 \quad \dots (2.37)$$

Además, pueden calcularse los umbrales inferior y superior en los que se encontraría la exactitud real alcanzada por la clasificación. Este intervalo se calcula para un determinado nivel de significancia (σ), a partir del error de muestreo (ER) y del nivel de probabilidad ($1 - \sigma$):

$$F = F_m \pm ZE_S \quad \dots (2.38)$$

donde,

Z: es la abscisa del área bajo la curva normal para ese nivel de probabilidad ($1 - \sigma$);

E_S : es el error estándar del muestreo y es función del porcentaje de aciertos (p), de fallos (q) y del tamaño de la muestra:

$$E_S = \frac{\sqrt{pq}}{n} \quad \dots (2.39)$$

Los errores de omisión y comisión expresan dos enfoques del mismo problema. Los primeros se refieren a una definición imperfecta de la categoría. Los segundos, a una delimitación excesivamente amplia. Desde otro punto de vista, algunos autores hablan de exactitud del usuario y del productor. La primera es inversamente proporcional a los errores de comisión, mientras la segunda a los de omisión.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA

La Percepción Remota como herramienta en la evaluación y monitoreo de la calidad del agua

Tradicionalmente la evaluación de calidad en los cuerpos de agua superficiales consiste en determinar indicadores o parámetros de calidad con base en sitios particulares de muestreo. Sin embargo, esto no siempre es suficiente en cuerpos de agua con características heterogéneas o en situaciones en las que se requiera gran precisión espacial de las características en el cuerpo de agua. Para solventar estas carencias la percepción remota ha demostrado ser una alternativa adecuada.

La observación a distancia de la Tierra, utilizando sensores satelitales, es una manera sencilla de evaluar y monitorear la calidad del agua una vez establecido un procedimiento adecuado para hacerlo, el cual se describe a lo largo de este capítulo.



Existen varias investigaciones previas que han estudiado la relación entre las propiedades del agua (desde el punto de vista de su calidad) y datos obtenidos mediante sensores colocados en plataformas (percepción remota) para cuerpos de agua variados tanto en tipo como en extensión geográfica, en lugares como Brasil (Braga 1993), Finlandia (Zhang 2005), España (Álvarez, et al. 2006), Turquía (Nas 2010), Estados Unidos (Wang and Han 2006, Kloiber 2002, Olmanson 2002), Reino Unido (S.

Baban 1997), entre otros. La recopilación de información debe de ser constante para conocer, interpretar e inferir, de forma más integral, el procedimiento más adecuado para obtener los modelos.

VALLE DE BRAVO

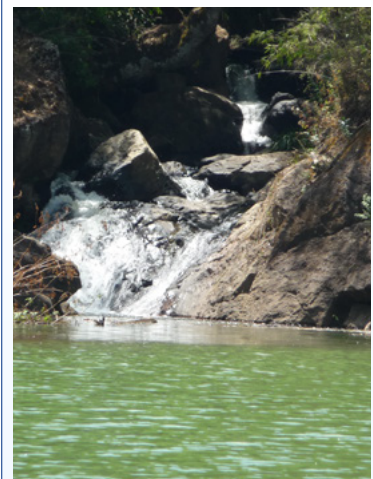


Figura 3.1 Para realizar estudios de calidad del agua, utilizando información obtenida mediante sensores remotos, es necesario que el cuerpo de agua en estudio sea profundo, es decir, que presente un tirante hidráulico de 2.50 m como mínimo. El embalse de Valle de Bravo cumple con esta característica

La visión sinóptica de la PR proporciona una riqueza de datos extraordinaria si se les compara con los que pueden obtenerse mediante el muestreo y colección de datos de superficie. Aunado a esto, el monitoreo de grandes áreas resulta mucho más económico utilizando la PR.

Las ventajas más importantes que tienen estas técnicas sobre el muestreo tradicional son: una continua cobertura geográfica de los satélites que proporcionan información sobre la calidad de todo el cuerpo de agua continuamente; la percepción remota nos permite obtener información de lugares inaccesibles; por último, las imágenes históricas proporcionan una estimación de la calidad del agua a través del tiempo, ofreciendo una excelente forma de evaluar la evolución de la calidad en el cuerpo de agua.

Sin embargo, es importante mencionar que es necesario contar con un grupo de muestras in situ, a fin de calibrar la relación entre propiedades del agua y las imágenes y datos obtenidos vía satélite continuamente.

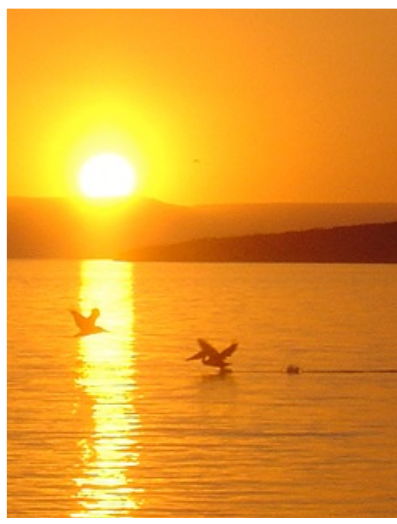


Figura 3.3 El comportamiento óptico del agua está estrechamente relacionado con sus constituyentes

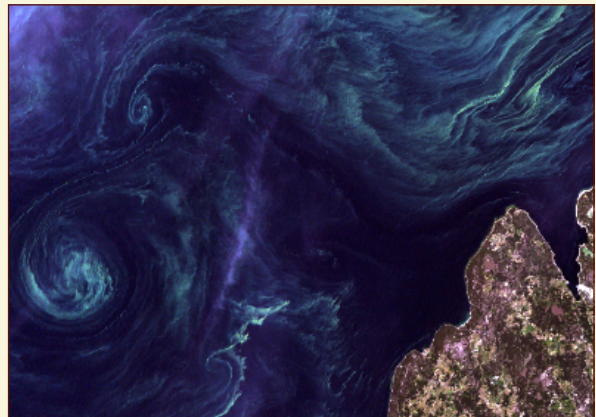
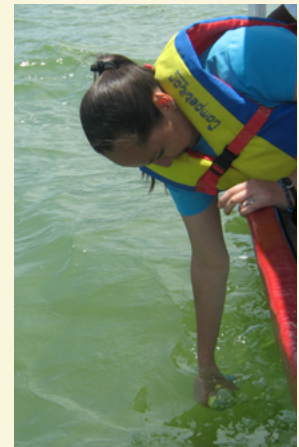


Figura 3.2 Intensidad y color de luz

Es posible establecer relaciones entre parámetros de calidad del agua y la reflectancia, debido a que la intensidad y color de luz es modificada por el volumen del agua y sus contaminantes. De esta forma pueden generarse relaciones empíricas entre mediciones de reflectancia y ciertos parámetros de calidad del agua de una muestra



Las propiedades ópticas de las aguas naturales dependen de la concentración de sólidos suspendidos, fitoplancton y materia orgánica disuelta, parámetros además muy relacionados con la calidad del agua (Figura 3.3).

La región del espectro electromagnético que abarca la luz visible y la IR se utiliza para detectar indicadores de calidad del agua. Las mediciones en esta porción del espectro utilizan la energía electromagnética reflejada. También se utiliza el IR térmico, usando mediciones directas de la energía emitida.

3.1 Plataforma seleccionada

Se pueden utilizar varios tipos de imágenes para hacer análisis de calidad del agua y distribución de sedimentos. La selección de la imagen (y por lo tanto, de la plataforma y del sensor) dependerá de ponderar las distintas características que ofrece cada una de ellas y evaluar cuál es la más adecuada para la situación en estudio. Para estudios de cuerpos de agua continentales las imágenes Landsat TM y ETM+ son muy adecuadas, debido en gran parte a su bajo costo o gratuito, cobertura temporal y resolución espacial. La resolución espectral también es adecuada, ya que cuenta con un número suficiente de bandas en el visible (3 bandas) que es la región del espectro electromagnético en donde se encuentra la mayor información para este tipo de estudio. Las imágenes IKONOS son también bastante útiles para evaluaciones de pequeñas extensiones (Olmanson 2002).

Para este estudio se seleccionó la plataforma Landsat 7 (Figura 3.4 y 3.5), debido principalmente a su resolución espectral y la accesibilidad para adquirir las imágenes. Además, existe una cantidad considerable de publicaciones que reportan estudios de calidad del agua en diversos países utilizando esta plataforma. Otra particularidad de suma importancia que orientó la decisión de usar el sensor ETM+ en este estudio es que la banda 1 del mismo que corresponde al ámbito del azul en el espectro electromagnético, que es muy útil en los estudios de cuerpos de agua.

El Landsat 7 es el satélite operacional más reciente del programa Landsat, que como se había mencionado en el Capítulo 2, su operación depende de la NASA. Por otro lado, la producción y comercialización de imágenes depende de la USGS (United States Geological Survey).

Cada imagen adquirida está compuesta por 8 bandas espectrales, 7 en distintos ámbitos del espectro electromagnético y una pancromática.

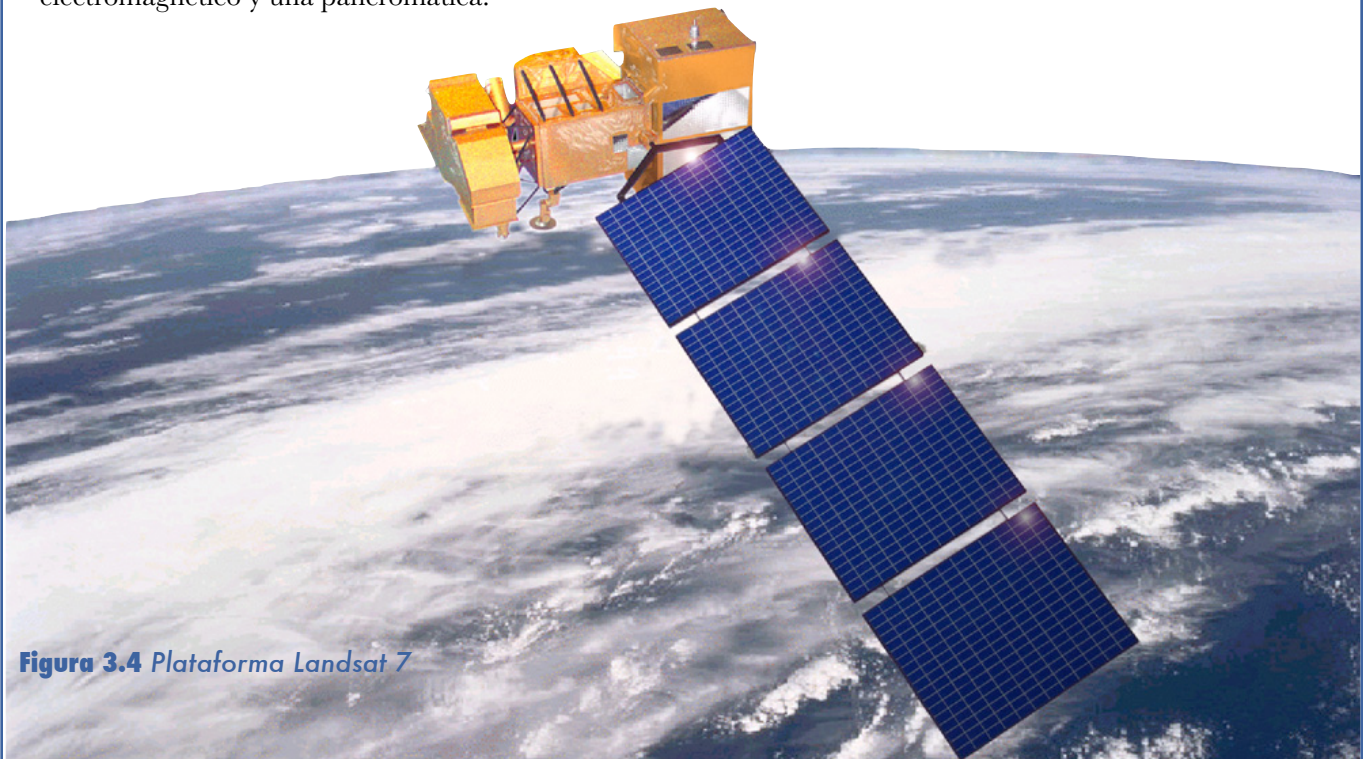


Figura 3.4 Plataforma Landsat 7



Figura 3.5 LANDSAT 7
La plataforma LANDSAT 7 posee un sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), con características adecuadas para el estudio de cuerpos de agua

El Landsat 7 es capaz de adquirir imágenes en un área que se extiende desde los 81° de latitud norte hasta los 81° de latitud sur en todas las longitudes del globo terrestre.

Completa cada órbita en aproximadamente 99 minutos, permitiendo al satélite dar 14 vueltas a la Tierra diariamente y cubrir la totalidad del planeta en 16 días. La órbita es descendente, o sea de norte a sur; el satélite cruza la línea del Ecuador entre las 10:00 y 10:15 (hora local) en cada pasaje. Tiene una órbita heliosíncrona, es decir, siempre pasa a la misma hora por un determinado lugar.

La resolución temporal del Landsat 7 es igual que la del Landsat 5 (16 días), y cada imagen cubre igual área (185 x 185 km por escena). La conservación de estos parámetros técnicos facilita una perfecta integración y compatibilidad entre el procesamiento de las imágenes del Landsat 7 con datos históricos del Landsat 5, existentes desde 1984. Esto es bastante útil cuando es necesario utilizar los dos tipos de datos de un mismo lugar en forma simultánea, por ejemplo, para un estudio multitemporal. Un resumen de las características principales de la plataforma y el sensor se muestra en el Cuadro 3.1.

El sensor ETM+ cuenta con 100 detectores compuestos por foto-diodos de silicio para las bandas 1 a 4 e indio-antimonio para las bandas 5 y 7. Cada banda requiere de 16 detectores. La banda térmica cuenta con detectores de mercurio-cadmio-telurio.

Cuadro 3.1 Características principales de la plataforma LANDSAT 7

Sensor	ETM + (Enhanced Thematic Mapper plus)	
Órbita	705 +/- 5 km (en el ecuador) sincronización solar	
Inclinación de órbita	98.2° +/- 0.15	
Tiempo de órbita alrededor de la Tierra	98.9 minutos	
Altitud	705 kilómetros	
Tamaño de escena	185 x 185 km	
Tiempo de cruce por el Ecuador	Descendente; 10:00am +/- 15 min	
Tiempo de regreso	16 días (233 órbitas)	
Resolución Radiométrica	8 bits	
Resolución espacial	30 m; banda 6: 60m (térmico); pan 15m	
Resolución espectral	1 (Azul)	0.450-0.515 μm
	2 (Verde)	0.525-0.605 μm
	3 (Rojo)	0.630-0.690 μm
	4 (IR próximo)	0.775-0.900 μm
	5 (IR lejano)	1.550-1.750 μm
	6 (Térmico lejano)	10.40-12.5 μm
	7 (Térmico próximo)	2.090-2.350 μm
	8 (pancromático)	0.520-0.900 μm

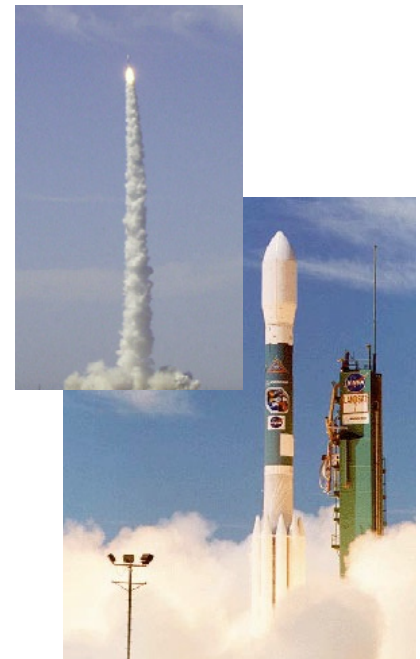


Figura 3.6 Lanzamiento de la plataforma LANDSAT 7

3.2 Bandedo en imágenes Landsat 7

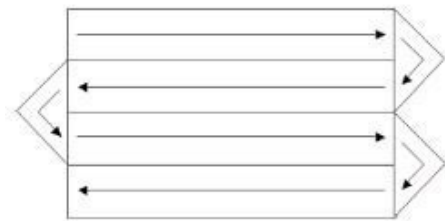
Es importante mencionar que las imágenes Landsat 7 presentan un bandedo a partir del 31 de mayo de 2003, debido a que se desactivó un dispositivo llamado SLC (Scan Line Corrector) del sensor ETM+ (véase Figura 3.7). Este dispositivo tenía la función de compensar el escaneado durante el movimiento orbital de la plataforma Landsat. Se realizaron diversos esfuerzos por reactivar este corrector, pero sin ningún éxito. Al resultar una falla mecánica irreversible, las imágenes a partir de esa fecha presentan zonas sin información, por lo que se pierde aproximadamente el 23% de los datos.

El efecto de la falla (bandedo) se incrementa en las zonas más cercanas al borde de la imagen, disminuyendo gradualmente hacia el centro hasta desaparecer, formando una franja vertical sin alteraciones de unos 22 kilómetros de ancho aproximadamente (Figura 3.8).

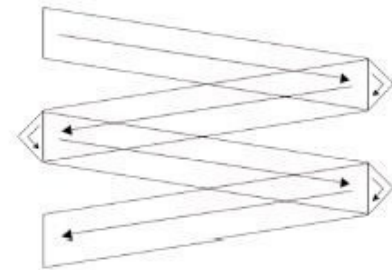
La localización vertical del bandedo se presenta de forma aleatoria, aunque siempre con el mismo ancho y separación entre franjas.

Existen algunos métodos para rellenar los espacios perdidos por el bandedo, pero todos presentan la desventaja de utilizar imágenes adquiridas en fechas previas para completar los espacios perdidos. Las escenas recuperadas con estas técnicas pueden resultar útiles para cierto tipo de estudios, pero para la evaluación y monitoreo de la calidad del agua es necesario contar con información de la fecha específica de estudio, así que es imposible completar la imagen con datos de otras fechas de adquisición.

Sin embargo, para estos estudios esta situación no afecta de forma importante, ya que es posible seleccionar entre los sitios de muestreo únicamente los que se encuentren en áreas en donde no afecte el bandedo una vez adquirida la imagen, por lo que el 100% de los datos se procesan. Es por lo anterior que es recomendable establecer sitios de muestreo que no describan líneas paralelas al bandedo para evitar múltiples pérdidas.



SLC encendido



SLC apagado

Figura 3.7 Esquematización de la falla en el corrector de Landsat 7

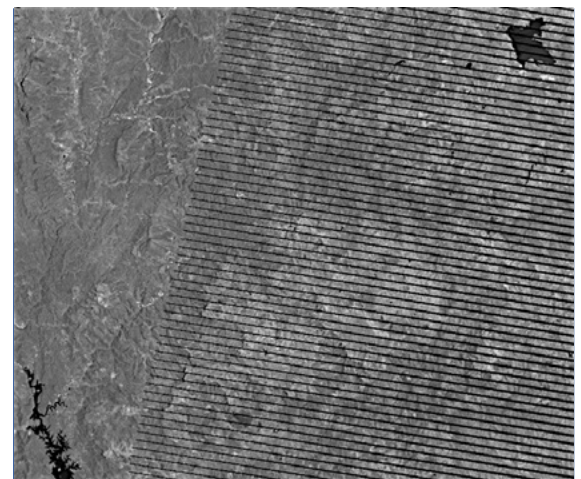


Figura 3.8 Región de una escena Landsat 7. Obsérvese el incremento en el bandedo. La parte izquierda de la imagen corresponde a la región central de la escena completa, por lo que se aprecia libre de bandas

3.3 Planeación de las fechas del muestreo y adquisición de las imágenes

Con el objetivo de que el paso del satélite no difiera en más de 24 horas respecto al muestreo realizado en campo, es importante prever el paso del satélite por la zona, para esto resulta muy útil la herramienta desarrollada por la USGS que se encuentra en el sitio electrónico <http://landsat.usgs.gov/>, un calendario de adquisición (Figura 3.9) en el que una vez identificada una fecha cualquiera de paso, nos indica todas las fechas pasadas y futuras de paso por la misma zona, que para el caso de esta plataforma es cada 16 días.

La calidad de las imágenes debe de ser alta, lo más libre de nubosidad posible y de preferencia en el verano (Olmanson 2002).

Las imágenes LANDSAT se pueden adquirir directa y gratuitamente del servidor de la USGS (United States Geological Survey), a través de la aplicación Java USGS Global Visualization Viewer (Visualizador Global de la USGS), alojada en la dirección electrónica <http://glovis.usgs.gov/>, que permite seleccionar la región de interés y visualizar las imágenes disponibles para descarga. Las imágenes de la plataforma Landsat 7 se actualizan continuamente, mientras que el banco de datos de las imágenes de la plataforma Landsat 5 se actualiza de forma más esporádica.

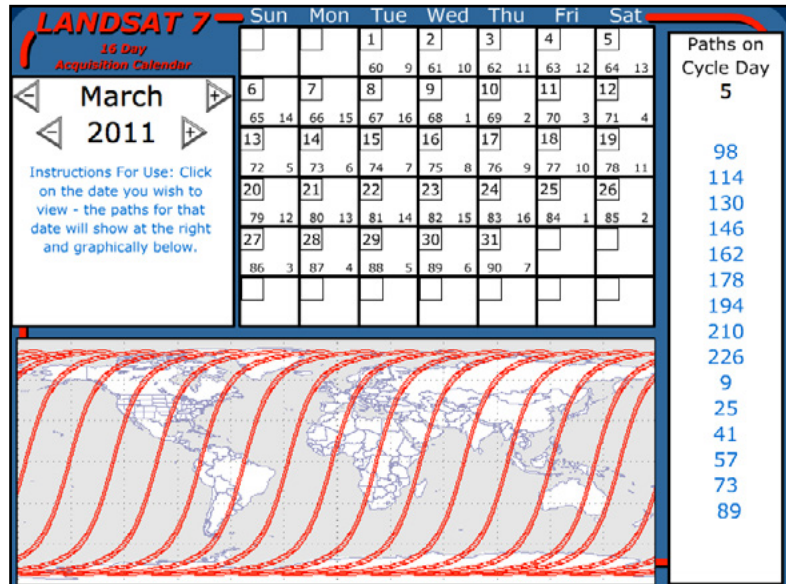


Figura 3.9 Calendario de adquisición de Landsat 7. Gracias al calendario de adquisición que se aloja en la dirección electrónica <http://landsat.usgs.gov/> es posible estimar rápidamente las fechas de los pasos del satélite por una región de interés. Conocer fechas de paso futuras es útil para, por ejemplo, planear campañas de muestreo, y fechas pasadas nos permiten realizar estudios multitemporales de una región o fenómeno.

En un formato similar existe un calendario para estimar las fechas de paso de Landsat 5. A pesar de tener la misma resolución temporal (16 días), las dos plataformas recorren una misma zona con un desfase temporal.



3.4 Determinación de sitios de muestreo

La determinación de sitios para efectuar un muestreo representativo en los embalses generalmente se realiza basándose en suposiciones respecto a las descargas que se encuentren en el embalse. Basándose en criterios tradicionales, la única información que se tiene es la observable en campo, por lo que es probable omitir sitios importantes de muestreo o realizar muestreos en sitios donde no es necesario hacerlo. Incluso en estudios anteriores de calidad del agua mediante PR la determinación de estos sitios es hasta cierto punto caprichosa (Wang and Han 2006).

Sin embargo, es posible utilizar técnicas de PR para determinar sitios de muestreo mucho más adecuados que los que nuestros sentidos son capaces de determinar.

La firma espectral del agua pura es una característica que se ve alterada si existe presencia de contaminantes (Vázquez 2000). Las alteraciones en esta firma pueden indicarnos distintas zonas del cuerpo de agua con diferentes calidades respecto a ciertos parámetros, como pueden ser profundidad del disco de Secchi, sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos (Wang and Han 2006).

Los píxeles pueden ser agrupados en familias de forma automatizada por un software cuando presentan correlación entre ellos. De esta forma, podrían determinarse sitios de muestreo que nos arrojarán información estadísticamente significativa y con baja correlación.

Como imagen base para procesar y determinar los sitios más adecuados de muestreo, es importante seleccionar una que tenga la menor cantidad de nubosidad posible (idealmente 0% de nubosidad). Evidentemente en la época de estiaje correspondiente a la zona de interés se tendrán las mayores probabilidades de encontrar una imagen con esta característica fundamental.

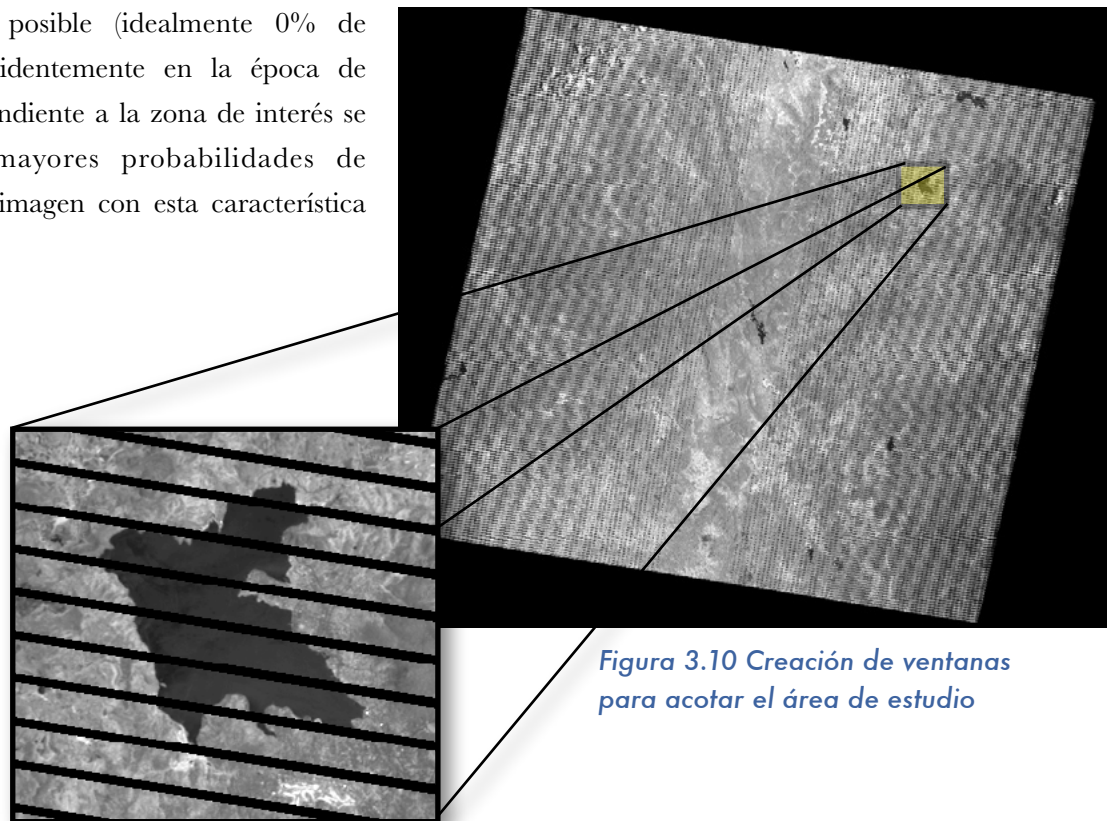


Figura 3.10 Creación de ventanas para acotar el área de estudio

Una vez seleccionada la imagen, es recomendable localizar dentro de la escena el embalse a estudiar para poder realizar un recorte de las imágenes que rodee al embalse. Esto tiene la finalidad de procesar menos información y facilitar los cálculos al programa, además de evitar el marco de las imágenes raster completas (Figura 3.10).

3.5 Corrección atmosférica

Para realizar estudios multitemporales y multispectrales (que impliquen extracción de información de múltiples bandas) es necesario realizar una corrección atmosférica de las imágenes. Para esto, se despliega el histograma para analizar la distribución de los píxeles y hacer corrección atmosférica y stretch lineal con saturación (en los casos en que se requiera). Una manera de realizar la corrección es determinar los Niveles Digitales mínimos para cada banda (se muestran en el Cuadro 3.2) para restarlos y así hacer la corrección atmosférica. A continuación se muestran, de la Figura 3.11 a la Figura 3.16, los histogramas de las bandas 1 a la 7 respectivamente (a manera de ejemplo), para una imagen de Valle de Bravo del 25 de abril de 2010. Las imágenes se despliegan con una paleta de escala de grises (256).

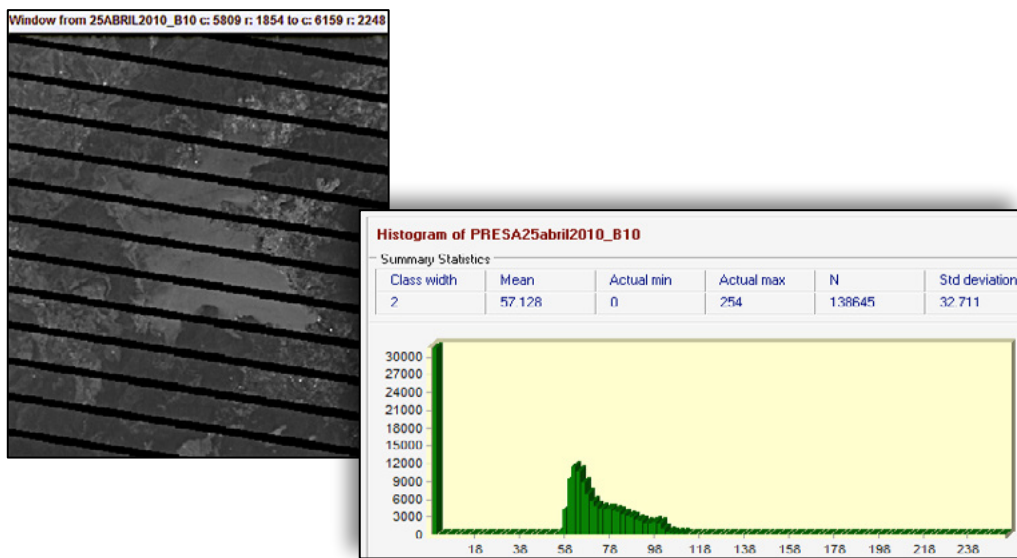


Figura 3.11
Histograma de la banda 1

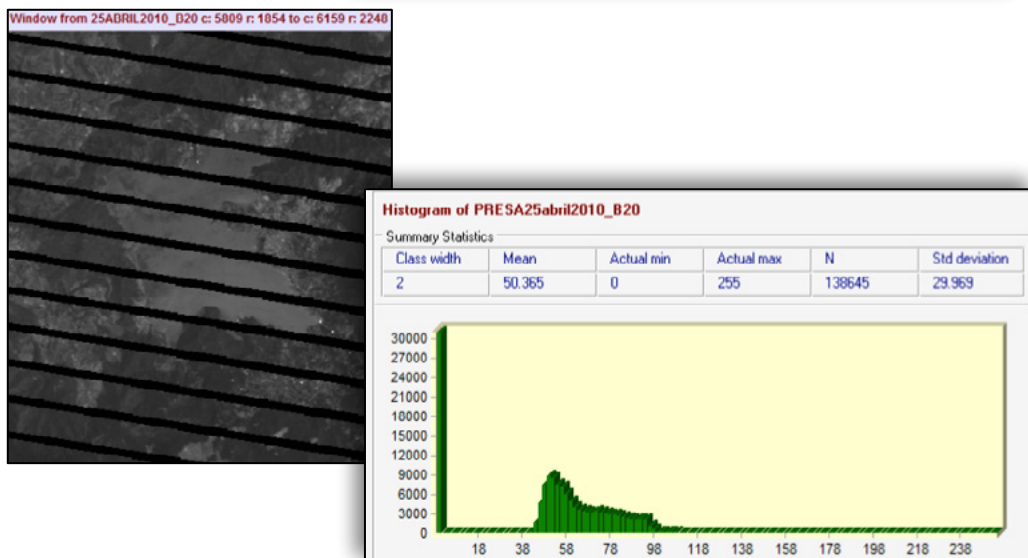


Figura 3.12
Histograma de la banda 2

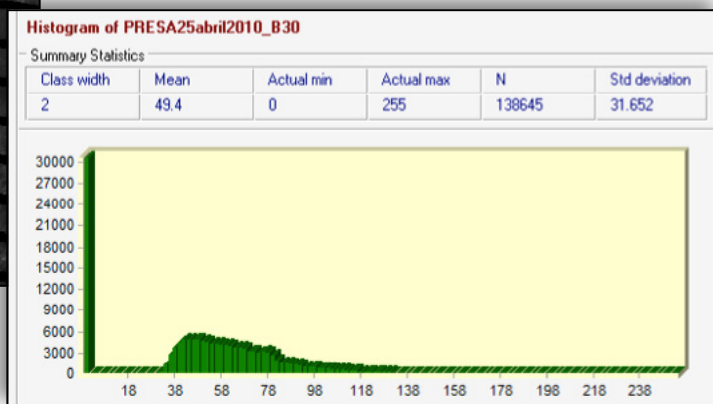
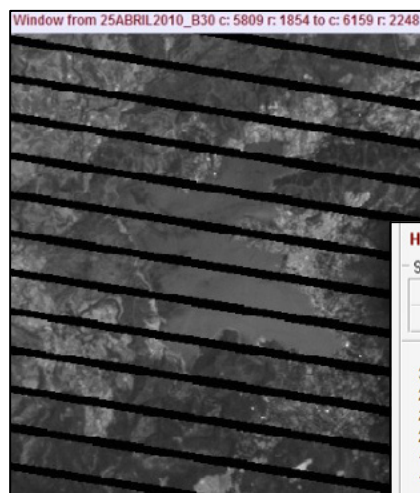


Figura 3.13
Histograma de la banda 3

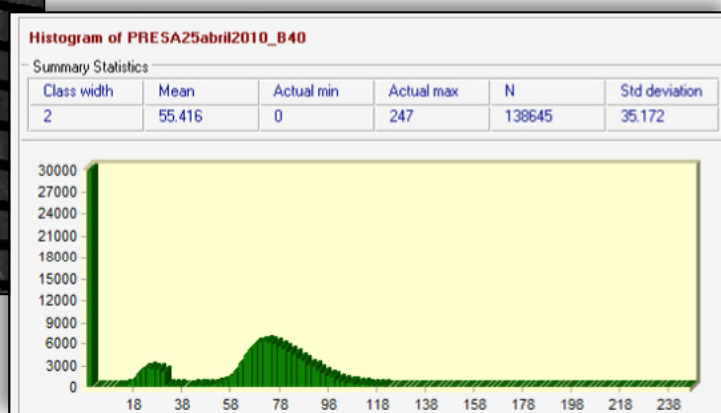


Figura 3.14
Histograma de la banda 4

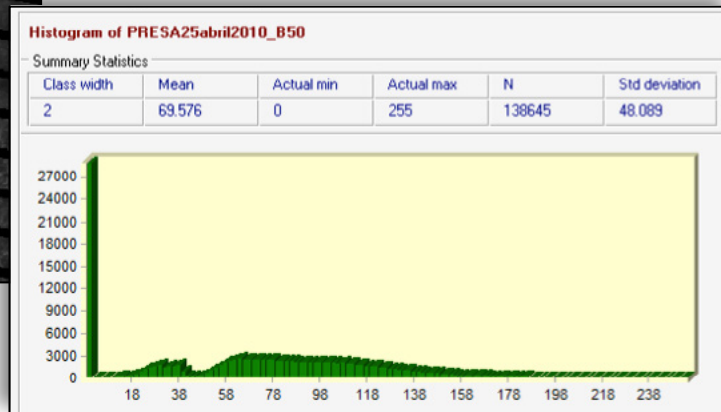


Figura 3.15
Histograma de la banda 5

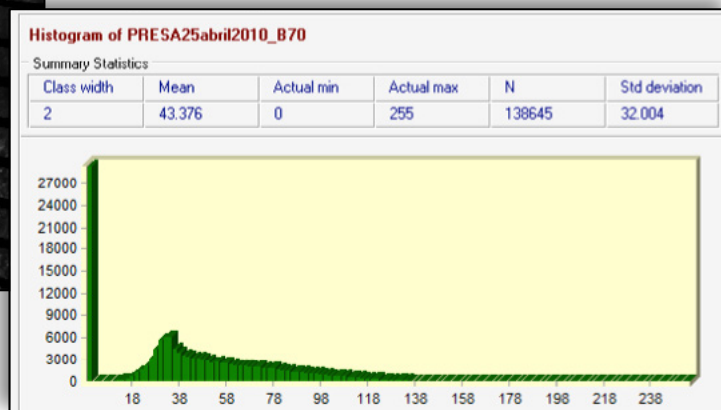


Figura 3.16
Histograma de la banda 7

Cuadro 3.2 Niveles Digitales mínimos por banda

Valor mínimo banda 1	54
Valor mínimo banda 2	40
Valor mínimo banda 3	30
Valor mínimo banda 4	13
Valor mínimo banda 5	8
Valor mínimo banda 7	9

Cuadro 3.3 Porcentajes de saturación

Banda 1	0.3%
Banda 2	0.3%
Banda 3	0.4%
Banda 4	0.4%
Banda 5	0.3%
Banda 7	0.2%

Así, se restan los valores mostrados en el Cuadro 3.2 a cada imagen correspondiente. Es importante hacer notar que los valores del bandeo (que evidentemente su nivel digital es 0) tomarán valores negativos, por lo que es necesario realizar una reclasificación de todos los valores negativos para llevarlos a 0. Los histogramas corregidos se muestran de la Figura 3.17 a la Figura 3.19. Para el despliegue de imágenes, se consideran los porcentajes de saturación que se muestran en el cuadro 3.3.

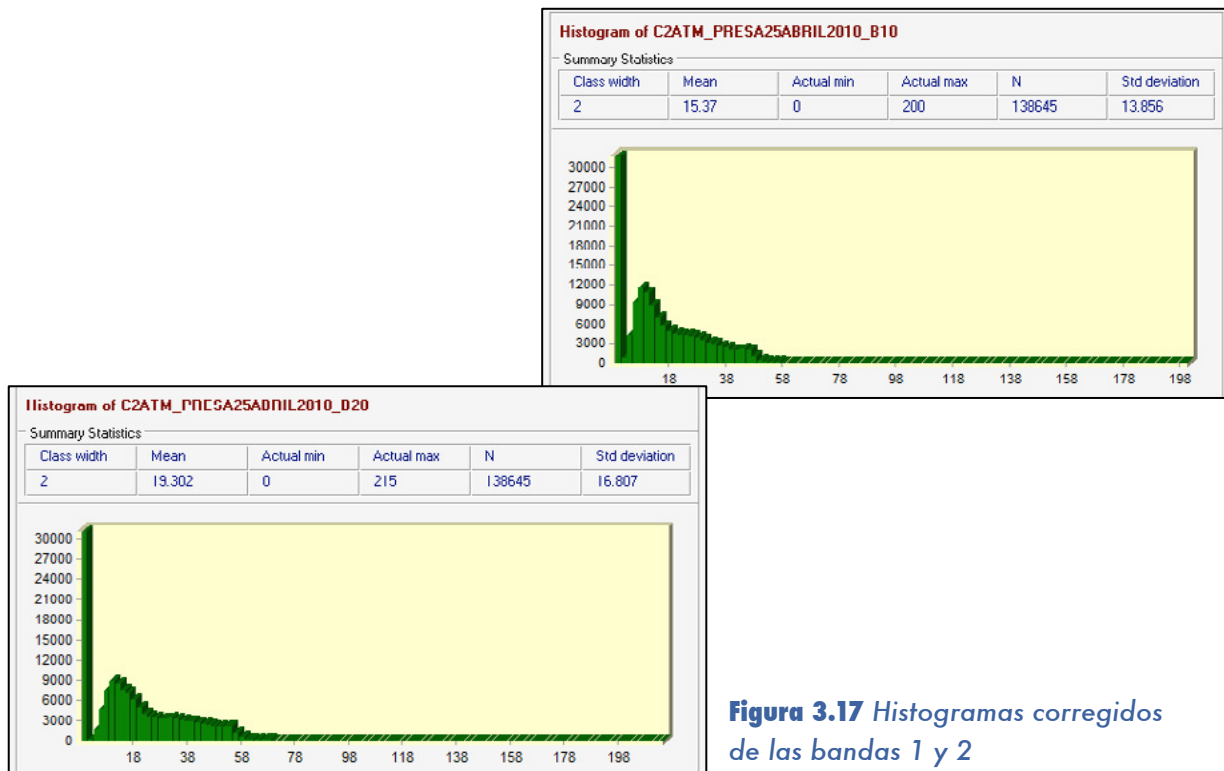


Figura 3.17 Histogramas corregidos de las bandas 1 y 2

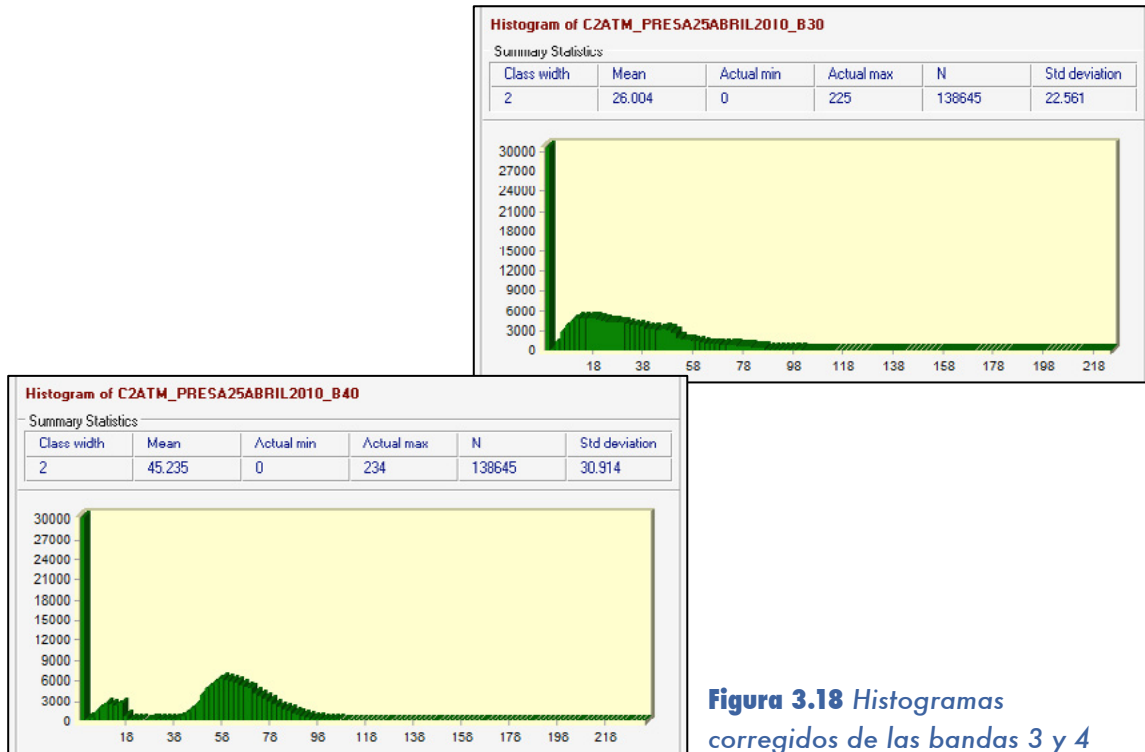


Figura 3.18 Histogramas corregidos de las bandas 3 y 4

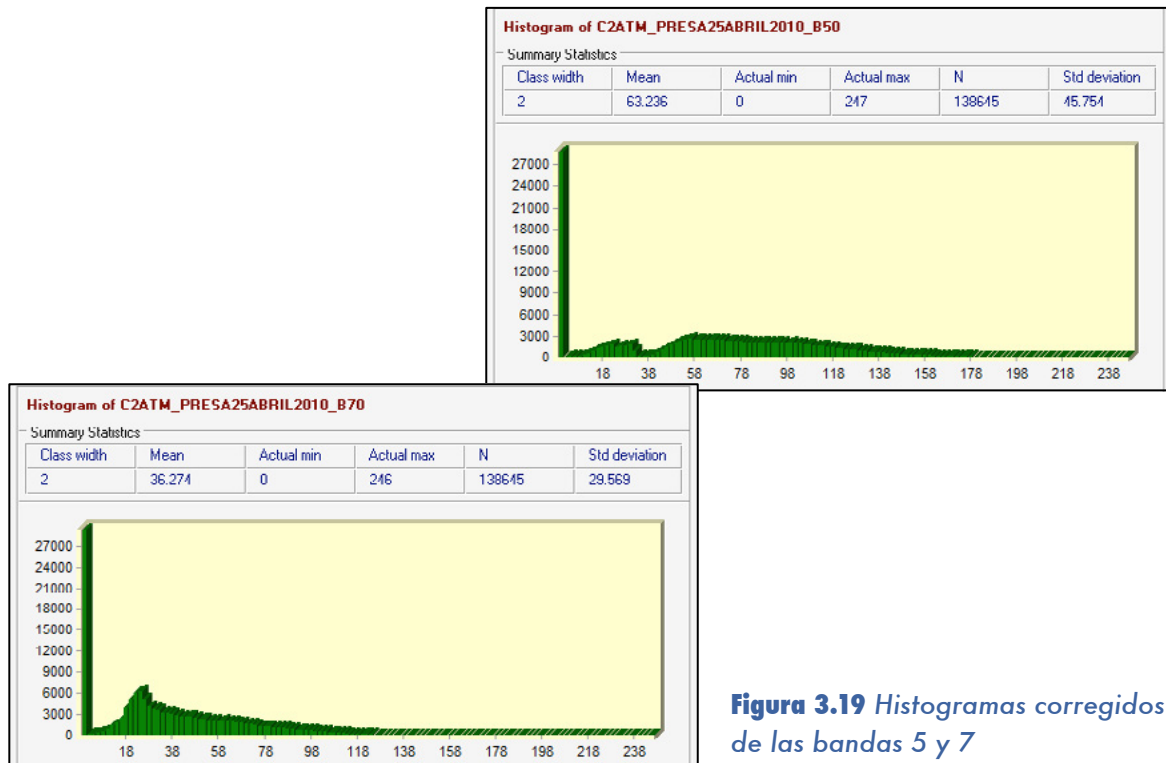
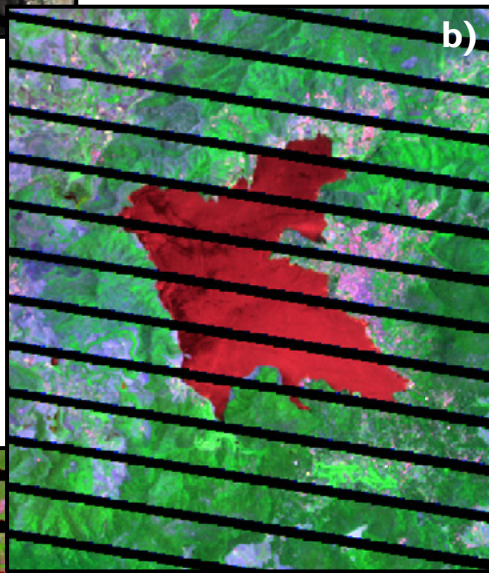
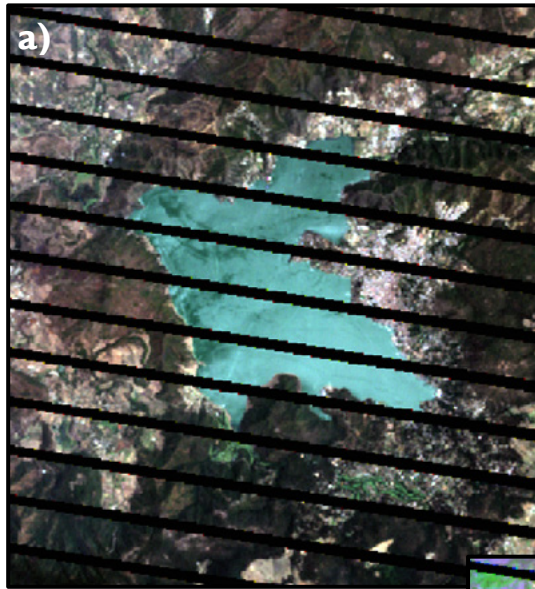


Figura 3.19 Histogramas corregidos de las bandas 5 y 7

3.6 Composición de bandas

Para observar las características de la imagen a color es útil hacer **composiciones de color**. Las composiciones se basan en el principio de que las tarjetas de video de los sistemas computacionales cuentan con tres canales, asociados uno a uno con los colores primarios ópticos (rojo, verde y azul). Es posible asignar a cada uno de estos canales una de las bandas que nos ofrece el sensor que utilizemos para realizar el estudio (para este caso el ETM+, el sensor montado en Landsat 7), sin tener limitaciones en el orden de despliegue. Lo anterior permite resaltar ciertas características de interés, como delimitar claramente el cuerpo de agua, resaltar distintas



calidades presentes en el agua del embalse, distinguir las zonas con vegetación de las zonas urbanas o rocosas, etc. En la Figura 3.20 se muestran algunas posibles composiciones.

Nótese que los objetos que presentan mayor reflectividad en ciertas bandas resaltan al aplicar

composiciones de color en donde se desplieguen esas bandas en cuestión. Por ejemplo, la vegetación presenta alta reflectancia en la banda 4 del sensor ETM+, correspondiente al infrarrojo cercano, lo que se aprecia en la Figura 3.20 inciso c, que muestra a esta banda en el canal del verde.

Figura 3.20 Composición en a) color real (RGB= 321), b) falso color (RGB=147) y falso color (RGB=543)

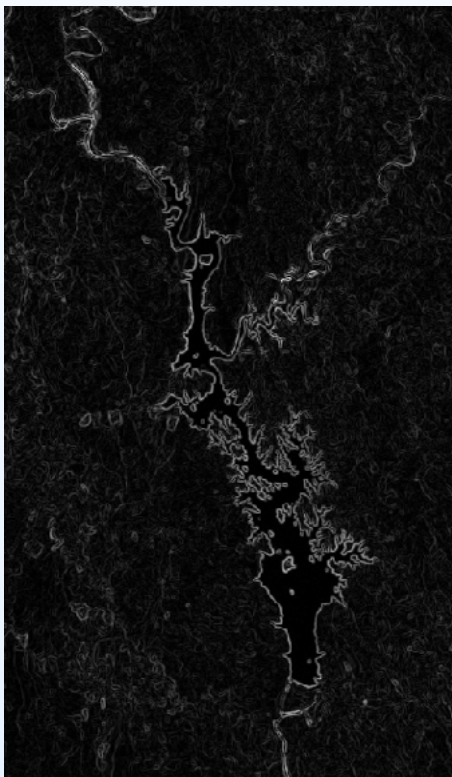
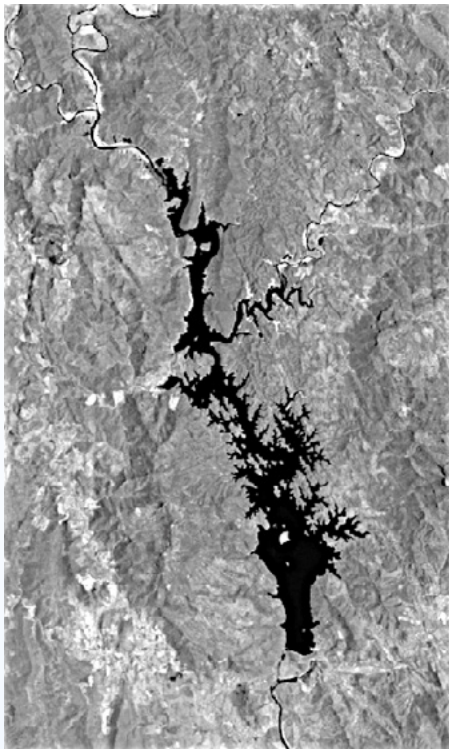


Figura 3.21 Filtro Sobel aplicado a una imagen de un cuerpo de agua

3.7 Detección de bordes

Resulta muy importante en el procesamiento de imágenes adquiridas mediante sensores remotos tratar de aligerar los procesos realizados por el software especializado. La cantidad de información contenida en una escena es bastante, y en muchas ocasiones, sobre todo en el estudio de cuerpos de agua, gran parte de la imagen es prescindible.

Para evitar información innecesaria, facilitar el proceso de clasificación no supervisada y el procesamiento general de la imagen, es recomendable utilizar una técnica de enmascaramiento para eliminar todos los datos que no pertenecen al embalse. Para hacer esto, es necesario definir la línea de frontera entre el cuerpo de agua y el terreno que lo rodea. Esto se logra al aplicar un filtro que resalte los bordes entre dos superficies distintas. Existen varios filtros que realizan esta función, como ya se había mencionado en el capítulo anterior. Uno de los más efectivos para esta tarea es el filtro de detección de bordes tipo Sobel, que aplica los siguientes algoritmos:

$$K_x = \begin{matrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{matrix} \quad \dots (3.1)$$

$$K_y = \begin{matrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{matrix} \quad \dots (3.2)$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad \dots (3.3)$$

Donde X y Y son las imágenes resultantes de aplicar el operador Kernel asociado a cada uno de ellos en dirección x y y (K_x y K_y), y R es la imagen resultante.

Este par de operadores Kernel equivalen a obtener la derivada en cada dirección de los valores de la imagen; de esta forma, cuando hay un cambio de pendiente se puede suponer que hay un cambio de superficie o borde entre dos objetos. Es por lo anterior que se maximizan los valores de borde y se minimizan los que no lo son, por lo que las fronteras quedan resaltadas.

Para construir la máscara es recomendable aplicar el filtro de detección de bordes en la banda 4, 5 o 7 del sensor ETM+ (o si se trabaja con otro sensor en bandas que pertenezcan al infrarrojo) porque en estas queda bien definida la línea del embalse respecto al suelo, debido a la firma espectral del agua, ya que existe menor o nula reflectancia a partir de la banda 4. El resultado se muestra en la Figura 3.22.

Después debe hacerse una reclasificación de los valores resultantes que presentó la escena al aplicarle el filtro Sobel.

Para esto, se igualan a 0 todos los pixeles que presentaran valores comprendidos en el intervalo de 0 a 105. Este último valor se determina mediante observación directa de los valores en las líneas definidas por el filtro Sobel, con el fin de eliminar los bordes más tenues y resaltar los bordes del embalse (Figura 3.23 a).

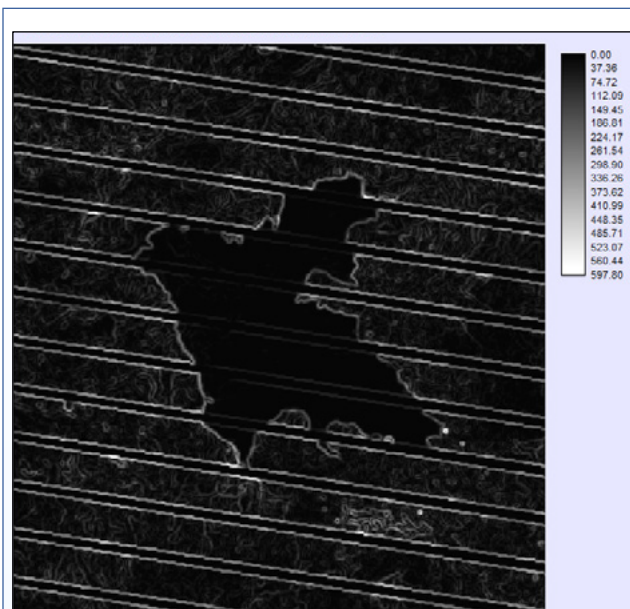


Figura 3.22 Filtro Sobel aplicado a la banda 4. Nótese que el efecto del bandeo disminuye en la región que delimita la superficie del embalse

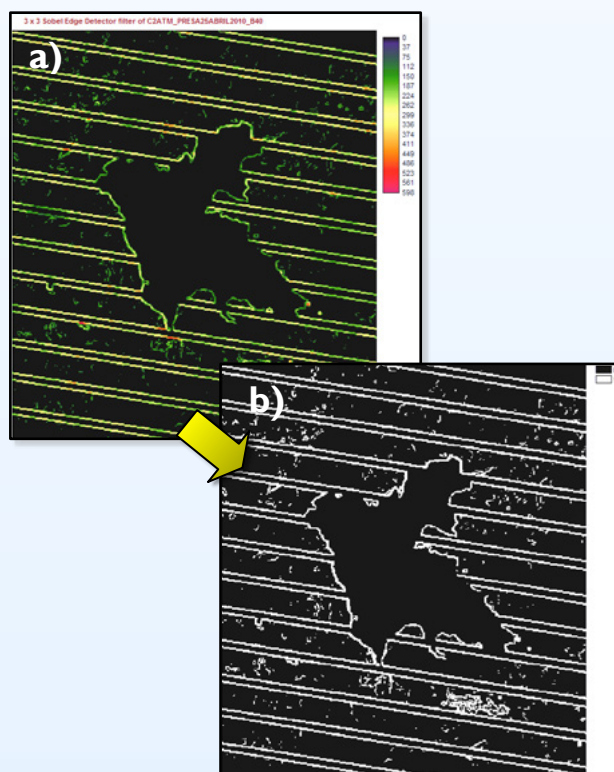


Figura 3.23 Discretización de los bordes del embalse

Si se observa cuidadosamente la Figura 3.23a, al aplicar el filtro Sobel sobre la imagen se genera una gama de valores, definiendo bordes e irregularidades en el terreno.

En realidad los distintos valores no tienen utilidad para el caso de estudio, por lo que es útil agrupar los valores que representen las fronteras o bordes principales y descartar el resto. Para conseguir esto, es útil realizar una reclasificación de los píxeles para obtener una imagen binaria, discretizando a valores de 0 y 1 (Figura 3.23b). De esta forma, queda perfectamente definida la línea que limita la superficie que abarca el embalse, por lo que se facilita el trazo de un vector poligonal que representa el área inundada (Figura 3.24).

Normalmente el software de procesamiento de imágenes satelitales permitirá convertir ese vector poligonal a una imagen raster, lo que permite utilizarlo para realizar operaciones con esta información, por ejemplo, multiplicar la imagen binaria (vector convertido a raster) por cada una de las bandas para poder invalidar el área exterior al embalse (Figura 3.24).

Es importante mencionar que al multiplicar por el polígono de enmascaramiento, al ser un vector binario, deja intactos los ND del embalse en todas las bandas y sólo elimina el suelo circundante. De esta forma, el procesamiento en el programa se aligera enormemente, además de que los datos analizados sólo corresponderán al vaso en estudio.





25 de abril de 2010



2 de octubre de 2010

Fecha	Área (ha)
25 abril 2010	1675.71
2 octubre 2010	1748.34

Figura 3.25 Comparación de dos superficies del embalse de Valle de Bravo para fechas que corresponden a época de estiaje y de lluvias. Nótese que en época de lluvias la superficie cubierta excede a la respectiva del estiaje en 72.63 hectáreas

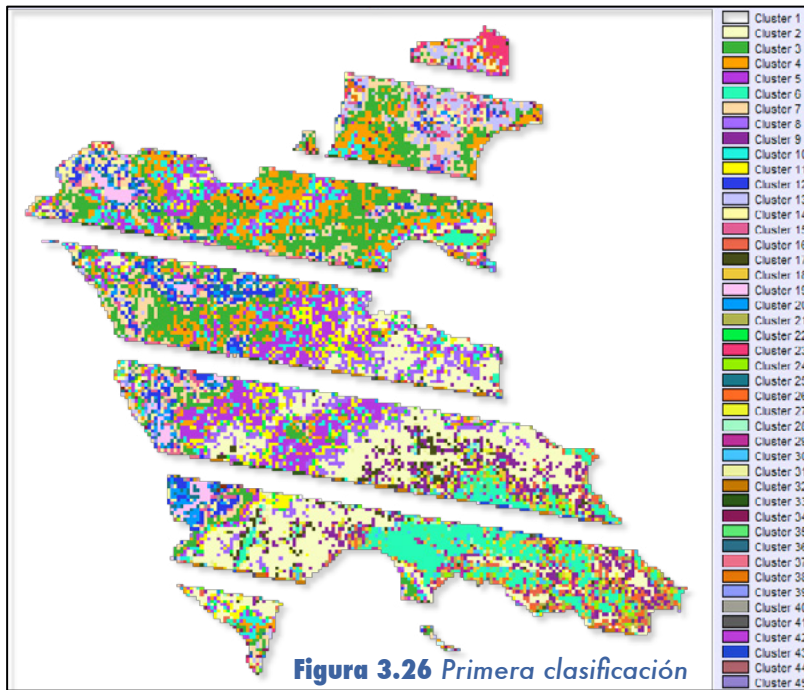
3.8 Determinación de superficie de embalses

La detección de bordes también puede ser aprovechada para determinar el área superficial del cuerpo de agua en estudio.

De hecho, es posible evaluar en diferentes épocas del año la superficie inundada e incluso, si se cuenta con la batimetría del embalse, conocer el volumen de agua almacenada en la fecha de adquisición de la imagen.

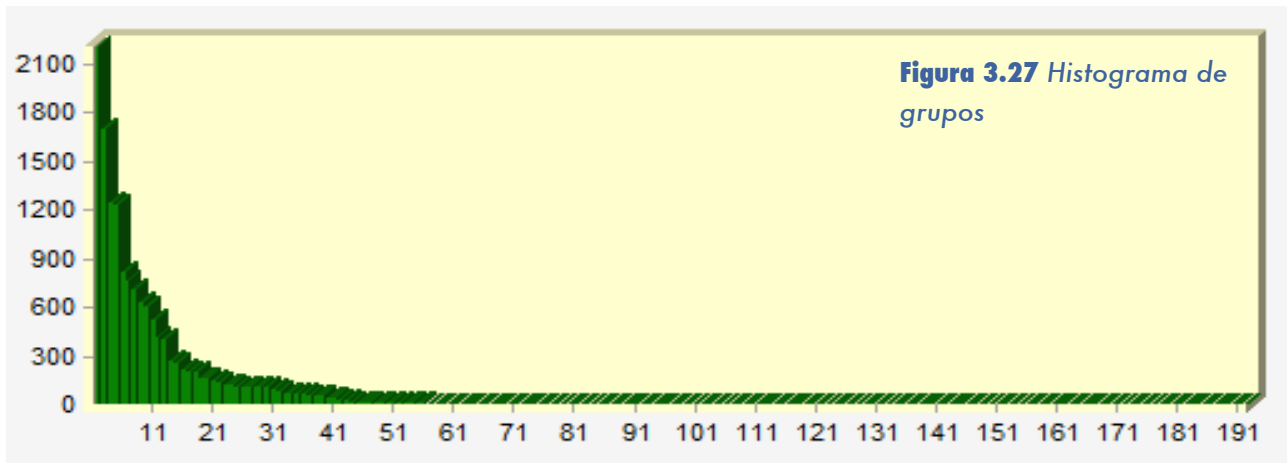
Al trazar un vector poligonal aprovechando la línea que define el embalse, determinada por el algoritmo aplicado para detectar bordes, es posible calcular el área que representa este vector. Así, se puede obtener el área del embalse para cualquier día de paso del satélite, que para el caso de Landsat, será cada 16 días.

En la figura 3.25 se muestra una comparación de la cobertura superficial del embalse Valle de Bravo para épocas del año contrastantes: estiaje y lluvias, en donde se observa que en la época de lluvias la superficie inundada excede aproximadamente en 4.5%, respecto a la superficie cubierta en época de estiaje.



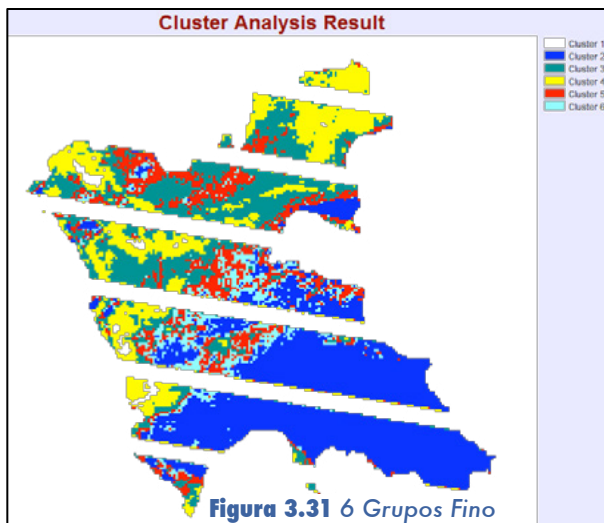
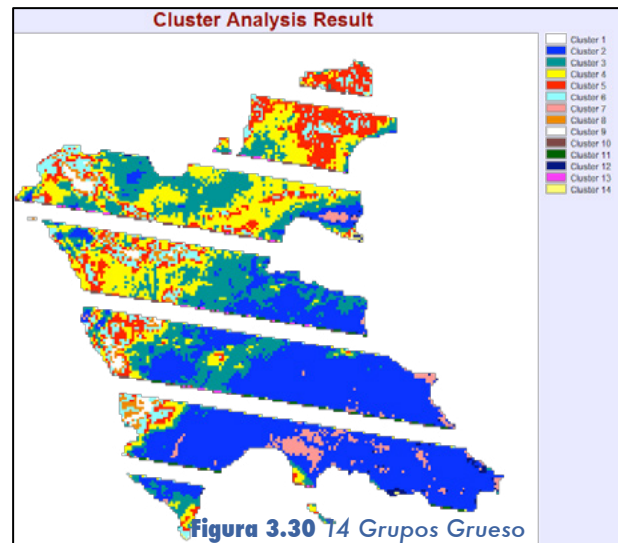
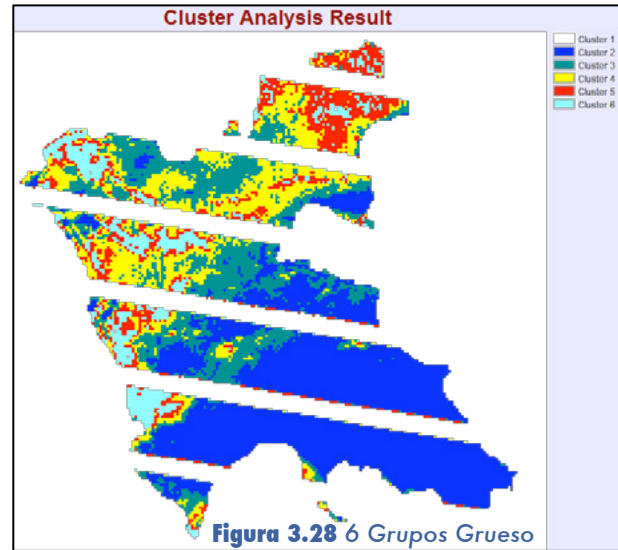
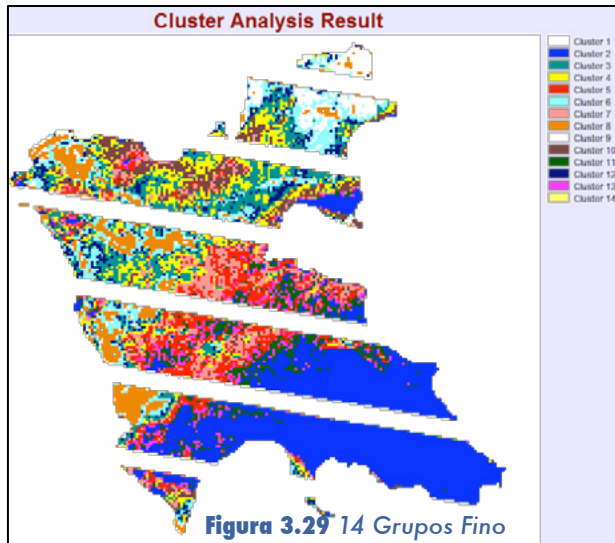
3.9 Determinación de sitios de muestreo con PR

Los píxeles pueden ser agrupados en grupos de forma automatizada por un software cuando presentan correlación entre ellos. Conviene aplicar una agrupación fina con todas las bandas, reteniendo todos los grupos para conocer cómo están distribuidos. Para el ejemplo de la Figura 3.26 resultan 192 grupos, una cantidad poco adecuada para establecer sitios de muestreo.



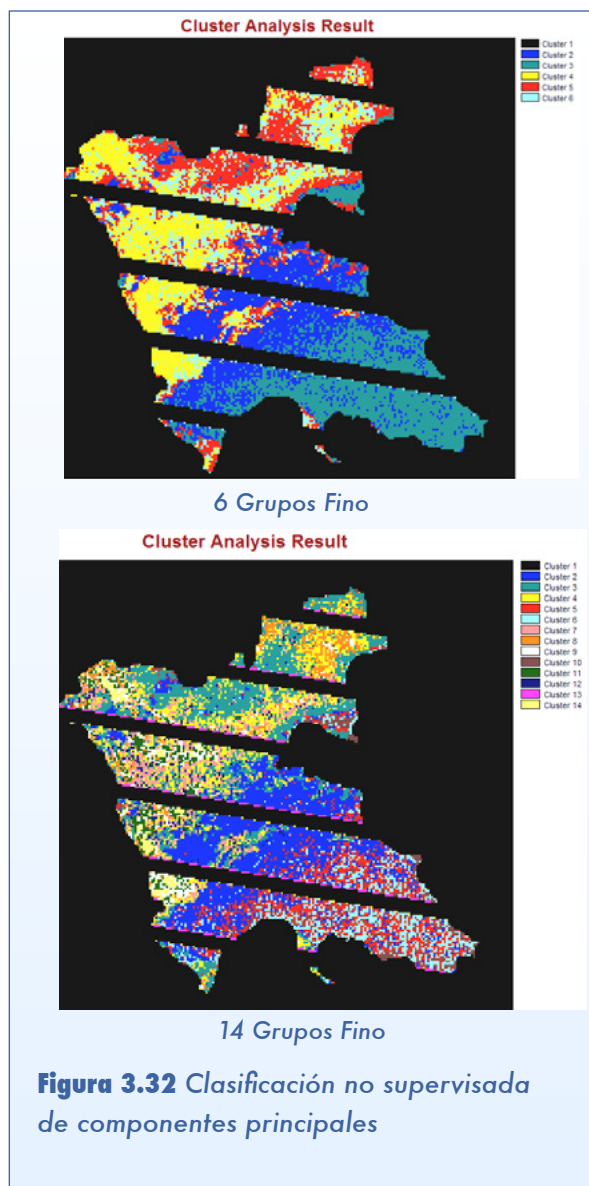
Desplegando el histograma, es posible analizar y determinar que las clases más importantes para el ejemplo son 5, habiendo otro grupo de 13 (Figura 3.27). Como se puede observar, existen dos saltos grandes entre los valores de píxeles acumulados entre la clase 5 y la 6, y entre la clase 13 y 14. Lo anterior indica que se pueden despreciar las familias posteriores a la clase 13, ya que el número de píxeles agrupados en ellas no es representativo y haría más difícil la interpretación de los datos.

Con la información anterior se generan grupos con estos límites, con clasificación gruesa y fina (Figura 3.28 a Figura 3.31):



Es importante mencionar que la clasificación gruesa y fina es una función de algunos programas de PR. La diferencia en este algoritmo radica en que el programa reconocerá para la clasificación gruesa sólo los picos del histograma de cada banda como posibles clases, y en la clasificación fina, además de los picos, distinguirá los “hombros” que presente el histograma, es decir, las variaciones que tenga el histograma cuando dos grupos adyacentes se sobrepone de manera que no se pueda identificar un pico.

Por otro lado, se puede probar con análisis de las componentes principales, para posteriormente meter las componentes más significativas en la generación de grupos y poder comparar con los resultados anteriores. Este tipo de análisis asegura que no se ingrese a la clasificación no supervisada información repetitiva que pudiera alterar los grupos. Las tres primeras componentes generalmente tienen la mayor carga de información, por lo que se puede repetir el proceso de clasificación con éstas. No se muestra la clasificación gruesa porque al ser componentes principales, no se generan suficientes familias. Los resultados para el ejemplo se muestran en el Cuadro 3.4:



Cuadro 3.4 Componentes principales

COMP	C1	C2	C3	C4	C5	C6
% var.	99.0512	0.5972	0.1866	0.0889	0.0422	0.0338
LOAD	C1	C2	C3	C4	C5	C6
B10	0.998	-0.035	0.033	0.046	0.000	-0.002
B20	0.998	-0.057	0.015	-0.030	-0.003	0.008
B30	0.998	0.000	-0.063	0.001	0.008	-0.016
B40	0.982	0.102	-0.118	0.041	-0.051	0.084
B50	0.984	0.167	0.038	-0.015	-0.035	-0.020
B70	0.983	0.169	0.031	-0.008	0.061	0.023

Se puede observar en el mismo cuadro que la mayor parte de la información se encuentra en la primera componente principal. Ésta situación se podría atribuir a que en realidad se está analizando una sola superficie: el agua, y por lo tanto la mayoría de los datos quedan agrupados en la primera componente. Cada grupo indica entonces una zona en la que las reflectividades son similares, por lo que se puede suponer que sería adecuado proponer algunos sitios de muestreo en cada familia de píxeles.

Para el embalse de Valle de Bravo se proponen 50 sitios de muestreo para asegurar que los sitios perdidos por el barrido móvil que se presenta en este tipo de imágenes no afecte de forma importante el número de datos que en un futuro se procesarán. En la Figura 3.33 se observan los sitios de muestreo propuestos.

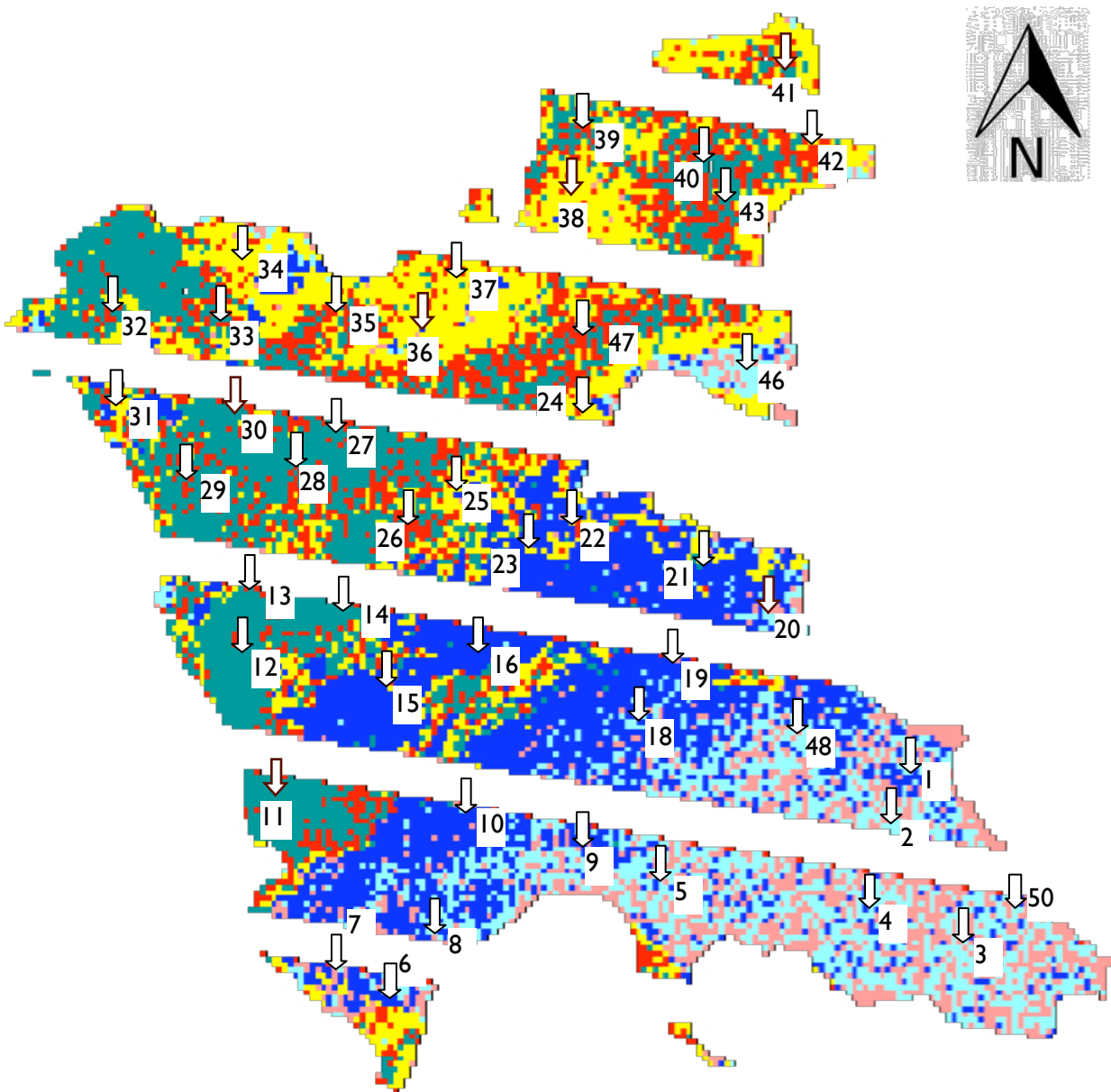


Figura 3.33 Sitios de muestreo propuestos

En el Cuadro 3.5 se muestra la localización de las estaciones de muestreo determinadas con la técnica anteriormente descrita.

Cuadro 3.5 Localización de las estaciones de muestreo

Estación de muestreo	Coordenadas
1	19° 11 '13 "N - 100° 08 '07 " W
2	19° 11 '01 "N - 100° 08 '11" W
3	19° 10 '41 "N - 100° 07 '58 " W
4	19° 10 '45 "N - 100° 08 '13 " W
5	19° 10 '51 "N - 100° 08 '49 " W
6	19° 10 '30 "N - 100° 09 '37 " W
7	19° 10 '35 "N - 100° 09 '45 " W
8	19° 10 '47 "N - 100° 09 '29 " W
9	19° 10 '58 "N - 100° 09 '02 " W
10	19° 11 '03 "N - 100° 09 '23 " W
11	19° 11 '11 "N - 100° 09 '41 " W
12	19° 11 '33 "N - 100° 10 '03 " W
13	19° 11 '50 "N - 100° 10 '01 " W
14	19° 11 '42 "N - 100° 09 '44 " W
15	19° 11 '27 "N - 100° 09 '37 " W
16	19° 11 '35 "N - 100° 09 '23 " W
17	19° 11 '40 "N - 100° 09 '04 " W
18	19° 11 '22 "N - 100° 08 '56 " W
19	19° 11 '33 "N - 100° 08 '47 " W
20	19° 11 '34 "N - 100° 08 '23 " W
21	19° 11 '49 "N - 100° 08 '43 " W
22	19° 11 '53 "N - 100° 09 '07 " W
23	19° 11 '53 "N - 100° 09 '11 " W
24	19° 12 '13 "N - 100° 09 '05 " W
25	19° 12 '03 "N - 100° 09 '27 " W
26	19° 11 '57 "N - 100° 09 '35 " W
27	19° 12 '14 "N - 100° 09 '45 " W
28	19° 12 '08 "N - 100° 09 '53 " W
29	19° 12 '06 "N - 100° 10 '13 " W
30	19° 12 '20 "N - 100° 10 '08 " W
31	19° 12 '18 "N - 100° 10 '27 " W
32	19° 12 '36 "N - 100° 10 '27 " W
33	19° 12 '35 "N - 100° 10 '07" W
34	19° 12 '44 "N - 100° 10' 02 " W
35	19° 12 '35 "N - 100° 09 '46 " W
36	19° 12 '29 "N - 100° 09 '34 " W
37	19° 12 '43 "N - 100° 09 '26 " W
38	19° 12 '45 "N - 100° 09 '08 " W
39	19° 13 '11 "N - 100° 09 '04 " W
40	19° 13 '02 "N - 100° 08 '45 " W
41	19° 13 '13 "N - 100° 08 '31 " W
42	19° 13 '06 "N - 100° 08 '26 " W
43	19° 12 '55 "N - 100° 08 '39 " W
44	19° 12 '39 "N - 100° 08 '32 " W
45	19° 12 '42 "N - 100° 08 '50 " W
46	19° 12 '25 "N - 100° 08 '33 " W
47	19° 12 '30 "N - 100° 09 '04 " W
48	19° 11 '19 "N - 100° 08 '28 " W
49	19° 11 '04 "N - 100° 08 '37 " W
50	19° 11 '13 "N - 100° 08 '07 " W

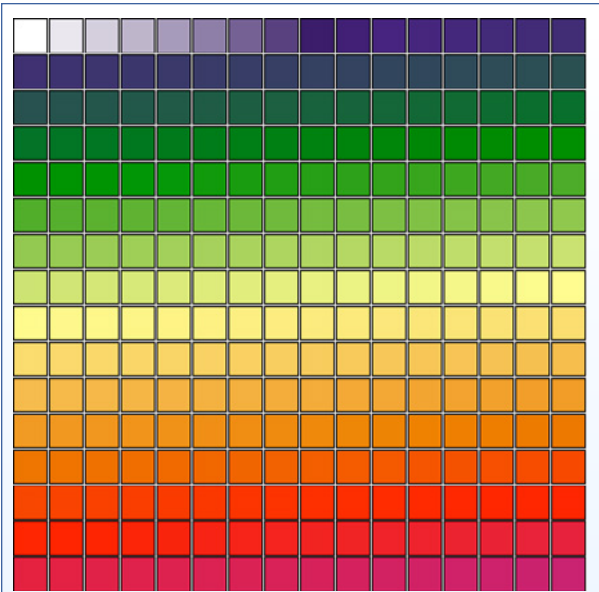


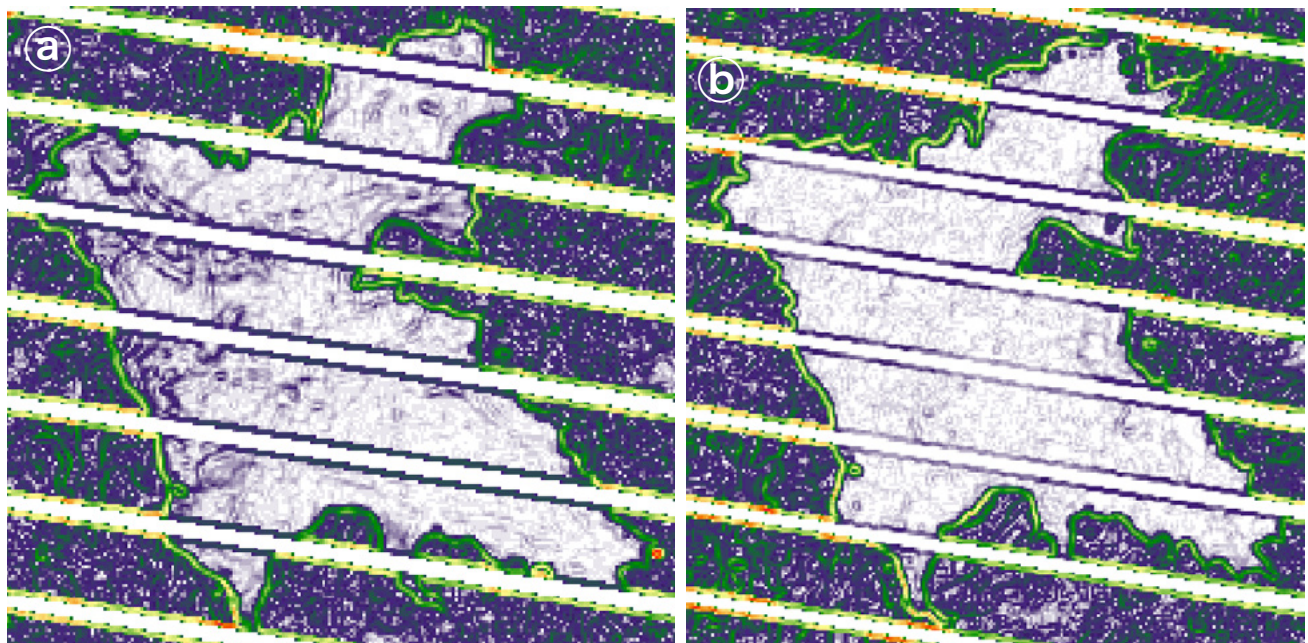
Figura 3.34 Paleta de ejemplo para desplegar la imagen resultante de aplicar un filtro Sobel

En procesamiento de imágenes, el uso de una paleta adecuada para desplegar la información es fundamental para visualizar e interpretar de forma correcta

3.10 Variación de calidad mediante detección de bordes

Aprovechando el principio previamente explicado de detección de bordes con un filtro tipo Sobel, si se aplica dicho filtro a 2 imágenes de fechas diferentes, pueden encontrarse diferencias importantes. Se obtienen imágenes resultantes que dan una idea cualitativa de la variación de calidades en el cuerpo de agua en las 2 fechas. Mientras la calidad del agua sea más heterogénea, la variación será mayor y el algoritmo indicará visualmente las zonas que presenten mayores diferencias. Para facilitar la identificación visual de las diferentes zonas, es necesario generar una paleta de alto contraste para desplegar la imagen resultante del filtro Sobel con la misma. La paleta propuesta se muestra en la Figura 3.34. El resultado de aplicar esta plantilla en las imágenes filtradas se muestra en la Figura 3.35

Figura 3.35 Comparación del embalse con filtro Sobel para época de estiaje (a) y época de lluvias (b)



3.11 Procesamiento de datos

Una vez obtenidos los datos de campo en los sitios de muestreo previamente determinados, es posible desarrollar un modelo por cada uno de los parámetros que lo estime cuantitativamente, a partir de los datos obtenidos del sensor satelital.

Existen varios parámetros en los que es posible hacer la correlación, entre los cuales están:

- Turbiedad
- Índice de Estado Trófico (IET), a través de la Profundidad de Disco de Secchi (PDS)
- Sólidos Disueltos Totales (SDT)
- Clorofila
- Sólidos Suspendidos Totales

Índice de Estado Trófico

Las mediciones de campo de la PDS (Figura 3.36) se pueden utilizar para calcular un Índice de Estado Trófico IET (TSI por sus siglas en inglés) para realizar estudios con PR. Esto se fundamenta en dos razones principales: realizar la regresión con una medida estandarizada y obtener valores crecientes a mayor turbiedad del agua. Recordemos que mientras más grande sea el valor de la PDS, el agua es menos turbia, y por el contrario, a mayor valor del IET, el agua es más turbia.

La obtención del IET se fundamenta en la propuesta de Carlson (1977) que relaciona la profundidad del disco con un valor que da una idea del estado trófico del embalse. A pesar de que el estado trófico de un cuerpo de agua depende de muchos factores, como puede ser la carga de nutrientes, la concentración de nutrientes, productividad, cantidad y calidad de la fauna y la flora, morfología del lago, etc., algunos de éstos están interrelacionados y puede considerarse uno o varios parámetros representativos para tener una idea del estado trófico del cuerpo de agua.



Figura 3.36 Disco de Secchi

Inventado en la segunda mitad del Siglo XIX por el italiano Pietro Angelo Secchi, el Disco de Secchi es una de las herramientas más antiguas para realizar estudios limnológicos que se utilizan en la actualidad. La información que otorga es muy valiosa para estudios de correlación con imágenes satelitales por ser una medición óptica

Basado en esta hipótesis, el mismo autor propone basarse en un criterio paramétrico único para desarrollar un índice que muestre el estado trófico del cuerpo de agua en estudio.

El criterio base es la PDS, uno de los parámetros más fáciles de determinar en campo, además de ser un indicador indirecto de la turbiedad del agua. Carlson construyó el índice con base en todos los posibles valores que puede adquirir este parámetro. De hecho, el autor relacionó el parámetro con la población de algas en el cuerpo de agua, a través de la relación de la penetración de la luz con el crecimiento de estos organismos.

El autor propone la relación:

$$IET(PDS) = 10 \cdot \left[6 - \frac{\ln PDS}{\ln 2} \right] \quad \dots (3.4)$$

Para plantear la ecuación 3.4, se consideró que el punto cero de la escala debía ser mayor que cualquier dato reportado de PDS. El cero de la escala son 64 metros de PDS. La escala práctica termina en el valor de 100, asociado a 6.4 cm de PDS. Esta escala es intencionalmente cuantitativa ya que en las escalas cualitativas de estado trófico se pierde detalle en las diferencias sutiles.

Carlson planteó el cálculo de 3 índices de estado trófico, en función de la PDS, la clorofila y el fósforo total, respectivamente. Para fines de generación del modelo, sólo se eligió el que está en función de la PDS, ya que este parámetro se relaciona directamente con características ópticas del agua. Es importante mencionar que este índice sólo considera la penetración de la luz en el agua y excluye la presencia de clorofila o fósforo como indicadores del estado trófico del cuerpo de agua, exceptuando lo que pudieran contribuir como obstáculos en la penetración de luz antes mencionada.

En el Cuadro 3.6 y en el Cuadro 3.7 se presentan el IET calculado para las dos campañas de muestreo en Valle de Bravo.

El IET es un parámetro útil que se puede utilizar junto con imágenes satelitales como variable dependiente en la generación de modelos de calidad del agua.

Cuadro 3.6 IET para muestras del 25 de abril de 2010

Estación	Coordenadas	PDS (m)	IET
1	19° 11 '13 "N - 100° 08 '07 " W	1.00	60.00
2	19° 11 '01 "N - 100° 08 '11" W	1.00	60.00
3	19° 10 '41 "N - 100° 07 '58 " W	1.00	60.00
4	19° 10 '45 "N - 100° 08 '13 " W	1.10	58.62
5	19° 10 '51 "N - 100° 08 '49 " W	1.08	58.89
6	19° 10 '30 "N - 100° 09 '37 " W	1.07	59.02
7	19° 10 '35 "N - 100° 09 '45 " W	1.09	58.76
8	19° 10 '47 "N - 100° 09 '29 " W	1.21	57.25
9	19° 10 '58 "N - 100° 09 '02 " W	1.23	57.01
10	19° 11 '03 "N - 100° 09 '23 " W	1.14	58.11
11	19° 11 '11 "N - 100° 09 '41 " W	1.17	57.73
12	19° 11 '33 "N - 100° 10 '03 " W	1.10	58.62
13	19° 11 '50 "N - 100° 10 '01 " W	1.28	56.44
14	19° 11 '42 "N - 100° 09 '44 " W	1.05	59.30
15	19° 11 '27 "N - 100° 09 '37 " W	1.10	58.62
16	19° 11 '35 "N - 100° 09 '23 " W	1.11	58.49
17	19° 11 '40 "N - 100° 09 '04 " W	1.06	59.16
18	19° 11 '22 "N - 100° 08 '56 " W	1.03	59.57
19	19° 11 '33 "N - 100° 08 '47 " W	1.14	58.11
20	19° 11 '34 "N - 100° 08 '23 " W	1.09	58.76
21	19° 11 '49 "N - 100° 08 '43 " W	1.09	58.76
22	19° 11 '53 "N - 100° 09 '07 " W	1.06	59.16
23	19° 11 '53 "N - 100° 09 '11 " W	1.00	60.00
24	19° 12 '13 "N - 100° 09 '05 " W	0.83	62.69
25	19° 12 '03 "N - 100° 09 '27 " W	0.91	61.36
26	19° 11 '57 "N - 100° 09 '35 " W	1.07	59.02
27	19° 12 '14 "N - 100° 09 '45 " W	0.72	64.74
28	19° 12 '08 "N - 100° 09 '53 " W	1.10	58.62
29	19° 12 '06 "N - 100° 10 '13 " W	1.15	57.98
30	19° 12 '20 "N - 100° 10 '08 " W	1.00	60.00
31	19° 12 '18 "N - 100° 10 '27 " W	0.95	60.74
32	19° 12 '36 "N - 100° 10 '27 " W	1.00	60.00
33	19° 12 '35 "N - 100° 10 '07" W	0.92	61.20
34	19° 12 '44 "N - 100° 10 '02 " W	1.00	60.00
35	19° 12 '35 "N - 100° 09 '46 " W	1.00	60.00
36	19° 12 '29 "N - 100° 09 '34 " W	1.03	59.57
37	19° 12 '43 "N - 100° 09 '26 " W	1.00	60.00
38	19° 12 '45 "N - 100° 09 '08 " W	0.96	60.59
39	19° 13 '11 "N - 100° 09 '04 " W	1.05	59.30
40	19° 13 '02 "N - 100° 08 '45 " W	0.86	62.18
41	19° 13 '13 "N - 100° 08 '31 " W	1.00	60.00
42	19° 13 '06 "N - 100° 08 '26 " W	0.89	61.68
43	19° 12 '55 "N - 100° 08 '39 " W	0.88	61.84
44	19° 12 '39 "N - 100° 08 '32 " W	0.97	60.44
45	19° 12 '42 "N - 100° 08 '50 " W	0.89	61.68
46	19° 12 '25 "N - 100° 08 '33 " W	0.80	63.22
47	19° 12 '30 "N - 100° 09 '04 " W	1.00	60.00
48	19° 11 '19 "N - 100° 08 '28 " W	1.00	60.00
49	19° 11 '04 "N - 100° 08 '37 " W	1.00	60.00
50	19° 11 '13 "N - 100° 08 '07 " W	0.86	62.18

Cuadro 3.7 IET para muestras del 2 de octubre de 2010

Estación	Coordenadas	PDS (m)	IET
1	19° 11 '13 "N - 100° 08 '07 " W	1.69	52.43
2	19° 11 '01 "N - 100° 08 '11" W	1.97	50.22
3	19° 10 '41 "N - 100° 07 '58 " W	2.03	49.79
4	19° 10 '45 "N - 100° 08 '13 " W	1.57	53.49
5	19° 10 '51 "N - 100° 08 '49 " W	1.86	51.05
6	19° 10 '30 "N - 100° 09 '37 " W	1.69	52.43
7	19° 10 '35 "N - 100° 09 '45 " W	1.77	51.76
8	19° 10 '47 "N - 100° 09 '29 " W	1.88	50.89
9	19° 10 '58 "N - 100° 09 '02 " W	1.72	52.18
10	19° 11 '03 "N - 100° 09 '23 " W	1.69	52.43
11	19° 11 '11 "N - 100° 09 '41 " W	1.74	52.01
12	19° 11 '33 "N - 100° 10 '03 " W	1.96	50.29
13	19° 11 '50 "N - 100° 10 '01 " W	1.82	51.36
14	19° 11 '42 "N - 100° 09 '44 " W	1.83	51.28
15	19° 11 '27 "N - 100° 09 '37 " W	1.71	52.26
16	19° 11 '35 "N - 100° 09 '23 " W	1.78	51.68
17	19° 11 '40 "N - 100° 09 '04 " W	1.65	52.78
18	19° 11 '22 "N - 100° 08 '56 " W	-	-
19	19° 11 '33 "N - 100° 08 '47 " W	1.43	54.84
20	19° 11 '34 "N - 100° 08 '23 " W	1.49	54.25
21	19° 11 '49 "N - 100° 08 '43 " W	-	-
22	19° 11 '53 "N - 100° 09 '07 " W	-	-
23	19° 11 '53 "N - 100° 09 '11 " W	1.61	53.13
24	19° 12 '13 "N - 100° 09 '05 " W	1.49	54.25
25	19° 12 '03 "N - 100° 09 '27 " W	1.69	52.43
26	19° 11 '57 "N - 100° 09 '35 " W	1.80	51.52
27	19° 12 '14 "N - 100° 09 '45 " W	1.83	51.28
28	19° 12 '08 "N - 100° 09 '53 " W	1.91	50.66
29	19° 12 '06 "N - 100° 10 '13 " W	1.79	51.60
30	19° 12 '20 "N - 100° 10 '08 " W	1.88	50.89
31	19° 12 '18 "N - 100° 10 '27 " W	1.58	53.40
32	19° 12 '36 "N - 100° 10 '27 " W	1.70	52.34
33	19° 12 '35 "N - 100° 10 '07" W	1.81	51.44
34	19° 12 '44 "N - 100° 10 '02 " W	1.88	50.89
35	19° 12 '35 "N - 100° 09 '46 " W	1.48	54.34
36	19° 12 '29 "N - 100° 09 '34 " W	1.73	52.09
37	19° 12 '43 "N - 100° 09 '26 " W	1.96	50.29
38	19° 12 '45 "N - 100° 09 '08 " W	1.80	51.52
39	19° 13 '11 "N - 100° 09 '04 " W	1.83	51.28
40	19° 13 '02 "N - 100° 08 '45 " W	1.59	53.31
41	19° 13 '13 "N - 100° 08 '31 " W	1.67	52.60
42	19° 13 '06 "N - 100° 08 '26 " W	1.61	53.13
43	19° 12 '55 "N - 100° 08 '39 " W	1.58	53.40
44	19° 12 '39 "N - 100° 08 '32 " W	1.38	55.35
45	19° 12 '42 "N - 100° 08 '50 " W	1.56	53.58
46	19° 12 '25 "N - 100° 08 '33 " W	1.38	55.35
47	19° 12 '30 "N - 100° 09 '04 " W	1.43	54.84
48	19° 11 '19 "N - 100° 08 '28 " W	1.60	53.22
49	19° 11 '04 "N - 100° 08 '37 " W	1.94	50.44
50	19° 11 '13 "N - 100° 08 '07 " W	1.94	50.44

3.12 Generación de los modelos

Los modelos para estimar parámetros de calidad del agua basados en información que entregan las plataformas y sensores satelitales, generalmente son de tipo regresión lineal múltiple. Lo anterior implica que para una variable dependiente (el parámetro de calidad del agua) existirán varias variables independientes (información contenida en cada una de las bandas).

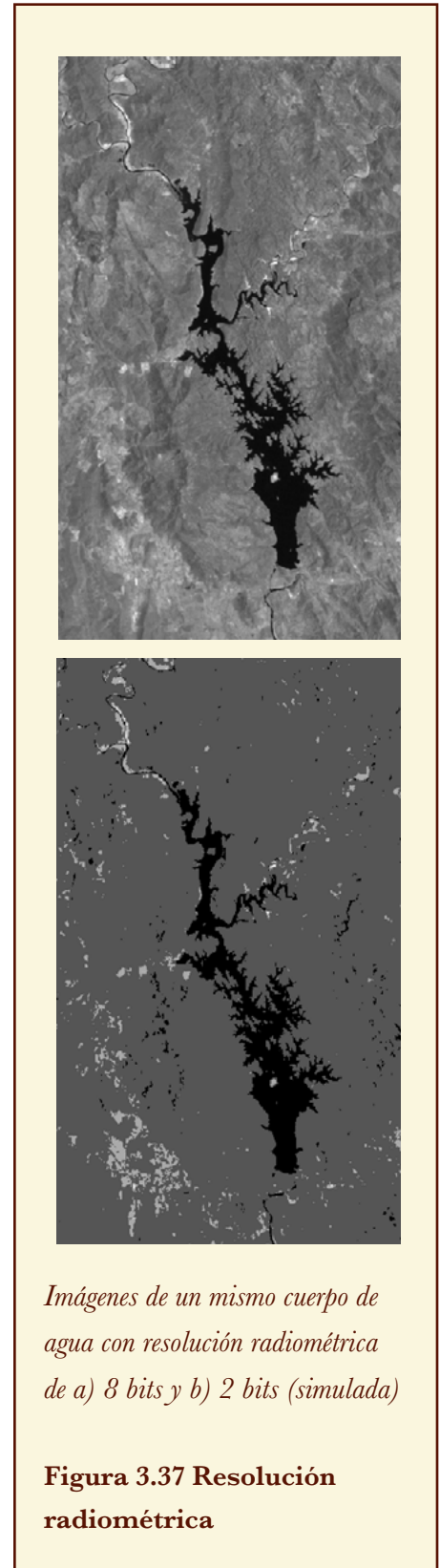
Las variables independientes que definirán el modelo más adecuado se buscan probando diferentes combinaciones lineales entre el conjunto de valores obtenido en las distintas bandas del satélite Landsat 7, obviamente con base en el comportamiento de la firma espectral del agua y descartando las bandas que no sean significativas.

Corrección radiométrica

La radiación electromagnética que captan los sensores de cualquier plataforma satelital se ve alterada porque la atmósfera interfiere con ella.

La información que contienen las imágenes satelitales está expresada en términos del Nivel Digital de cada uno de los píxeles. Recordemos que el ND es un valor cuya escala varía en función de la resolución radiométrica (Figura 3.37) que posea el sensor. Por ejemplo, para una resolución de 8 bits el ND variará de 0 a 255, es decir, 256 valores (2^8), por lo que un ND cercano a 0 representa un valor muy bajo o nulo de reflectancia, y uno cercano a 255 representará uno muy alto de reflectancia para la banda analizada.

Al ser valores relativos ajustados a una escala, los ND crudos requieren corregirse radiométricamente y transformarse a valores físicos de reflectancia para trabajar con ellos de manera adecuada, es decir, calibrarse. Lo anterior cobra especial importancia en estudios donde se analicen imágenes de distintas épocas (estudios multitemporales).



Esta corrección pretende minimizar la variación debida a los diferentes ángulos solares respecto al cenit y las variaciones de la radiación incidente asumiendo una superficie Lambertiana. Los valores de cada Nivel Digital se convierten en valores de reflectancia para cada banda, utilizando la ecuación 3.5:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi d_s^2 (\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda} ND_{\lambda})}{E_{0\lambda} \cos \theta_i} \quad \dots (3.5)$$

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 [$Wm^{-2}\mu m^{-1}$]

θ_i es el ángulo del cenit solar

Para calcular d_s^2 se utilizó la expresión 3.6:

$$d_s^2 = \left[1 + 0.01674 \left(\text{sen} \frac{2\pi(J - 93.5)}{365} \right) \right]^2 \quad \dots (3.6)$$

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

Para calcular el coseno del ángulo cenital μ_s , se utilizó la expresión (Wolf and Brinker 2001):

$$\cos \theta_i = \cos \phi_i \cos \delta_i \cos \omega_i + \text{sen} \phi_i \text{sen} \delta_i \quad \dots (3.7)$$

En donde:

ϕ es la latitud en decimales

$\omega = 15 \times (h-12)$ es el ángulo horario obtenido a partir de la hora solar h

δ es la declinación solar, calculada como:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left[360 \left(\frac{284 + J}{365} \right) \right] \quad \dots (3.8)$$

La expresión $\alpha_\lambda + \beta_\lambda DN_\lambda$ contenida en la ecuación 3.5 representa la radiancia espectral detectada por el sensor en cada una de sus bandas.

Los coeficientes de calibración α_λ y β_λ son propios para cada sensor; por ejemplo, para obtener los correspondientes a Landsat 7 se puede consultar a Chander (2009), como se muestra en el Cuadro 3.8.

Cuadro 3.8 Rango espectral del sensor ETM+, ámbitos dinámicos de postcalibración e irradiancia solar exoatmosférica media

L7 ETM+ Sensor ($Q_{calmin} = 1$ and $Q_{calmax} = 255$)							
Band	Spectral range	Center wavelength	$LMIN_\lambda$	$LMAX_\lambda$	$G_{rescale}$	$B_{rescale}$	$ESUN_\lambda$
Units	μm		$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$		$(W/m^2 \text{ sr } \mu m)/DN$	$W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$	$W/(m^2 \mu m)$
<i>Low gain (LPGS)</i>							
1	0.452–0.514	0.483	–6.2	293.7	1.180709	–7.38	1997
2	0.519–0.601	0.560	–6.4	300.9	1.209843	–7.61	1812
3	0.631–0.692	0.662	–5.0	234.4	0.942520	–5.94	1533
4	0.772–0.898	0.835	–5.1	241.1	0.969291	–6.07	1039
5	1.547–1.748	1.648	–1.0	47.57	0.191220	–1.19	230.8
6	10.31–12.36	11.335	0.0	17.04	0.067087	–0.07	N/A
7	2.065–2.346	2.206	–0.35	16.54	0.066496	–0.42	84.90
PAN	0.515–0.896	0.706	–4.7	243.1	0.975591	–5.68	1362
<i>High Gain (LPGS)</i>							
1	0.452–0.514	0.483	–6.2	191.6	0.778740	–6.98	1997
2	0.519–0.601	0.560	–6.4	196.5	0.798819	–7.20	1812
3	0.631–0.692	0.662	–5.0	152.9	0.621654	–5.62	1533
4	0.772–0.898	0.835	–5.1	157.4	0.639764	–5.74	1039
5	1.547–1.748	1.648	–1.0	31.06	0.126220	–1.13	230.8
6	10.31–12.36	11.335	3.2	12.65	0.037205	3.16	N/A
7	2.065–2.346	2.206	–0.35	10.80	0.043898	–0.39	84.90
PAN	0.515–0.896	0.706	–4.7	158.3	0.641732	–5.34	1362

En los cuadros 3.9 a 3.14 se pueden observar conversiones para distintos ND a valores de reflectancia de las imágenes satelitales del 25 de abril y 2 de octubre de 2010 del embalse de Valle de Bravo.

Cuadro 3.9 ND de puntos de muestreo de la campaña del 25 de abril de 2010

Muestra	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 7
1	44	52	45	15	28	22
3	46	59	49	18	31	25
4	47	57	50	18	32	26
6	46	54	49	15	29	24
8	51	59	53	20	34	25
9	48	55	50	16	30	24
10	50	58	52	17	31	0
11	45	55	46	16	0	0
12	45	55	48	15	29	23
13	46	54	45	15	28	23
14	46	53	46	14	28	23
16	42	52	45	14	27	22
17	45	54	44	15	27	22
18	45	55	47	15	28	24
19	40	48	37	12	22	19
21	40	48	41	13	24	21
22	40	48	38	12	25	20
23	42	53	44	14	25	22
24	41	50	43	14	26	20
25	42	49	40	12	23	22
26	38	47	36	11	22	17
27	33	43	33	9	19	14
28	34	45	35	11	18	17
29	34	40	30	9	18	14
30	30	38	28	8	16	13
31	32	41	33	10	20	16
32	36	44	33	11	21	16
33	39	48	40	13	25	19
34	35	43	37	10	21	17
35	39	44	37	13	24	22
36	37	44	35	12	22	18
38	35	42	36	11	22	17
42	29	37	31	10	19	14
43	30	38	30	10	19	11
44	32	38	30	9	18	16
45	30	38	29	9	18	12
46	27	34	26	6	14	10
47	37	42	35	11	21	17
48	40	50	44	15	27	22
49	44	52	44	15	29	22
50	48	55	48	18	32	23

Cuadro 3.10 ND de puntos de muestreo de la campaña del 2 de octubre de 2010

Muestra	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 7
3	16	21	14	4	6	8
4	18	22	15	6	8	7
5	17	20	13	3	6	7
6	15	20	12	3	6	4
7	15	19	12	3	5	6
9	15	18	10	2	4	5
11	15	22	13	3	6	8
13	12	17	10	2	3	7
14	15	17	9	2	3	4
15	18	18	13	4	6	7
16	17	18	12	3	7	7
17	17	20	12	4	6	8
18	18	19	12	3	6	7
19	19	20	15	5	8	8
21	17	20	15	5	6	9
23	16	19	12	4	6	6
24	14	17	11	3	3	5
25	14	17	9	2	6	4
26	16	20	13	5	5	6
27	14	18	9	3	4	5
29	15	19	11	3	5	4
30	19	22	14	5	7	8
31	14	19	12	4	5	8
32	16	20	14	5	6	9
33	18	23	16	5	7	8
34	19	23	16	6	9	10
36	14	20	11	5	6	8
37	17	22	16	6	10	8
38	20	21	18	5	11	7
39	14	17	10	3	5	7
40	13	17	10	3	4	7
41	18	23	17	6	7	9
42	18	23	16	5	8	9
44	15	19	11	4	5	5
45	14	17	10	2	4	5
47	13	18	9	2	3	5
49	20	24	18	6	8	9
50	16	18	13	4	4	6

Cuadro 3.11 *Radiancia de puntos de muestreo de la campaña del 25 de abril de 2010*

Muestra	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 7
1	27.2846	34.3386	22.3544	3.8565	2.4042	0.5758
3	28.8420	39.9303	24.8410	5.7758	2.7828	0.7075
4	29.6208	38.3327	25.4627	5.7758	2.9090	0.7513
6	28.8420	35.9362	24.8410	3.8565	2.5304	0.6636
8	32.7357	39.9303	27.3277	7.0553	3.1615	0.7075
9	30.3995	36.7350	25.4627	4.4962	2.6566	0.6636
10	31.9570	39.1315	26.7060	5.1360	2.7828	-0.3900
11	28.0633	36.7350	22.9761	4.4962	-1.1300	-0.3900
12	28.0633	36.7350	24.2194	3.8565	2.5304	0.6197
13	28.8420	35.9362	22.3544	3.8565	2.4042	0.6197
14	28.8420	35.1374	22.9761	3.2167	2.4042	0.6197
16	25.7271	34.3386	22.3544	3.2167	2.2779	0.5758
17	28.0633	35.9362	21.7328	3.8565	2.2779	0.5758
18	28.0633	36.7350	23.5977	3.8565	2.4042	0.6636
19	24.1696	31.1433	17.3812	1.9372	1.6468	0.4441
21	24.1696	31.1433	19.8678	2.5769	1.8993	0.5319
22	24.1696	31.1433	18.0029	1.9372	2.0255	0.4880
23	25.7271	35.1374	21.7328	3.2167	2.0255	0.5758
24	24.9483	32.7410	21.1111	3.2167	2.1517	0.4880
25	25.7271	31.9421	19.2462	1.9372	1.7731	0.5758
26	22.6121	30.3445	16.7595	1.2974	1.6468	0.3563
27	18.7184	27.1492	14.8946	0.0179	1.2682	0.2246
28	19.4972	28.7469	16.1379	1.2974	1.1420	0.3563
29	19.4972	24.7528	13.0296	0.0179	1.1420	0.2246
30	16.3822	23.1551	11.7863	-0.6219	0.8895	0.1807
31	17.9397	25.5516	14.8946	0.6576	1.3944	0.3124
32	21.0546	27.9480	14.8946	1.2974	1.5206	0.3124
33	23.3909	31.1433	19.2462	2.5769	2.0255	0.4441
34	20.2759	27.1492	17.3812	0.6576	1.5206	0.3563
35	23.3909	27.9480	17.3812	2.5769	1.8993	0.5758
36	21.8334	27.9480	16.1379	1.9372	1.6468	0.4002
38	20.2759	26.3504	16.7595	1.2974	1.6468	0.3563
42	15.6035	22.3563	13.6513	0.6576	1.2682	0.2246
43	16.3822	23.1551	13.0296	0.6576	1.2682	0.0929
44	17.9397	23.1551	13.0296	0.0179	1.1420	0.3124
45	16.3822	23.1551	12.4080	0.0179	1.1420	0.1368
46	14.0460	19.9598	10.5430	-1.9014	0.6371	0.0490
47	21.8334	26.3504	16.1379	1.2974	1.5206	0.3563
48	24.1696	32.7410	21.7328	3.8565	2.2779	0.5758
49	27.2846	34.3386	21.7328	3.8565	2.5304	0.5758
50	30.3995	36.7350	24.2194	5.7758	2.9090	0.6197

Cuadro 3.12 *Radiancia de puntos de muestreo de la campaña del 2 de octubre de 2010*

Muestra	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 7
3	5.4798	9.5752	3.0832	-3.1809	-0.3727	-0.0388
4	7.0373	10.3740	3.7048	-1.9014	-0.1202	-0.0827
5	6.2586	8.7764	2.4615	-3.8207	-0.3727	-0.0827
6	4.7011	8.7764	1.8398	-3.8207	-0.3727	-0.2144
7	4.7011	7.9776	1.8398	-3.8207	-0.4989	-0.1266
9	4.7011	7.1787	0.5965	-4.4605	-0.6251	-0.1705
11	4.7011	10.3740	2.4615	-3.8207	-0.3727	-0.0388
13	2.3649	6.3799	0.5965	-4.4605	-0.7513	-0.0827
14	4.7011	6.3799	-0.0251	-4.4605	-0.7513	-0.2144
15	7.0373	7.1787	2.4615	-3.1809	-0.3727	-0.0827
16	6.2586	7.1787	1.8398	-3.8207	-0.2465	-0.0827
17	6.2586	8.7764	1.8398	-3.1809	-0.3727	-0.0388
18	7.0373	7.9776	1.8398	-3.8207	-0.3727	-0.0827
19	7.8161	8.7764	3.7048	-2.5412	-0.1202	-0.0388
21	6.2586	8.7764	3.7048	-2.5412	-0.3727	0.0051
23	5.4798	7.9776	1.8398	-3.1809	-0.3727	-0.1266
24	3.9224	6.3799	1.2182	-3.8207	-0.7513	-0.1705
25	3.9224	6.3799	-0.0251	-4.4605	-0.3727	-0.2144
26	5.4798	8.7764	2.4615	-2.5412	-0.4989	-0.1266
27	3.9224	7.1787	-0.0251	-3.8207	-0.6251	-0.1705
29	4.7011	7.9776	1.2182	-3.8207	-0.4989	-0.2144
30	7.8161	10.3740	3.0832	-2.5412	-0.2465	-0.0388
31	3.9224	7.9776	1.8398	-3.1809	-0.4989	-0.0388
32	5.4798	8.7764	3.0832	-2.5412	-0.3727	0.0051
33	7.0373	11.1728	4.3265	-2.5412	-0.2465	-0.0388
34	7.8161	11.1728	4.3265	-1.9014	0.0060	0.0490
36	3.9224	8.7764	1.2182	-2.5412	-0.3727	-0.0388
37	6.2586	10.3740	4.3265	-1.9014	0.1322	-0.0388
38	8.5948	9.5752	5.5698	-2.5412	0.2584	-0.0827
39	3.9224	6.3799	0.5965	-3.8207	-0.4989	-0.0827
40	3.1436	6.3799	0.5965	-3.8207	-0.6251	-0.0827
41	7.0373	11.1728	4.9481	-1.9014	-0.2465	0.0051
42	7.0373	11.1728	4.3265	-2.5412	-0.1202	0.0051
44	4.7011	7.9776	1.2182	-3.1809	-0.4989	-0.1705
45	3.9224	6.3799	0.5965	-4.4605	-0.6251	-0.1705
47	3.1436	7.1787	-0.0251	-4.4605	-0.7513	-0.1705
49	8.5948	11.9717	5.5698	-1.9014	-0.1202	0.0051
50	5.4798	7.1787	2.4615	-3.1809	-0.6251	-0.1266

Cuadro 3.13 *Reflectancia de puntos de muestreo de la campaña del 25 de abril de 2010*

Muestra	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 7
1	0.1366	0.1895	0.1458	0.0371	0.1041	0.0678
3	0.1444	0.2203	0.1620	0.0556	0.1205	0.0833
4	0.1483	0.2115	0.1661	0.0556	0.1260	0.0885
6	0.1444	0.1983	0.1620	0.0371	0.1096	0.0781
8	0.1639	0.2203	0.1782	0.0679	0.1369	0.0833
9	0.1522	0.2027	0.1661	0.0433	0.1151	0.0781
10	0.1600	0.2159	0.1742	0.0494	0.1205	-0.0459
11	0.1405	0.2027	0.1498	0.0433	-0.0489	-0.0459
12	0.1405	0.2027	0.1579	0.0371	0.1096	0.0730
13	0.1444	0.1983	0.1458	0.0371	0.1041	0.0730
14	0.1444	0.1939	0.1498	0.0310	0.1041	0.0730
16	0.1288	0.1895	0.1458	0.0310	0.0987	0.0678
17	0.1405	0.1983	0.1417	0.0371	0.0987	0.0678
18	0.1405	0.2027	0.1539	0.0371	0.1041	0.0781
19	0.1210	0.1718	0.1134	0.0186	0.0713	0.0523
21	0.1210	0.1718	0.1296	0.0248	0.0823	0.0626
22	0.1210	0.1718	0.1174	0.0186	0.0877	0.0575
23	0.1288	0.1939	0.1417	0.0310	0.0877	0.0678
24	0.1249	0.1806	0.1377	0.0310	0.0932	0.0575
25	0.1288	0.1762	0.1255	0.0186	0.0768	0.0678
26	0.1132	0.1674	0.1093	0.0125	0.0713	0.0420
27	0.0937	0.1498	0.0971	0.0002	0.0549	0.0264
28	0.0976	0.1586	0.1052	0.0125	0.0495	0.0420
29	0.0976	0.1366	0.0850	0.0002	0.0495	0.0264
30	0.0820	0.1278	0.0769	-0.0060	0.0385	0.0213
31	0.0898	0.1410	0.0971	0.0063	0.0604	0.0368
32	0.1054	0.1542	0.0971	0.0125	0.0659	0.0368
33	0.1171	0.1718	0.1255	0.0248	0.0877	0.0523
34	0.1015	0.1498	0.1134	0.0063	0.0659	0.0420
35	0.1171	0.1542	0.1134	0.0248	0.0823	0.0678
36	0.1093	0.1542	0.1052	0.0186	0.0713	0.0471
38	0.1015	0.1454	0.1093	0.0125	0.0713	0.0420
42	0.0781	0.1233	0.0890	0.0063	0.0549	0.0264
43	0.0820	0.1278	0.0850	0.0063	0.0549	0.0109
44	0.0898	0.1278	0.0850	0.0002	0.0495	0.0368
45	0.0820	0.1278	0.0809	0.0002	0.0495	0.0161
46	0.0703	0.1101	0.0688	-0.0183	0.0276	0.0058
47	0.1093	0.1454	0.1052	0.0125	0.0659	0.0420
48	0.1210	0.1806	0.1417	0.0371	0.0987	0.0678
49	0.1366	0.1895	0.1417	0.0371	0.1096	0.0678
50	0.1522	0.2027	0.1579	0.0556	0.1260	0.0730

Cuadro 3.14 Reflectancia de puntos de muestreo de la campaña del 2 de octubre de 2010

Muestra	B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 7
3	0.0386	0.0743	0.0283	-0.0431	-0.0227	-0.0064
4	0.0496	0.0805	0.0340	-0.0257	-0.0073	-0.0137
5	0.0441	0.0681	0.0226	-0.0517	-0.0227	-0.0137
6	0.0331	0.0681	0.0169	-0.0517	-0.0227	-0.0355
7	0.0331	0.0619	0.0169	-0.0517	-0.0304	-0.0210
9	0.0331	0.0557	0.0055	-0.0604	-0.0381	-0.0283
11	0.0331	0.0805	0.0226	-0.0517	-0.0227	-0.0064
13	0.0167	0.0495	0.0055	-0.0604	-0.0458	-0.0137
14	0.0331	0.0495	-0.0002	-0.0604	-0.0458	-0.0355
15	0.0496	0.0557	0.0226	-0.0431	-0.0227	-0.0137
16	0.0441	0.0557	0.0169	-0.0517	-0.0150	-0.0137
17	0.0441	0.0681	0.0169	-0.0431	-0.0227	-0.0064
18	0.0496	0.0619	0.0169	-0.0517	-0.0227	-0.0137
19	0.0551	0.0681	0.0340	-0.0344	-0.0073	-0.0064
21	0.0441	0.0681	0.0340	-0.0344	-0.0227	0.0008
23	0.0386	0.0619	0.0169	-0.0431	-0.0227	-0.0210
24	0.0276	0.0495	0.0112	-0.0517	-0.0458	-0.0283
25	0.0276	0.0495	-0.0002	-0.0604	-0.0227	-0.0355
26	0.0386	0.0681	0.0226	-0.0344	-0.0304	-0.0210
27	0.0276	0.0557	-0.0002	-0.0517	-0.0381	-0.0283
29	0.0331	0.0619	0.0112	-0.0517	-0.0304	-0.0355
30	0.0551	0.0805	0.0283	-0.0344	-0.0150	-0.0064
31	0.0276	0.0619	0.0169	-0.0431	-0.0304	-0.0064
32	0.0386	0.0681	0.0283	-0.0344	-0.0227	0.0008
33	0.0496	0.0867	0.0397	-0.0344	-0.0150	-0.0064
34	0.0551	0.0867	0.0397	-0.0257	0.0004	0.0081
36	0.0276	0.0681	0.0112	-0.0344	-0.0227	-0.0064
37	0.0441	0.0805	0.0397	-0.0257	0.0081	-0.0064
38	0.0605	0.0743	0.0511	-0.0344	0.0157	-0.0137
39	0.0276	0.0495	0.0055	-0.0517	-0.0304	-0.0137
40	0.0221	0.0495	0.0055	-0.0517	-0.0381	-0.0137
41	0.0496	0.0867	0.0454	-0.0257	-0.0150	0.0008
42	0.0496	0.0867	0.0397	-0.0344	-0.0073	0.0008
44	0.0331	0.0619	0.0112	-0.0431	-0.0304	-0.0283
45	0.0276	0.0495	0.0055	-0.0604	-0.0381	-0.0283
47	0.0221	0.0557	-0.0002	-0.0604	-0.0458	-0.0283
49	0.0605	0.0929	0.0511	-0.0257	-0.0073	0.0008
50	0.0386	0.0557	0.0226	-0.0431	-0.0381	-0.0210

Regresión lineal múltiple

Una vez obtenidos los valores de reflectancia para cada una de las bandas en todos los puntos de muestreo tendremos los datos necesarios para comenzar el proceso estadístico de generación de los modelos, mediante regresiones lineales.

Debido a que la información contenida en las imágenes multiespectrales se encuentra en cada una de las bandas que las conforman, se requiere de la regresión múltiple para incluir la información presente en cada una de estas bandas.

Un modelo de regresión lineal múltiple consiste en relacionar una serie de variables explicativas con una variable dependiente para poder estimarla. Es decir, se utiliza para examinar la relación entre una variable dependiente cuyo valor se conoce en un cierto número de localizaciones, y un sistema de variables independientes cuyos valores también son conocidos para esas mismas localizaciones.

La forma de un modelo de regresión lineal múltiple es:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad \dots (3.9)$$

En donde:

Y es la variable dependiente

β_i son los coeficientes de cada una de las variables explicativas (coeficientes de regresión)

x_i son las propias variables explicativas

Este modelo tiene la forma de combinación lineal de los predictores y sus coeficientes. A pesar de su forma relativamente simple, es una herramienta muy flexible y utilizada en el estudio de muchos fenómenos y, a través de él, es posible expresar con diferentes grados de exactitud la forma en que varía el valor de salida (o dependiente) con los cambios de los predictores (o variables explicativas) (Vittinghoff, et al. 2005).

Se recomienda realizar pruebas con diversas combinaciones de datos de ingreso (bandas) para encontrar los modelos de regresión lineal más adecuados. Una forma de hacerlo es utilizar regresiones por pasos atrasadas para encontrar las bandas que son significativas, para posteriormente, realizar regresiones múltiples lineales sólo para las bandas con información significativa.

Las regresiones por pasos atrasadas comienzan al examinar el efecto combinado de todas las posibles o probables variables explicativas que intervengan en un fenómeno (variable dependiente). Posteriormente, las variables explicativas se van eliminando una a una para encontrar las que tienen mayor relevancia en la relación. Así se puede conocer cuál es la aportación de cada una de las variables explicativas respecto a las otras en la predicción de la variable dependiente.

Validación de los modelos

Existen distintas técnicas y criterios comparativos para validar un modelo de regresión. Para este trabajo, se eligió el Índice de Concordancia, propuesto por (Willmott, 1981). Dicho índice refleja una relación entre la variable aleatoria observada y la variable aleatoria simulada. El índice de concordancia no es una medida de correlación o asociación en el sentido formal, sino más bien una medida del grado en que las predicciones de un modelo están libres de errores. Al mismo tiempo, es una medida normalizada a fin de que pueda ser fácilmente interpretada y se puedan hacer fácilmente comparaciones entre sus magnitudes para una variedad de modelos, independientemente de las unidades.

Varía entre 0,0 y 1,0, en donde un valor calculado de 1,0 indica una concordancia perfecta entre las observaciones predichas (P) y las observadas (O), y 0,0 implica que uno de los dos es completamente diferente.

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| - |O'_i|)^2} \quad \dots (3.10)$$

Donde $P'_i = P_i - \bar{O}$ y $O'_i = O_i - \bar{O}$, IC especifica el grado en que las desviaciones observadas respecto a \bar{O} corresponden, tanto en magnitud como en signo, a las desviaciones predichas sobre \bar{O} . Se asume que las porciones de las magnitudes de P_i y O_i que son equivalentes a \bar{O} no están en error, ya que \bar{O} se considera que está libre de errores. Todo el potencial de error, en otras palabras, se supone que se contiene en P_i y O_i , o más específicamente, en la distancia de cada P_i a O_i cada .

Se sugiere que la magnitud de d se evalúe principalmente con base en el conocimiento acerca de (1) los fenómenos que se estudian, (2) modelo de datos o la exactitud de medición, (3) el procedimiento de simulación o modelos geográficos empleados, y (4) la sensibilidad de la estadística descriptiva para comparar las variables observadas y previstas.

Generación de los modelos

Un criterio para seleccionar el modelo más adecuado es basarse en que el índice de concordancia sea el máximo y que el número de bandas utilizadas sea el mínimo.

Para el caso del proyecto PAPIIT, los modelos que presentaron las características más adecuadas se presentan en las ecuaciones 3.10, 3.11 y 3.12.

Índice de Estado Tráfico:

$$IET = 51.466 - 92.645 \cdot B_1 + 53.9 \cdot B_2 + 75.42 \cdot B_3 \quad \dots (3.11)$$

Índice de concordancia: 0.873

Turbiedad:

$$Turb = 2.808 + 42.961 \cdot B_2 + 1.994 \cdot B_4 \quad \dots (3.12)$$

Índice de concordancia: 0.893

Sólidos Disueltos Totales:

$$SDT = 92.218 + 102.538 \cdot B_2 + 5.919 \cdot \frac{B_4}{B_2} \quad \dots (3.13)$$

Índice de concordancia: 0.896

3.13 Generación de mapas de calidad

Los modelos de calidad definidos para los parámetros de interés son útiles para generar mapas de calidad para cualquier imagen del embalse, obtenida a partir del mismo sensor, aplicando los modelos a cada pixel que quede dentro del embalse.

Para realizar esto, se efectúa la conversión de ND de todos los pixeles del embalse a valores de reflectancia en las 4 primeras bandas, ya que el resto (bandas 5 y 7) no están incluidas en los modelos generados.

Con las imágenes corregidas radiométricamente, es posible generar una imagen en donde estén mapeados los valores que se obtienen al aplicar el modelo para cada parámetro al embalse. Para facilitar la visualización de los resultados gráficos del modelo, es recomendable desplegar cada uno de los mapas con una paleta de colores adecuada.

Los resultados del procedimiento anteriormente descrito se muestran de la Figura 3.38 a la Figura 3.46 para tres campañas de muestreo.

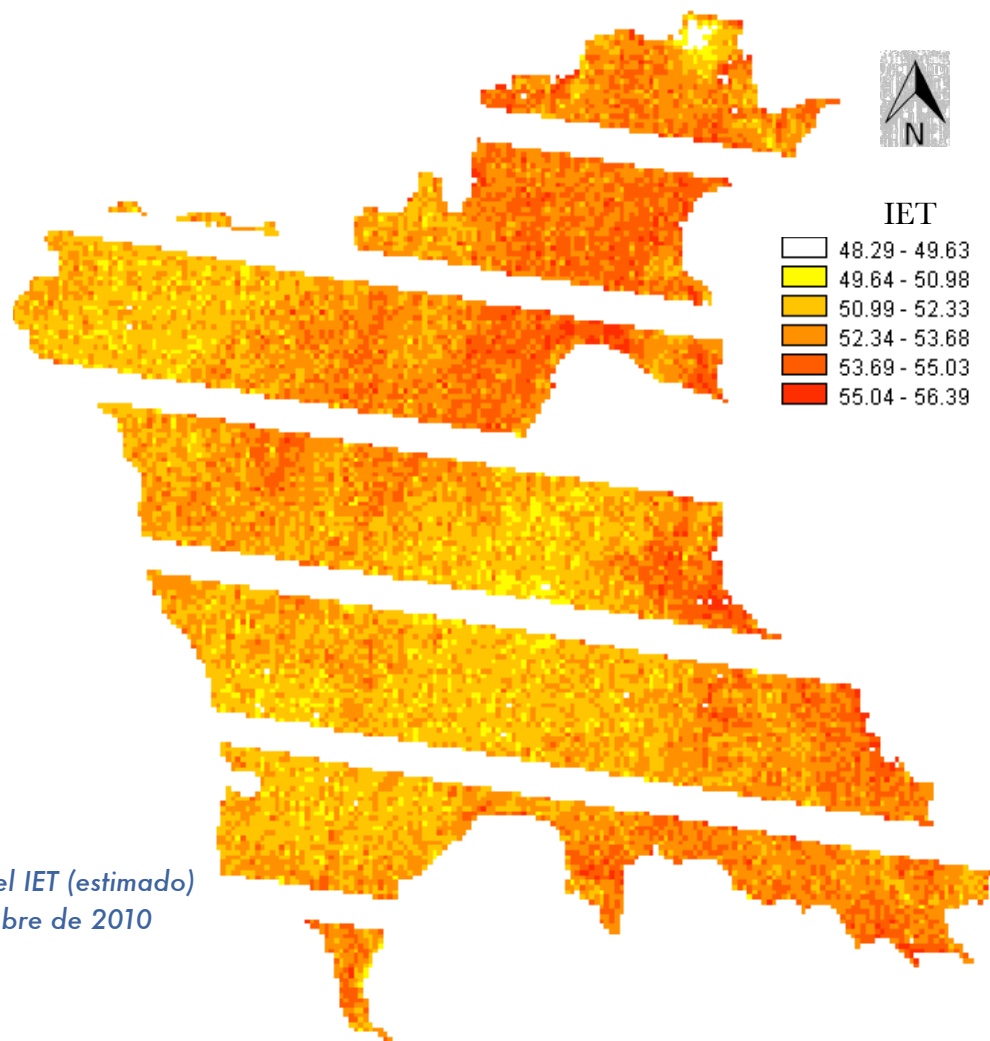


Figura 3.38 Mapa del IET (estimado) para el 2 de octubre de 2010

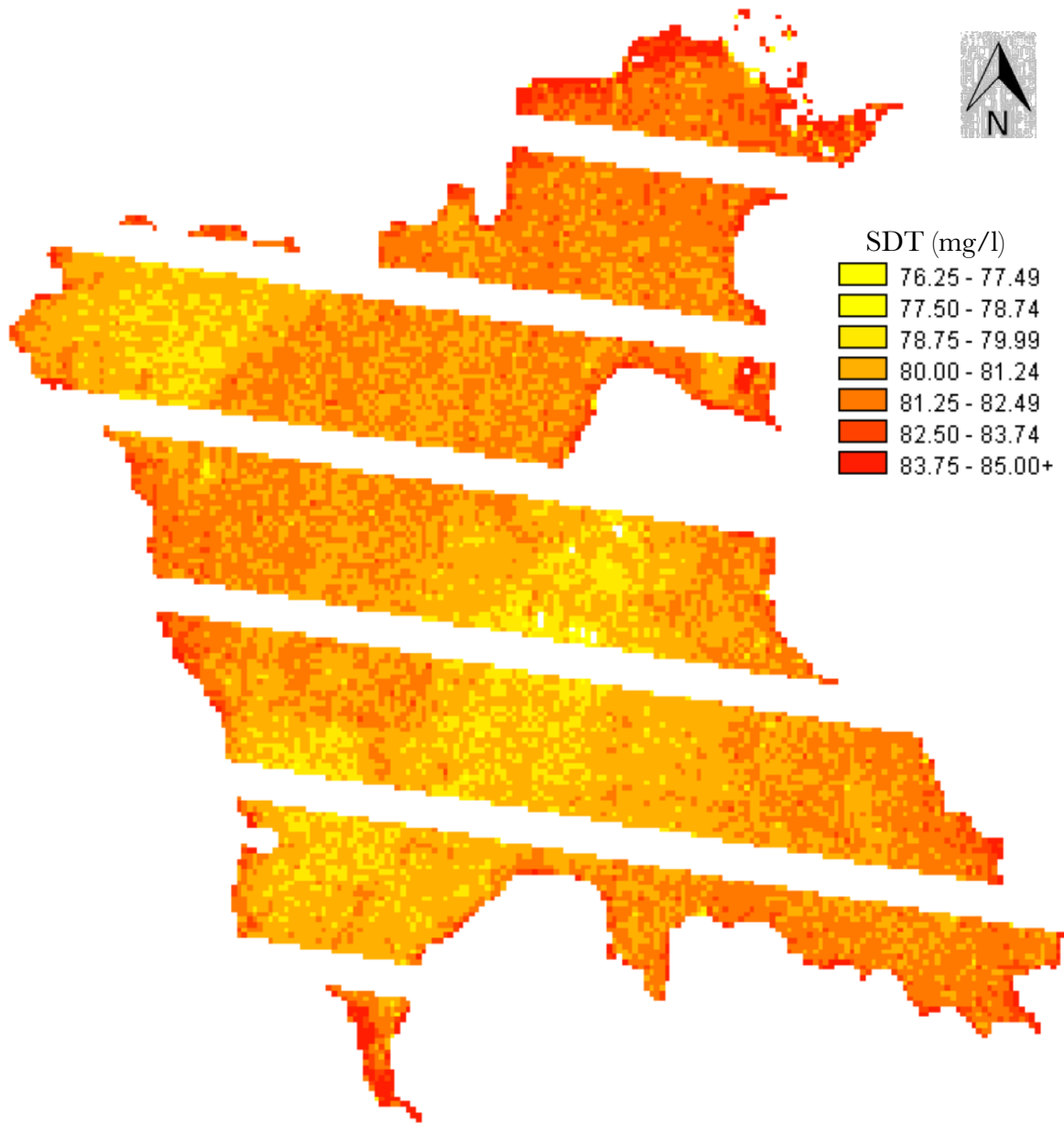


Figura 3.39 Mapa de SDT (estimados) para el 2 de octubre de 2010

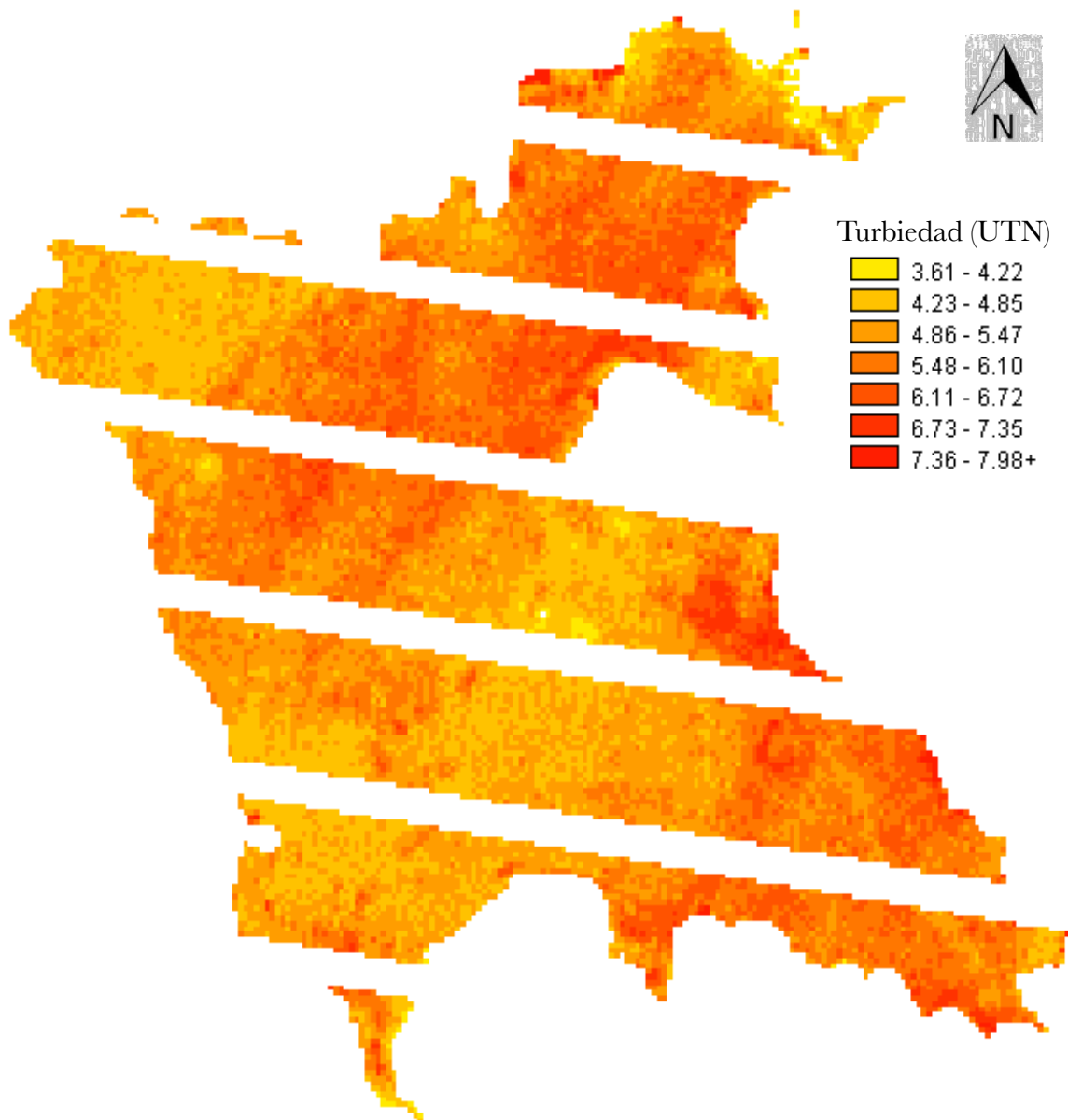


Figura 3.40 Mapa de Turbiedad (estimada) para el 2 de octubre de 2010

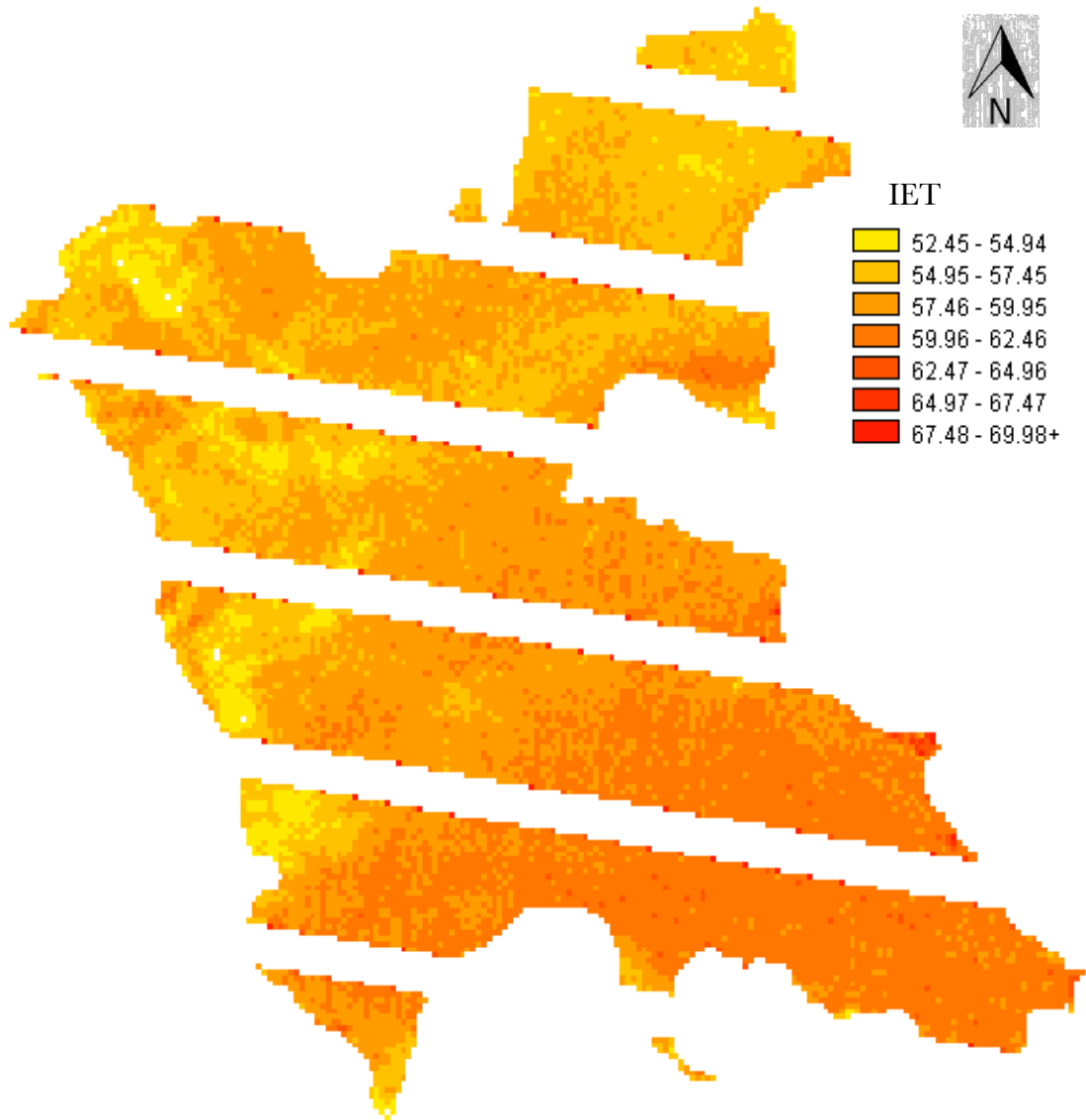


Figura 3.41 Mapa del IET (estimado) para el 25 de abril de 2010

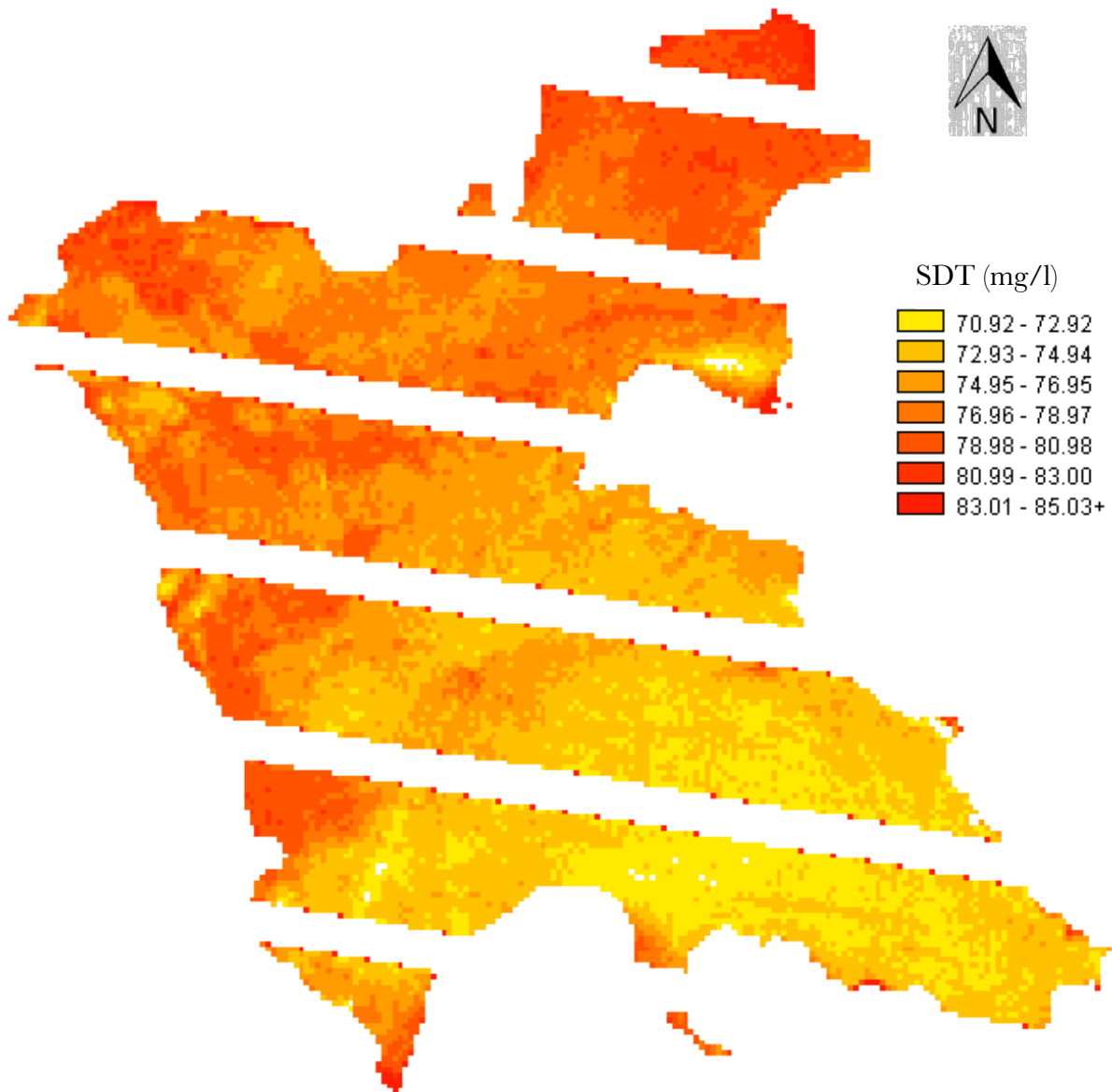


Figura 3.42 Mapa de SDT (estimados) para el 25 de abril de 2010

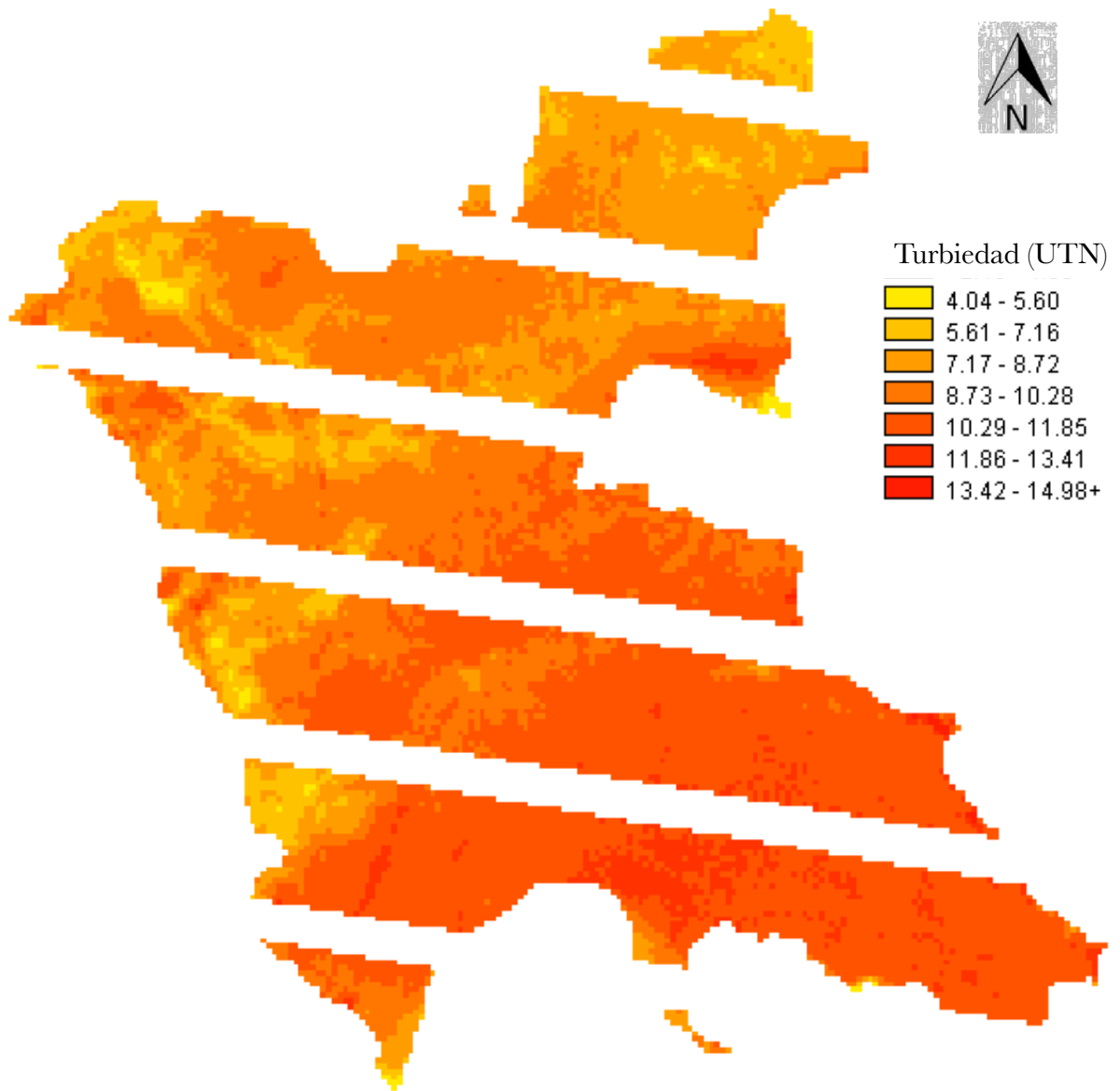


Figura 3.43 Mapa de Turbiedad (estimada) para el 25 de abril de 2010

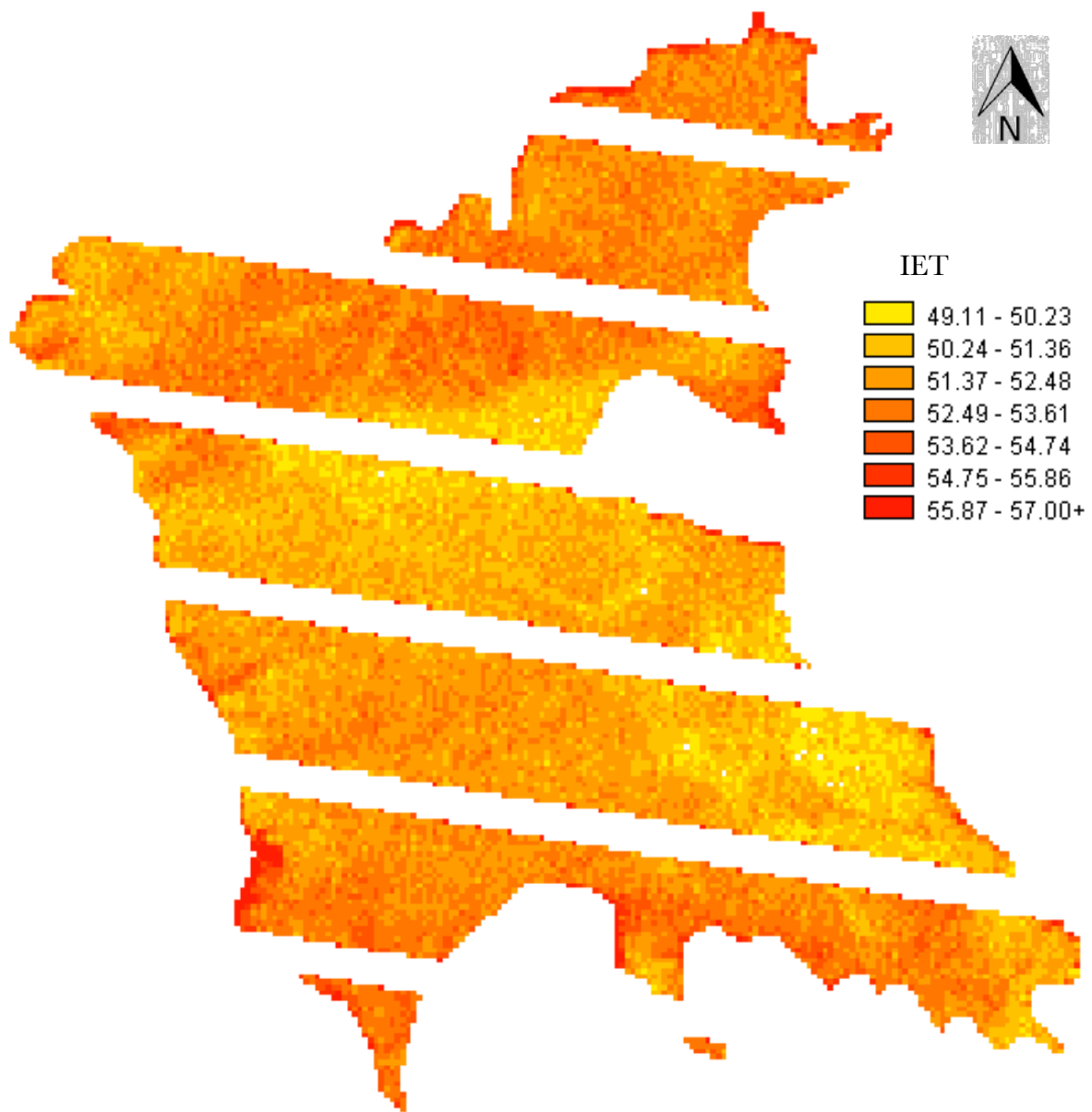


Figura 3.44 Mapa del IET (estimado) para el 27 de marzo de 2011

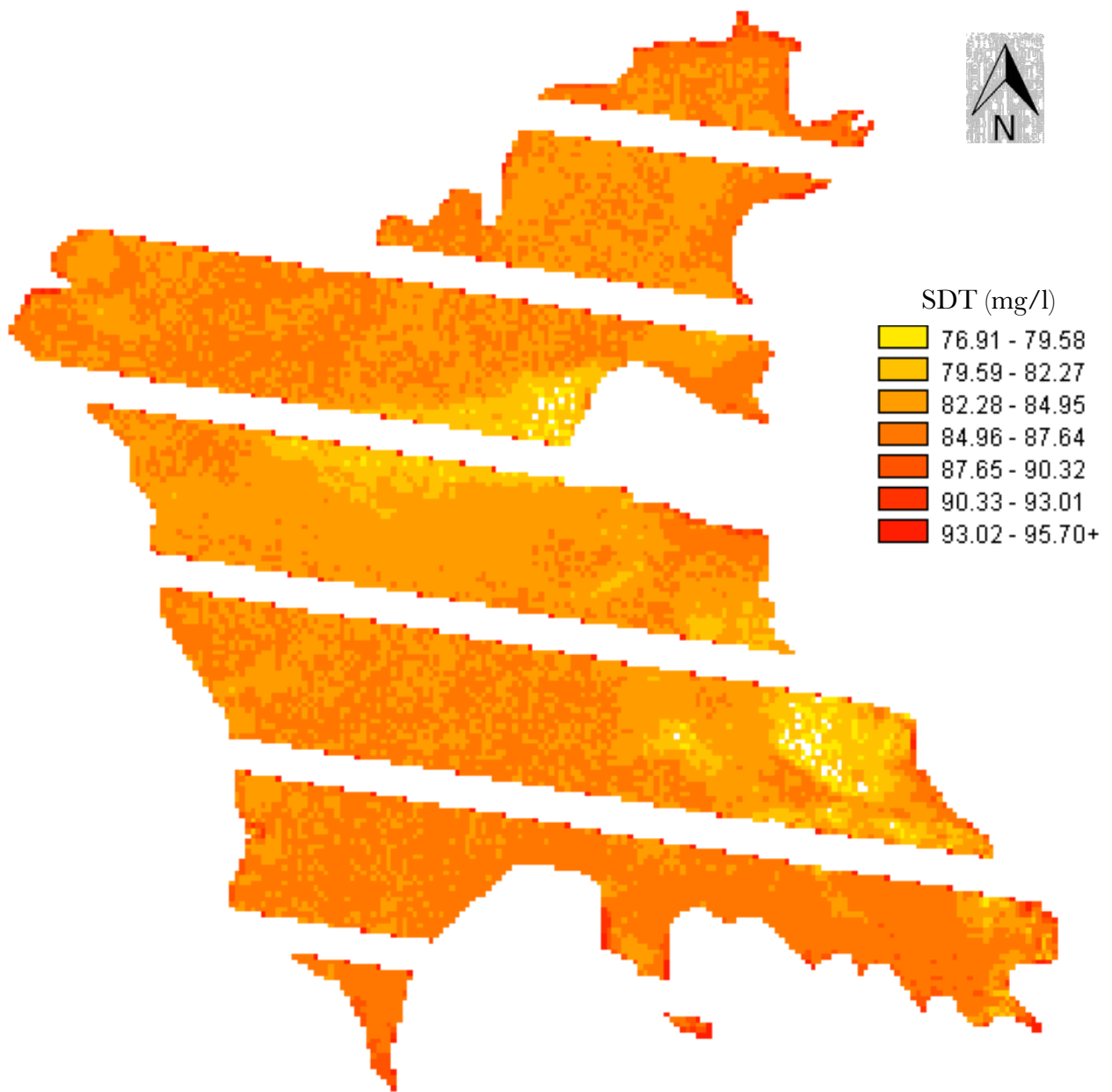


Figura 3.45 Mapa de SDT (estimados) para el 27 de marzo de 2011

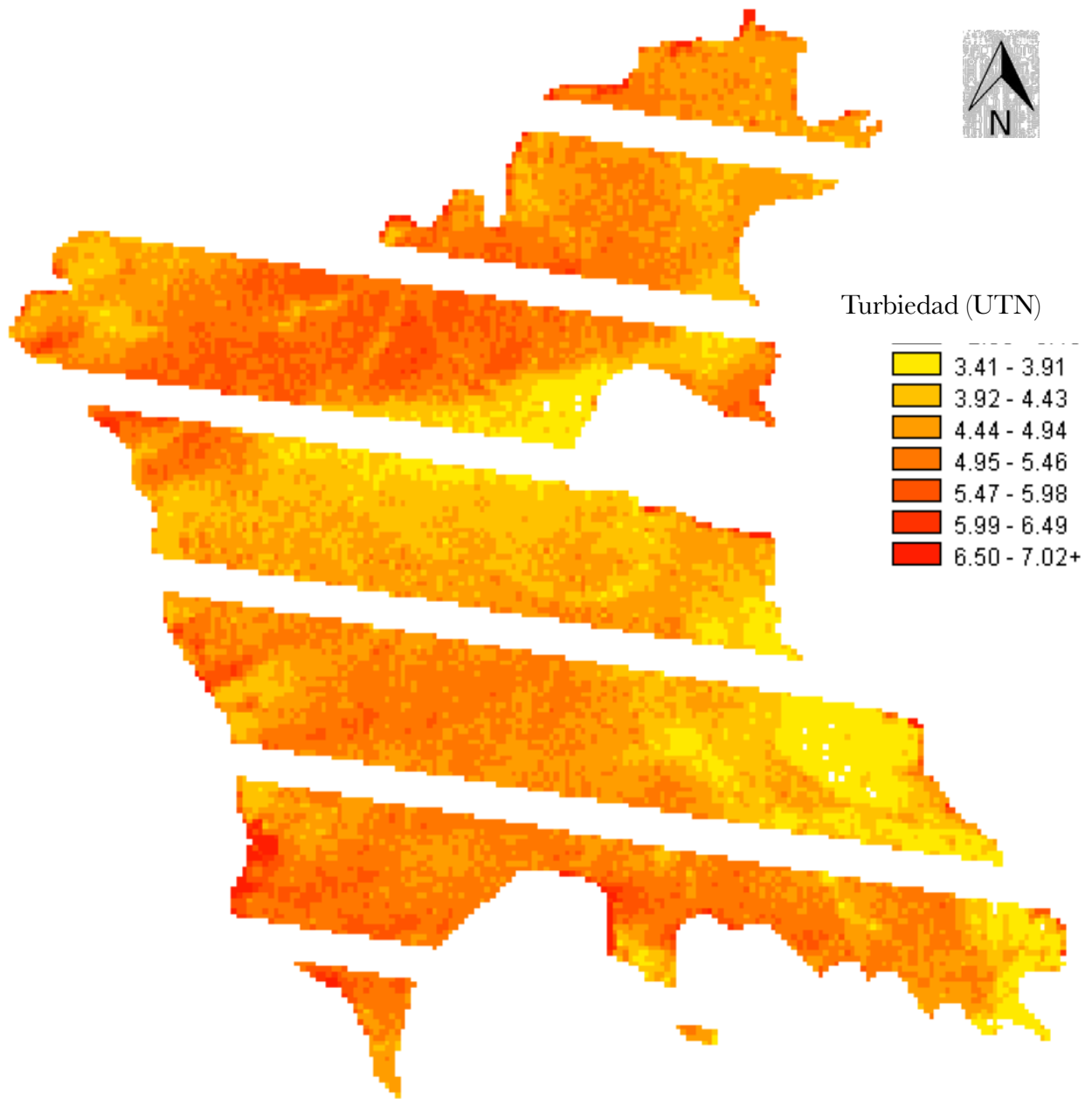


Figura 3.46 Mapa de Turbiedad (estimada) para el 27 de marzo de 2011

3.14 Comprobación de los modelos

Para comprobar los modelos obtenidos se recomienda realizar una visita de campo después de generarlos para conocer la exactitud que presenta el modelo frente a la realidad. Lo anterior se logra comparando los datos observados en campo con los valores estimados por el modelo. En los cuadros 3.15, 3.16 y 3.17 se muestra la comparación mencionada, para la campaña de muestreo realizada el día 27 de marzo del año 2011.

Cuadro 3.15 Estimación del IET para campaña del 27 de marzo de 2011

Muestra	IET medido	IET estimado	% error
1	51.681	50.461	2.36
3	50.365	52.216	3.67
4	50.291	52.728	4.85
5	49.091	49.750	1.34
6	50.816	51.983	2.30
7	50.000	51.917	3.83
9	49.714	51.917	4.43
10	50.514	53.295	5.51
13	48.173	52.363	8.70
15	49.574	52.433	5.77
16	49.024	51.482	5.01
17	48.757	50.767	4.12
19	47.984	50.185	4.59
20	47.551	50.977	7.21
22	48.823	50.399	3.23
23	47.984	53.314	11.11
25	50.000	51.781	3.56
26	50.893	53.447	5.02
27	50.439	54.227	7.51
29	51.282	49.905	2.68
30	50.589	53.947	6.64
32	49.434	52.798	6.80
33	52.009	52.930	1.77
35	53.865	53.225	1.19
36	53.219	52.927	0.55
38	54.739	52.061	4.89
39	53.040	50.833	4.16
40	54.055	51.412	4.89
41	51.600	51.987	0.75
42	51.440	50.030	2.74
43	49.365	52.426	6.20
44	51.681	51.346	0.65
45	51.681	52.565	1.71
46	51.600	51.567	0.06
48	51.681	50.833	1.64
49	52.176	50.115	3.95
50	52.260	50.682	3.02

El error promedio es del 4.01%

Cuadro 3.16 *Estimación de SDT para campaña del 27 de marzo de 2011*

Muestra	SDT medido	SDT estimado	% error
1	77	79.627	3.41
3	82	85.082	3.76
4	82	84.808	3.42
5	83	80.742	2.72
6	81	83.702	3.34
7	84	84.392	0.47
9	84	84.392	0.47
10	83	84.594	1.92
13	83	84.808	2.18
15	83	83.957	1.15
16	85	83.543	1.71
17	84	83.716	0.34
19	86	82.763	3.76
20	85	80.742	5.01
22	84	80.199	4.52
23	82	83.508	1.84
25	84	84.371	0.44
26	82	84.099	2.56
27	83	83.046	0.06
29	83	84.636	1.97
30	83	83.092	0.11
32	84	83.321	0.81
33	85	83.321	1.98
35	84	83.303	0.83
36	85	83.303	2.00
38	86	83.716	2.66
39	86	83.716	2.66
40	85	83.798	1.41
41	82	83.508	1.84
42	83	79.627	4.06
43	82	83.716	2.09
44	84	83.798	0.24
45	83	83.321	0.39
46	85	84.055	1.11
48	83	83.716	0.86
49	83	82.123	1.06
50	84	82.763	1.47

El error promedio es del 1.91%

Cuadro 3.17 *Estimación de la Turbiedad para campaña del 27 de marzo de 2011*

Muestra	Turbiedad medida	Turbiedad estimada	% error
1	4.50	3.85	27.19
3	5.00	5.50	17.34
4	5.60	5.26	9.65
5	4.90	4.07	29.52
6	4.70	5.47	29.75
7	5.20	5.49	9.30
9	5.80	5.49	8.43
10	5.20	5.73	17.06
13	4.70	5.26	21.62
15	5.20	5.71	16.59
16	4.60	5.01	16.27
17	4.80	4.78	0.71
19	4.80	4.54	9.62
20	5.00	4.07	31.95
22	5.20	4.28	29.52
23	4.80	5.94	42.23
25	5.90	5.02	23.12
26	4.70	5.95	48.26
27	5.10	6.17	35.54
29	4.80	4.80	0.17
30	5.10	6.41	43.56
32	5.60	5.70	2.84
33	5.70	5.70	0.01
35	6.30	5.23	25.41
36	5.90	5.23	17.56
38	5.60	4.78	23.40
39	5.80	4.78	27.54
40	5.60	4.55	29.86
41	5.30	5.94	20.01
42	5.00	3.85	39.74
43	4.70	4.78	3.11
44	4.90	4.55	12.33
45	6.00	5.70	7.70
46	4.50	5.25	31.15
48	6.80	4.78	42.96
49	4.80	4.09	26.36
50	4.80	4.54	9.62

El error promedio es del 21.27%

BIBLIOGRAFÍA

Aldalur, B., and M. Santamaría. «Realce de imágenes: filtrado espacial.» *Revista de Teledetección*, no. 17 (2002): 31-42.

Álvarez, José Antonio, Francisco Zarazaga, Miguel Latre, Rubén Béjar, and Pedro Muro. “Water quality monitoring based on sediment distribution using satellite imagery.” 9th AGILE Conference on Geographic Information Science. Visegrád, 2006. 144-150.

Arbelo, Manuel. “Tutorial de Teledetección.” Página personal del Doctor Arbelo. 2004. <http://webpages.ull.es/users/marbelo/rs1.pdf> (accessed 2009 йил 15-noviembre).

Baban, S.M.J. “Environmental Monitoring of Estuaries; Estimating and Mapping Various Environmental Indicators in Breydon Water Estuary, U.K., Using Landsat TM Imagery.” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, no. 44 (1997): 589-598.

Baban, Serwan M.J. “The use of Landsat imagery to map fluvial sediment discharge into coastal waters.” *Marine Geology (Elsevier)*, no. 123 (1995): 263-270.

Braga, Claudia Z. F. “Water Quality Assessment with Simultaneous Landsat-5 TM Data at Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil.” *Remote Sensing of Environment*, no. 45 (1993): 95-106.

Brezonik, Patrick. “Landsat-based Remote Sensing of Lake Water Quality Characteristics, Including Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM).” *Lake and Reservoir Management (North American Lake Management Society)* 4, no. 21 (2005): 373-382.

Brivio, P.A. “Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images.” *International Journal of Remote Sensing* 22, no. 2 (2001): 487-502.

Carlson, Robert. “A trophic state index for lakes.” *Limnology and Oceanography* 22, no. 2 (1977): 361-369.

Carpenter, D.J. “Modeling Inland Water Quality Using Landsat Data.” *Remote Sensing of Environment*, no. 13 (1983): 345-352.

Cetto, Ana María. *La Luz en la Naturaleza y el Laboratorio*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 1996.

Chander, Gyanesh. «Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors.» *Remote Sensing of Environment (Elsevier)*, no. 113 (2009): 893–903.

CONAGUA, Organismo del Agua del Estado de México. Comisión de cuenca Valle de Bravo – Amanalco. Consultado en febrero de 2011.

CONAGUA. Plan para la Gestión Integral del Agua y Recursos Asociados de la Cuenca Valle de Bravo, Estado de México. CONAGUA, 2005.

CONAGUA. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Edición 2010. MÉXICO, D.F.: SEMARNAT, 2010.

Cortés Morales, Roberto Salvador. “Evaluación de la calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo.” (Tesis de licenciatura en Biología), UNAM. Facultad de Ciencias. 2002

de Broglie, Louis-Victor. Recherches sur la théorie des quanta. Reed. 1992. París: Masson, 1924.

de Jong, Steven. Remote Sensing Image Analysis, Including the Spatial Domain. New York: Springer Science, 2005.

Dekker, A.G. “Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes.” *The Science of the Total Environment*, no. 268 (2001): 197-214.

Elachi, Charles, and Jakob van Zyl. Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing. 2a Edición. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

Fraser, R.N. “Multispectral remote sensing of turbidity among Nebraska Sand Hills lakes.” *International Journal of Remote Sensing* 19, no. 15 (1998): 3011-3016.

Gervin, Janette. “Landsat investigation of water quality in lake Okeechobee.” ASP-ACSM Convention . Washington, D.C., 1977. 1-35.

Giardino, Claudia. “Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery.” *The Science of the Total Environment*, no. 268 (2001): 19-29.

Hadjimitsis, Diofantos. “Assessment of temporal variations of water quality in inland water bodies using atmospheric corrected satellite remotely sensed image data.” *Environmental Monitoring and Assessment (Springer Science)*, no. 159 (2009): 281-292.

Hellweger, F.L. “Use of satellite imagery of water quality studies in New York Harbor.” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, no. 61 (2004): 437-448.

Hernández, Juan Francisco. “Aplicación de técnicas de teledetección al estudio de la turbidez de las aguas litorales en la costa oriental de gran canaria mediante un modelo teórico.” *Aplicación de técnicas de teledetección al estudio de la turbidez de las aguas litorales en la costa oriental de gran canaria mediante un modelo teórico*, no. 7 (2003): 229-240.

Indian Space Research . ISRO. 2011. <http://www.isro.org/> (accessed 20 de Mayo de 2011).

Kemp, Karen. Encyclopedia of geographic information science. California: SAGE Publications, Inc., 2008.

Kloiber, Steven. "A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data." Remote Sensing of Environment (Elsevier), no. 82 (2002): 38-47.

Martínez, Ma. Concepción. "Percepción de los usos, prácticas y representaciones en torno al agua. El caso de Valle de Bravo, México." XIII CONGRESO DE HISTORIA ECONÓMICA. Buenos Aires, Argentina, 2002. 1-23.

Menéndez Martínez, Carlos Manuel. "Estudios de calidad del agua". Curso de Administración de la Calidad del Agua. UNAM, México D.F.

Mota, Karina. "Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo". México, D.F.: UNAM, 2011.

Nas, Bilgehan. "An Application of Landsat-5TM Image Data for Water Quality Mapping in Lake Beysehir, Turkey." Water Air Soil Pollution, 2010.

NMX-AA-014-1980. Cuerpos receptores.- muestreo

NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.

NMX-AA-004-SCFI-2000. Análisis de agua – Determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.

NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas – Método de prueba.

NMX-AA-042-1987. Calidad del agua determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichiacoli presuntiva.

NMX-AA-102-SCFI-2006. Calidad del agua detección y enumeración organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y Escherichiacoli presuntiva – Método de filtración en membrana.

NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua – Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba.

NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

NOM-003-SEMARNAT-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Ley de Aguas Nacionales

Olgún Ortiz, Miriam. *Fotografía del siglo XIX, principios del XX, Mujeres Productoras*. D.F.: UNAM, ENAP, 2008.

Olmanson, Leif. "Use of Landsat Imagery to develop a Water Quality Atlas of Minnesota's 10,000 Lakes." Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS. Minnesota: University of Minnesota, 2002.

Pacholczyk, Philippe. «Spot Satellite Family: Past, Present and Future of the Operations in the Mission and Control Center.» 1993: 81-86.

Rees, Gareth. *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

Richards, John A., and Xiuping Jia. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Cuarta edición. Springer, 2006.

Roldán Pérez, Gabriel Alfonso y Ramírez Restrepo, John Jairo. *Fundamentos de limnología neotropical*. 2da Edición.

Ruiz, Ma. del Rosío. *Análisis multitemporal de atributos y zonificación de áreas de inundación utilizando técnicas de percepción remota* (Tesis doctoral). México, D.F.: UNAM, 2002.

Schott, John. *Remote Sensing: The Image Chain Approach*. Segunda edición. New York: Oxford University Press, 2007.

Schowengerdt, Robert. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. San Diego, California: Elsevier, 2007.

Sepúlveda, Rodrigo. "Diseño de Modelos de Calidad del Agua Mediante el Uso de la Percepción Remota" Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, UNAM, México, D.F., 2011.

Tebbutt T. H. Y. *Fundamentos de Control de Calidad del Agua*. Tercera edición, Limusa, México. 1996

Vázquez, Alba. "Evaluación de la Calidad del Agua Mediante Percepción Remota." Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería, UNAM, México, D.F., 2000.

Vázquez, Alba. "Manual de prácticas de laboratorio de ingeniería sanitaria y ambiental." Facultad de Ingeniería. UNAM, México, D.F., 2006

Vittinghoff, Eric, Stephen Shiboski, David Glidden, and Charles McCulloch. *Statistics for Biology and Health*. San Francisco: Springer Science, 2005.

Wang, F., y L. Han. "Applications of Landsat-5 TM imagery in assessing and mapping water quality in Reelfoot Lake, Tennessee." *International Journal of Remote Sensing* 27, no. 23 (2006): 5269–5283.

Wolf, Paul, y Russell Brinker. *Topografía*. 9a edición. Bogotá: Alfaomega, 2001.

Zhang, Yuanzhi. "Surface Water Quality Estimation Using Remote Sensing in the Gulf of Finland and the Finnish Archipelago Sea." Thesis for the degree of Doctor of Science in Technology, Department of Electrical and Communications Engineering, Helsinki University of Technology Laboratory of Space Technology, Espoo, Finland, 2005.



Evaluación de la calidad del agua mediante técnicas de percepción remota, se publicó el 17 de enero de 2022 en la página de la Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, México, Ciudad de México. C.P. 04510