



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES SATELITALES PARA
CONOCER LA CALIDAD DEL AGUA EN LA PRESA: VALLE DE BRAVO”**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

PRESENTA:
LAURA COUTIÑO ROMÁN

DIRECTOR DE TESIS:
M. EN I. ALBA BEATRIZ VELÁZQUEZ GONZÁLEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F.

2012





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/105/10

Señorita
LAURA COUTIÑO ROMÁN
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora M.I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES SATELITALES PARA CONOCER LA CALIDAD DEL AGUA EN LA PRESA: VALLE DE BRAVO"

- INTRODUCCIÓN
- I. PERCEPCIÓN REMOTA
- II. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DIGITAL DE LAS IMÁGENES
- III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDIOS DE CALIDAD DEL AGUA DEL VASO DE LA PRESA: VALLE DE BRAVO
- IV. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES QUE PERMITA CONOCER CUALITATIVAMENTE LA CALIDAD DEL AGUA DEL VASO DE LA PRESA: VALLE DE BRAVO
- V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 21 de Septiembre del 2010.
EL PRESIDENTE

ING. RODOLFO SOLÍS UBALDO

RSU/MTH*gar.

Contenido

	Página
Índice de Figuras	II
Índice de Tablas	V
Introducción	1
Objetivo	2
Capítulo 1	3
1.1	3
1.2	10
1.3	32
Capítulo 2	37
2.1	40
2.2	47
2.3	56
Capítulo 3	67
3.1	67
3.2	74
Capítulo 4	99
4.1	100
4.2	104
4.3	109
4.4	114
Capítulo 5	126
Anexo I	129
Bibliografía	132

Índice de Figuras

	Página
1.1 Componentes de un sistema de percepción remota	4
1.2 Alcances de los SIG	6
1.3 Capas temáticas	6
1.4 Modelos vectorial y raster	8
1.5 Esquema de una onda electromagnética	10
1.6 Espectro electromagnético	12
1.7 Concepto de ángulo sólido y esteroradian	14
1.8 Concepto de radiancia	15
1.9 Distribución espectral de la energía radiante de un cuerpo negro a distintas temperaturas	16
1.10 Distribución espectral de la constante solar y de emisión de la superficie terrestre	18
1.11 Curva de emitancia radiactiva del Sol	20
1.12 Formas de interacción de la radiación con la materia	21
1.13 Transmisividad de la atmósfera a distintas longitudes de onda	23
1.14 Dispersión de la radiación azul y roja	24
1.15 Superficies espectaculares y difusas (lambertianas)	25
1.16 Respuestas espectrales de distintas cubiertas terrestres	28
1.17 Relaciones entre resolución espacial, espectral y temporal para distintos sensores	32
1.18 Ilustración de como la luz es atenuada por el agua clara. Notar que en la región infrarroja hay muy poca penetración en el agua	33
1.19 Ilustración del incremento en la dispersión de energía al incrementarse la concentración de sedimentos	35
2.1 Formación numérica de un canal de una imagen satelital	38
2.2 Organización de una imagen digital TM	39
2.3 Corrección geométrica de la imagen (matriz de píxeles de salida geoméricamente correcta superpuesta sobre la matriz de píxeles de entrada distorsionada)	41
2.4 Estructura de una matriz numérica CLUT	48
2.5 Principios de la técnica de optimización del contraste	49
2.6 Cubo de color	52
2.7 Relación entre la composición de color, las imágenes fuente y su representación	52
2.8 Reducción del efecto de topografía por un cociente entre bandas del infrarrojo y del visible	54
2.9 Componentes principales 1 y 2	55
2.10 Fundamentos del análisis no supervisado	59
2.11 Diagrama de signaturas espectrales para las cubiertas que intervienen en la clasificación	60
2.12 Algoritmos para llevar a cabo la asignación de los pixeles a una categoría	62

	Página	
2.13	Tipos de muestreo aplicados a la verificación	64
2.14	Ejemplo de una matriz de confusión entre clases	65
3.1	Localización de la Cuenca Valle de Bravo	67
3.2	Ríos principales de la cuenca	69
3.3	Principales descargas al vaso de la presa Valle de Bravo	71
3.4	Componentes del Sistema Cutzamala	72
3.5	Características de la Presa Valle de Bravo	72
3.6	Precipitaciones Pluviales en la presa Valle de Bravo	73
3.7	Lluvia acumulada para el periodo 2003-2010	74
3.8	Fotografía del embalse de la presa de Valle de Bravo	74
3.9	Ubicación aproximada de los sitios de muestreo	78
3.10	Imagen de la región correspondiente al embalse de Valle de Bravo con los 50 puntos de muestreo distribuidos por toda su área.	89
3.11	Medidor multiparámetro con GPS HI 9828	90
3.12	Determinación de turbiedad por medio del disco Secchi	90
3.13	Manejo y operación de espectrofotómetro HACH DR 2800	91
3.14	Método de filtración de membrana	91
3.15	Determinación de DBO ₅	92
3.16	Muestras colocadas en el desecador	93
3.17	Preparación de crisoles	93
3.18	Cálculo del peso total del crisol Gooch con contenidos de sólidos suspendidos	93
4.1	Flujo metodológico del análisis multitemporal	99
4.2	Satélite Landsat 7 ETM+	100
4.3	Opciones de resolución empleando <i>cities</i> como Map Layers	102
4.4	Escena que contiene el área de estudio, el embalse de Valle de Bravo	102
4.5	Diferentes casos de presencia de nubosidad en las imágenes satelitales de Landsat 7 ETM+	103
4.6	Nubosidad presente en las imágenes satelitales de Landsat 7 ETM+ empleadas en el análisis	103
4.7	Ventana principal Ilwis 3.7.1	104
4.8	Banda 1 importada a Ilwis	105
4.9	Delimitación del área de interés de la imagen satelital de la banda 4 de la fecha del 25 de abril del 2010	106
4.10	Procedimiento para llevar a cabo un recorte	106
4.11	Generación de la matriz varianza-covarianza y cuadro de diálogo del <i>Map List</i> que conforma la matriz	107

	Página	
4.12	Generación de los componentes principales y cuadro de diálogo de salida	108
4.13	Generación de la operación CLUSTER y la tabla de salida del proceso	109
4.14	Imágenes cluster correspondientes a la primer campaña de muestreo (25 de abril del 2010)	111
4.15	Imágenes cluster correspondientes a la segunda campaña de muestreo (02 de octubre de 2012)	112
4.16	Imágenes cluster correspondientes a la tercer campaña de muestreo (26 de marzo de 2012)	113
4.17	Mejoras en la calidad visual en la presentación de los resultados obtenidos mediante el análisis de imágenes satelitales	114
4.18	Curvas de isoconcentración en orden multitemporal del parámetro de turbiedad (en UTJ)	116
4.19	Curvas de isoconcentración en orden multitemporal del parámetro de sólidos suspendidos (mg/l)	117
4.20	Curvas de isoconcentración en orden multitemporal del parámetro de temperatura (en °C)	118
4.21	Presentación multitemporal de los Clusters obtenidos en el Capítulo 3 (coincidentes a las fechas en que se llevaron a cabo las campañas de muestreo)	119
4.22	Comparativa entre ambos métodos (Imágenes satelitales – Trabajos de campo) correspondiente la primera campaña de muestreo	123
4.23	Comparativa entre ambos métodos (Imágenes satelitales – Trabajos de campo) correspondiente la segunda campaña de muestreo	124
4.24	Comparativa entre ambos métodos (Imágenes satelitales – Trabajos de campo) correspondiente la tercera campaña de muestreo	125

Índice de Tablas

	Página	
1.1	Bandas o regiones del espectro electromagnético	13
1.2	Rango de longitudes en el espectro visible	13
1.3	Magnitudes radiométricas	15
1.4	Percepción remota pasiva y activa	19
1.5	Componentes atmosféricos causantes de la absorción	22
1.6	Principales ventanas atmosféricas	22
1.7	Factores que influyen en la reflectividad del agua, suelo y vegetación	28
1.8	Principales sensores	29
2.1	Formatos de grabación más usuales	40
3.1	Clima en la Cuenca Valle de Bravo	69
3.2	Aprovechamientos superficiales de agua por uso y por porcentaje	71
3.3	Estudio Informe final de proyectos de control de malezas acuáticas, Archivo Histórico del Agua (AHA).	75
3.4	Estudio de Evaluación de la calidad del agua en la presa Valle de Bravo, Archivo Histórico del Agua (AHA).	75
3.5	Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala, CONAGUA.	76
3.6	Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala, CONAGUA.	76
3.7	Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala, CONAGUA.	76
3.8	Plan para la gestión Integral del Agua y Recursos Asociados de la cuenca de Valle de Bravo, IMTA.	77
3.9	Evaluación de la Calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo	77
3.10	Calidad del agua en la cuenca Valle de Bravo Amanalco, una propuesta para su manejo	77
3.11	Estudio de Informe final de proyectos de control de malezas acuáticas 1987 IMTA	79
3.12	Estudio de evaluación de la calidad del agua en la presa Valle de Bravo 1996	80
3.13	Estudio de evaluación de la calidad del agua en la presa Valle de Bravo 1996	81
3.14	Estudio de Plan para la gestión integral del agua y recursos asociados de la cuenca de Valle de Bravo, Estado de México (1999-2006)	83
3.15	Estudio de evaluación de la calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo 2001, tesis de licenciatura en Biología	84
3.16	Estudio de evaluación de la calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo	85
3.17	Índice de Calidad individual para cada parámetro	86
3.18	Calificación del agua en función del ICA	87
3.19	Fecha, ubicación de las estaciones de muestreo y el ICA obtenido correspondientes al periodo 1987-2002	95

	Página
ICA obtenido y ubicación de las estaciones de muestreo correspondiente a la primera campaña de muestreo, proyecto PAPIIT 107710 “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota”.	96
ICA obtenido y ubicación de las estaciones de muestreo correspondiente a la segunda campaña de muestreo, proyecto PAPIIT 107710 “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota”.	97
ICA obtenido y ubicación de las estaciones de muestreo correspondiente a la tercera campaña de muestreo, proyecto PAPIIT 107710 “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota”.	98
4.1 Características de las bandas espectrales de LANDSAT 7 ETM+	101
4.2 Límites máximos permisibles que se establecen en la NOM-001-SEMARNAT-1996	121
4.3 Límites máximos permisibles que se establecen en la NOM-127-SSA-1996	121

INTRODUCCIÓN

Hoy en día el estudio de los elementos que integran nuestro entorno es decir, el ambiente, está teniendo cada vez mayor relevancia pues ya podemos ver actualmente los estragos del daño que se le ha venido ocasionando a lo largo del desarrollo de la vida humana debido a la explotación desmedida de los recursos sin una adecuada planeación y control. Y es debido a esta inquietud o preocupación por lo que los avances tecnológicos ya ofrecen un amplio conjunto de herramientas aplicables en dicho campo de estudio.

La percepción remota se encuentra entre tales herramientas, permite el estudio de la cubierta terrestre, desde las superficies continentales hasta los cuerpos de aguas como, mares, ríos, embalses, etcétera. Facilitando enormemente la observación de áreas de estudio de gran tamaño mediante las imágenes de los satélites que son capturadas a través de los sensores que cuentan con características variables como son, el tipo de órbita, su resolución temporal, es decir, su tiempo de recorrido para pasar por un mismo punto, la altura a la que se encuentra, su resolución espectral, entre muchas otras.

La percepción remota nace debido al interés natural del ser humano por la observación de todo lo que le rodea así que tenemos como primer rudimento fotosensible al ojo humano pero, posteriormente este tuvo un imitador proveniente de la tecnología, la cámara fotográfica, que hizo su aparición en el Siglo XIX y que con el paso del tiempo fue siendo mejorada hasta que en 1930 empezó a ser aplicada en la observación aérea. Con la llegada de la Segunda Guerra Mundial se dio un gran impulso a la fotografía aérea así como a otras nuevas formas de percepción remota. Pero el avance con mayor impacto sucedió en la década de 1960, con el remplazo de las plataformas aéreas por las satelitales y, las cámaras fotográficas por los sensores electrónicos multiespectrales acoplados a computadoras.

La percepción remota en general es utilizada en diversas actividades: minería, industria petrolera, urbanismo, hidrología, oceanografía, meteorología, agricultura, ingeniería ambiental, entre otras; en todas ellas podemos encontrar aplicaciones para la detección de ciertos elementos de interés, tales como el área que abarca un derrame de petróleo, detectar la ubicación de ciertos minerales, planeación de zonas urbanas, pérdidas de playa, distribución de temperaturas en el océano, patrón de corrientes marinas, concentración de clorofila, catalogar los usos de suelo, patrón de vientos, determinación de la ubicación eficiente de rellenos sanitarios y plantas de transferencia de residuos, y estudios de la flora y el agua. Y, en el caso particular del agua, algunas de las aplicaciones que se tienen, es la determinación de su calidad, las fuentes de contaminación no puntuales en los cuerpos de agua, erosión y estado trófico.

Como puede notarse, éstas y muchas más aplicaciones están enfocadas a promover la protección y control de la explotación y transformación de los recursos naturales para poder evitar su deterioro y contaminación.

De entre las principales preocupaciones a nivel global que se tienen respecto a la contaminación se encuentra el agua, por la importancia que posee para el desarrollo de la vida humana como elemento indispensable para toda clase de ser vivo, ya que desde la cubierta terrestre y hasta el cuerpo humano, el mayor porcentaje de estos está compuesto por agua. Y es que, a pesar de que

su contaminación se conoce desde la antigüedad, aún continua siendo un problema serio hasta nuestros días, que se ha ido tratando de enfrentar, pero debido al poco control sobre su uso no se ha podido resolver sino todo lo contrario, se acrecienta cada vez más, manifestándose en la escasez del agua para consumo humano y caracterizarse por ser fácilmente un transmisor de agentes infecciosos al estar contaminada.

OBJETIVO

Con base en todo lo anterior, el presente trabajo que forma parte del proyecto PAPIIT “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota”, tiene como objetivo aplicar una metodología de análisis multitemporal digital de imágenes en la Presa Valle de Bravo que, permita conocer cualitativamente la calidad del agua, ya que se trata de un cuerpo de agua destacado pues forma parte del Sistema Cutzamala que abastece de agua potabilizada a una parte del Distrito Federal y Estado de México.

En la metodología se emplean tanto los datos obtenidos a través de tres campañas de muestreo llevadas a cabo entre los años 2010 y 2011; y, la información generada mediante la aplicación de un Sistema Información Geográfica (SIG) a través del cual se realiza un análisis de las imágenes digitales obtenidas mediante la percepción remota. Todo esto con la finalidad de presentar como se lleva a cabo un monitoreo de la calidad del agua empleando la percepción remota.

El trabajo está integrado por cuatro capítulos que, a continuación se describen brevemente:

En el Capítulo 1 se describen las características que definen a la percepción remota y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), así como las aplicaciones prácticas que se tienen con respecto a la calidad del agua.

En el Capítulo 2 se explica el procesamiento y análisis digital de imágenes satelitales, seccionándolo en tres fases:

- Procesamiento y rectificación de la imagen
- Realce de la imagen
- Clasificación digital

En el Capítulo 3 se presentan las características físicas y socioeconómicas de Valle de Bravo, así como una revisión bibliográfica de estudios de la calidad del agua del vaso de la presa y, el procesamiento de la información recolectada durante los trabajos de campos llevados a cabo como parte del proyecto y los resultados obtenidos.

En el Capítulo 4 se lleva a cabo un análisis de las imágenes digitales del embalse de la presa de Valle de Bravo empleando un SIG además de un análisis comparativo de los resultados obtenidos con el SIG y a partir de campañas de muestreo.

1. Percepción remota

En este capítulo se presentan los fundamentos de la percepción remota (PR), se presenta también el tema de sensores y plataformas, elementos con los que es posible la adquisición de imágenes satelitales.

Finalmente se incluye información sobre algunas aplicaciones de la percepción remota, principalmente aquellas relacionadas con estudios de la calidad del agua.

1.1 Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica

En esta sección se definen los elementos que integran la PR, así como también la estrecha relación existente con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ya que ambos se complementan.

Concepto de Percepción Remota

En la actualidad, podemos interpretar que el concepto de PR se refiere a la ciencia o arte de obtener información sobre un objeto, superficie o fenómeno sin entrar en contacto material con él. Pero en un sentido más generalizado, no sólo engloba los procesos que permiten obtener información desde el aire o el espacio, sino también su posterior tratamiento de acuerdo a la aplicación que tendrá la información recolectada.

Ahora, desde un contexto tecnológico o científico, la percepción remota se refiere a los datos recolectados por los sensores e instrumentos que miden la radiación electromagnética emitida por el objeto observado y, que se encuentran en formato digital por lo que se pueden analizar y graficar por equipos especializados.

La PR no se limita a los instrumentos con los que se detecta y mide la radiación electromagnética; el concepto es todavía más amplio, ya que su definición incluye también las cámaras digitales utilizadas en fotografía convencional o fotografías aéreas, radiología y otros dispositivos de sensor utilizados en la medicina y en muchas otras especialidades; pero, su definición más convencional se restringe a la aplicación de la obtención de información sobre la Tierra.

Componentes básicos de la percepción remota

La PR o también llamada en algunas bibliografías como teledetección espacial, se compone básicamente de los elementos que se muestran en la Figura 1.1.

El proceso de teledetección involucra una interacción entre la radiación incidente y los objetos de interés, así como la percepción de energía emitida y el uso de sensores que no producen imágenes.

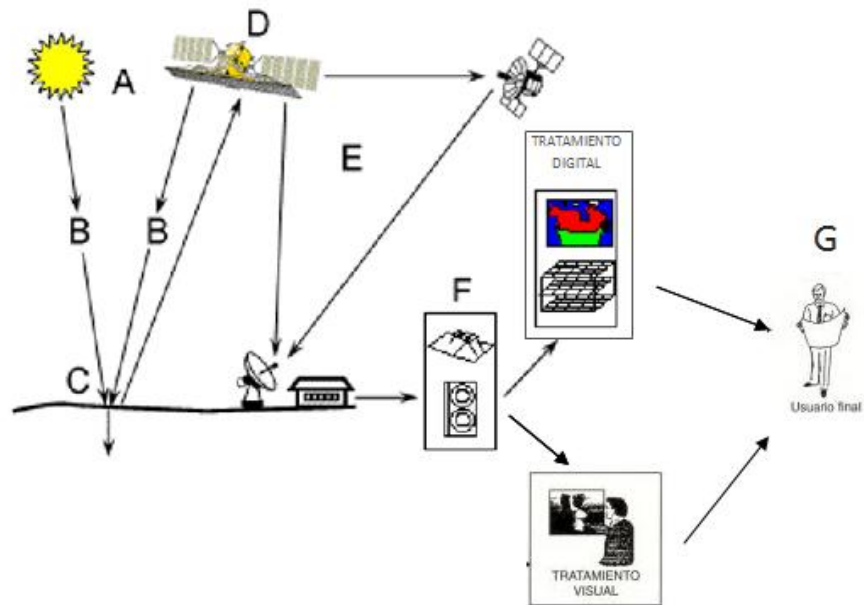


Figura 1.1 Componentes de un sistema de percepción remota.

Modificado de Canada Centre for Remote Sensing. Remote Sensing Tutorial. Fundamentals of Remote Sensing.

- A. Fuente de energía o iluminación.** Supone el origen del flujo energético detectado por el sensor, ya que ilumina y provee de energía electromagnética al objeto de interés. Puede tratarse de una fuente externa al sensor, en cuyo caso se habla de percepción remota pasiva, o de un haz energético emitido por éste que se refiere a una percepción remota activa.
- B. Atmósfera y radiación.** Se presentan dos contextos, el primero hace referencia al momento en que interactúa el objeto con la fuente de energía, es decir, cuanto la energía viaja de la fuente hacia él. El segundo, se presenta cuando ahora la energía viaja del objeto hacia el sensor. Para ambos contextos, observamos que la energía entrará en contacto e interactuará con la atmósfera.
- C. Interacción con el objeto.** El objeto recibe la señal energética procedente de la fuente, e interactúa de forma particular con ella en función de sus propiedades y características físicas.
- D. Sistema sensor.** Está integrado por el sensor y además por la plataforma que se encarga de su "transporte". A continuación de que la energía ha sido emitida por el objeto, se requiere de un sensor, el cual tiene como objetivo captar la energía emitida, codificarla, grabarla o enviarla al sistema de recepción.
- E. Estación de recepción-comercialización.** Es donde se recibe la energía registrada por el sensor, donde es grabada como imagen (copia impresa y / o digital) con sus correcciones pertinentes, para su posterior distribución.
- F. Interpretación y análisis.** La imagen es analizada e interpretada por personal capacitado para extraer la información sobre el objeto de interés y transmitirla en una clave temática

o cuantitativa que facilite su visualización. Dicho análisis puede ser con base en un tratamiento visual o digital.

- G. Aplicación.** El usuario final se encarga de analizar y aplicar la información obtenida para brindar información precisa acerca del objeto con la finalidad de ampliar el conocimiento sobre él o como ayuda para la resolución de un problema particular.

Sistemas de Información Geográfica

Primeramente, un Sistema de Información (SI) consiste en la unión de información en formato digital y herramientas informáticas para su análisis con objetivos específicos, por tanto, un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un caso particular de un SI en el que la información aparece *georreferenciada* es decir incluye su posición en el espacio utilizando un sistema de coordenadas estandarizado resultado de una proyección cartográfica (generalmente UTM).

Respecto a los sistemas de información geográfica, se han propuesto una gran cantidad de definiciones, a continuación se presenta la definición dada por el Centro Nacional de Información Geográfica y Análisis de EU:

“Un SIG es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación”.

Al hablar de un SIG, puede hacerse referencia a tres conceptos distintos: como un software, un proyecto o como disciplina, pues, a pesar de que den la impresión de ser aplicaciones meramente prácticas, basadas en un programa delimitado, trabajan con una metodología propia y poseen un núcleo teórico importante en el que se combinan conceptos de diferentes disciplinas (topología, estadística espacial, etc.).

Componentes de un SIG

Los elementos necesarios para poder implantar esta herramienta en cualquier actividad son los siguientes:

- **Base de datos.**- Información que está disponible o es requerida para iniciar;
- **Software.**- Programa o aplicación programada para realizar tareas específicas;
- **Hardware.**- El equipo de cómputo requerido para poder emplear el software; y,
- **Liveware.**- Personal capacitado para manipular y conjuntar los tres elementos anteriores.
- **Procedimientos.**- Modelos y prácticas operativas exclusivas en cada organización bien definidos y consistentes para producir resultados correctos y reproducibles.

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.

Para emplear eficientemente esta herramienta, es necesario conocer cómo y qué tanto podemos manipular la información en los SIG y que podemos obtener a partir de ella. En la Figura 1.2 se resumen sus alcances.

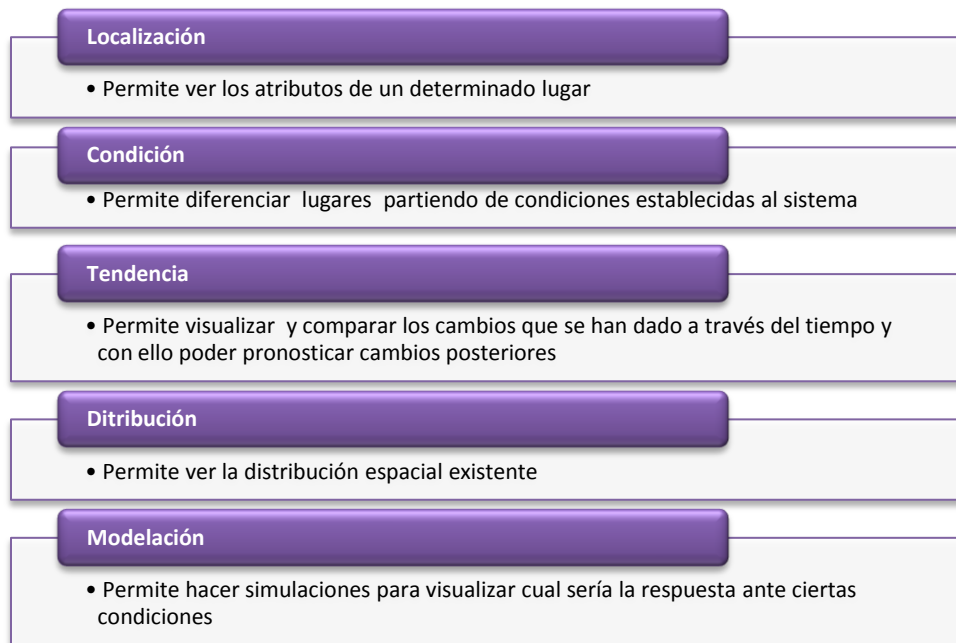


Figura 1.2 Alcances de los SIG.

Fuente: Vázquez, Alba. SIG. Curso de la Especialidad de Sanitaria y Ambiental. UNAM

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 1.3), cada una de las cuales representa una variable temática y se definen a través de objetos espaciales (puntos, líneas, áreas, celdas, etc.).

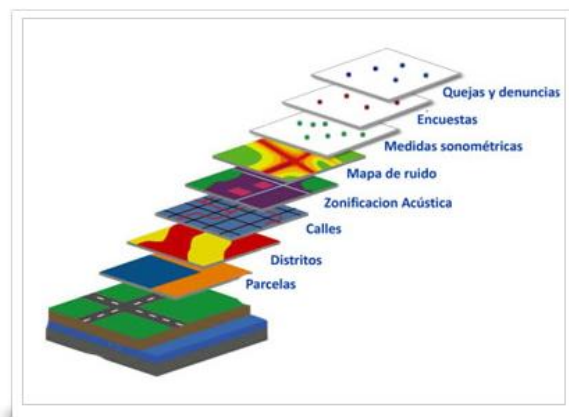


Figura 1.3 Capas temáticas.

Fuente: www.urbanoise.es

Las capas temáticas de un mismo 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.

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 a cerca 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 su 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* lo que se busca es 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 pueden ser descritos 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. Pues 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

La información necesaria para interactuar con un SIG puede dividirse en dos partes: la información gráfica y la información alfanumérica. La primera de ellas generalmente hace referencia a la cartografía del ámbito de trabajo y puede ser obtenida por diferentes medios: fotogrametría, topografía, información obtenida en campo y geo-referenciada con GPS, percepción remota, etc., en este último caso se captura simultáneamente también la información alfanumérica.

Modelos de datos

Para trabajar con un SIG es necesario introducir la información geográfica en un sistema de información y realizar una modelación de la realidad, siendo los dos modelos de datos más empleados el *vectorial* y el *raster*.

Si se desea disponer de información de una amplia zona sin importar los límites de los objetos, se emplean los datos *raster* con los que se dispone de información continua. Sin embargo, si los límites de las entidades geográficas tienen gran importancia para la aplicación y se requieren recoger los elementos de forma individual, se elegirá un modelo *vectorial*. En ambas estructuras de datos será necesario que queden reflejadas las relaciones espaciales de los elementos entre sí.

Comparación entre ambos modelos

Una de las decisiones básicas al usar un SIG consiste en la posibilidad de elegir entre utilizar el modelo vectorial o el raster, cada uno de ellos con diferente capacidad de representar la realidad y por tanto, con sus propias ventajas y desventajas. 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.



Figura 1.4 Modelos vectorial y raster.

Fuente: Instituto de Tecnologías Educativas. España.

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 la cada vez mayor capacidad de los discos duros) 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.

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 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.

Concatenación de los SIG con la PR

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 procesado 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 por una parte 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.

Esta convergencia de SIG y teledetección 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.

1.2 Fundamentos teóricos de la percepción remota

La PR requiere para poder llevarse a cabo que exista una interacción entre el objeto y el sensor; tal interacción puede realizarse a través de las siguientes tres formas: por reflexión, por emisión, y por emisión – reflexión. La primera de ellas es la más importante para el estudio de los recursos naturales, pues se deriva directamente de la luz solar, la cual ilumina la superficie terrestre que se refleja dependiendo del tipo de objeto del que se trate; la segunda forma consiste en basarse en la energía emitida por los propios objetos; finalmente en el caso de que el sensor sea el que además de captar la reflexión del objeto sea capaz de administrarle la energía necesaria. El flujo energético que se da entre el objeto y el sensor para que exista la interacción se define como radiación electromagnética. La información se propaga a través de la radiación electromagnética a la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) de la fuente al sensor.

Por la importancia que tiene la radiación electromagnética como transmisor de información en todas las formas de PR, se requiere hacer un estudio de la misma y sus propiedades. La radiación es una de las tres formas de transmisión de energía en la naturaleza (conducción, convección y radiación) siendo la única que se transmite sin contacto material entre el emisor y el receptor. La energía se expresa en Julios (J), por tanto la transferencia o flujo de energía se expresa por unidad de área, por unidad de tiempo o por unidad de tiempo y área.

Concretamente, la naturaleza de la radiación electromagnética se puede fundamentar con base en dos modelos, los cuales son aparentemente contradictorios y en el fondo complementarios: el de la teoría ondulatoria y el de la teoría del movimiento de partículas o cuántica, las cuales se pueden compaginar ya que se ha demostrado que la luz se comporta de acuerdo a ambos planteamientos.

Teoría ondulatoria

Esta teoría es desarrollada por Huygens y Maxwell, entre otros, y describe como la energía electromagnética viaja a la velocidad de la luz siguiendo un modelo armónico y continuo (Figura 1.5).

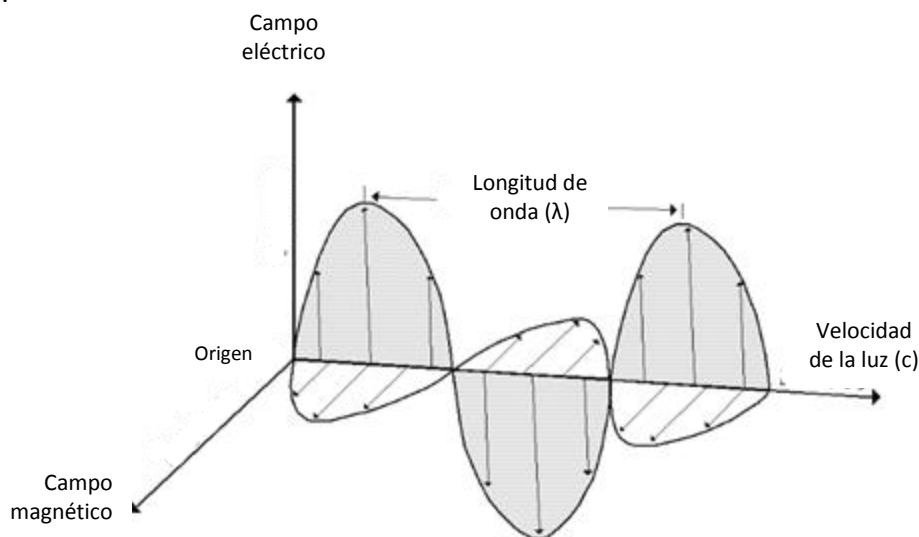


Figura 1.5 Esquema de una onda electromagnética.

Fuente: US Army Corps of Engineers. Engineering and design. Remote sensing. 2003.

Se asume que la radiación se produce como resultado de oscilaciones en los campos eléctrico y magnético en las inmediaciones de los objetos. Estas oscilaciones generan ondas que contienen 2 campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético, y que transmiten la energía².

Al ser ondas las que dan lugar al flujo energético, pueden definirse por dos parámetros:

- Longitud de onda: Indica la longitud de la onda, es decir, la distancia entre dos “picos” o valles sucesivos de la función sinusoidal. Se representa usualmente como λ y se mide en metros (m), centímetros (cm), micrómetros (μm) o nanómetros (nm).
- Frecuencia: Se define como el número de ciclos de una onda pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo². Se mide en hercios (Hz, ciclo por segundo).

$$c = \lambda F \quad [1.1]$$

El producto de ambos parámetros da como resultado la velocidad de la luz c , $c = 3 \times 10^8$ m/s; por lo tanto, la frecuencia y la longitud de onda están inversamente relacionadas, por lo que a menor longitud de onda, mayor frecuencia y viceversa.

Teoría cuántica o del movimiento de partículas

Teoría llevada a cabo por Planck y Einstein, entre otros. Considera a la energía electromagnética como un flujo de partículas, los fotones (o cuantos), con masa igual a cero. La energía transportada por cada fotón depende del objeto que emite la radiación y podemos calcularla con la ecuación siguiente:

$$Q = hF \quad [1.2]$$

En donde,

- Q, es la energía radiante de un fotón, en julios;
- h, es la constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ Js); y,
- F, es la frecuencia.

Ahora, relacionando ambos modelos, sustituyendo la ecuación 1.1 en 1.2, obtenemos:

$$Q = \frac{hc}{\lambda} \quad [1.3]$$

Por tanto, a mayor longitud de onda, menor resulta la cantidad de energía radiante y viceversa, lo cual implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que la radiación en longitudes cortas.

Espectro electromagnético

La energía radiante se encuentra en función de la longitud de onda y la frecuencia, por lo que podemos representarla con base en esos parámetros.

El espectro electromagnético puede ser interpretado como el conjunto de las longitudes de onda (y por tanto, frecuencia, ya que son inversamente proporcionales), desde las más cortas hasta las kilométricas, que puede adoptar la radiación. Se encuentra dividido en una serie de bandas o regiones ya que en cada una de ellas se presenta cierta homogeneidad en el comportamiento de la energía radiante. Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda; para las más cortas se utilizan los nanómetros (nm) o micrómetros (μm), mientras las más grandes se miden en centímetros (cm) o metros (m), Figura 1.6.

Los límites que se han fijado a esas regiones son aproximados y varían de unos autores a otros, existiendo además superposiciones entre regiones contiguas y cada una de estas regiones se divide además en categorías adicionales.

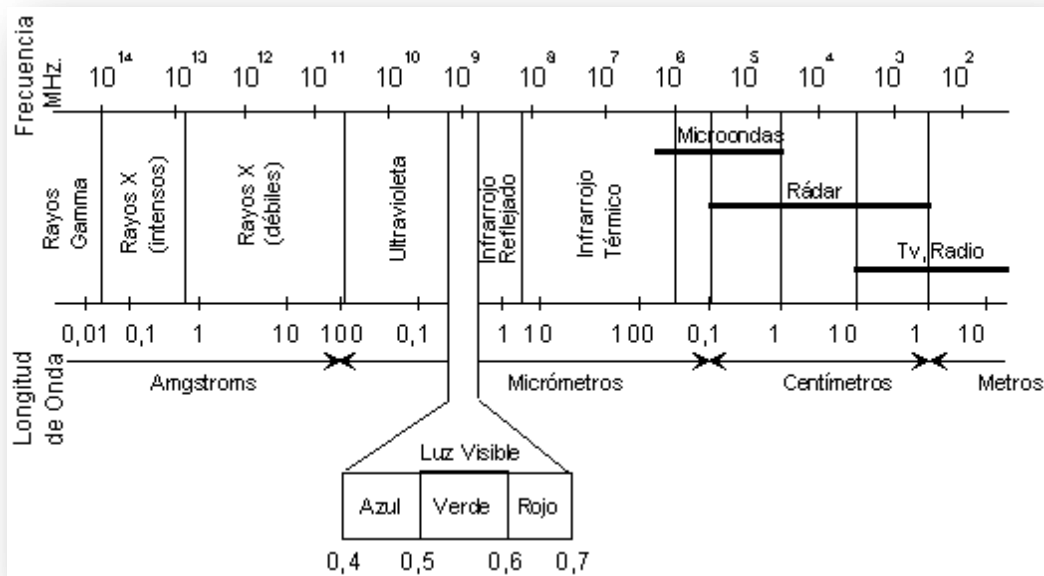


Figura 1.6 Espectro electromagnético.

Fuente: Chuvieco, Fundamentos de Teledetección espacial.

A continuación se describen las principales bandas que son empleadas en percepción remota y, en la Tabla 1.1 y 1.2 se resume y detalla.

- Espectro visible (0.4 - 0.7 μm)

Es la única de las radiaciones electromagnéticas perceptible por el ojo humano, además coincide con la longitud de onda donde es máxima la radiación solar. Se suele clasificar al espectro visible en tres bandas elementales: azul (0.4 - 0.5 μm); verde (0.5 - 0.6 μm); rojo (0.6 - 0.7 μm) pero en realidad se presenta un continuo de colores.

- Infrarrojo próximo (0.7 - 1.3 μm)

Banda importante para diferenciar masas vegetales y concentraciones de humedad. En esta banda de infrarrojo es en donde la radiación solar tiene más importancia que la terrestre. También suele

llamársele infrarrojo reflejado o cercano y, fotográfico, pues puede ser detectado a partir de films dotados de emulsiones especiales.

- Infrarrojo medio (1.3 - 8 μ m)

En esta banda se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie terrestre.

- Infrarrojo lejano o térmico (8 - 14 μ m)

Banda que incluye la porción emisiva del espectro terrestre.

- Microondas (desde 1 mm)

Tiene la propiedad de ser transparente a la cubierta nubosa, pero también de llevar asociada muy poca energía. Por eso, si se quiere usar esta banda tendrá que ser haciendo teledetección *activa*.

Tabla 1.1 Bandas o regiones del espectro electromagnético.

Banda o región	Rango de longitudes
Rayos gamma	< 0,03nm
Rayos X	0,03nm – 3nm
Ultravioleta	3nm – 0,3 μ m
Visible	0,3 μ m – 0,7 μ m
Infrarrojo	0,7 μ m - 300 μ m
Microondas	300 μ m – 20cm
Radio-TV	> 20cm

Fuente: Apuntes de SIG y Teledetección. Universidad de Murcia.

Tabla 1.2 Rango de longitudes en el espectro visible.

Color visible	Rango de longitudes
Violeta	0.4 - 0.446 μ m
Azul	0.446 - 0.500 μ m
Verde	0.500 - 0.578 μ m
Amarillo	0.578 - 0.592 μ m
Naranja	0.592 - 0.620 μ m
Rojo	0.620 - 0.7 μ m

Nomenclatura y definición de las cantidades de radiación

Una serie de conceptos se utilizan para caracterizar la radiación electromagnética y su interacción con la materia. Estos se describen brevemente a continuación y, la Tabla 1.3 presenta un resumen.

- **Energía radiante.** Es la energía transportada por una onda electromagnética o la cantidad de energía radiada en todas direcciones. A la cantidad de energía radiante por unidad de volumen se le denomina, densidad radiante.
- **Flujo radiante.** Es la energía transferida por radiación de una superficie a otra por unidad de tiempo.
- **Emitancia o excitancia radiante.** Energía emitida por radiación desde una superficie por unidad de tiempo y de superficie (cantidad de energía que se transmite cada segundo por cada metro cuadrado de la superficie emisora).
- **Irradiancia radiante.** Energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo. Concepto similar al de emitancia pero ahora referido a la energía que llega a un cuerpo a través del espacio procedente de otro (que la ha emitido).
- **Intensidad radiante.** es el flujo radiante procedente de una fuente de radiación por unidad de ángulo sólido (Ω) y en una dirección concreta.
- **Ángulo sólido.** Es el ángulo tridimensional formado en el vértice de un cono. La unidad del ángulo sólido es el esteroradian (sr) y se define como el ángulo sólido para el que la superficie A es igual a r^2 donde r es el radio de la esfera. Puesto que el área de una Esfera es $4 \pi r^2$, en una esfera completa hay 4π estereorradianes, Figura 1.7.

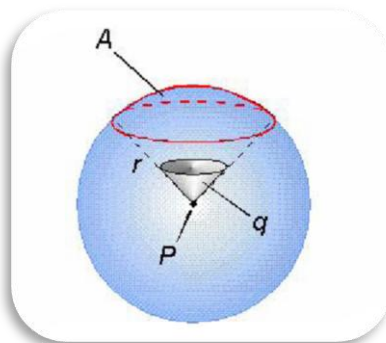


Figura 1.7 Concepto de ángulo sólido y esteroradian.
Fuente: Apuntes de SIG y Teledetección. Universidad de Murcia

- **Radiancia.** Es el flujo radiante que abandona una unidad de área en una dirección particular siguiendo un ángulo sólido particular (Ω). Su importancia estriba en que es la magnitud que detecta el sensor, Figura 1.8.

$$L = \frac{\theta/\Omega}{A \cos \theta} \quad [1.4]$$

En donde:

L , es la radiancia; y,

ϑ , es el ángulo formado por la dirección del flujo radiante y el vector perpendicular a la superficie receptora de tamaño A .

Cuando la radiancia, la emitancia e irradiancia se refieren a una porción concreta del espectro electromagnético se les completa con el calificativo de espectral y para a su denotación se le añade un subíndice λ .

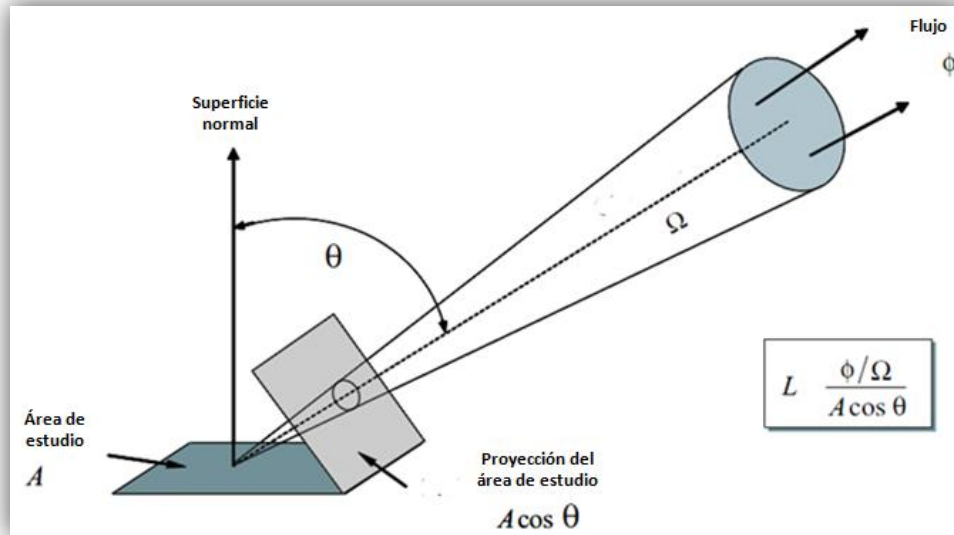


Figura 1.8 Concepto de radiancia.

Modificado de: Elachi, Introduction to the Physics and Techniques Remote Sensing.

Tabla 1.3 Magnitudes radiométricas.

Concepto	Símbolo	Ecuación	Unidad de medida
Energía radiante	Q	--	Julios (J)
Densidad radiante	W	$\frac{\delta Q}{\delta v}$	J/m ³
Flujo radiante	ϕ	$\frac{\delta Q}{\delta t}$	watt
Emitancia radiante	M	$\frac{\delta \phi}{\delta A}$	watt/m ²
Irradiancia	E	$\frac{\delta \phi}{\delta A}$	watt/m ²
Intensidad radiante	I	$\frac{\delta \phi}{\delta \Omega}$	watt/sr
Radiancia	L	$\frac{\delta I \cos \theta}{\delta A}$	watt/m ² sr
Radiancia espectral	L _{λ}	$\frac{\delta L}{\delta \lambda}$	watt/m ² sr μ m
Emitancia espectral	M _{λ}	$\frac{\delta M}{\delta \lambda}$	watt/m ² μ m
Irradiancia espectral	E _{λ}	$\frac{\delta E}{\delta \lambda}$	watt/m ² μ m

Leyes de la radiación electromagnética

Una serie de leyes físicas nos ayudan a entender mejor la interacción de la radiación electromagnética (particularmente aquellas provenientes de Sol) con la superficie terrestre.

Para ello es necesario considerar el espectro de emisión de un cuerpo negro, o sea de un cuerpo que absorbe toda la energía que incide sobre él. Ni el Sol ni la Tierra se comportan como cuerpos negros, sin embargo, conviene considerar primero el comportamiento de cuerpos “ideales”. La Figura 1.9 presenta el espectro de emisión (o absorción) de cuerpos negros a distintas temperaturas. Un espectro de absorción/emisión grafica la intensidad de la radiación en función de longitud de onda asociada a esa radiación.

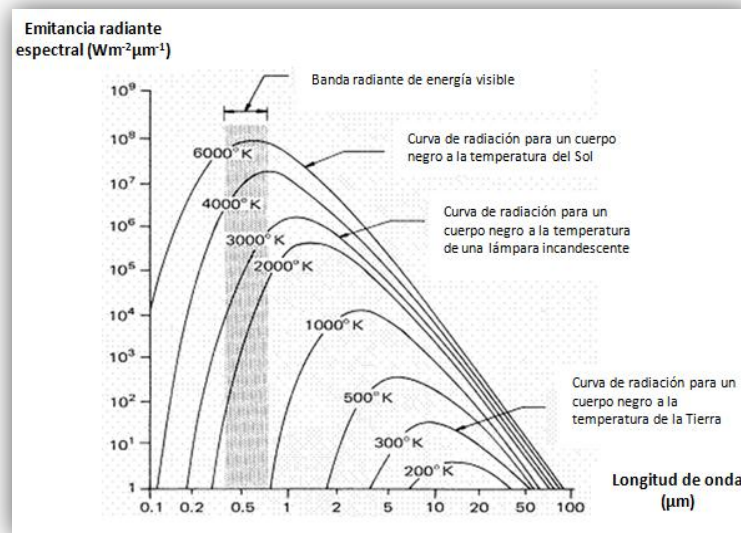


Figura 1.9 Distribución espectral de la energía radiante de un cuerpo negro a distintas temperaturas.

Fuente: LILLEDAND, Thomas. Remote sensing and image interpretation.

El cálculo de las curvas representadas en la Figura 1.9 fue uno de los mayores desafíos de la física. Max Planck logró resolverlo a principios del siglo XX y sus resultados de plasmaron en la ley que lleva su nombre.

La Ley de Planck permite estimar la energía emitida por un cuerpo negro a una temperatura T en un dado rango de longitudes de onda (o de frecuencias). Como una función de la longitud de onda se expresa:

$$M_{n,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1 \right]} \quad [1.5]$$

Donde,

$M_{n,\lambda}$, indica la emitancia espectral de un cuerpo negro a una determinada longitud de onda;

h, es la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ W s}^2$);

k, es la constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} \text{ W s}^2/\text{K}$);

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

λ , es la longitud de onda; y,

T, es la temperatura absoluta de un cuerpo negro (en Kelvin, K).

Simplificando la ecuación 1.5, obtenemos lo siguiente:

$$M_{n,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1 \right]} \quad [1.6]$$

Donde c_1 puede sustituirse por $3,74 \times 10^{-16} \text{ W m}^2$ y c_2 por $1,44 \times 10^{-2} \text{ mK}$.

La ecuación 1.6 indica que cualquier objeto por encima del cero absoluto radia energía, y que es directamente proporcional a la temperatura, por lo que, a mayor temperatura, el cuerpo radiará con mayor intensidad en longitudes de onda más cortas. Por lo que, aunque el Sol es la mayor fuente de radiación electromagnética para la aplicación de PR, se debe siempre considerar que todos los objetos terrestres (agua, suelos, vegetación, etc.) son también fuentes de radiación, aunque de magnitud y composición espectral muy diferente a la del Sol.

La ley de Stefan – Boltzmann indica que cualquier cuerpo en la naturaleza emite radiación y lo hace con diferentes longitudes de onda. Es la integral de la ecuación de la ley de Planck y permite, por tanto, calcular el total de energía emitida por un cuerpo negro a la temperatura T sumando las emisiones para cada una de las longitudes de onda (emitancia espectral).

$$M_n = \sigma T^4 \quad [1.7]$$

Donde σ es la constante de Stefan – Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); y, T la temperatura en Kelvin. Con la ecuación 1.7 resulta evidente que la cantidad de energía que emite un cuerpo negro por radiación como la distribución de esta energía en diferentes longitudes de onda (emitancia espectral) depende fundamentalmente de la temperatura de dicho cuerpo.

Otra ley fundamental para entender el comportamiento espectral de un cuerpo negro fue postulada por Wilhelm Wien. La Ley del desplazamiento de Wiens postula que el espectro de emisión de un cuerpo varía con la temperatura, y permite calcular a qué longitud de onda se produce el pico de máxima emisión de energía de un cuerpo a una temperatura T. Como puede observarse a mayor temperatura menor longitud de onda.

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T} \quad [1.8]$$

Donde T indica la temperatura del cuerpo negro en Kelvin (K) y, $\lambda_{m\acute{a}x}$ es la longitud de onda del pico de emisión en metros.

Además, esta ley es aplicada para seleccionar la banda más conveniente para detectar un determinado fenómeno, siempre que la temperatura sea conocida.

La temperatura del Sol es de aproximadamente 6000°K mientras que la de la Tierra es de 300°K , esto significa que la radiación solar va a ser máxima para una longitud de onda de $0.48 \mu\text{m}$ (región visible) y la terrestre máxima en una longitud de onda de $9.66 \mu\text{m}$ (infrarrojo térmico). Sin embargo, hay que tener en cuenta que conforme la radiación se aleja del punto de emisión, la irradiancia disminuye de forma proporcional al cuadrado de la distancia recorrida. Así los órdenes de magnitud de la distribución espectral de la constante solar (cantidad de energía solar que llega

al techo de la atmósfera) y del espectro de emisión terrestre (Ver Figura 1.10) son más próximos, apareciendo una zona del espectro en la que la emisión terrestre es mayor que la constante solar.

Por tanto, la radiación solar domina aquellas regiones del espectro electromagnético que corresponden a la radiación visible y al infrarrojo reflejado. La radiación terrestre domina el infrarrojo térmico, mientras que las radiaciones que corresponden a las microondas (radar) no aparecen en la naturaleza, deben ser por tanto de origen artificial, generadas por el propio sensor que las recibe posteriormente reflejadas.

En las anteriores leyes se ha supuesto que las superficies naturales se comportan como cuerpos negros, que resulta ser una exagerada simplificación, por lo cual, se deben corregir las ecuaciones anteriores añadiendo un nuevo parámetro, la emisividad, de acuerdo con la ley de Kirchoff:

$$M = \epsilon M_n \quad [1.9]$$

Donde,

M_n , indica la emitancia espectral de un cuerpo negro; y,

ϵ (*Emisividad*). Es la relación entre la emitancia de una superficie, y la que ofrecería un emisor perfecto a la misma temperatura. Las leyes de Planck, Stefan y Wien nos permiten obtener como sería la radiación de un cuerpo a una temperatura dada si su eficiencia fuera del 100 %. En realidad este no llega a ser un caso real, sino que todos los cuerpos terrestres tienen una emisividad inferior a 1. En función de la emisividad, los cuerpos pueden dividirse en:

- *Cuerpo negro o emisor perfecto*. El que emite radiación al máximo de sus posibilidades. $\epsilon = 1$.
- *Cuerpo gris*, aquel en el que $0 < \epsilon < 1$.
- *Reflector perfecto*, $\epsilon = 0$.
- *Radiador selectivo*, $\epsilon_\lambda = f(\lambda)$, es decir la emisividad depende de la longitud de onda que se considere.

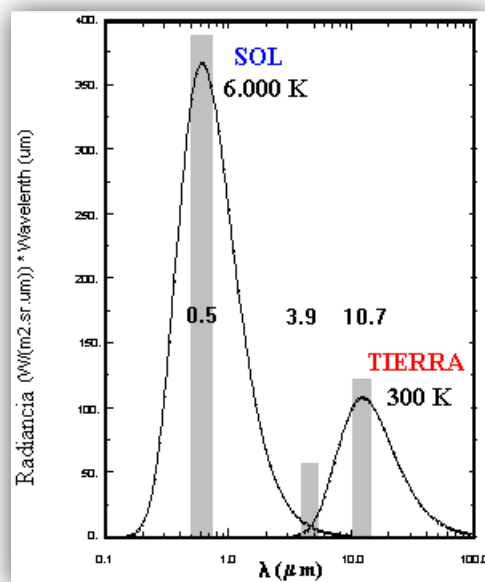


Figura 1.10 Distribución espectral de la constante solar y de emisión de la superficie terrestre.

Fuente: <http://meteolot.com>

Percepción remota activa y pasiva

Esta clasificación se refiere al tipo de fuente de energía que es utilizada durante el proceso. Si la energía es suministrada por una fuente independiente del sensor, como es el caso del Sol, se le conoce como percepción remota pasiva, y, cuando ocurre que el satélite es el proveedor de la energía requerida se trata de la percepción remota activa, Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Percepción remota pasiva y activa

Fuente de energía		Percepción remota pasiva	Percepción remota activa
		El Sol	El sensor
Bandas del espectro electromagnético	Visible e infrarrojo cercano	En general, en estas bandas solo se lleva a cabo P.R. de este tipo	Raramente ocurre P.R. activa, en el caso de que una aeronave lleve un láser como foco energético
	Infrarrojo térmico	En este caso el objeto en estudio por sí mismo es la fuente de radiación. El sensor detecta la radiación que ha sido emitida por el objeto	
	Microondas		Es muy común en esta banda. En este caso el satélite o aeronave emite una señal con una antena.
Aplicación		Para el estudio de los recursos terrestres, condiciones atmosféricas, urbanismo, etc.	Básicamente para actividades militares y en el control de tráfico aéreo

Irradiancia solar

El Sol es el principal suministro de energía para la PR, ya que participa de manera directa o indirectamente en cada una de las bandas que se emplean en esta actividad por lo que es conveniente analizar con más detenimiento las características espectrales del sol.

- *Dominio óptico del espectro*

Grupo de longitudes de onda directamente dependientes de la energía solar. También se incluyen las ondas que se encuentran contenidas en la banda del infrarrojo medio, puesto éstas aún mantienen relación con tal fuente de energía.

En la curva de emitancia espectral del Sol (Figura 1.11) se puede observar que se presenta una banda de emitancias elevadas entre 0,3 y 2 μm , reduciéndose en las demás regiones debido a los efectos atmosféricos. A esa banda se le denomina dominio óptico del espectro, y representa la región de mayor interés para la percepción remota de la superficie terrestre.

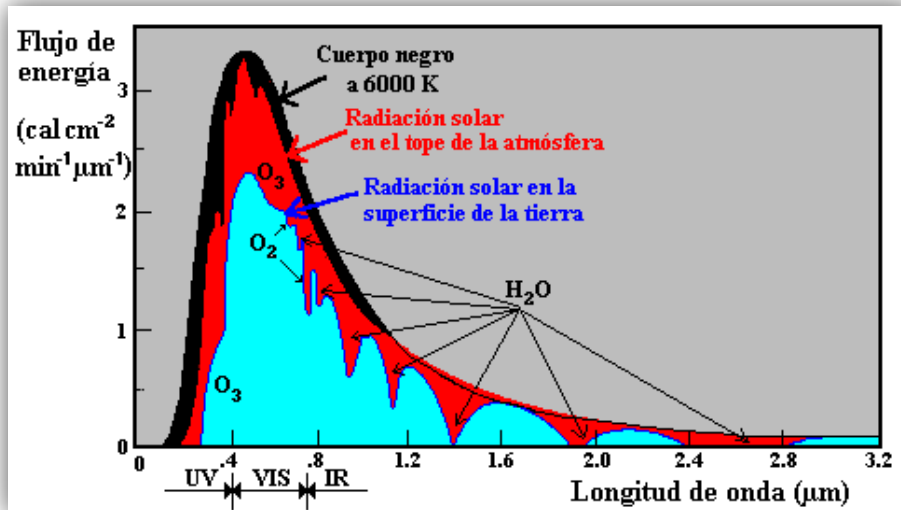


Figura 1.11 Curva de emitancia radiativa del Sol.
Fuente: <http://meteolot.com>

Interacción de la radiación con los elementos que integran la PR

La radiación empleada para el estudio de la Tierra, como se ha mencionado anteriormente es emitida principalmente por el Sol e interacciona en función del tipo de elementos del que se trate, por lo que la radiación puede comportarse de tres formas diferentes:

- **Reflejiéndose**, la radiación es reenviada de vuelta al espacio;
- **Absorbiéndose**, la radiación pasa a incrementar la energía del objeto; y,
- **Transmitiéndose**, la radiación se transmite hacia abajo a otros objetos.

Partiendo de lo anterior, se considera que la radiación incidente en el elemento puede definirse como:

$$\frac{\phi_i}{\phi_i} = \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i}$$

En donde,

ϕ_i / ϕ_i , representa la radiación incidente total en el elemento;

ϕ_r / ϕ_i , representa la relación entre la radiación incidente total y la reflejada por el elemento;

ϕ_a / ϕ_i , representa la relación entre la radiación incidente total y la absorbida por el elemento; y,

ϕ_t / ϕ_i , representa la relación entre la radiación incidente total y la transmitida por el elemento.

A las relaciones anteriores se les conoce como reflectividad o también conocida como albedo (ρ), absorptividad (α) y transmisividad (τ), respectivamente. De modo que, también pueden ser representados los diferentes comportamientos que puede adoptar la radiación en un objeto (Figura 1.12) de la siguiente manera:

$$1 = \rho + \alpha + \tau$$

La interacción de la radiación con cada elemento, es decir, sus valores de ρ , α y τ , va a depender de la longitud de onda de que se trate y de las características de ese elemento.

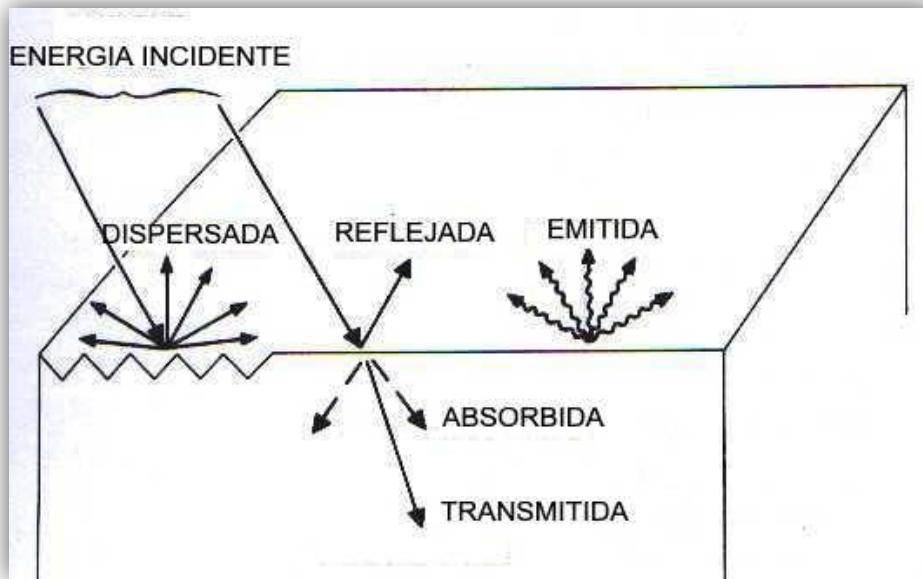


Figura 1.12 Formas de interacción de la radiación con la materia.

Fuente: <http://www-atmo.at.fcen.uba.ar/> <http://meteolot.com>

También es importante analizar los factores que interfieren en el flujo de energía que recibe el sensor, ya que no sólo depende de la reflectividad de la superficie u objeto en estudio. Los más importantes son:

- Condiciones atmosféricas
- Geometría de la observación
- La pendiente y orientación de la cubierta

Por ello, a continuación se presenta la interacción específica de la radiación electromagnética con los efectos que ocasionan dichos factores.

▪ Interacción radiación electromagnética - atmósfera

La atmósfera interviene de forma significativa en el proceso de la PR, pues para alcanzar la superficie terrestre la radiación proveniente del Sol debe atravesarla primero. A través de ella la radiación sufrirá una serie de transformaciones antes de poder llegar a la superficie, las cuales modificarán tanto sus características cualitativas como cuantitativas. Además, para ser detectada por un sensor a bordo de una plataforma satelital la radiación debe cruzar nuevamente la atmósfera.

La radiación en la atmósfera como anteriormente se mencionó, puede ser transmitida, absorbida, reflejada, pero, además dispersada. Los gases (anhídrido carbónico, oxígeno, ozono, nitrógeno y argón, principalmente), el vapor de agua y los aerosoles serán responsables del tipo y magnitud de las interacciones entre la atmósfera y la radiación. El anhídrido carbónico, ozono y vapor de agua son los principales responsables de la interacción con la radiación electromagnética.

El efecto que produce la atmósfera varía de acuerdo a las condiciones siguientes:

- Longitud de la trayectoria
- Magnitud de la señal de energía detectada
- Condiciones atmosféricas presentes
- Longitud de onda involucrada

Absorción atmosférica

Los componentes atmosféricos absorberán energía en determinadas longitudes de onda, Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Componentes atmosféricos causantes de la absorción

Componente atmosférico	Absorción
Oxígeno atómico (O ₂)	Porción de espectro correspondiente al ultravioleta
Ozono (O ₃)	Porción de espectro correspondiente al ultravioleta
Vapor de agua	En torno a 6μm y entre 0,6 y 2μm
Anhídrido carbónico (CO ₂)	En el infrarrojo térmico en torno a 15μm y en el infrarrojo medio entre 2,5 y 4,5μm

Debido a este efecto ocasionado por la atmósfera en la radiación, se reduce la transmisividad de la energía en determinadas regiones del espectro electromagnético, por lo que para llevar a cabo el proceso de PR es necesario recurrir a las *ventanas atmosféricas*, las cuales son bandas en las que la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta (Figura 1.13).

Es precisamente en las bandas donde se localizan las ventanas atmosféricas donde se lleva a cabo la observación de las superficies terrestres, por lo que los sensores que serán empleados en este tipo de estudios deben diseñarse de tal manera que perciban la radiación en esas longitudes de onda, Tabla 1.6. Por el contrario, para los satélites de observación atmosférica las bandas que emplean se ubican en aquellas porciones del espectro electromagnético de mayor absorción por parte de los componentes de la atmósfera que se desea estudiar.

Tabla 1.6 Principales ventanas atmosféricas

Banda del espectro electromagnético	Longitud de onda
Visible e infrarrojo reflejado	0,3 a 1.35μm
Infrarrojo medio	1,5 a 1,8μm; 2,0 a 2,4μm; 2,9 a 4,2μm; 4,5 a 5,5μm
Infrarrojo térmico	8 a 14μm
Micro-ondas	Por encima de 20mm

En general se considera que si el día es suficientemente despejado la absorción atmosférica puede despreciarse en las ventanas atmosféricas.

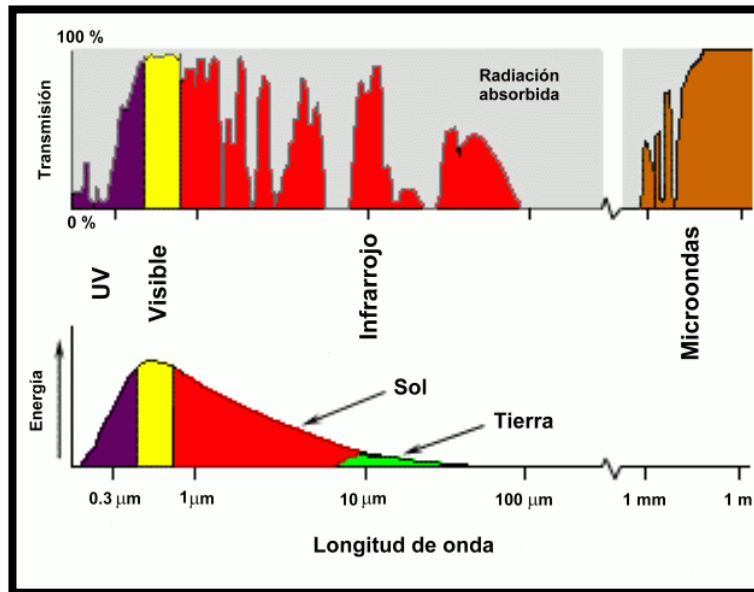


Figura 1.13 Transmisividad de la atmósfera a distintas longitudes de onda.
Fuente: Universidad de Murcia. Nuevas Tecnologías y Contaminación de Atmósferas, para PYMEs.

Dispersión atmosférica

Este efecto tiene lugar cuando las partículas atmosféricas en suspensión (agentes dispersores), como aerosoles o moléculas gaseosas, desvían o re-direccionan la radiación, por lo que la dispersión genera la radiación difusa y reduce la directa.

La dispersión puede representar una fracción sustancial de la radiación percibida por un sensor y su magnitud afectará la interpretación que realizamos del comportamiento espectral de la superficie. Debido a la elevada variabilidad espacio-temporal de las partículas atmosféricas resulta difícil establecer modelos generales para cuantificar su influencia final en las imágenes adquiridas por el sensor pero, por la importancia que tienen en los procesos de la observación terrestre se han desarrollado diversos modelos que buscan corregir la distorsión que introduce la dispersión atmosférica en la señal generada en la superficie.

Su magnitud dependerá de varios factores como la longitud de onda de la radiación, el tamaño de las partículas o moléculas atmosféricas y la distancia recorrida por la radiación en la atmósfera y, es en función de estos factores que se puede clasificar la dispersión que genera la atmósfera.

Tipos de dispersión

- *Rayleigh*

Predomina cuando la longitud de onda es mucho menor que el tamaño de los agentes dispersores, afecta por tanto a las longitudes de onda más cortas, por lo que se puede establecer

que la magnitud de la dispersión en este caso, resulta inversamente proporcional a la longitud de onda, y por ello es la de mayor influencia en la percepción remota. Por lo que, la radiación azul sufre una mayor dispersión que la roja, así, esta dispersión es la responsable del color azul del cielo (Figura 1.14).

- *Mie*

Ocurre cuando el tamaño de los agentes dispersores es igual o similar que las longitudes de onda incidentes, por lo que afecta a todas las longitudes de onda del espectro visible. Esta dispersión es generada por aerosoles (mezcla de vapor de agua, gases y partículas sólidas), así como del polvo atmosférico, y en menor escala a los incendios forestales o por brumas costeras.

Normalmente se produce en las capas bajas de la atmósfera, pues dada la naturaleza de las partículas que lo producen, éstas difícilmente se encuentran por encima de los seis kilómetros en cantidades apreciables (Figura 1.14).

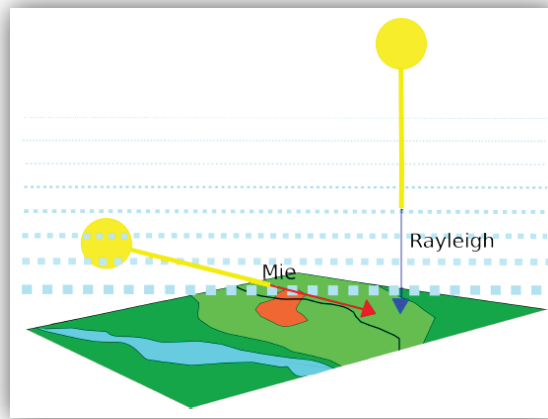


Figura 1.14 Dispersión de la radiación azul y roja.

Fuente: Universidad de Murcia. Apuntes de Teledetección.

- *No selectiva*

Afecta por igual a las diferentes longitudes de onda pues se debe a gotas de agua (nubes o nieblas) o partículas grandes de polvo. Y dado que la dispersión de este tipo es independiente de la longitud de onda, las nubes se verán blancas o grises, pues dispersan por igual toda la luz visible.

Emisión atmosférica

De acuerdo con lo establecido en la Ley de Planck, la atmósfera como cualquier otro cuerpo que se encuentra por encima del cero absoluto radia energía, por lo que tal energía debe ser considerada en los estudios que se lleven a cabo dentro del espectro infrarrojo térmico para la obtención de la emitancia espectral que proviene de la superficie terrestre. Resulta difícil diferenciar una radiación de la otra, pero se cuenta con procesos de corrección ante este efecto atmosférico.

Los problemas relacionados con la interacción de la atmósfera tienen mayor importancia en estudios multitemporales que si se trabaja con imágenes de una sola fecha, pues en éstas se

asume que la distorsión atmosférica es equivalente en todo el espacio (al menos en las imágenes de alta resolución que cubren una pequeña porción de la superficie terrestre).

▪ Interacción radiación electromagnética – superficie terrestre

Durante el proceso de la PR interesa obtener propiedades de la superficie o el objeto a partir de su reflectancia, la cual brinda elementos para evaluar como interactúa la radiación incidente con la superficie; tal información se obtiene a partir del sensor, que es el que la recibe.

Es aquí donde interesa la *geometría de observación*, pues parte de la calidad con la que la información 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.

La rugosidad que presenta la cubierta terrestre es un factor predominante sobre la geometría de observación, pues esta característica de las cubiertas puede cuantificarse a partir de la relación entre la altura promedio de las irregularidades de la superficie y la longitud de onda de la radiación, por lo que una superficie se percibirá como rugosa cuando la longitud de onda reflejada sea corta; y lisa cuando ésta sea larga, y, partiendo de ello se obtiene la siguiente clasificación:

- Superficie especular

La radiación es reflejada en una única dirección y formando un ángulo con la vertical igual al ángulo de la radiación incidente. Esta reflexión ocurrirá en el caso de superficies “lisas” (Figura 1.15).

- Superficie difusa

La reflexión difusa tiene lugar en todas direcciones y es generada por superficies “rugosas”. Cuando la superficie se comporta como un difusor perfecto, o sea la radiación es reflejada en todas las direcciones y en igual magnitud, denominamos a esa superficie como *lambertiana* (Figura 1.15).

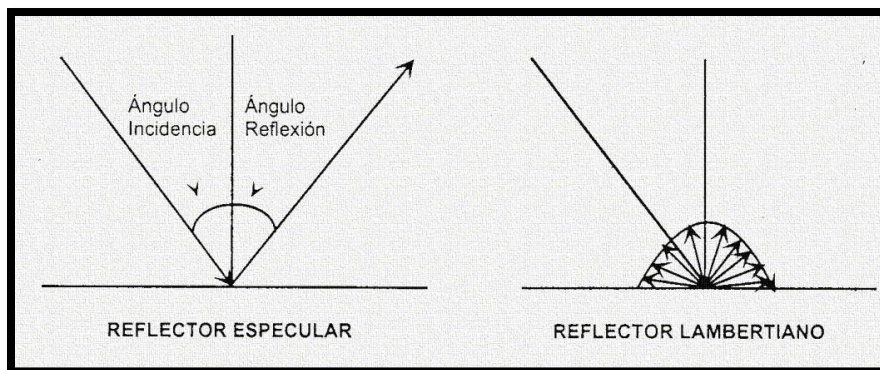


Figura. 1.15 Superficies espectaculares y difusas (lambertianas).

Fuente: Millán Pilar [et al]. Teledetección.

La mayor parte de las superficies naturales tienden a tener un comportamiento difuso, con la excepción por ejemplo del agua en calma en el espectro visible, que presenta un comportamiento

espectacular, en longitudes de onda mayores (microondas) también podemos encontrar superficies espectaculares, siempre que la rugosidad del terreno sea suficientemente pequeña.

Este comportamiento de las superficies también variará de acuerdo con el ángulo de incidencia de la radiación. Cuando el ángulo de incidencia respecto a la normal (perpendicular) a la superficie sea grande (por ejemplo, por la mañana) la superficie se comportará como rugosa mientras que el ángulo sea pequeño (al mediodía) lo hará como lisa.

Conjuntamente con los ángulos de incidencia y reflexión, tenemos otros factores que juegan un papel importante con la reflectividad que se genera de las cubiertas terrestres, pues también presenta variaciones estacionales, muy notables en el caso de las cubiertas vegetales. Por ello, el comportamiento de una cubierta en el espectro visible está influido además de sus características propias, por una serie de factores externos que modifican su comportamiento espectral como son:

- La modificación del ángulo de incidencia debida al cambio de fecha y del momento del día en que paso del satélite;
- El ángulo de reflexión relacionado con la órbita del satélite y con las características del sensor;
- Modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación (pendiente del terreno);
- Variantes medioambientales en la superficie: asociación con otras superficies, homogeneidad que se presenta, estado fenológico, etc.; y,
- Al comparar señal proveniente de distintos sensores (cambia el ángulo de observación).

Las superficies terrestres para su estudio a través de la percepción remota se diferencian por su comportamiento espectral. Las diferencias dependerán de una cantidad de factores ligados primeramente a las características químicas, estructurales y funcionales de las superficies.

La reflectancia de una superficie tendrá un comportamiento diferente dependiendo de la longitud de onda que se trate. Durante el estudio de los recursos terrestres, las superficies más importantes o representativas son, el agua, la vegetación y el suelo.

Agua

La transmisividad del agua clara es alta en el espectro visible, lo mismo que la absorción en el infrarrojo. Respecto a su reflectancia aparece un pico en el verde el cual va reduciéndose hasta el infrarrojo, y es precisamente debido a este comportamiento en el infrarrojo que se puede distinguir al agua de áreas de tierra como por ejemplo en las costas, lagos o ríos.

La respuesta espectral se ve alterada además de las características superficiales, por su profundidad y el fondo; por ejemplo, un fondo de arena clara proporciona mayor reflectancia que otro compuesto por materia orgánica en descomposición. La profundidad a la que la luz puede penetrar depende de la longitud de onda. Por tanto al incrementarse la profundidad del agua la reflectancia, en cualquier longitud de onda, desciende.

Cuando el agua es turbia, las consecuencias sobre la respuesta espectral dependen del agente que esté ocasionando la turbiedad. Si se debe a la presencia de fitoplancton, la reflectividad en la

banda verde aumenta mientras que en la azul disminuye. Si se debe a sedimentos inorgánicos la reflectividad aumenta, especialmente en el rojo.

La reflectividad en la nieve es muy particular ya que es alta en todas las longitudes de onda, especialmente en el caso de la nieve fresca, pudiendo incluso saturar los sensores.

Suelo

En el suelo, toda la energía se absorbe o refleja, ya que la transmisión es nula. La reflectividad es predominantemente baja para todas las bandas, pero va aumentando hacia el infrarrojo. Hay una relación muy estrecha entre su reflectividad y su contenido de agua; pues puede suceder que sean proporcionales o inversamente proporcionales, esto depende de que en algunas regiones el agua absorbe la energía.

También el tamaño de las partículas del suelo interviene en su respuesta espectral, de forma proporcional, ya que al aumentar el tamaño de las partículas también crece la reflectividad.

El contenido de materia orgánica es otro factor, cuanto mayor sea su contenido y cuanto menos descompuesta se encuentre más oscuro resulta el suelo lo que ocasiona una menor reflectividad. La composición química y mineralógica también va a influir en la respuesta espectral; así por ejemplo, el contenido en óxidos de hierro va a incrementar la reflectividad en el rojo.

Vegetación

La vegetación sana tiene una reflectividad baja en el visible aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila. Mientras tanto sucede todo lo contrario en el infrarrojo cercano ya que la reflectividad es muy alta debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que, el agua de la planta absorbe la energía, por lo que el contenido de agua representa un factor importante en el comportamiento espectral del suelo. En general cuanto menor sea el contenido de agua de una planta, mayor será su reflectividad en el infrarrojo medio.

En cuanto a la vegetación enferma su respuesta espectral disminuye en el infrarrojo y aumenta en el rojo y azul. La energía que viaja en longitudes de ondas mayores (infrarrojo cercano) es demasiado baja para poder ser aprovechada por la vegetación por lo que su absorción es muy baja, y el resto se trasmite o refleja.

La cantidad de energía de los fotones que viajan con longitudes de onda mayores (infrarrojo cercano) es demasiado baja para ser aprovechada por la vegetación por lo que sólo se absorbe en torno al 5%, el resto se transmite (40%) o refleja (55%). Sin embargo, la energía transmitida acabará llegando a otra hoja situada por debajo, y por tanto una porción importante de esa energía será reflejada. Este proceso, repetido en diferentes capas hace que se incremente el tanto por ciento de energía reflejada por un dosel vegetal.

El envejecimiento de la planta conlleva también una reducción en la reflectividad en el infrarrojo. Las variaciones en la estructura interna de las hojas son la causa principal de que los patrones de respuesta espectral sean diferentes de unas especies a otras.

La Tabla 1.7 incluye los factores que determinan la reflectividad del agua, suelo y vegetación.

Tabla 1.7 Factores que influyen en la reflectividad del agua, suelo y vegetación.

Superficie terrestre	Factores
Agua	-Sedimentos -Contenido de clorofila -Profundidad y características del fondo
Suelo	-Composición química -Contenido de materia orgánica -Contenido de humedad -Tamaño de las partículas del suelo -Rugosidad de la superficie
Vegetación	-Estructura de la hoja -Contenido de pigmentos -Estado hídrico -Arquitectura del dosel vegetal -Ángulo de incidencia -Radiación incidente -Efectos del suelo

Los distintos tipos de superficie difieren en su comportamiento espectral, esto puede ser comparado y caracterizado desde los espectros de reflectancia, que son curvas obtenidas a partir de medidas de laboratorio para las principales cubiertas terrestres. Estas curvas reciben el nombre de *firmas espectrales* pues representan la particularidad con la que una superficie terrestre específica refleja la energía electromagnética a distintas longitudes de onda (Figura 1.16). Es importante mencionar que el comportamiento espectral de una superficie puede variar debido a factores como la irradiancia solar y condiciones atmosféricas pero resultan muy útiles para realizar una correcta interpretación de las imágenes así como para la elección de las bandas idóneas para llevar a cabo la observación remota de la superficie en estudio.

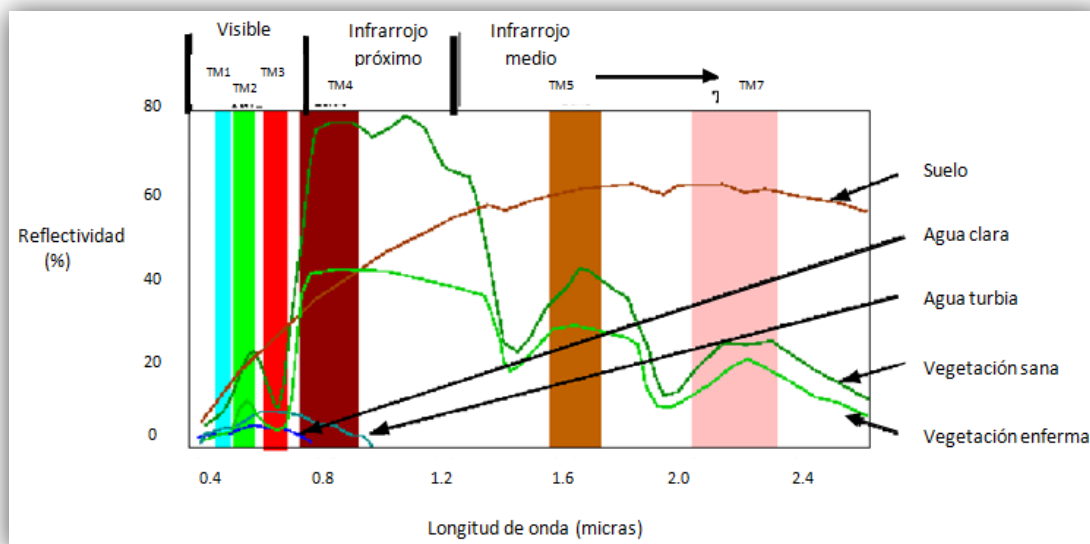


Figura 1.16 Respuestas espectrales de distintas cubiertas terrestres.

Fuente: <http://www.unmsm.edu.pe/>

Sensores y plataformas

Plataforma

La plataforma se refiere a los satélites o aviones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia.

Satélites

Existen dos tipos fundamentales de satélites, los geosíncronos o geoestacionarios y los heliosíncronos. Los primeros se sitúan sobre el Ecuador a una órbita a 36000 km de la Tierra. Permanecen siempre en la vertical de un punto determinado acompañando a la Tierra en su movimiento de rotación. Es el caso de Meteosat, situado sobre la perpendicular entre el meridiano 0° y el Ecuador, desde el que se obtienen imágenes de la parte de la Tierra visible desde el punto en que se encuentra. Los satélites heliosíncronos se desplazan en órbitas generalmente circulares y polares (el plano de la órbita es paralelo al eje de rotación de la Tierra) de modo que, aprovechando el movimiento de rotación terrestre, puede captar imágenes de diferentes puntos cada vez que pase por el mismo punto de la órbita. Estas órbitas sólo son posibles entre 300 y 1500km de altura. La órbita se diseña de forma que el satélite pasa siempre sobre el mismo punto a la misma hora local.

Tabla 1.8 Principales sensores

Sensor	R.espacial	Tamaño	R.temporal	R.Radiométrica	R.Espectral
Meteosat	2500 m	Toda la esfera	0.5 horas	256 ND	V,Ic,It
NOAA AVHRR	1100 m	2700 x 2700 Km	12 horas	1024 ND	2V,Ic,It
Landsat TM	30 m	185x185 Km	16 días	256 ND	3V, 3Ic,It
SPOT HRV	20 m	60x60 Km	20 días	256 ND	2V, Ic
SPOT Vegetation	1150 m	2200x200 Km	1 día	1024 ND	2V, 2Ic
MODIS	250 m	2330x2330 Km	1 día	1024 ND	36 bandas
IRS	15 m		24 días	128 ND	3V,Ic
IKONOS	4 m	100x100 Km	a petición	2048 ND	3Vis, Ic
QuickBird	0.7 m	100x100 Km	a petición	2048 ND	3Vis, Ic

Sensor

Un sensor es el aparato que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia y que es transportado en una plataforma. Puede captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina canal o banda.

Clasificación de los sensores

Una primera clasificación de los sensores se refiere a sensores activos (generan su propia radiación y la reciben rebotada) y sensores pasivos (reciben radiación emitida o reflejada por la Tierra). Dentro de los sensores pasivos están los sensores fotográficos, óptico-electrónicos que combinan una óptica similar a la fotográfica y un sistema de detección electrónica (detectores de barrido y empuje), espectrómetros de imagen, y de antena (radiómetros de microondas). Por lo que se refiere a los sensores activos, actualmente se dispone del radar y el lidar (basado en tecnología laser).

En un sistema óptico-electrónico la radiancia recibida por los componentes ópticos se descompone en varias longitudes de onda, cada una de ellas se envía a un conjunto de detectores sensibles a diversas regiones del espectro que la amplifican y la convierten en señal eléctrica y finalmente en un valor numérico conocido como Nivel Digital (ND). Estos valores numéricos pueden convertirse otra vez a valores de radiancia conociendo los coeficientes de calibrado. Existen dos grandes tipos de sistemas óptico-electrónicos: los radiómetros de barrido y los radiómetros de empuje.

Los radiómetros de barrido son los más comunes en teledetección. Disponen de un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria permitiendo explorar una franja de terreno a ambos lados de esta. Cada movimiento del espejo supone que se envíe información de una franja distinta al conjunto de sensores.

Los radiómetros de empuje eliminan el espejo oscilante al disponer de una cadena con un gran número de detectores de manera que se cubre todo el campo visual del sensor. Ello permite aumentar la resolución espacial y reducir los errores geométricos ya que se ha eliminado la parte móvil, y poco robusta, de los detectores de barrido. Como contrapartida resulta bastante compleja la calibración de todos los sensores al mismo tiempo para que se comporten de forma homogénea. Estos problemas son especialmente graves en el infrarrojo. En el futuro se dispondrá de sensores capaces de captar toda la imagen, como una matriz bidimensional, al mismo tiempo; de esta forma se reducirán los problemas de tipo geométrico.

Los espectrómetros de imagen constituyen una nueva generación de instrumentos cuya misión es obtener imágenes en un gran número de bandas obteniendo un espectro casi continuo de radiación. Existen radiómetros de barrido y empuje.

Los radiómetros de microondas están compuestos por una antena que actúa como elemento receptor y amplificador de la señal de microondas (que es muy débil) y un detector. En este tipo de sistemas, la resolución espacial es inversamente proporcional al diámetro de la antena y directamente proporcional a la longitud de onda. Además se necesitan tamaños de pixel lo suficientemente grandes para recoger una señal de radiación lo suficientemente amplia. Por tanto la resolución espacial es pequeña y sólo pueden aplicarse en estudios globales.

El radar trabaja en una banda comprendida entre 1 mm y 1 m. Se basan en el principio de que las microondas artificiales enviadas en una dirección determinada chocan con los objetos y son dispersadas. La energía dispersada se recibe, se amplifica y se analiza para determinar la localización y las propiedades de los objetos. Puesto que puede medirse también el tiempo que tarda un pulso de radiación en ir y volver, puede conocerse la distancia recorrida y generar así modelos digitales de elevaciones (aunque con problemas ya que quedan zonas de sombra en áreas abruptas). Debido a su capacidad para trabajar sean cuales sean las condiciones atmosféricas su uso se ha extendido considerablemente, especialmente en zonas con cobertura nubosa persistente.

En función de la orientación con la que el sensor capta las imágenes se distingue entre sensores de:

- *Orientación vertical*, habitual en satélites de resolución espacial baja (meteosat) o media (Landsat)

- *Orientación oblicua*, típica del radar
- *Orientación modificable*, aparece en los sensores de alta resolución a partir del SPOT-IHV. Permite mantener una elevada resolución espacial y tener una resolución temporal (tiempo de revisita) también elevada. Ya no se toman imágenes de toda la superficie terrestre de forma sistemática sino que el sensor es orientado por encargo. El inconveniente es que es difícil encontrar imágenes a posteriori, ya que sólo se toman aquellas imágenes que se han encargado previamente.

Resolución de los sensores

- *Resolución espacial*

Se refiere al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la imagen de satélite. Se mide en unidades de longitud (metros sobre el terreno), y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie. Esa distancia, corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, que se denomina píxel; esta es la medida más generalizada de la resolución espacial. La resolución espacial está en estrecha relación con la escala de trabajo y con la fiabilidad finalmente obtenida en la interpretación.

- *Resolución espectral*

La resolución espectral indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Entre los sensores espaciales, la menor resolución espectral corresponde al radar y a los sistemas fotográficos; por el contrario, los sensores óptico-electrónicos ofrecen un amplio ámbito de bandas. La elección del número, anchura, localización de las bandas que incluye el sensor está estrechamente relacionada con los objetivos de su diseño.

- *Resolución radiométrica*

Se refiere a la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. En el caso de los sistemas óptico-electrónicos, la imagen habitualmente se presenta en formato digital, gracias a una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite. El número de valores que incluye ese ámbito, es decir, el número máximo de niveles digitales de la imagen, suele identificarse con la resolución radiométrica del sensor. Actualmente, la mayor parte de los sistemas ofrecen 256 niveles por píxel, es decir, de 0 a 255.

- *Resolución temporal*

La resolución temporal indica el intervalo de tiempo entre cada imagen obtenida por la plataforma (seleccionada en el caso de los aviones) cada media hora en el caso de los satélites geosíncronos y variable en el caso de los satélites heliosíncronos. Recientemente se han desarrollado satélites de

muy alta resolución espacial con sensores orientables, de manera que la zona de la que captan imágenes es relativamente independiente de la posición que ocupe el satélite.

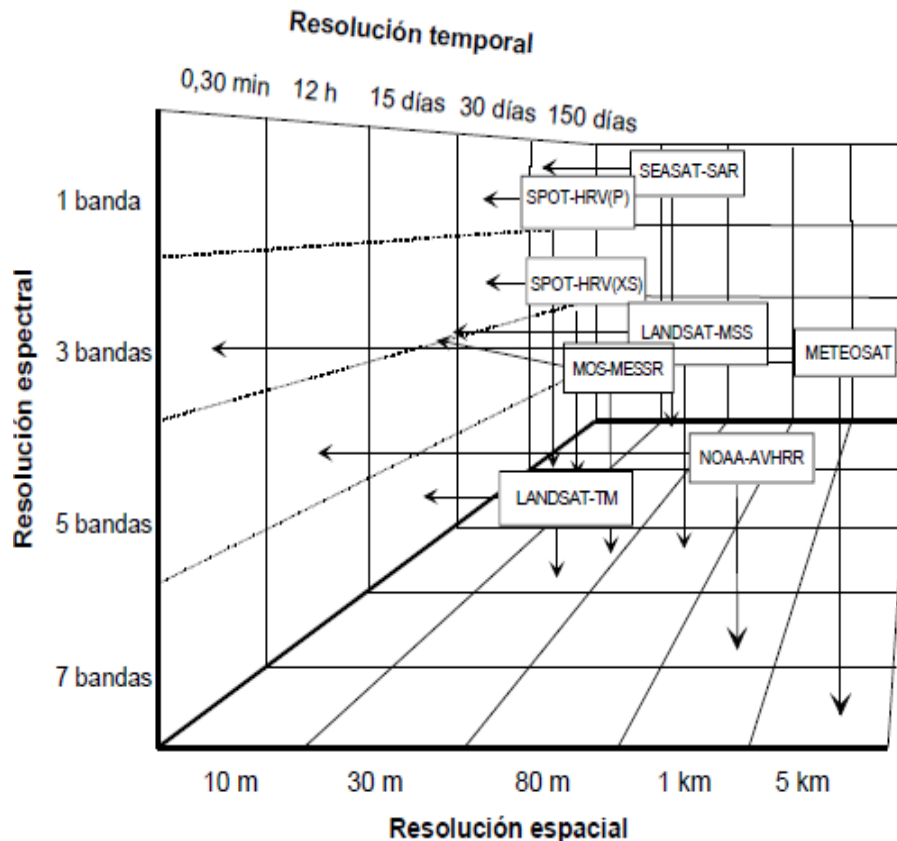


Figura 1.17 Relaciones entre resolución espacial, espectral y temporal para distintos sensores.

Fuente: Chuvieco, Fundamentos de Teledetección espacial.

1.3 Aplicaciones de la percepción remota a la evaluación de la calidad del agua

La calidad del agua es el término general que describe si el agua puede ser utilizada o si el ambiente puede estar en peligro por los contaminantes existentes en el agua, por ello su estudio y control es tan indispensable, ya que es un elemento esencial para todo ser vivo. Así que, por la importancia que implica, la PR es también aplicada en estas actividades.

Ahora bien, la región del espectro electromagnético que incluye la luz visible e infrarroja se utiliza para detectar indicadores de la calidad del agua midiendo la energía electromagnética reflejada, mientras que en la región del térmico infrarrojo mide directamente la energía emitida; en el caso de la región de microondas únicamente se puede emplear en el caso de que se busquen contaminantes superficiales, como capas de aceites.

En general, pueden establecerse relaciones entre parámetros de calidad del agua dados y la reflectancia, debido a que la intensidad y color de la luz es modificada por el volumen del agua y sus contaminantes de esta forma, puede generarse relaciones empíricas entre mediciones de reflectancia y la calidad del agua de una muestra. El grado al cual la luz es atenuada por el agua

varía con la longitud de onda de la luz, y con la naturaleza, concentración y color del contaminante del agua. En la Figura 1.18 se muestra cómo la luz es atenuada por el agua clara.

Como puede apreciarse, la naturaleza empírica de este planteamiento requiere desarrollar una relación única para cada estudio de calidad del agua, incluso aun para un mismo estudio pueden llegar a cambiar debido a que la concentración del parámetro en el agua puede modificarse. Para poder desarrollar tales relaciones empíricas, es necesario realizar programas de muestreo periódico en campo, y posteriormente programas de muestreo adicionales para verificar la calibración. En el caso de estudios con imágenes adquiridas en diferentes fechas y/o distintos sensores, es necesario modelar los factores que intervienen en la señal detectada por el sensor, los cuales incluyen relaciones angulares entre el Sol y el sensor, y la composición de la atmósfera.

Las aplicaciones de la PR empleando la región del térmico infrarrojo han sido básicamente en la medición de diferencias de temperatura. La interpretación de los datos térmicos se relaciona generalmente con información auxiliar, aunque, la contaminación térmica en la superficie del agua puede medirse directamente con un explorador térmico.

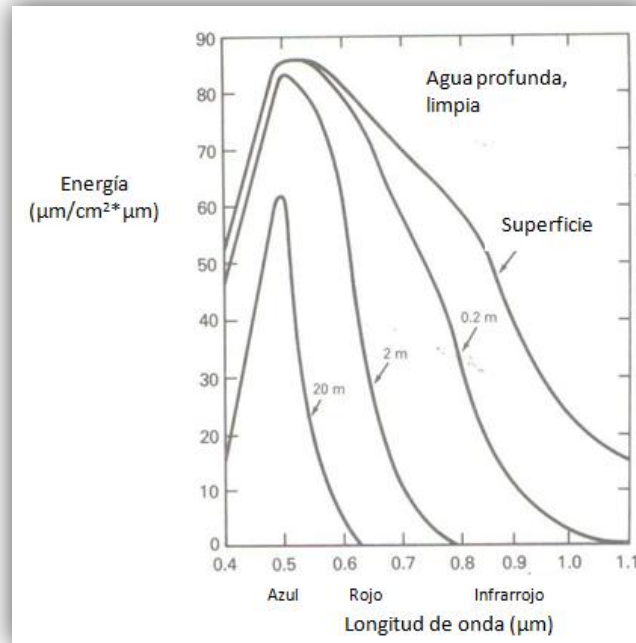


Figura 1.18 Ilustración de como la luz es atenuada por el agua clara. Notar que en la región infrarroja hay muy poca penetración en el agua.

Fuente: ENGMAN, Edwin Taylor. Remote sensing in hydrology

Determinación de la calidad del agua

La aplicación de la PR se limita a aquellas características del agua que pueden detectarse en las regiones del espectro electromagnético detalladas anteriormente. Al respecto, se ha usado exitosamente en indicadores tales como: color, turbiedad y sólidos suspendidos.

Color

El color es un parámetro de calidad del agua que proporciona información cualitativa respecto a la productividad biológica y a la apariencia química de los cuerpos de agua. El color verdadero se debe a la presencia de sólidos en suspensión coloidal o en solución y para su determinación deben tomarse muestras y determinarse *in situ*, mientras que el color aparente es aquel que se percibe directamente y que puede ser causado por la reflexión de la luz en los sólidos en suspensión, el fondo del cuerpo de agua, o el reflejo del cielo. Frecuentemente el color aparente se determina como indicador de la presencia de vida y de sólidos suspendidos en el agua. Algunas veces estos cambios son muy sutiles o son eliminados por otras fuentes de color en el agua natural y por eso no son detectables por técnicas comunes de PR.

Turbiedad

Parámetro que se define como la transparencia óptica o grado de opacidad producido en el agua por materia particulada en suspensión.

La turbiedad varía espacial y temporalmente, cambia al modificarse las descargas en los afluentes y con las corrientes internas, con la estratificación térmica y los ciclos de vida en el agua. La percepción remota constituye un buen método para un monitoreo de estos cambios. Gran parte de la dinámica de un cuerpo de agua, así como su calidad se puede deducir de los datos de turbidez. Por ejemplo, Abiodun (1976) fue capaz de identificar cinco masas de agua distintas en el Lago Kainji en el río Níger. Más tarde el trabajo de Abiodun y Adeniji (1978) demostró que la clasificación espectral de las aguas del lago con la secuencia de datos del Landsat podría ser utilizado para trazar el movimiento de masas de agua diferentes.

Sólidos

La presencia de sólidos en el agua cambia notablemente las características de dispersión del agua; ya que la concentración de sólidos incrementa la energía reflejada si se compara con lo que refleja el agua clara, lo que puede verse en la Figura 1.19. Sin embargo, la reflectancia de los sólidos y el agua permanece baja en la porción del infrarrojo cercano a menos que esté presente una cantidad significativa de algas. La restricción de un sensor para detectar turbiedad a una profundidad aproximada de 1m, cuando mucho, limita su aprovechamiento para la detección de sólidos suspendidos superficiales.

Un gran número de estudios han sido realizados con Landsat multiespectral scanner (MSS) para relacionar las concentraciones de sedimentos suspendidos con las mediciones de reflectancia (Yarget et al 1974; Ritchie et al 1976; Munday y Alfoldi 1979; Aranuvachapum y Le Blond 1981, Whitlock y col. 1981). Los datos de Landsat MSS constituyen un medio ideal para la supervisión sedimentos en suspensión en cuerpos de agua grandes. Una de las ventajas del enfoque de Landsat es que la distribución de los sedimentos se puede asignar al espacio y, cuando los datos de calibración adecuados están disponibles, se pueden trazar líneas de isoconcentración.

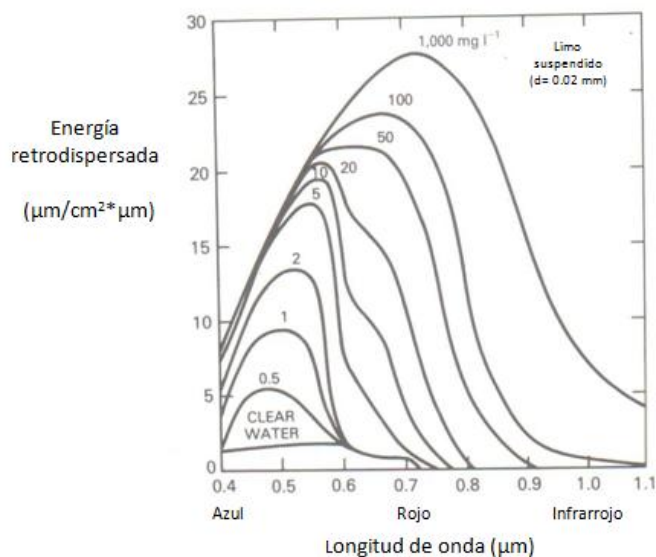


Figura 1.19 Ilustración del incremento en la dispersión de energía al incrementarse la concentración de sedimentos.

Fuente: ENGMAN, Edwin Taylor. Remote sensing in hydrology.

Fuentes de de contaminación no puntuales y erosión

La PR tiene una importante participación en estudios para la estimación de fuentes de contaminación no puntuales; la contaminación causada por este tipo de fuentes contaminantes, está estrechamente relacionada con la cubierta de suelo y su uso, de manera que cuando se asocia cubierta de suelo y topografía puede describirse el potencial de calidad del agua del escurrimiento pluvial.

Diversos grupos de investigación han empleado datos de Landsat como información de entrada de la cubierta del suelo para modelar este tipo de fuentes de contaminación (Shecter 1976; Ok 1975; Ragan y Rogers, 1978). Uno de los modelos es el de Okl, que a través del cual se puede estimar la erosión y contribución de sedimentos; el modelo se basa en la evaluación de la ecuación universal de pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1978):

$$A = RKLSCP \quad [1.10]$$

donde,

A, es el promedio anual de pérdida del suelo por unidad de área, R, es el factor de precipitación; K, el factor de erosión del suelo; L, el factor de longitud de la pendiente; S, el factor de inclinación de la pendiente; C, el factor de manejo de cultivo; P, el factor de control la erosión. Para estos estudios, el factor de manejo de cultivo, C, y el control de la erosión del factor de la práctica, P, fueron agrupados en un solo parámetro y estimados a partir de datos del Landsat.

Un enfoque similar fue utilizado para un estudio de ocho condados en el centro de New York (Campbell, 1979). En este estudio el potencial de contaminación no puntual define como:

$$PNP = f(\text{características del suelo} \times \text{uso agrícola del suelo} \times \text{intensidad de proximidad al agua}) \quad [1.11]$$

Este índice se aplica a las celdas de aproximadamente 62 hectáreas (o 53 píxeles Landsat). Los datos de intensidad de uso agrícola se derivan de los datos del Landsat. Las características del suelo se determinan a partir de los datos en los estudios de erosión del suelo y la proximidad a la superficie del agua se midió mediante un recuento de celdas de los cuerpos de agua identificados en mapas topográficos. Otro estudio realizado por Pelletier (1985) describe la adaptación de un sistema de información geográfica (SIG) a la ecuación universal de pérdida de suelo (Wischmeier y Smith, 1978) que utiliza los datos, ya sea del Landsat MSS (79m de resolución) o el Landsat TM (30 m de resolución) para determinar la cobertura del suelo y, posteriormente, el factor de manejo de cultivo.

En los casos citados anteriormente, la erosión del suelo no se ha medido directamente por las técnicas de teledetección. En todos los casos, se han determinado varios factores relativos al tipo y uso del suelo, y topografía para estimar la erosión.

Estado trófico de cuerpos de agua

El estado trófico de un cuerpo de agua se refiere a la descripción de su productividad y de sus nutrientes. Para caracterizar el estado trófico de un cuerpo de agua pueden utilizarse como indicadores los primeros descritos en los apartados anteriores, sin embargo, los factores de mayor interés son el nitrógeno y el fósforo.

Investigadores como Witzing y Whitehurst (1981) han propuesto índices numéricos del estado trófico y su estimación a partir de datos del Landsat, pero no son aplicables a todas las regiones físico-climáticas y dimensiones del cuerpo de agua.

Los datos del térmico infrarrojo del Landsat se han usado exitosamente para evaluar la calidad del agua en lagos, como en el estudio del Lago Utah en E.U.A., realizado por Miller y Rango (1984), donde correlacionaron la capacidad de emisión del calor con concentraciones de algas, obteniéndose como resultado una alta correlación positiva entre la energía térmica emitida y la concentración de algas, durante el día, mientras en el período de la noche la correlación resultó negativa.

2. Procesamiento y análisis digital de las imágenes

La finalidad de este capítulo es presentar el conjunto de técnicas y métodos más usuales utilizados en el procesamiento y análisis digital de las imágenes con el objetivo de poder extraer de manera óptima la información requerida con la ayuda de hardware y software.

El procesamiento digital de imágenes es un tema extremadamente amplio, y a menudo involucra procedimientos que pueden ser matemáticamente complejos. Por lo que el objetivo de este capítulo es dar una introducción a los principios básicos del procesamiento sin ahondar tanto en los detalles matemáticos involucrados. Cabe mencionar que también es posible fundamentar la interpretación de imágenes empleando un análisis visual únicamente.

Comúnmente las funciones disponibles en los sistemas de análisis digital se categorizan de la siguiente manera:

- Procesamiento y rectificación de la imagen
- Realce de la imagen
- Clasificación digital

Primeramente se detallará la estructura básica de una imagen digital.

- *Imagen*

Este término se refiere a la representación de la intensidad de luz a través de una función bidimensional donde x e y son las coordenadas espaciales, por lo que el valor de tal función en cualquier punto (x,y) es proporcional al brillo de la imagen en ese punto.

- *Imagen digital*

Se puede considerar como una matriz en la cual las filas y columnas determinan un punto en la imagen y el correspondiente elemento de matriz identifica el valor de gris en ese punto.

- *Píxel*

Es la unidad mínima de información en una imagen digital, definido por un número entero ND (nivel digital).

- *Nivel digital (ND)*

Es un valor digital que puede traducirse a una intensidad visual (nivel de gris), mediante cualquier convertidor digital – analógico.²

- *Histograma*

El histograma de una imagen ofrece una descripción global de la apariencia de la imagen. El histograma de valores de un canal de una imagen digital es una función que expresa el número o frecuencia de ocurrencia de píxeles asociados a cada nivel digital. Se puede deducir el número de píxeles que pertenecen a cada una de las intensidades de la escala de gris adoptada. El histograma puede representarse gráfica o digitalmente. Existen tres formas comúnmente empleadas de

representación gráfica: por medio de barras, columnas o gráfica, en las cuales se presentan generalmente un eje horizontal con los niveles digitales de 0 a 255 y un eje vertical con el número de pixeles. Mientras que la forma digital es un cuadro, que presenta de entrada los valores posibles de las cuentas digitales de la imagen, de 0 a 255, y como salida el número de pixeles asignados a cada una de ellas.

La idea central detrás del procesamiento de una imagen digital es bastante simple. De acuerdo con lo comentado en el Capítulo anterior, el proceso de adquisición de una imagen digital, en el caso particular de los equipos óptico-electrónicos, parte de la radiancia recibida a través del sensor proveniente de los objetos, la cual es convertida a una señal eléctrica que a su vez genera un nivel digital para cada pixel que conforma la imagen (Figura 2.1).

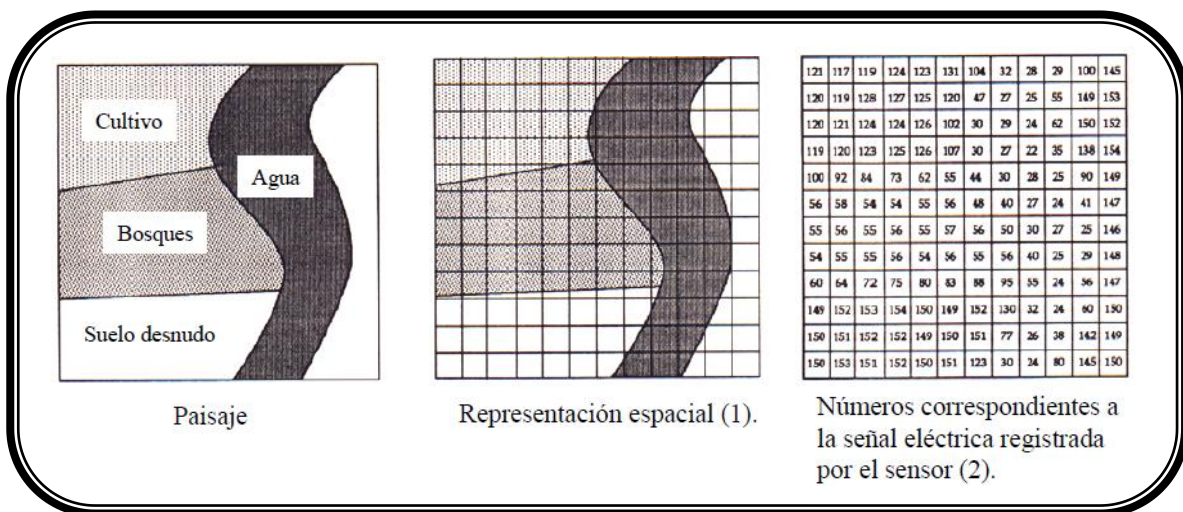


Figura 2.1 Formación numérica de un canal de una imagen satelital.
 Modificada de Catro, Roberto. Taller de fundamentos de percepción remota.

El sistema sensor, además se encarga de generar para cada pixel lo que se conoce como “valores de canales”, denominándosele de esta forma a la radiancia recibida en una determinada banda del espectro. Para cada canal o banda se produce un número binario en la digitalización (un bit, 0 ó 1), así que 8 bits pueden usarse para almacenar los valores de un canal (nivel digital correspondiente a cada pixel).

Entonces, una imagen digital se conforma a través de una localización espacial y espectral, esto puede esquematizarse en la Figura 2.2, en donde se ve que se trata de una matriz numérica de tres dimensiones; las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras que la tercera indica su dimensión espectral. Para expresar la dirección Norte - Sur se emplean las filas de la matriz, y, las columnas para indicar la orientación Oeste - Este. En estas matrices, el origen de las coordenadas se ubica en la esquina superior izquierda (línea 1, columna 1); esto se debe a la secuencia de adquisición de imágenes, de Norte a Sur de acuerdo a la traza del satélite. Y finalmente, la tercera dimensión corresponde a la resolución espectral del sensor,

por lo que el número de canales o bandas con las que contará cada matriz varía de acuerdo al equipo empleado.

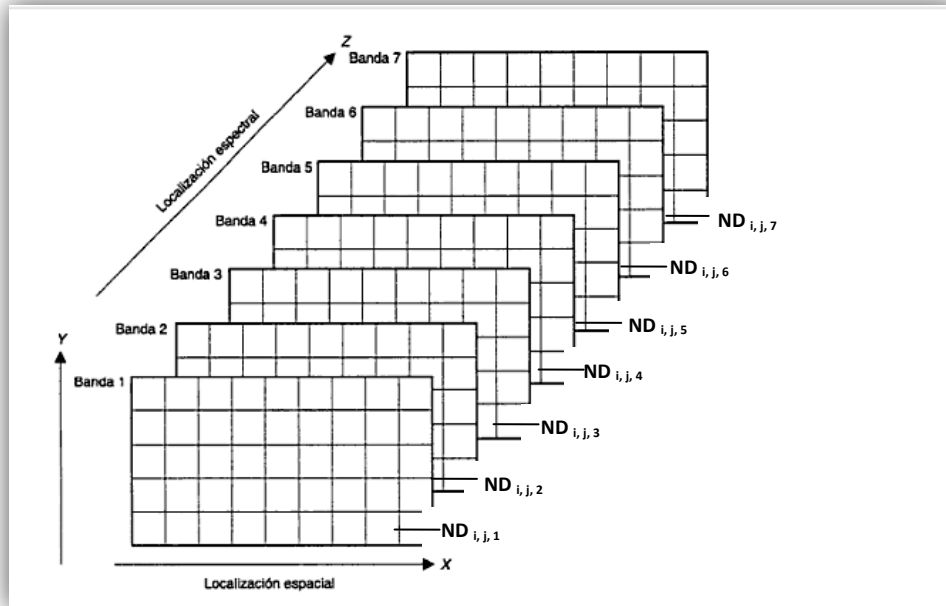


Figura 2.2 Organización de una imagen digital TM.

Fuente: Chuvieco, Emilio. Fundamentos de teledetección espacial.

Ahora bien, existen varios *formatos de grabación* para recopilar 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 (2^8 , de 0 a 255). La Tabla 2.1 contiene la descripción de los formatos de grabación más habituales así como su ilustración respectiva para facilitar su comprensión.

Las imágenes satelitales también incluyen normalmente un archivo de cabecera en donde se almacena el formato con el que están grabados los niveles digitales que la componen, el tipo de correcciones aplicadas por la estación receptora y las condiciones en que se adquirió la imagen, como: día, tipo de sensor, elevación, localización de la escena, etc.

Tabla 2.1 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, y 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.	
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.	
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.	

2.1 Procesamiento y rectificación de la imagen

Durante el proceso de captura de la imagen se presentan errores que conllevan a tener anomalías en la información que se ha obtenido. Es por ello que, se requieren operaciones que tiendan a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea.

Este primer grupo de funciones se requiere desarrollar antes de llevar a cabo la manipulación y extracción de la información, ya que permiten hacer correcciones de distorsiones geométricas y radiométricas así como para eliminar el ruido introducido durante el proceso de captación. Y es por ello que también se suele referir a ellas como *pre-procesamiento* de la imagen.

Las fuentes de error en el caso particular de las imágenes, se deben frecuentemente a distorsiones originadas por la plataforma, por la rotación terrestre, por el sensor o por la atmósfera. Algunos de estos inconvenientes se arreglan comúnmente en los centros encargados

de la recepción o venta de imágenes; sin embargo, otros persisten, haciendo precisas una serie de técnicas de ajuste.

Distorsión y corrección geométrica

Las fuentes de este tipo de distorsiones van desde variaciones en la exploración e inestabilidad de la plataforma, geometría del sensor, rotación de la Tierra y su curvatura. La intención de las correcciones geométricas (Figura 2.3) es compensar las distorsiones introducidas por estos factores para que la imagen corregida pueda tener la calidad geométrica de un mapa.

El proceso de una corrección geométrica normalmente se lleva a cabo como un procedimiento de dos pasos. Primero, aquellas distorsiones que son *sistemáticas*, o predecibles, son consideradas, para luego, seguir con aquellas distorsiones que son esencialmente al *azar*, o no predecibles.

Las distorsiones sistemáticas son bien conocidas y fácilmente corregidas por la aplicación de fórmulas derivadas del modelado de las fuentes de sus distorsiones; mientras que, para las distorsiones no predecibles, su corrección involucra un análisis empleando lo que se conoce como, *puntos de control en tierra (GCPs)*, los cuales nos permiten geo-referenciar las imágenes obtenidas a través de percepción remota, es decir, transformar las coordenadas de la imagen en coordenadas cartográficas (UTM u otras proyecciones), con lo que la imagen resultante puede superponerse usando mapas convencionales o, ajustar dos o más imágenes entre sí como en el caso de estudios multi-temporales.

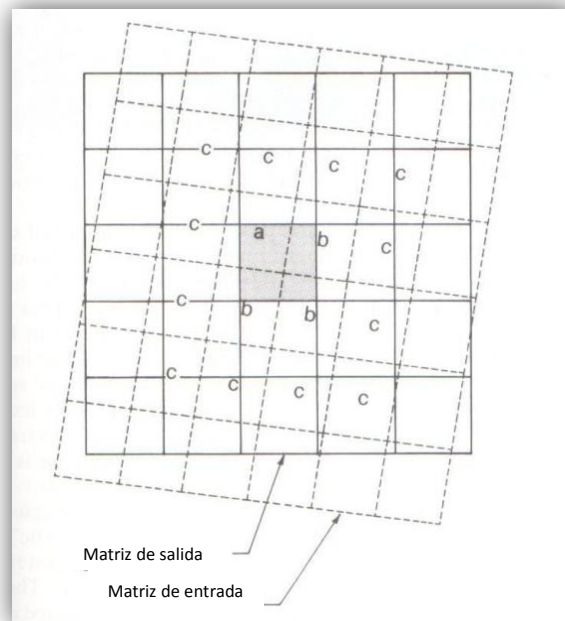


Figura 2.3 Corrección geométrica de la imagen (matriz de píxeles de salida geoméricamente correcta superpuesta sobre la matriz de píxeles de entrada distorsionada).

Fuente: Lillesand, Remote sensing and image interpretation.

Pero para ambos casos, el proceso que se lleva a cabo para realizar las correcciones geométricas se realiza en tres fases:

- 1) Localización de puntos comunes a la imagen y al mapa (o a otra imagen de referencia)
- 2) Cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y las del mapa; y,
- 3) Transferencia de los ND originales a la nueva posición, definida por la transformación previa.

Tal transformación está basada en funciones numéricas. Esta transformación es generada a través de los siguientes polinomios:

$$x = a_0 + a_1r_n + a_2c_n \quad [2.1]$$

$$y = b_0 + b_1r_n + b_2c_n \quad [2.2]$$

donde:

r_n : es el número de renglón

c_n : es el número de columna

x e y : son las coordenadas del mapa; y,

a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 y b_2 : son los coeficientes de los polinomios

Como puede apreciarse, se necesita primeramente calcular los coeficientes de los polinomios; para ello tendrán que seleccionarse varios puntos que puedan localizarse exactamente en el mapa (x, y), y que además sean identificables en la imagen (renglón, columna). Es necesario que tales puntos sean claramente identificables en la imagen y en el mapa, como lo son, por ejemplo, rasgos físicos de carácter antropogénico no sujetos a cambios temporales (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 este número mínimo para obtener una transformación óptima con el más pequeño error en la posición de los puntos seleccionados. Los errores pueden deberse a una pobre posición del mouse en la imagen y por una denominación equivocada de las coordenadas en el mapa. La exactitud general de la transformación está dada por el promedio de los errores en los puntos de referencia y, se le conoce como *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 el total de 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. Se continúa calculando nuevamente 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.

Ya que se obtiene una precisión de la transformación aceptable, tal transformación es relacionada con la imagen y puede hacerse una referencia para cada pixel dado por el sistema coordenado, así la imagen es geo-referenciada, por lo que la imagen tendrá coordenadas para cada pixel pero su geometría no está corregida por las distorsiones geométricas y no está adaptada al mapa de referencia; por lo que es necesario transferir los niveles digitales a su nueva posición. Las funciones de ajuste permiten calcular la posición correcta de cada pixel, pero no originan de suyo

una nueva imagen, puesto que solo suponen sólo una transferencia de coordenadas y no de niveles digitales.

Entonces, para corregir en su totalidad la imagen se utiliza el procedimiento conocido como “re-muestreo”, que permite determinar los niveles digitales; y, son tres los métodos que permiten llevarlo a cabo: vecino más próximo, interpolación lineal, y convolución cúbica. A continuación se describen brevemente cada una de ellos.

- *Vecino más próximo*

Sitúa en cada celda de la imagen corregida el ND del pixel más cercano en la imagen original. Por lo que resulta ser el método más rápido ya que supone menor transformación de los ND originales. Su mayor inconveniente está en la distorsiones que introducen en rasgos lineales de la imagen, que pueden aparecer en la imagen corregida como líneas quebradas.

- *Interpolación lineal*

Para asignar el nuevo valor digital, promedia el ND de los cuatro pixeles más cercanos en la original. Este promedio se pondera de acuerdo a la distancia existente entre el pixel original y el corregido. Con este método se disminuye el efecto de distorsión en rasgos lineales, aunque tiende a difuminar un poco los contrastes espaciales de la imagen original.

- *Convolución cúbica*

Supone un volumen de cálculo mayor, ya que considera los ND de los 16 pixeles más cercanos; con lo que se logra obtiene un efecto visual más correcto.

Distorsión y corrección radiométrica

Las distorsiones radiométricas son las provocadas por la atmósfera así como los problemas radiométricos provenientes del mal funcionamiento del sensor. A diferencia de las correcciones geométricas que modifican la posición de los pixeles, aquí solo se pretende modificar sus niveles digitales. A continuación se presentan las correcciones radiométricas más comunes que se llevan a cabo.

Restauración de líneas o pixeles perdidos

Debido al mal funcionamiento del sensor o de la antena receptora de la imagen, a veces llegan a presentarse líneas o pixeles perdidos. En una visualización de la imagen, ésta presentaría una serie de líneas anómalas (negras o blancas), o incluso una serie de pixeles aislados de similar aspecto.²

En este caso se trata de información perdida por lo que a través de las correcciones lo que se busca es mejor de manera artificial el aspecto visual de la imagen. Así que la manera más lógica de dar solución a esta problemática es basarse en el criterio de vecindad, es decir, sustituir el ND de cada línea o pixel por el de los precedentes o posteriores (vecinos). En seguida se describen algunos métodos que se tienen para poder llevar a cabo este criterio.

El método más sencillo es la sustitución del ND, ya sea que se trate de una línea o pixel, por el de sus precedentes o posteriores. Se representa de la siguiente manera:

$$ND_{i,j} = ND_{i-1j} \quad [2.3]$$

donde:

ND_{ij} : es el ND de la línea i defectuosa y columna j

ND_{i-1j} : es el ND del píxel situado en la línea precedente. Para línea posterior subíndice $i+1$)

Otro método es obtener el promedio de los valores de las líneas anterior y posterior a la defectuosa. Es decir,

$$ND_{i,j} = \text{ent}\{(ND_{i-1j} + ND_{i+1j})/2\} \quad [2.4]$$

donde:

ent: indica que el resultado de la operación debe convertirse en el número entero más cercano.

Un tercer método de recuperar la información perdida utiliza una banda auxiliar, altamente correlacionada con la que presenta problemas. A partir de esta banda auxiliar, se estima el valor de los pixeles defectuosos de la forma siguiente¹:

$$ND_{i,j,k} = \text{ent} \left\{ \left(\frac{s_k}{s_r} \right) \left[ND_{i,j,r} - (ND_{i,j+1,r} + ND_{i,j-1,r})/2 \right] + (ND_{i,j+1,k} + ND_{i,j-1,k})/2 \right\} \quad [2.5]$$

donde:

s_k : desviación típica de la banda a restaurar "k"

s_r : desviación típica de la banda auxiliar "r"

Corrección del bandeo de la imagen

En algunas ocasiones, cuando se emplea para la captura de imágenes equipos de barrido secuencial, suele observarse un bandeo de la imagen, sobre todo en zonas de baja radiancia. Este bandeo, conocido típicamente como "*striping*" es inducido a un mal calibrado entre los detectores que integran el sensor. Esto, visualmente ocasiona la presencia de líneas más oscuras o claras, además resulta ser un efecto periódico.

El ajuste digital se logra asumiendo que los detectores involucrados, estando bien calibrados, presentan similares histogramas (ND vs frecuencia). Por lo que, se recurre a calcular el histograma de cada detector, calculando independientemente la frecuencia de los n número de líneas. Después, se ajusta el histograma de cada detector a uno que es elegido como referencia y, que regularmente se asume que sea el del conjunto de la imagen, es decir, el formado por todas las líneas que la componen. Para llevar a cabo este proceso, se aplica una función para la cual se calculan los siguientes coeficientes de ajuste:

$$a_i = S/S_i \quad [2.6]$$

$$b_i = \overline{ND} - a_i \overline{ND_i} \quad [2.7]$$

La función de ajuste es:

$$ND_{ij}' = a_i ND_{ij} + b_i \quad [2.8]$$

donde:

s : desviación estándar del histograma de referencia

s_i : desviación estándar del histograma parcial

ND : es la media del histograma de referencia

ND_i : es la media del histograma parcial

Corrección atmosférica

La radiación que recibe el sensor se ve afectada (cuenta con un porcentaje añadido) de una manera importante debido a la dispersión atmosférica que ocasionan ciertos componentes, como el vapor de agua y los aerosoles.

El principal inconveniente es que, la dispersión atmosférica no es constante en la imagen, pues en algunas zonas se podría generar una mayor afectación que en otras ya que depende de la concentración que haya de los elementos que la ocasionan; así también, depende de la longitud de onda.

Es por ello, que debido a su complejidad, es difícil determinar una corrección rigurosa, pero, a pesar de las dificultades es necesario obtener una estimación del efecto atmosférico; sobre todo en situaciones como:

- 1) Cuando se realizan combinaciones lineales entre bandas (variación en función de la longitud de onda)
- 2) En modelos que indiquen relación entre ND y determinados parámetros físicos
- 3) Al realizar estudios multi-temporales

A continuación se habla de dos métodos empleados en esta problemática. Se empezará hablando del método conocido como método del histograma por sus valores mínimos (Chavez), en el cual se considera que las áreas con materiales de fuerte absortividad presentan una radiancia espectral muy próxima a cero. Por lo que, una práctica de aproximación a la corrección atmosférica es restar a todos los ND de cada banda el ND mínimo de esa misma banda, situando el origen del histograma en cero¹:

$$ND_{i,j,k}' = ND_{i,j,k} + ND_{min,k} \quad [2.9]$$

en donde:

ND_{i,j,k}: ND del pixel (i,j) en la banda k

ND_{min,k}: ND mínimo de la banda k.

Para el caso de estudios multi-temporales, basta normalizar los ND de distintas escenas a otra, que se elige como referencia. El método se basa en determinar la reflectividad aparente para una serie de objetos que no cambien entre fechas, y a partir de ellos puede estimarse unos coeficientes de sesgo y ganancia que permiten relacionar los ND entre fechas distintas.

Eliminación del ruido

Se le conoce como *ruido de la imagen* a cualquier alteración no deseada en los datos de la imagen que se debe a limitaciones en la detección, en la digitalización de la señal, o en el proceso de registro de datos. Las fuentes potenciales de ruido pueden tratarse de un mal funcionamiento del detector, la interferencia electrónica entre los componentes del sensor, o pausas intermitentes en la transmisión de datos y en la secuencia de grabación. El ruido puede degradar o disfrazar totalmente la verdadera información radiométrica contenida en una imagen digital. Por lo que, la eliminación del ruido usualmente precede a los procedimientos de realce o clasificación de la imagen.

Al igual que los procesos de restauración geométrica, la corrección del ruido en cualquier situación dada, depende de si se trata de un ruido sistemático (periódico), aleatorio, o alguna combinación de ambos, así que, son varios los procedimientos que se han desarrollado para tratar este inconveniente en las imágenes. Un método consiste en elaborar una serie de histogramas de la imagen (uno para cada sensor involucrado en una determinada banda). Estos histogramas se comparan en términos de sus valores promedio y la mediana para identificar “el o los sensores problema”. Los factores de ajuste de la escala de grises pueden determinarse para corregir los histogramas y son aplicados para cada pixel en las líneas problema mientras que los demás no son alterados.

Otro problema de ruido es el de línea orientada que, algunas veces puede encontrarse en datos digitales como “línea punteada”. En este caso, un número de píxeles adyacentes a lo largo de una porción de la línea o de la línea completa pueden no contener valores de niveles digitales.

Otro problema de ruido en la línea orientada es que a veces se encuentra los niveles digitales descendentes en la línea. En esta situación, un número de píxeles adyacentes a lo largo de una línea (o una línea entera) puede no contener ND. Este problema es normalmente abordado mediante la sustitución de los niveles digitales defectuosos con el promedio de los valores de los píxeles que ocurren en las líneas por encima y por debajo. Alternativamente, los niveles digitales de la línea precedente pueden ser insertados en los píxeles defectuosos.

Problemas por ruido aleatorio en información digital son tratados de forma muy diferente, pues este tipo de ruido se caracteriza por sus variaciones no sistemáticas en los niveles de grises de pixel a pixel llamado “bit error”. Tal ruido causa que las imágenes tengan apariencia como de estar “salpimentadas” o “con nieve”. Así que, son manejados por el reconocimiento de que los valores de ruido normalmente cambian mucho más abruptamente que los valores de la verdadera imagen. Por lo tanto, el ruido puede ser identificado mediante la comparación de cada píxel en una imagen con sus vecinos, pues si la diferencia entre el valor de un pixel dado y sus valores circundantes un umbral de análisis específico, se asume que el pixel contiene ruido. Por lo que, el valor de dicho pixel puede ser remplazado por el promedio de los valores de sus vecinos. Ventanas de 3x3 o 5x5 son típicamente usadas en tales procedimientos.

2.2 Realce de la imagen

En este apartado se describen los procedimientos que pretenden mejorar la interpretación visual de una imagen, pero no aumentan la cantidad contenida de información, solamente buscan hacer más evidentes los rasgos de interés presentes en ella para una aplicación en particular.

Existe una cantidad virtualmente ilimitada de opciones para realizar realces a la imagen, las cuales podemos disponer en dos conjuntos: el primero conocido como *optimización del contraste (operaciones globales)*, pues modifican independientemente el brillo de cada pixel; el segundo grupo llamado, *manipulación de las funciones espaciales (operaciones locales)*, contrastante al anterior ya que modifican el valor de cada pixel basadas en el valor de los pixeles vecinos.

Optimización del contraste

El mejoramiento del contraste en un primer caso, se emplea para adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad del monitor de visualización, pues cada sensor ofrece diferentes resoluciones de acuerdo a su diseño y puede no corresponder uno con otro, por lo que resulta preciso realizar un ajuste. En este primer caso, existen dos posibles necesidades de ajuste, pues primeramente puede ocurrir que el sensor ofrezca un menor número de ND que el nivel de visualización (NV) facilitado por el equipo donde se llevará a cabo el tratamiento; en el segundo caso que el sensor presente un número de ND que exceda la capacidad del equipo. Así que, el ajuste para la primera situación se trata de una expansión del contraste original, mientras que para el segundo será necesaria una reducción.

Así también, el mejoramiento de contraste se utiliza para disminuir el efecto de bruma en la imagen que se debe a la luz dispersada en la atmósfera que llega directamente al sensor, sin haber interactuado con los objetos de la superficie terrestre, y provoca en los ND un mayor valor y este efecto aditivo es el que hace que la imagen aparezca con un bajo contraste. Este efecto es diferente para cada ámbito espectral, más alto en el azul y más bajo en el ámbito del infrarrojo del espectro electromagnético.

La clave para entender las mejoras de contraste está en el concepto de un histograma de la imagen, ya que mediante la manipulación de la gama de valores digitales en una imagen, podemos aplicar varias mejoras a los datos. Además, la relación entre los ND máximos y mínimos define digitalmente el contraste de una imagen, y, con base en ello puede juzgarse la necesidad por ejemplo, de expandir o comprimir el contraste; aunque es importante mencionar que actualmente los equipos que se emplean para el análisis de imágenes cuentan con una gran capacidad por lo que hoy día la compresión de contraste resulta prácticamente innecesaria, por ello en este tema solo se abordará lo que respecta a expansión del contraste; pero, antes de ello, se explica a continuación el principio de visualización que permite aplicar operativamente tales procesos.

Principio de visualización

El principio de la visualización de un canal de una imagen digital es de asociar un nivel de gris o de un color a cada nivel digital¹¹. Es decir, se refiere a la manera en que se relaciona el nivel visualizado (NV) en pantalla con cada uno de los niveles digitales (ND) de la imagen, para ello se emplea una matriz numérica conocida como *tabla de referencia de color* (Color Look Up Table,

CLUT). Esta herramienta permite modificar la relación entre el ND almacenado y la intensidad de brillo que se visualiza, es decir, cada ND puede corresponder a un NV sin que sea igual que él.

Comúnmente, la CLUT (Figura 2.4) se representa como una matriz numérica de 3 columnas por 256 filas. El orden de las filas indica el ND de entrada, mientras el número almacenado en la tabla expresa el NV con el que el nivel digital será mostrado en pantalla; finalmente, las tres columnas corresponden a los tres colores elementales (azul, verde y rojo).

ND	NV		
	Rojo	Verde	Azul
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
...			
255	255	255	255

Figura 2.4 Estructura de una matriz numérica CLUT.

Modificada de Chuvieco, Emilio. Fundamentos de teledetección espacial.

En la imagen original, los valores digitales para cada banda se encuentran concentrados en una pequeña porción del ámbito de valores digitales. El estiramiento de contraste o estiramiento de histograma cambia los valores originales de los píxeles para distribuirlos mejor en todo el rango, aumentando así el contraste que percibimos. A continuación se describen 3 técnicas diferentes para llevar a cabo una expansión.

La *expansión lineal* es la técnica más sencilla, ya que el ND mínimo se asigna al negro extremo (0), y, el ND máximo se asigna al blanco extremo (255); el resto de los valores de los píxeles se distribuyen linealmente entre tales extremos. Su desventaja es que asigna los mismos niveles de visualización (NV) tanto a valores de DN que ocurren pocas veces como a los que ocurren con mayor frecuencia. Y a pesar de usar el blanco y negro extremo, muchas veces se genera una imagen con poco brillo e incluso, si bien todas las tonalidades de gris del despliegue son utilizadas, la mayor parte de los píxeles son desplegados en grises medios. Esto se debe a la distribución más o menos normal dentro de los valores mínimo y máximo del histograma. Por esta razón es muy típico 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.

En el caso del *histograma ecualizado* se aplica una técnica con una expansión no lineal, pues en este método los valores de los DN se distribuyen con base en su frecuencia por lo que diferentes tonos de gris son asignados a los valores de DN que ocurren con mayor frecuencia en el histograma. Esta técnica ofrece resultados mejores que la anterior, sobre todo si la imagen original presenta una distribución gaussiana.

La expansión especial de contraste, es muy similar a la técnica de expansión lineal, su particularidad radica en que la interpolación de los valores se realiza para unos ámbitos predefinidos por el usuario en donde se manifieste con mayor claridad una cubierta de interés, es decir, para poder discriminar lo mejor posible el objeto de estudio, se debe emplear todo el ámbito disponible de niveles de gris para este rasgo solamente, de tal forma que aparecen de

manera detallada las diferencias en el rasgo de interés, mientras que el resto de rasgos se asignan a solo un tono de gris.

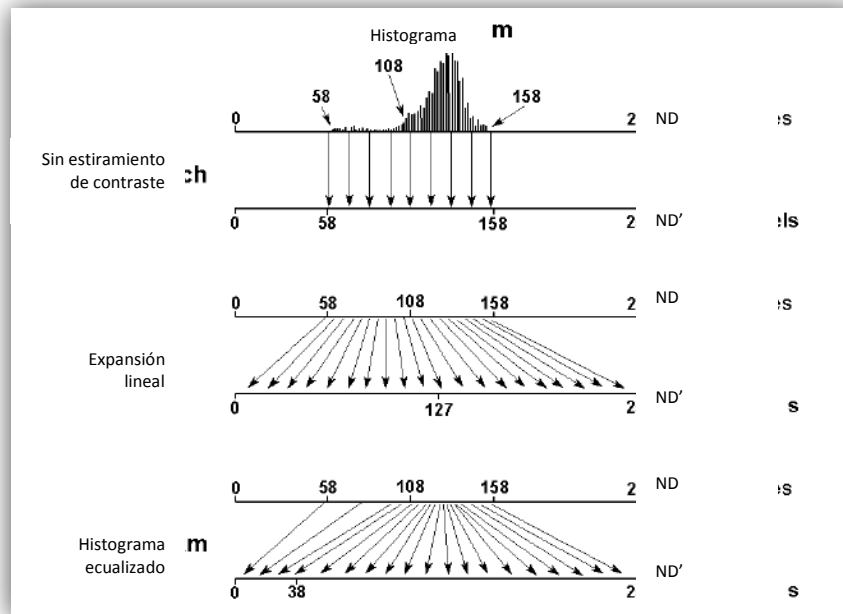


Figura 2.5 Principios de la técnica de optimización del contraste.
Modificada de Lillesand. Remote sensing and image interpretation.

Manipulación de las funciones espaciales

En este apartado se trata sobre el concepto de mejoramiento espacial empleando *filtros espaciales*, los cuales se aplican para resaltar o suprimir características específicas en la imagen. Estos se basan en su frecuencia espacial, o sea, su frecuencia en la imagen. Los filtros espaciales realizan cálculos matemáticos en cada píxel usando los valores de píxeles vecinos.

Con esta herramienta se pueden corregir y restaurar imágenes afectadas por el mal funcionamiento del sistema, mejorar las imágenes para su interpretación visual o resumir rasgos particulares. Como con todos los procedimientos de optimización de imágenes anteriormente descritos, también se busca crear nuevas imágenes a partir de los datos de la imagen original, de tal manera que se incremente la cantidad de información que pueda ser visualmente interpretada. Pero a diferencia de las técnicas de realce de la imagen, el filtrado modifica necesariamente la imagen ya que pretenden extraer información cuantitativa que debe almacenarse como una nueva capa en lugar de como una paleta de colores.

El objetivo es relacionar los píxeles de la imagen con sus vecinos, ya sea para homogeneizarlos o diferenciarlos. El proceso de filtrado radica en la aplicación a cada uno de los píxeles de la imagen, de una matriz *móvil* de coeficientes de filtraje (CF) de tamaño $N \times N$ (también conocida como Kernel), que está en función del número de píxeles vecinos que se quiere implicar en el proceso, entre mayor tamaño sea la matriz, el efecto será más intenso. En cualquier caso, la matriz se aplica sucesivamente a la imagen original, desplazándose (de aquí que se le considere una matriz móvil) un píxel en cada paso. Es importante resaltar que sólo se modifica el ND del píxel central, entre los

que son afectados en cada momento por la matriz de filtraje. A este procedimiento se le conoce como *convolución*.

El proceso matemático del filtraje consiste en relacionar a cada pixel con sus vecinos, de acuerdo a los coeficientes determinados por el usuario y que están en función de las consecuencias que se buscan obtener con esta herramienta. Los filtros se pueden expresar mediante la siguiente ecuación:

$$ND'_{i,j} = \frac{\sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 ND_{i+p,j+q} CF_{f+p,c+q}}{\sum_{p=-1}^1 \sum_{q=-1}^1 CF_{f+p,c+q}} \quad [2.10]$$

donde:

$ND_{i,j}$: indica el ND original del pixel i,j ;

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

CF: indica el coeficiente de filtraje; y ,

f y c : indican la fila y la columna centrales de la matriz de filtraje

Lo que resulte al aplicar esta fórmula, se debe aproximar al entero más próximo.

Al variar el cálculo realizado y la ponderación de los píxeles individuales en la ventana de filtro, los filtros pueden ser diseñados para mejorar o suprimir diferentes tipos de características, por lo que los filtros pueden ser de alta o baja frecuencia.

Filtros de frecuencia baja (paso bajo)

Con esta herramienta se busca eliminar frecuencias altas y medias, y , resaltar rasgos con frecuencias bajas dando como resultado una imagen que tiene un menor contraste, una apariencia más suave, por lo que también se le conoce como “suavización de imágenes” o filtro de homogenización. El inconveniente primordial reside en que al aplicar este proceso se puedan perder los rasgos de interés, por ello, el mayor énfasis a tener en cuenta es la preservación de los bordes (límites entre objetos).

Así, por ejemplo, en una imagen de una zona relativamente pequeña, se observa que los valores de los ND cambian de manera gradual con respecto a los valores de los píxeles aledaños, se dice que estas áreas presentan una baja frecuencia espacial, o sea, poco contraste.

Filtros de frecuencia alta (paso alto)

Ahora, en una determinada zona reducida de una imagen se aprecia un cambio brusco (no gradual) en los valores de los ND, se dice que presenta una alta frecuencia espacial. Los límites (bordes agudos o aristas) ocupan un área pequeña y son por lo tanto rasgos de alta frecuencia.

Los filtros de frecuencia alta están diseñados para resaltar frecuencias altas y para suprimir frecuencias bajas, con su aplicación se busca resaltar los límites entre objetos; por lo que, son también llamados filtros de optimización de bordes.

Se distinguen dos clases de filtros, filtros de gradiente o direccionales y filtros laplacianos o no-direccionales. Los primeros se tratan de filtros que se emplean para mejoramientos específicos de tendencias lineales, se diseñan de tal manera que resaltan los objetos lineales o bordes orientados en una cierta dirección. Matemáticamente pueden verse como el resultado de tomar la primera

derivada, de ahí el termino Gradiente. Mientras que los segundos resaltan rasgos lineales sin importar la dirección que tengan en la imagen. Estos filtros no consideran el gradiente mismo, sino los cambios del gradiente. En su forma más simple, pueden verse como el resultado de tomar la segunda derivada.

Visualización de imágenes multibanda

Hasta ahora, las mejoras abordadas solo están enfocadas a imágenes de una sola banda, por lo que en seguida se tratará la utilidad del análisis multibanda y todo lo que implica, pero para ello primeramente se hablará del proceso que implica la visualización de éstas.

La información contenida en bandas diferentes puede integrarse combinándolas a través de una composición de color. La información espectral se combina para desplegar cada banda individual en una sola de los tres colores primarios: rojo, verde y azul. Esto último se debe a que varios autores han puesto en evidencia que el ojo humano es más capaz de distinguir tonos de color que intensidades de brillo (Jiménez y García, 1982)². Por ello, es común el empleo de color ya que facilita en gran medida ciertos procesos digitales como el análisis.

Composición de falso color (CFC)

Se le llama de esta manera a la combinación específica de bandas con el fin de emplearlas para crear una composición de color de una imagen. Aquí, el color rojo se asigna a la banda del infrarrojo cercano; el verde a la banda del rojo visible; y, el azul a la banda visible del verde. Así que, en una CFC la vegetación se visualiza como rojiza, el agua azulosa, y, el suelo descubierto entre tonos marrón y gris. Para las imágenes multispectrales de SPOT, las bandas 1,2 y 3 son visualizadas en azul, verde y rojo, respectivamente. Mientras que en imágenes TM el rojo, verde y azul visualizan las bandas 5, 4 y 3, respectivamente. Así también otras combinaciones de bandas son posibles; algunas combinaciones dan colores de salida semejantes a los colores naturales, por ejemplo el agua es visualizada en azul. A esto último se debe que también se le llame como composición de color pseudo natural.

Empleando 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.

Composiciones de color

Las composiciones de color son creadas y desplegadas en pantalla, por combinación de valores espectrales de tres bandas individuales. Cada banda es visualizada usando uno de los colores primarios. En la Figura 2.6 se encuentra el cubo de color con los aditivos primarios (rojo, verde y azul) que dan los colores sustrativos (amarillo, magenta y cian). En donde podemos ver que, una combinación de píxeles con altos valores de ND para las bandas individuales produce 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.

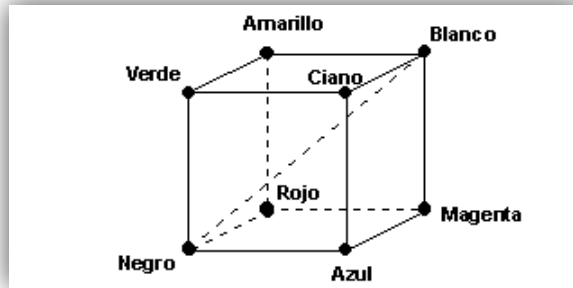


Figura 2.6 Cubo de color

La relación entre los valores de los píxeles de las imágenes multibanda y los colores asignados a cada píxel, se almacena en una representación. Una representación almacena 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. Los valores de los píxeles de las tres 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 (Figura 2.7).

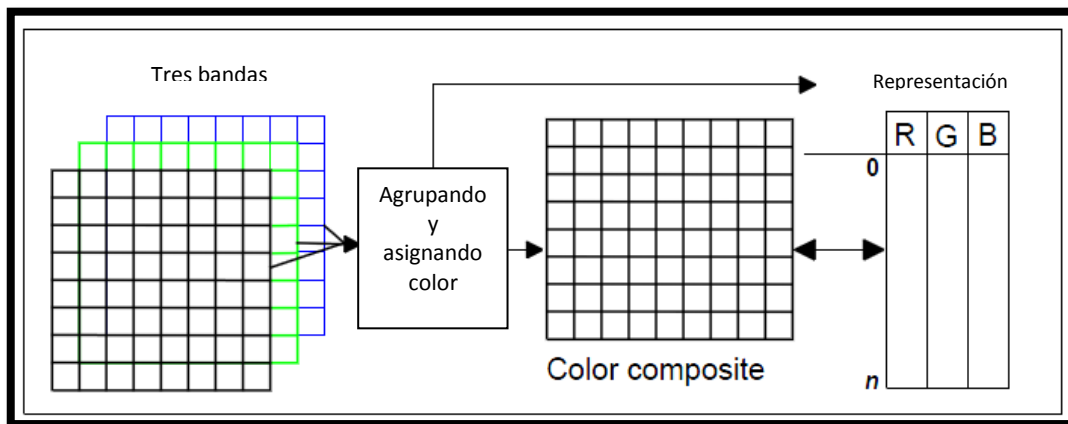


Figura 2.7 Relación entre la composición de color, las imágenes fuente y su representación.
 Modificada de ILWIS Department. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences Enschede,
 The Netherlands. ILWIS 2.1 for Windows.

Análisis mutibanda

En el análisis multibanda, se llevan a cabo transformaciones de las imágenes que son operaciones que se encargan de crear nuevas imágenes a partir de las combinaciones de las bandas originales, con el objeto de mejorar la discriminación de algunos aspectos temáticos en la imagen. Esto se debe a que algunas bandas son mejores que otras en la discriminación de ciertos tipos de objetos o cubiertas. Estos procedimientos resultan muy útiles ya que la información contenida en varias bandas se preserva en la imagen generada a partir de ellas. Existen diversas opciones para poder llevar a cabo estas transformaciones, aunque en el presente trabajo solo se abordaran aquellas que son empleadas en aplicaciones medio ambientales de la percepción remota. En general podemos hablar de dos tipos de transformaciones:

- Orientadas: Son transformaciones en las que se conoce *a priori* cuáles son los factores que intervienen, de modo que los coeficientes de las transformaciones están especialmente orientados para estimarlos, por ejemplo: Índices de vegetación.
- No orientadas: No se asume nada acerca de cuáles son los factores implicados y se deja que un procedimiento estadístico analice los datos para buscar regularidades que permiten extraer un conjunto de nuevas variables (componentes, factores, etc.) que explican los valores de reflectividad obtenidos. Estas nuevas variables y su naturaleza física o meramente estadística deberán interpretarse a posteriori, por ejemplo: análisis de componentes principales, y estadísticas multibanda.

Índices de vegetación

El empleo de esta transformación tiene por objeto mejorar la discriminación entre suelos y vegetación, y para disminuir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

Llevar a cabo un cociente, en este tipo de transformaciones, implica efectuar una división, pixel a pixel, entre los ND almacenados en dos o más bandas de la misma imagen, y, se emplean para discriminar masas vegetales ya que tal tipo de cubierta tiene un peculiar comportamiento radiométrico. La signatura espectral característica de la vegetación sana muestra un claro contraste entre las bandas visibles (y especialmente la banda roja) y las comprendidas en el infrarrojo cercano. Mientras en la región visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la luz que reciben (función clorofílica), en el infrarrojo cercano estas sustancias son bastante transparentes. Por ello, la vegetación sana ofrece baja reflectividad en la banda roja y alta en el infrarrojo cercano; entonces, podemos establecer que cuanto mayor sea el contraste entre los ND de las bandas infrarroja y roja, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada, y, bajos valores de contraste indican una vegetación enferma, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación que ofrecen un contraste muy pequeño.

Con base en lo anterior, se forman los índices de vegetación, combinando la banda roja e infrarroja cercana del espectro. Los más empleados son el simple cociente entre tales bandas, y el denominado índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index):

$$Coc_{i,j} = \frac{ND_{i,j,IR}}{ND_{i,j,R}} \quad [2.11]$$

y,

$$NDVI_{i,j} = \frac{ND_{i,j,IR} - ND_{i,j,R}}{ND_{i,j,IR} + ND_{i,j,R}} \quad [2.12]$$

Respecto al empleo de los cocientes de bandas para disminuir el efecto del relieve en la caracterización espectral de determinada cubierta, varios autores han mostrado el efecto homogeneizador de estas combinaciones aritméticas. La reducción en la reflectividad que presenta una zona en sombra es proporcional en distintas bandas, por lo que un cociente tenderá a resaltar el contraste espectral frente al contraste de iluminación, más claro en las bandas originales².

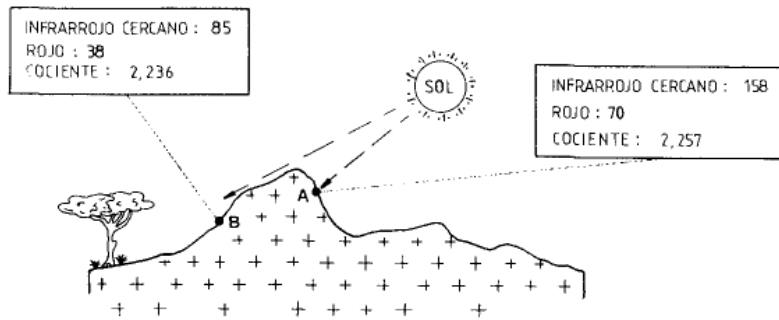


Figura 2.8 Reducción del efecto de topografía por un cociente entre bandas del infrarrojo y del visible.

Fuente: Montesinos, 1990.

Análisis de componentes principales

Existe una fuerte correlación entre las imágenes multispectrales, por lo que contienen mucha información redundante con lo que se incrementa considerablemente la carga de información computacional cuando tales imágenes son sometidas a procesos matemáticos. La técnica de Análisis por Componentes Principales (PCA, Principal Components Analysis) se trata de una transformación que se encarga de disminuir tal redundancia y puede ser aplicada previamente a un análisis visual o a un proceso más complejo de clasificación a través de algoritmos matemático-estadístico. Así que el objetivo es comprimir la información contenida en un conjunto grande de bandas espectrales a un conjunto menor de nuevas bandas a las que se les llama *componentes*.

Esta síntesis resulta muy conveniente cuando se pretende abordar un análisis multi-temporal (Joly et al, 1983), o cuando se intentan seleccionar las tres bandas más adecuadas para una composición en color (Green et al, 1988)². Por ejemplo, típicamente se aplica esta técnica a cada una de las imágenes de distintas fechas que intervienen en un estudio y con ellos reducir el número de bandas significativas para la clasificación, para luego combinar los componentes resultantes y obtener mapas de cambio o facilitar una mejor discriminación de cubiertas con dinamismo temporal.

Los componentes generados se ordenan de acuerdo a la cantidad de varianza, los primeros dos o tres componentes llevarán la mayor parte de la información y el resto únicamente mostrarán variaciones menores que, en algunos casos solamente se tratará de ruido. De acuerdo a esto último, podemos entonces establecer que al mantener sólo los primeros componentes se contará con la mayor parte de la información.

A través de un eje bivariado se representa el sentido y fuerza de la correlación lineal entre dos bandas, formando una nube de puntos que puede ser delimitada por una elipse; en la nube de puntos, se indica la localización de los ND en las bandas consideradas, y, la elipse expresa gráficamente la fuerza de correlación, que sabemos será mayor en cuanto más se aproxime a una recta. La Figura 2.9 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. Vemos que, gráficamente puede suponerse que una rotación de los ejes X y Y hacia las direcciones A y B, perfeccionará la disposición original de los datos y posiblemente también la separación entre los grupos de ND

homogéneos en la imagen. La rotación se obtiene puede obtenerse a través de la siguiente función:

$$CP_1 = a_{11}ND_i + a_{12}ND_j \quad [2.13]$$

donde CP_1 es el valor correspondiente al primer componente principal, obtenido a partir de los ND originales de las bandas i y j , después de aplicarles unos determinados coeficientes a_{11} y a_{12} . De igual manera, puede expresarse el desarrollo del segundo componente, pues existen tantos componentes principales como bandas originales.

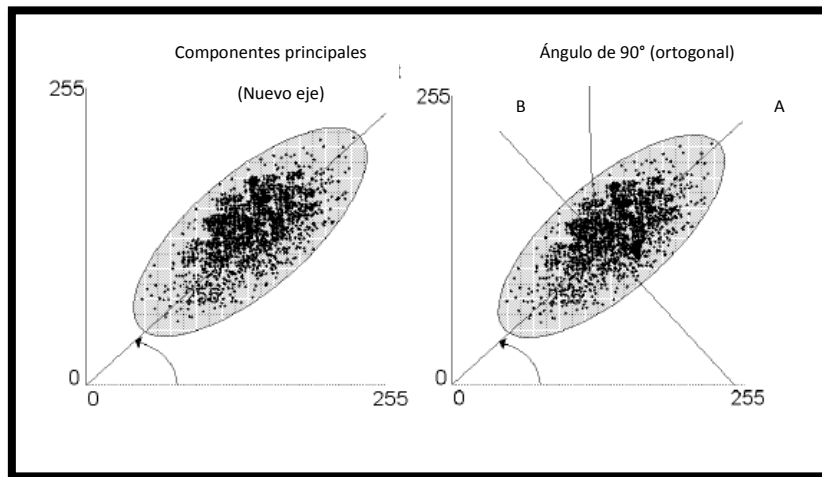


Figura 2.9 Componentes principales 1 y 2.

Modificada de ILWIS Department. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences Enschede, The Netherlands. ILWIS 2.1 for Windows.

Esta transformación de la imagen empieza a partir de la matriz de varianza-covarianza, de la cual 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. El eigenvalor va disminuyendo progresivamente, del primero a los últimos, pues se pretende maximizar sucesivamente la varianza extraída en el análisis. La varianza original de cada componente está dada por la proporción de su eigenvalor con respecto a la suma de los eigenvalores:

$$V_p = \frac{\lambda_p \times 100}{\sum_{p=1}^m \lambda_p} \quad [2.14]$$

donde m el número total de componentes.

Aunado a la longitud de cada eje, resulta interesante conocer su dirección, o sea, el eigenvector, el cual indica la ponderación que debe aplicarse a cada una de las bandas originales para obtener el nuevo componente principal, es decir, equivale a los coeficientes de regresión en una transformación lineal estándar, siendo las bandas de la imagen las variables independientes, y los CP las dependientes. Partiendo de los eigenvectores, se determina la matriz de correlación entre componentes principales y bandas de la imagen, lo que permite conocer el sentido espectral de estos componentes:

$$r_{p,k} = \frac{a_{p,k}\sqrt{\lambda_p}}{S_k} \quad [2.15]$$

donde,

$r_{p,k}$: indica el coeficiente de correlación entre el componente p y la banda k;

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

λ_p : indica el eigenvalor del componente p; y,

S_k : indica 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. El cálculo de las nuevas bandas, o componentes principales se realiza como:

$$CP_{i,j,p} = \sum_{k=1}^n a_{p,k} \times ND_{i,j,k} \quad [2.16]$$

donde,

n: indica el número de bandas;

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

$a_{p,k}$: indica los eigenvectores para dicho componente en cada una de las k bandas; y,

$ND_{i,j,k}$: el nivel digital de esa misma banda y para las mismas coordenadas.

2.3 Clasificación digital

Los valores medidos de la reflexión de una imagen depende de las características locales de la superficie terrestre, es decir que existe una relación entre la cobertura de la tierra y los valores de medición de reflexión. Con el fin de extraer información de los datos de imagen, esta relación debe ser encontrada. El proceso para encontrar la relación es la última fase de cualquier análisis digital y se le conoce como clasificación, la cual se puede hacer con una sola banda, en un proceso llamado densidad de corte, o el uso de muchas bandas (clasificación multi-espectral). Dentro de la clasificación digital se distinguen tres fases, que a continuación se verán a detalle.

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, y, como se trata de una clasificación numérica, es decir, se busca obtener el rango de ND que identifica a cada categoría, para todas las bandas que intervienen en la clasificación.

Esta diferenciación de categorías es posible ya que como se ha venido comentando, 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 que ayude a generar los resultados más precisos posibles con el mínimo costo, es decir, identificar debidamente las categorías reduciendo a lo imprescindible los trabajos de campo.

Con base en como son obtenidas las estadísticas de entrenamiento, típicamente se catalogan a los métodos de clasificación en dos grupos, supervisado y 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 a 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 de las propias preferencias personales.

Clasificación supervisada

Este método parte del conocimiento previo de la zona de interés o de estudio, ya sea por trabajos de campo o por experiencia previa y por ello se pueden delimitar sobre la imagen 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 operador cuenta con elementos a través de los cuales puede 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 multispectral¹⁵. RICHARDS (1986) propone 5 pasos para llevar a cabo una clasificación empleando el método supervisado, independientemente del algoritmo que se escoja para procesar la información:

- 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); y,
- 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 operador tenga conocimiento de la naturaleza de dichas categorías o áreas de entrenamiento. Los algoritmos que se utilizan son *clusters* o agrupamientos, y, tales agrupamientos 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:

- i) Selección de las bandas espectrales que intervendrán en la clasificación o análisis, ya sean éstas originales o fruto de alguna transformación;
- ii) 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; y,
- iii) Selección de un criterio para agrupar los casos similares.

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

$$D_{a,b} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{a,k} - ND_{b,k})^2} \quad [2.17]$$

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; y,

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 es el siguiente:

- i) Se señala una serie de centros de clase, de acuerdo al número y forma indicados por el operador;
- ii) Se asignan todos los píxeles de la imagen al centro de clase más próximo;
- iii) 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;
- iv) Se vuelven a asignar todos los píxeles al centro más cercano, el cual no tiene por qué coincidir con la anterior asignación realizada; y,
- v) Se vuelven a calcular los centros de clase, teniendo en cuenta las nuevas incorporaciones, y se retorna a la fase iv.

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 en para la clasificación de imágenes satelitales en zonas (urbana, descampados, bosques, ríos).

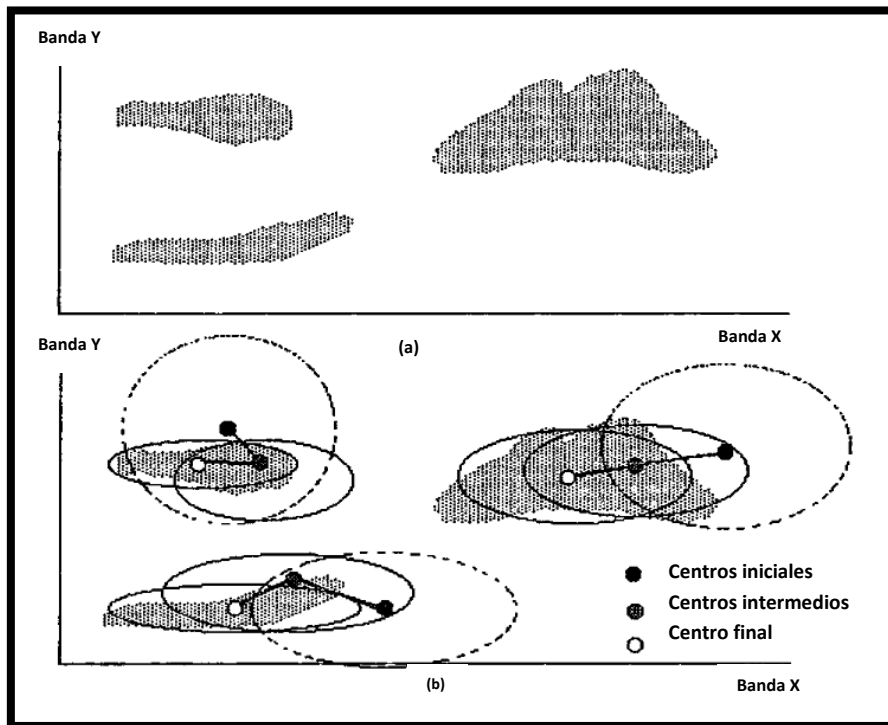


Figura 2.10 Fundamentos del análisis no supervisado.

Fuente: Chuvieco, Emilio. Fundamentos de teledetección espacial.

Clasificación mixta

El método supervisado y el no supervisado cuentan tanto con ventajas y desventajas, por ello se han buscado diversas alternativas en donde se combinan ambos métodos. Podemos agruparlos de la siguiente manera:

- i) Aquellos en los que se emplea el método supervisado para “guiar” el no supervisado. En este caso, el conocimiento del operador se utiliza para orientar la búsqueda de esos grupos espectrales homogéneos.
- ii) 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 firmas (Figura 2.11), en el cual 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 que fueron mencionadas en el Capítulo 1.

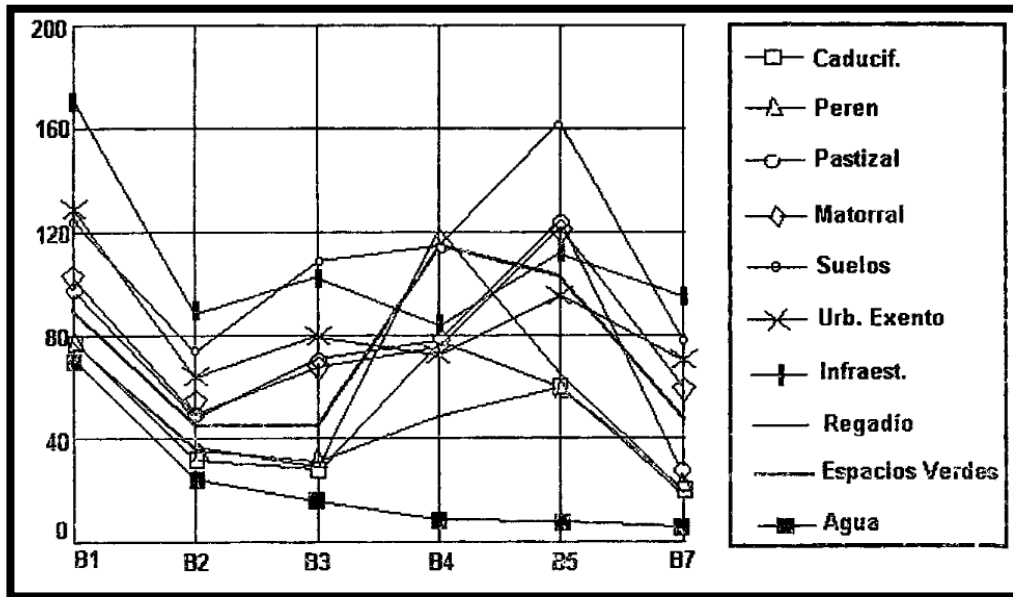


Figura 2.11 Diagrama de firmas espectrales para las cubiertas que intervienen en la clasificación.
Fuente: Chuvieco, Emilio. Fundamentos de teledetección espacial.

En este gráfico podemos identificar 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 es en la cual 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, sino, se asignará a una categoría con etiqueta "no conocida". Depende del método que se elija, para llevar a cabo la asignación, la decisión de si los píxeles son suficientemente similares a las categorías.

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 2.12 A).

$$d_{x,A} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (ND_{x,k} - \overline{ND}_{A,k})^2} \quad [2.18]$$

donde,

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

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

$\overline{ND}_{A,k}$: 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 definen 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 pixeles sin asignar o pixeles asignados a varias clases (Figura 2.12 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 pixeles 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:

$$\overline{ND}_{A,k} - R_{A,k} < ND_{x,k} < \overline{ND}_{A,k} + R_{A,k} \quad [2.19]$$

donde,

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

$R_{A,k}$: 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 pixeles 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 2.12 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.

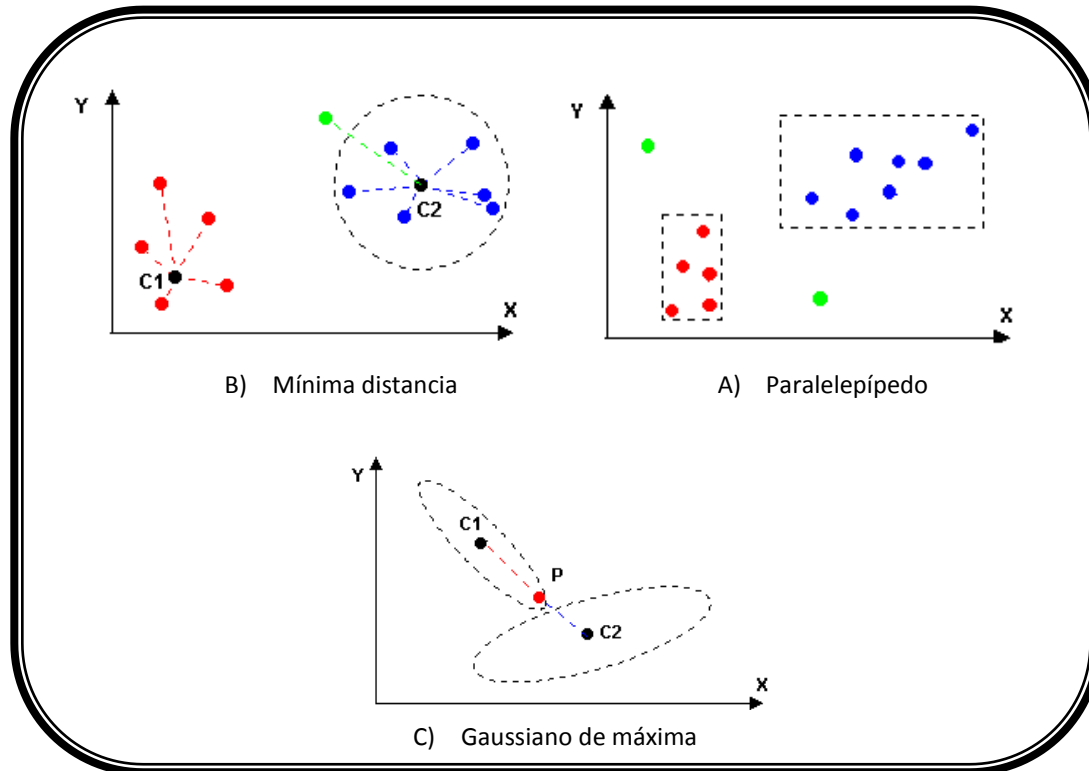


Figura 2.12 Algoritmos para llevar a cabo la asignación de los pixeles a una categoría.

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 se 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, tamaño y distribución, y, 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.

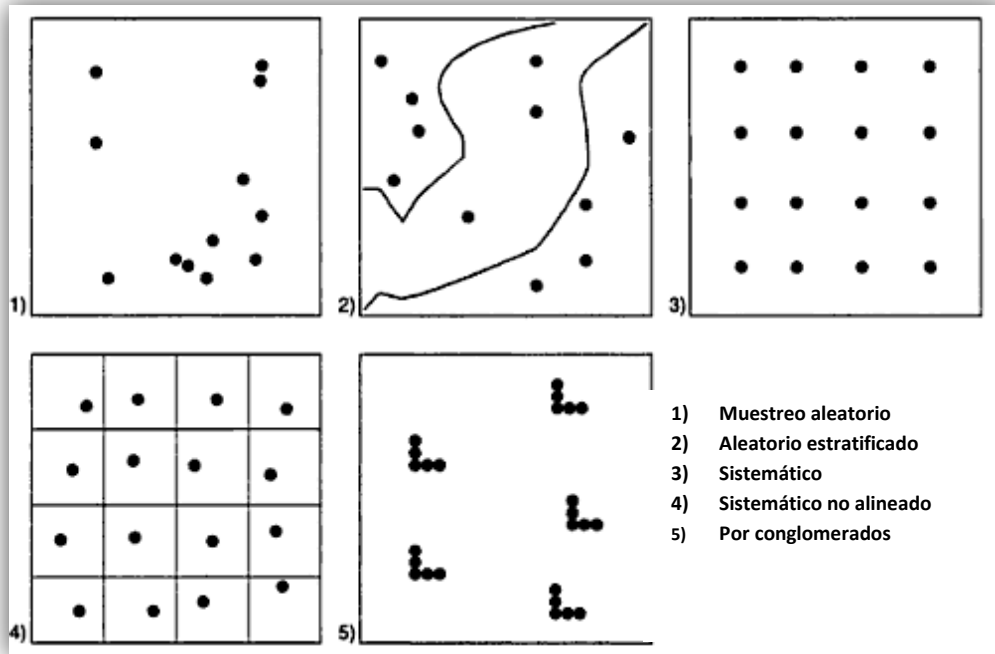


Figura 2.13 Tipos de muestreo aplicados a la verificación.
 Fuente: de Chuvieco, Emilio. Fundamentos de teledetección espacial.

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:

$$n = \frac{z^2 pq}{E^2} \quad [2.20]$$

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); y,
- 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, $n \times n$, donde n indica el número de categorías.

		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	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 2.14 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. En la Figura 2.14 se presenta un ejemplo de una matriz de confusión.

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:

$$F_m = \frac{\sum X_i}{\sum \sum X_{ij}} \times 100 \quad [2.21]$$

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 ($1 - \sigma$):

$$F = F_m \pm ZE_s \quad [2.22]$$

donde,

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

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:

$$E_s = \frac{\sqrt{pq}}{n} \quad [2.23]$$

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 relación inversa con los errores de comisión, mientras la segunda lo está con los de omisión².

III. Revisión bibliográfica de estudios de calidad del agua del vaso de la presa: Valle de Bravo

3.1 Caracterización regional

A continuación se presentan las características fisiográficas y socioeconómicas principales de la cuenca de Valle de Bravo para referenciar las condiciones ambientales del embalse de la presa de dicha cuenca. Del embalse se describen los usos del agua y el balance hidráulico con la finalidad de la importancia que tiene en las actividades humanas.

Marco Regional

La cuenca de Valle de Bravo tiene una superficie de 615.484 km² (incluyendo la cuenca cerrada de San Simón con una superficie de 89.582 km²), se encuentra en el poniente del Estado de México, cubre en su totalidad el municipio de Amanalco, y la mayor parte del municipio de Valle de Bravo. También comprende los municipios de Donato Guerra, Villa de Allende Villa Victoria y Temascaltepec, Almoloya de Juárez y Zinacatepec y, superficies menores exclusivamente forestales, Figura 3.1. Las coordenadas geográficas extremas son las siguientes (incluyendo la cuenca cerrada San Simón):

<i>Extremo Norte</i>	2143.8 N	19° 23' 05" N
<i>Extremo Sur</i>	2111.3 N	19° 05' 30" N
<i>Extremo oriente</i>	408.5 E	99° 52' 00" W
<i>Extremo poniente</i>	374.1 E	100° 11' 40" W

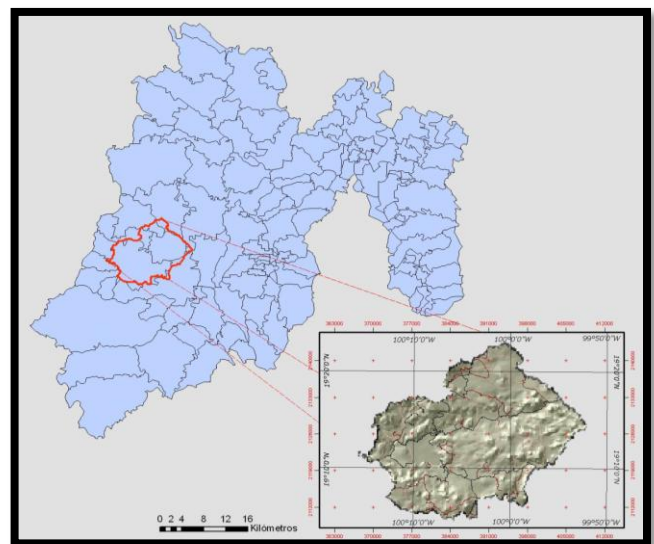


Figura 3.1 Localización de la Cuenca Valle de Bravo.
Fuente <http://www.educacionambiental.org.mx>

Esta cuenca pertenece a la Región Hidrológica 18 correspondiente a la cuenca Río Balsas y dentro de ésta a la cuenca del Río Cutzamala, y así a la subcuenca Río Tilostoc. Esta cuenca pertenece a la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac.

Fisiografía

Más del 90% de la cuenca Valle de Bravo es de origen volcánico. Existen numerosos volcanes esparcidos por toda la cuenca que representan las partes más altas de la misma y que finalmente dan forma al parteaguas. Los únicos relieves independientes de actividades volcánicas que se encuentran alrededor de la presa Valle de Bravo, son los Esquistos en la orilla Norte del vaso, y el lomerío al norte de la Ciudad de Valle de Bravo, que forma el parteaguas entre el Río Amanalco y Río Las Flores al poniente del poblado de Rincón de Estrada. Las altitudes de la cuenca varían entre los 3760 msnm (Cerro El Calvario, extremo oriente) hasta los 1792 msnm (fondo del desagüe debajo de la cortina de la presa) ó 1830 msnm (espejo del agua a la altura del vertedor).

Edafología

Los suelos de la cuenca se derivan de materiales volcánicos de diferentes edades. Dado que la constitución química de rocas y cenizas es la misma, los procesos *pedogenéticos* (transformación gradual de la roca madre y de los residuos vegetales del terreno) para la formación del suelo son muy rápidos. En la cuenca existen suelos con un mayor desarrollo, que son muy útiles para las actividades agrícolas, pero también muy susceptibles a la erosión y al desgaste físico. Los suelos encontrados en la cuenca son en orden de desarrollo: Acrisol háplico y Luvisol crómico (los más evolucionados), los Cambisoles, Andosoles (típicos de las zonas forestales), Phaeozem háplicos, los Leptosoles (poco desarrollados) y los Regosoles (los menos desarrollados). En general dominan los suelos de origen volcánico ya que 74 % de la superficie total de la cuenca está cubierta por Andosoles (cenizas volcánicas).

Uso de Suelo

Los usos del suelo en la cuenca son los que a continuación se presentan.

Agricultura	20,676.27 ha
Agua	1,779.45 ha
Bosque	33,631.92 ha
Pastizal	4,395.93 ha
Zona urbana	1,064.90 ha
<i>TOTAL</i>	<i>61,548.47 ha</i>

Hidrología

En toda la cuenca abundan los cauces perennes de aguas limpias y cristalinas, alimentados por manantiales, en especial en las áreas boscosas, a diferentes niveles de altura. En el norte, debido a la falta de superficies forestales, la cantidad y el volumen de manantiales es menor, y los cauces son más efímeros. La cuenca Valle de Bravo Amanalco tiene una precipitación anual de 973, 966, 610 m³. De esta cantidad el 48% se pierde por evapotranspiración (pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación), 35% se incorpora a la recarga de los mantos acuíferos subterráneos y el 17% escurre superficialmente. La cuenca en general se ubica en una zona de captación hídrica muy alta, con excepción del suroeste.

Los ríos que confluyen en la Presa Valle de Bravo son: La Hierbabuena o Santa Mónica, San Diego, Ladera oriente de Cuatenco, Calderones o El Cerrillo, Carrizal, Los Hoyos o El Molino, Amanalco, San Gaspar, La Cascada, Las Flores, Tiloxtoc, Los Quelites, El Campanario, Pinar de Osorio y Los Confites. La permeabilidad de las rocas y las fracturas del terreno favorecen la infiltración, lo que permite la recarga de mantos acuíferos. En la cuenca se encuentran rocas como el basalto que tienden a ser muy permeables, Figura 3.2.

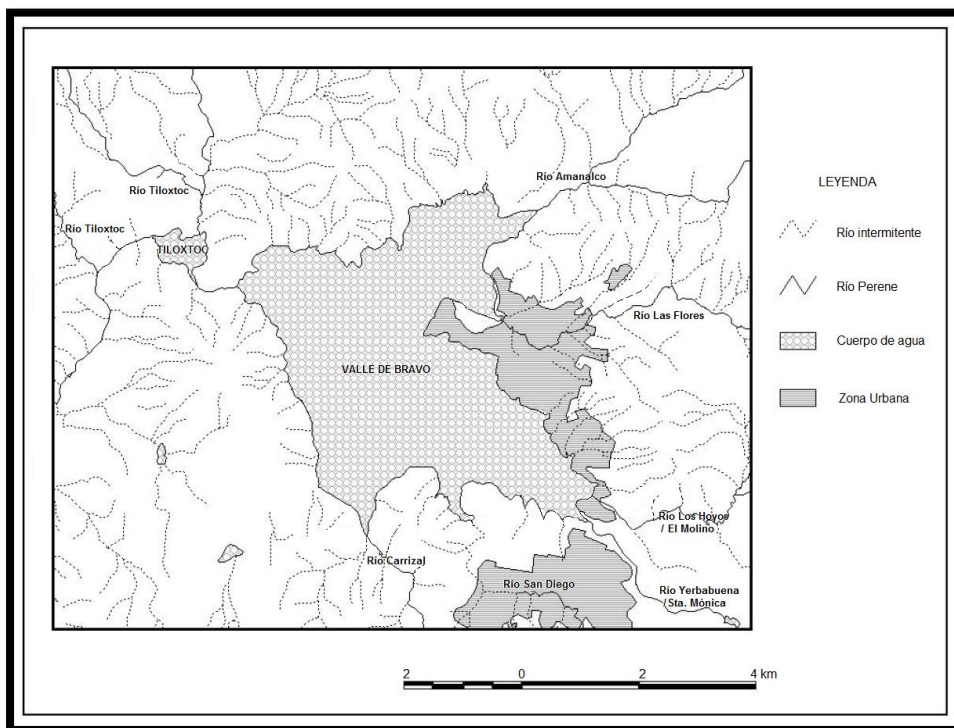


Figura 3.2 Ríos principales de la cuenca.

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

Climatología

De acuerdo con Chacón [et al], 2002 el clima en la Cuenca Valle de Bravo se presenta en la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Clima en la Cuenca Valle de Bravo.

Clima	Tipo de Clima	Ubicación altitudinal	% lluvias de verano	Área (ha)	%
(A)Cw ₁	Subhúmedo, semicálido a templado, T medio anual < 22 °C, T media mensual más fría < 18 °C P/T entre 43.2 y 55.3	Bajo la cota 2200 msnm	5 - 12 % anual	6,454.96	10.5 %
Cw ₂	Subhúmedo, templado moderado T med anual entre 12° a 18 °C T mes más frío entre -3° a +18 °C P/T > 55.3	Entre los 2200 a los 3000 msnm	5 - 12 % anual	49,683.60	80.8 %
C(E)w ₂	Semifrío subhúmedo P/T > 55.3	Arriba de los 3200 msnm	5 - 12 % anual	5,409.91	8.7 %
				61,548.47	100

Marco socioeconómico

La cuenca Valle de Bravo en términos hidrográficos de escurrimientos hacia el embalse, se puede subdividir en dos subcuencas; la primera subcuenca se denomina “cuenca Cerrada San Simón” y la segunda, que ocupa la mayor superficie, se denomina “cuenca de la presa Valle de Bravo”. Así, en la presente caracterización

socioeconómica, se hará referencia a la cuenca total Valle de Bravo y a las subcuencas Cerrada San Simón y de Valle de Bravo.

Demografía

Existen un gran número de asentamientos humanos continuos y dispersos. Los que tienen una mayor concentración de población y continuidad urbana son en orden de importancia en Valle de Bravo, Avándaro, Amanalco y San Juan. La cuenca total Valle de Bravo tiene asentamientos urbanos en 5 municipios: Valle de Bravo, Amanalco, Villa de Allende, Donato Guerra y Villa Victoria.

Vivienda y servicios

En la cuenca Valle de Bravo las viviendas particulares habitadas suman un total de 14,959 de las cuales se determinó el tipo de población para cada característica con base en el XII Censo General de población y Vivienda, (INEGI) del año 2010.

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. En localidades conectadas a la red de agua potable, hay zonas con servicio parcial debido a la intermitencia en el suministro. 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. El servicio de electricidad por vivienda es uno de los mejores atendidos en la cuenca. De continuar la tendencia actual, el servicio de electricidad para la cuenca estará totalmente cubierto en unos pocos años.

Actividades económicas

El ingreso económico más frecuente en la población ocupada de la cuenca es de 1 a 2 salarios mínimos, y corresponde al 34.63% de la población, seguida del 26.40% de la población que obtiene ingresos de 2 a 5 salarios mínimos. Sin embargo, el 33.83% de la población no recibe remuneración formal por su trabajo o bien, éste es menor a un salario mínimo.

Sector primario

En la cuenca la población económicamente activa que participa en el sector primario de la economía ha venido disminuyendo en los últimos 25 años. En cuanto a la producción agrícola los cultivos principales son, de maíz (ocupa 80% de la superficie agrícola), frijol, papa, haba, chícharo, jitomate, tomate, chile manzano, hortalizas, avena forrajera, trigo, alpiste, girasol y cebada, así como algunos frutales. El municipio de Valle de Bravo cuenta con una superficie silvícola de 23,692 ha en la que hay pinos, encinos y algunas especies como aile, álamo, fresnos, y madroños. La actividad pecuaria se realiza en todo el municipio de Amanalco, principalmente en Rincón de Guadalupe, Corral de Piedra, Hacienda Nueva, Capilla Vieja y Amanalco; en general, la producción es para autoconsumo o de consumo interno del municipio. En lo referente a la piscicultura, el municipio de Valle de Bravo cuenta con 81 estanques y solamente el 63% de ellos están en actividad, se produce principalmente trucha arco iris, alcanzando aproximadamente 70 toneladas anuales; la presa de Valle de Bravo con sus 1,730 ha de superficie constituye un potencial para la pesca tanto comercial como deportiva.

Sector secundario

En el municipio de Valle de Bravo existe la industria eléctrica y asociado a ésta la industria de la construcción. Predominan las empresas en el área de cerámica y fabricación de muebles de madera. Hay centros agroindustriales productores de hongos, licor, mermelada, aderezos, conservas y quesos, así como centros de actividad de producción artesanal, llevada a cabo por parte de la población indígena de las localidades del municipio.

Sector terciario

La actividad comercial ha tenido un gran impulso por el crecimiento de la región como polo de atracción turística. Las principales actividades que se han venido desarrollando debido a este factor son, el sector restaurantes y hoteles, el de comunicaciones y transportes, y, el de servicios privados no financieros.

Usos del agua

Los principales usos del agua en la cuenca de Valle de Bravo se indican en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Aprovechamientos superficiales de agua por uso y por porcentaje

Uso	Volumen anual (m ³)	Gasto en (l/s)	Porcentaje (%)
Generación de energía eléctrica	290,950,000	9,226.0	74
Acuícola	57,032,941	1,808.5	15
Agrícola	33,247,081	1,054.25	8
Público urbano	8,465,874	268.45	2
Múltiples	1,472,715	46.69	1
Total	391,168,611	12,403.89	100

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

Descargas

La Figura 3.3 resume la información de las principales descargas al vaso de la presa Valle de Bravo.

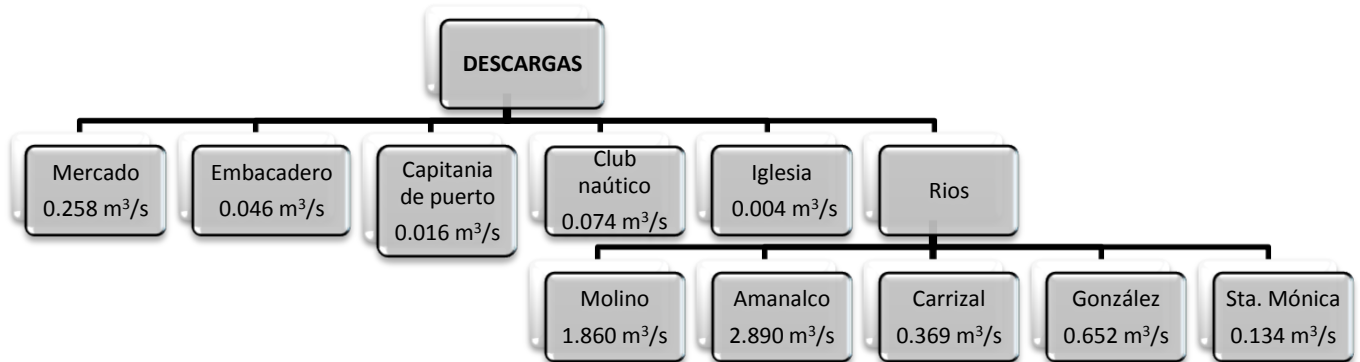


Figura 3.3 Principales descargas al vaso de la presa Valle de Bravo.
Fuente: Informe Final del Proyecto Control de Malezas Acuáticas 1992.

Balance hidráulico

El Sistema Cutzamala es un sistema hidráulico que almacena, conduce, potabiliza y distribuye agua dulce hacia la población e industria del Distrito Federal y a las zonas centrales de la cuenca de México y del valle de Toluca. Capta agua de lluvia a través de las presas ubicadas en el Estado de México y Michoacán suministrando aproximadamente un volumen de 16 m³/s al Valle de México. Los principales componentes del Sistema Cutzamala son 7 presas, 6 macroplantas de bombeo, 72.5 km de canales abiertos, 43.9 km de túneles, 218 km de acueductos y una planta potabilizadora “Los Berros”, con una capacidad instalada de 19.0 m³/s (Figura 3.4).

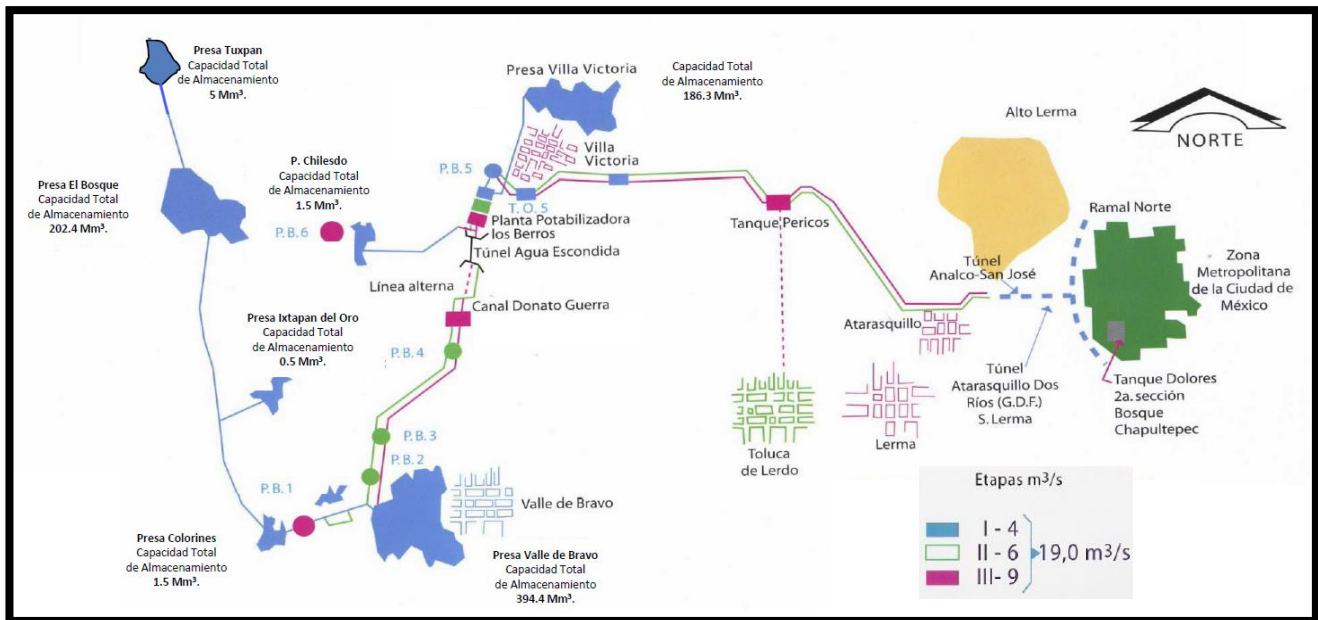


Figura 3.4 Componentes del Sistema Cutzamala.

Fuente: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Temas/CUTZAMALA2.pdf>

Presas Valle de Bravo

La presa de Valle de Bravo fue construida en 1944, se utilizó para la generación de energía eléctrica, como parte del *SISTEMA HIDROELÉCTRICO MIGUEL ALEMÁN*. En 1982, la presa cambió su uso, y pasó a formar parte del *SISTEMA CUTZAMALA*. La presa aporta el 38% de agua (6 m³/s) al Sistema Cutzamala, la mayor extracción ocurre durante los meses de mejor precipitación (julio a septiembre), cuando se extraen cerca de 10,000 litros por segundo (10 m³/s), siendo una de las presas más grandes y relevantes del Cutzamala. Además de sus características de construcción su belleza escénica ha permitido un desarrollo turístico muy importante para la región. En la Figura 3.5 muestra las principales características de la presa de valle de bravo.

ALMACENAMIENTO		VERTEDOR	
N.A.M.E.	1833.00 msnm	Vertedor tipo	Cresta libre
N.A.M.O.	1829.55 msnm	Longitud de cresta	94.4 m
N.A.MIN	1798.50 msnm	Carga máxima	3.45 m
Capacidad de azolves	7 millones m ³	Cap. Máxima de descarga	1200 m ³ /s
Capacidad útil	394 millones m ³	CORTINA	
Super almacenamiento	56 millones m ³	Altura sobre el lecho	48 m
Almacenamiento total	401 millones m ³	Altura total	56 m
Capacidad Máxima	457 millones m ³	Longitud de corona	148 m
CONSTRUCCION		Ancho de corona	8 m
Año de Construcción	1944	Ancho base	194 m
Superficie regada	18 000 hectáreas		
Área de la cuenca	546.9 km ²		

N.A.M.E. Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias
 N.A.M.O. Nivel de Aguas Máximas Ordinarias
 N.A.MIN Nivel de Aguas Mínimas

Figura 3. 5 Características de la Presa Valle de Bravo.

Fuente: Evaluación de la calidad del agua en la presa Valle de Bravo/1996.

Gastos

Con base en los registros históricos de las estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca, a través de medios electrónicos desarrolladas por el Instituto Mexicano de la Tecnología (IMTA) y el Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) se obtuvieron los gastos y escurrimientos de las principales corrientes de la cuenca Valle de Bravo. En los registros se encontró un bajo nivel de almacenamiento de la presa causada por la reducida precipitación pluvial que se presentó en la región en los últimos años, particularmente en 2004 y 2005. La disminución en la cantidad de lluvia redujo no sólo el nivel de la presa, sino también el de los manantiales de Valle de Bravo, por lo que también disminuyó el agua potable para las viviendas de la zona.

Almacenamiento

En la cortina se opera una estación climatológica que proporciona datos constantes sobre las precipitaciones pluviales; la CONAGUA es quien controla y regula el almacenamiento y la extracción de agua de la presa como parte del Sistema Cutzamala. Durante el periodo 2002-2007, los años 2003 y 2006 fueron los de mayores precipitaciones (con 1000 mm en el 2003) y el 2002 el de menor precipitación. En los últimos 16 años el promedio anual fue de 928 mm. Los meses de mayor lluvia del año son de julio a septiembre. La Figura 3.6 muestra las precipitaciones pluviales para el periodo 2005-2009 y en la Figura 3.7 puede verse la lluvia acumulada en el periodo de 2003-2010. La presa ha disminuido su capacidad de almacenamiento en un 21% desde su construcción debido al azolve producto de la erosión del suelo, el cual es acarreado por los ríos que desembocan en el embalse. La erosión es a su vez provocada por la deforestación y las prácticas agrícolas mal planificadas.

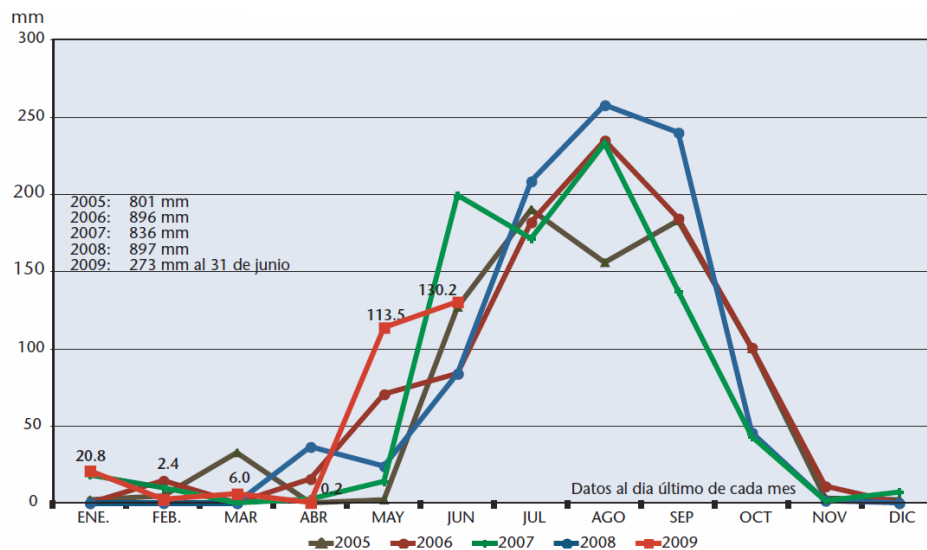


Figura 3.6 Precipitaciones Pluviales en la presa Valle de Bravo.

Fuente: Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, Dirección de Agua potable, Drenaje y Saneamiento y Residencia General de Operación Sistema Cutzamala.

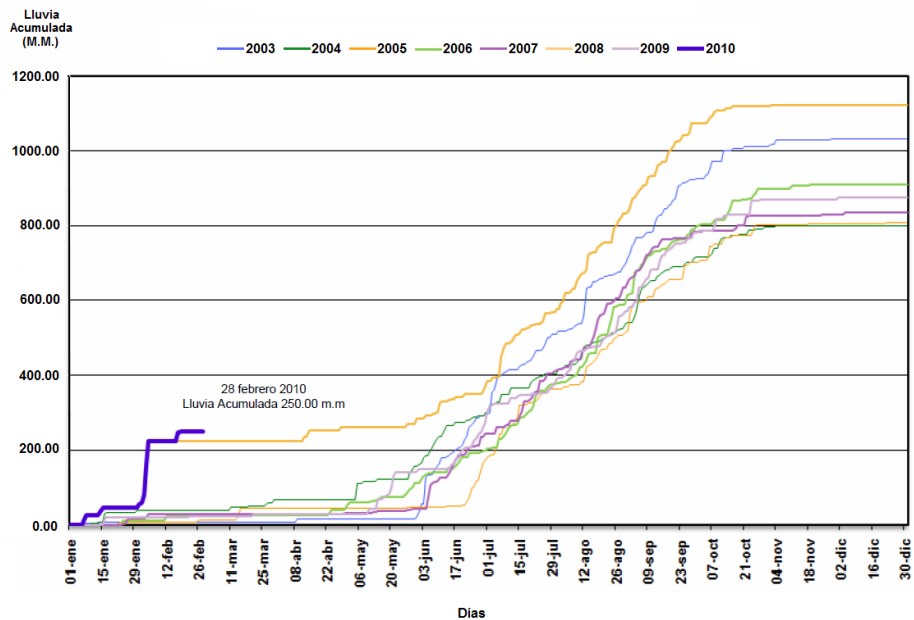


Figura 3.7 Lluvia acumulada para el periodo 2003-2010.

Fuente: Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, Dirección de Agua potable, Drenaje y Saneamiento y Residencia General de Operación Sistema Cutzamala.

El nivel de la presa durante el año fluctúa dependiendo de la precipitación y de la extracción realizada. Generalmente, aumenta a partir de septiembre (con la acumulación de escurrimientos de lluvia de las laderas y la disminución del nivel de extracción); llega a su nivel más alto a finales de octubre y empieza a bajar en marzo, alcanzando su nivel más bajo en junio, que es cuando reinicia la época de lluvia. Por lo anterior, el lago se encuentra en niveles bajos durante el verano.

3.2 Estudios de calidad del agua de la presa Valle de Bravo

El embalse de la presa de Valle de Bravo es ampliamente utilizado para diversas actividades, por ello requiere ser estudiada para poder determinar si es o no adecuada la calidad que posee para llevar a cabo tales usos. Pues como se mencionó anteriormente, la comunidad de Valle de Bravo, de entre sus principales actividades se encuentra el ecoturismo, por lo que en toda la zona se llevan a cabo diversos deportes y, algunos requieren contacto directo con el agua del embalse; además de formar parte importante del sistema Cutzamala.



Figura 3.8 Fotografía del embalse de la presa de Valle de Bravo.

Fuente: www.pricetravel.com.mx

Así pues, el embalse requiere estar dentro de los parámetros establecidos por las Normas Mexicanas para poder ser aprovechado de forma segura, es decir, sin ocasionar riesgos tanto a la vida humana como a demás organismos que se encuentra en contacto con él.

Revisión bibliográfica de estudios realizados de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo

Como parte del proyecto PAPIIT No. 107710 “ Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de percepción remota” se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre los estudios realizados de la calidad del agua del vaso de la presa Valle de Bravo; las fuentes de donde se obtuvo la información son las siguientes: Comisión Nacional del Agua (CNA), el Archivo Histórico del Agua (AHA), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), documentos del Instituto Nacional de Ecología y en diversas tesis de licenciatura, boletines e informes técnicos, consignados en la bibliografía del presente trabajo.

El IMTA realizó un estudio de la calidad del agua del vaso de la presa Valle de Bravo correspondiente al periodo 1998 a 2006 y la CONAGUA por su parte realizó un estudio que incluye los años 1999 y 2000. Adicionalmente se consultó una tesis de la licenciatura en biología correspondiente a los años 2001 y 2002. La información más relevante referente a cada uno de los estudios se encuentra resumida en las tablas que a continuación se presentan y en la Figura 3.9 se pueden ubicar los puntos de muestreos para cada estudio.

Tabla 3. 3 Estudio Informe final de proyectos de control de malezas acuáticas, Archivo Histórico del Agua (AHA).

Nombre de Estudio	Informe final de proyectos de control de malezas acuáticas, IMTA	
Responsable	Olvera Viascan, Víctor	
Objetivo	Establecer las relaciones causa - efecto de la proliferación de lirio y fitoplancton, como una manifestación de eutroficación evaluada con base a la dinámica de nutrientes y un antecedente de control de la calidad del agua. Permitiendo fijar las políticas de rehabilitación y manejo de las presas y lagos de México.	
Resultados	Se informa que los sedimentos contenían en promedio un 14% de materia orgánica. Presenta un estado de eutroficación generado básicamente por los aportes de nutrientes del río Amanalco y descarga del mercado. Los parámetros de color, turbiedad y sólidos suspendidos no satisfacen el uso del embalse. Se debe evitar que las descargas de aguas residuales de la población Valle de Bravo lleguen a la presa. Debe restringirse la actividad turística de la presa.	
Comentarios	La frecuencia de muestreo fue mensual de febrero a noviembre; pero para los meses de julio y septiembre el muestreo fue quincenal con el propósito de captar los cambios producidos por las lluvias.	
Año o periodo	1987	N° de estaciones de Muestreo 16
Parámetros de calidad del agua analizados	Temperatura ambiente, Temperatura del agua Oxígeno disuelto (OD), Potencial de hidrógeno (pH), Transparencia (Secchi), Turbiedad, Color, Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅), Demanda química de oxígeno (DQO), Fósforo (P-orto), Fósforo total (P-total), Nitrógeno (N-org), Amoníaco (NH ₃), Nitratos (NO ₃), Nitritos (NO ₂), Sulfatos (SO ₄), Dureza Total, Alcalinidad, Conductividad, Sólidos suspendidos fijos (SSF), Sólidos suspendidos volátiles (SSV), Sólidos suspendidos totales (SST).	

Fuente: MOTA, Karina. Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo.

Tabla 3. 4 Estudio de Evaluación de la calidad del agua en la presa Valle de Bravo, Archivo Histórico del Agua (AHA).

Nombre de Estudio	Evaluación de la calidad del agua en la presa Valle de Bravo, Tesis de Licenciatura de Ingeniería Civil	
Responsable	Velazco Hernández, Arturo	
Objetivo	Mostrar el procedimiento de evaluación de calidad del agua de la presa Valle de Bravo, así como proponer, un sistema de tratamiento para agua potable adecuado a la calidad del agua de este lugar y establecer, medidas para mejorar y conservar la calidad del agua.	
Resultados	Se encontró que el agua es adecuada para consumo humano siempre y cuando se dé un tratamiento de potabilización convencional, es decir un tratamiento que incluya procesos físicos y químicos, con desinfección.	
Comentarios	La contaminación de la presa por las descargas municipales no es de consideración; sin embargo, es necesario proteger la fuente. En la presa es necesario: mantener el control de lirio, controlar y revisar las embarcaciones para que no viertan combustibles ni aceites al embalse, así como un monitoreo continuo.	
Año o periodo	1996	N° de estaciones de Muestreo 7
Parámetros de calidad del agua analizados	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅), Potencial de hidrógeno (pH), Temperatura ambiente, Temperatura agua, Color, Oxígeno disuelto (OD), Conductividad, Grasas y aceites, Sólidos sedimentables, Sólidos totales, Sólidos suspendidos, Sólidos disueltos, Cloruros, Demanda química de oxígeno (DQO ₅), Nitratos (NO ₃), Nitritos (NO ₂), Boro, Alcalinidad, Acidez total, Dureza total, Dureza de calcio, Dureza de magnesio, Detergentes (SAAM), Fosfatos, Hierro, Coliformes totales.	

Fuente: MOTA, Karina. Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo.

Tabla 3. 5 Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala, CONAGUA.

Nombre de Estudio	Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala en coordinación con los gobiernos del Distrito Federal y Estado de México.	
Responsable	Comisión Nacional del Agua.	
Objetivo	Realizar el diagnóstico del comportamiento de la calidad del agua de los principales afluentes pertenecientes al Sistema Cutzamala.	
Resultados	La mayoría de los resultados de cada parámetro no representan un riesgo para el ecosistema y no rebasan los criterios ecológicos para fuentes de abastecimiento. El mercurio rebasa el límite de 0.001 mg/l, éste se encuentra en forma inorgánica en aguas superficiales y se deduce que fue depositado en la época de lluvias. El aluminio se considera en una concentración alta, lo cual puede representar problemas en el proceso de desinfección del agua.	
Comentarios	La ubicación del sitio de muestreo en el embalse de la presa de Valle de Bravo, se determinó en el centro de la cortina. La CNA realizó 10 muestreos en los meses de septiembre a diciembre.	
Año o periodo	1998	N° de estaciones de Muestreo 1
Parámetros de calidad del agua analizados	pH, coliformes totales, coliformes fecales, Color, Turbiedad, Sabor, Olor, Sulfatos (SO ₄), Cianuro, Cloruros, Dureza total, Fluoruros, Nitratos (NO ₃), Nitritos (NO ₂), Nitrógeno amoniacal (NH ₃), Sodio, Bario, Aluminio, Cadmio total, Cromo, Cobre, Hierro, Plomo, Manganeso, Zinc, Arsénico, Mercurio, Detergentes (SAAM), Fenoles totales, Sólidos disueltos totales (SDT), 2,4-D, Aldrín, Dieldrín, Heptacloro, Heptacloro Epóxido, Hexaclorobenceno, Metoxicloro, BHC g, Lindano, Clordano, 4;4 – DDT, Bromodichlorometano, Bromoformo, Cloroformo, Dibromoclorometano, Trihalometanos totales, Alfa total, Beta total.	

Fuente: MOTA, Karina. Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo.

Tabla 3. 6 Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala, CONAGUA.

Nombre de Estudio	Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala en coordinación con los gobiernos del Distrito Federal y Estado de México.	
Responsable	Comisión Nacional del Agua.	
Objetivo	Realizar el diagnóstico del comportamiento de la calidad del agua de los principales afluentes pertenecientes al Sistema Cutzamala.	
Resultados	El aluminio se mantiene dentro del límite permisible. Se rebasó la concentración de hierro de 0.30 mg/l, disminuyendo después. En general, en la presa Valle de Bravo se presentan condiciones naturales como fuente de abastecimiento, con agua que requiere ser desinfectada.	
Comentarios	La ubicación del sitio de muestreo fue en el centro de la cortina de la presa de Valle de Bravo se estableció tomando en cuenta las condiciones de la representatividad de las características del comportamiento de la calidad del agua, dentro de los embalses. La CNA realizó 10 muestreos en los meses de julio a noviembre.	
Año o periodo	1999	N° de estaciones de Muestreo 1
Parámetros de calidad del agua analizados	pH, Coliformes totales, Coliformes fecales, Color, Turbiedad, Sabor, Olor, Sulfatos (SO ₄), Cianuro, Cloruros, Dureza total, Fluoruros, Nitratos (NO ₃), Nitritos (NO ₂), Nitrógeno amoniacal (NH ₃), Sodio, Bario, Aluminio, Cadmio total, Cromo, Cobre, Hierro, Plomo, Manganeso, Zinc, Arsénico, Mercurio, Detergentes (SAAM), Fenoles totales, Sólidos disueltos totales (SDT), 2;4 D (AC. 2;4 Diclorofenoxiacetido), Aldrín, Dieldrín, Endosulfan I, Endosulfan II, Endrin, Heptacloro, Hexaclorobenceno, Metoxicloro, Toxafeno, BHC g, Lindano, Clordano, 4;4 – DDD, 4;4 – DDT, Bromodichlorometano, Bromoformo, Cloroformo, Dibromoclorometano, Alfa total, Beta total.	

Fuente: MOTA, Karina. Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo.

Tabla 3. 7 Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala, CONAGUA.

Nombre de Estudio	Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala en coordinación con los gobiernos del Distrito Federal y Estado de México.	
Responsable	Comisión Nacional del Agua.	
Objetivo	Realizar el diagnóstico del comportamiento de la calidad del agua de los principales afluentes pertenecientes al Sistema Cutzamala.	
Resultados	Persisten las mismas concentraciones de aluminio, hierro y manganeso. En general en la presa Valle de Bravo se presentan condiciones naturales como fuente de abastecimiento, con agua que requiere ser desinfectada.	
Comentarios	La ubicación del sitio de muestreo fue en el centro de la cortina de la presa de Valle de Bravo, se estableció tomando en cuenta las condiciones de la representatividad de las características del comportamiento de la calidad del agua, dentro de los embalses. La CNA realizó 11 muestreos durante los meses de Enero a Noviembre.	
Año o periodo	2000	N° de estaciones de Muestreo 1
Parámetros de calidad del agua analizados	pH, Coliformes totales, Coliformes fecales, Color, Sabor, Olor, Dureza total, Turbiedad, Sulfatos, Cloruros, Fluoruros, Fenoles totales, Nitrógeno amoniacal (NH ₃), Nitritos (NO ₂), Nitratos (NO ₃), Detergentes (SAAM), Cianuros, Aluminio, Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Cobre, Hierro, Mercurio, Manganeso, Sodio, Plomo, Zinc, Sólidos disueltos totales (SDT), Dicloroprop, Aldrín, Dieldrín, Endosulfan I, Endosulfan II, Endosulfan Sulfato, Endrin, Endrin aldehído, Heptacloro, Heptacloro Epóxido, Hexaclorobenceno, 5-Hidroxicamba, Metoxicloro, 4-Nitrofenol, Pentaclorofenol, Picloram, 2;4;5-T; Toxafeno, Bentazon, BHC a, BHC b, BHC d, BHC g; Lindano, Clordano, 2,3 D (AC. 2,4 Diclorofenoxiacetico), Acifluorfen, 2;4 DB, 4;4 – DDD, 4;4 – DDE, 4;4 – DDT, Bromodichlorometano, Bromoformo, Cloroformo, Dibromoclorometano.	

Fuente: MOTA, Karina. Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo.

Tabla 3. 8 Plan para la gestión Integral del Agua y Recursos Asociados de la cuenca de Valle de Bravo, IMTA.

Nombre de Estudio	Plan para la gestión integral del agua y recursos asociados de la cuenca de Valle de Bravo, Estado de México. IMTA		
Responsable	Comisión Nacional del Agua.		
Objetivo	Realizar el diagnóstico del comportamiento de la calidad del agua de los principales afluentes, además del monitoreo biológico de influentes y embalses en el periodo 1999-2006.		
Resultados	Los resultados coinciden en el deterioro que ha sufrido el embalse clasificándolo en estado eutrófico, debido principalmente a las concentraciones de nitrógeno y fósforo. Los demás parámetros que sobrepasan dichos criterios fueron: turbiedad, color, grasas y aceites, nitritos, ortofosfatos, aluminio, coliformes fecales, nitrógeno amoniacal y sulfatos. El aluminio se concentra en el fondo del embalse. Se observó el incremento en la DQO superficial, derivado de la presencia de microalgas.		
Comentarios	Los resultados presentan los valores promedio de parámetros de calidad del agua de acuerdo a los diferentes estudios que se han realizado en la presa Valle de Bravo. No se especifica el lugar de la obtención de la muestra pero con base en los estudios anteriores, se considerará al centro de la cortina.		
Año o periodo	1999 - 2006	N° de estaciones de Muestreo	1
Parámetros de calidad del agua analizados	pH, Conductividad, Turbiedad, Alcalinidad, Dureza total, Transparencia, Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅), Demanda química de oxígeno (DQO), Nitrógeno total de Kjeldahi (NTK), Nitrógeno amoniacal (NH ₃), Nitritos (NO ₂), Nitratos (NO ₃), Fosfato total, Ortofosfatos, Grasas y aceites, Detergentes (SAAM), Sólidos totales (ST), Sólidos totales fijos (STF), Sólidos total volátiles (STV), Sólidos disueltos totales (SDT), Sólidos suspendidos totales (SST), Coliformes Total, Coliformes Fecales.		

Fuente: MOTA, Karina. Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo.

Tabla 3. 9 Evaluación de la Calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo

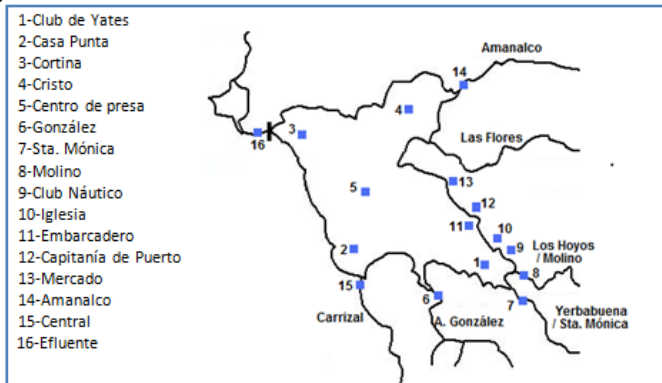
Nombre de Estudio	Evaluación de la calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo		
Responsable	Cortes Morales, Roberto Salvador, Tesis de licenciatura en Biología		
Objetivo	Evaluar la calidad bacteriológica y físico química del agua de la Presa Valle de Bravo		
Resultados	Los ríos Amanalco y Carrizal representan una fuente importante de contaminación para la presa, en especial para la época de lluvias. Con los resultados y la comparación con la NOM-127-SSA-1994, la presa no cumple con: pH, coliformes totales y fecales. De acuerdo al ICA, el agua de la presa Valle de Bravo, que suministra de agua a la Ciudad de México, solo requiere de una ligera purificación para considerarse de buena calidad para el consumo humano.		
Comentarios	Las toma de muestras se realizaron durante los meses agosto del 2001 a Julio del 2002		
Año o periodo	2001 - 2002	N° de estaciones de Muestreo	5
Parámetros de calidad del agua analizados	Demanda química de oxígeno (DQO), Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅), Oxígeno disuelto, Nitritos (NO ₂), Nitratos (NO ₃), Nitrógeno amoniacal (NH ₃), Fosfatos (PO ₄), Fosforo total, Detergentes (SAAM), Dureza total, Dureza de Calcio, Dureza de magnesio, Sulfatos (SO ₄), pH, Alcalinidad total, Alcalinidad a la fenoltaleina, Cloruros, Temperatura, Sólidos totales (ST), Sólidos suspendidos (SS), Sólidos disueltos (SD), Conductividad, Profundidad, Coliformes totales, Coliformes fecales, Estreptococos fecales.		

Fuente: MOTA, Karina. Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo.

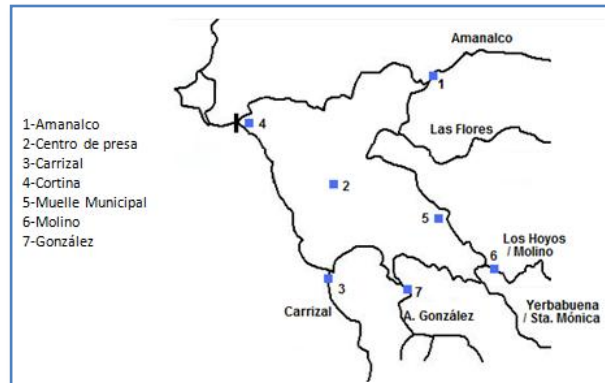
Tabla 3. 10 Calidad del agua en la cuenca Valle de Bravo Amanalco, una propuesta para su manejo

Nombre de Estudio	Calidad del agua en la cuenca Valle de Bravo Amanalco, una propuesta para su manejo.		
Responsable	Gustavo Pérez, Ana C. Instituto de Ecología		
Objetivo	Se determinó la calidad del agua de la Presa Valle de Bravo como una herramienta de monitoreo y evaluación de los impactos producidos por las actividades humanas en la cuenca. Utilizando métodos estandarizados, se determinaron los parámetros fisicoquímicos básicos, además de nutrientes.		
Resultados	Los resultados mostraron que debido a las concentraciones de formas de fósforo y nitrógeno registradas el cuerpo de agua se encuentra en estado eutrófico, favoreciendo la proliferación de comunidades microbianas y de otros organismos. Se identificaron 27 diferentes especies de bacterias agrupadas en 19 géneros. La cantidad de coliformes fecales sobrepasa los 1000 UFC/100ml en varios sitios de muestreo. Proponer un sistema de monitoreo de la calidad del agua con el fin de informar periódicamente a los usuarios la condición del agua con respecto al uso recreativo.		
Comentarios	El trabajo fue realizado gracias al apoyo de Fondo Pro Cuenca A. C. de Valle de Bravo y al Instituto de Ecología de la UNAM. En el estudio no se señalan los resultados completos de cada zona de muestreo del embalse.		
Año o periodo	2007	N° de estaciones de Muestreo	12
Parámetros de calidad del agua analizados	Temperatura, pH, Conductividad, Sólidos disueltos totales (SDT), Oxígeno disuelto, Nitrógeno total, Fósforo total, Carbono orgánico total, Aldrín, Dieldrín, Clordano, DDT, GammaHCH, Lindano, Hexaclorobenceno, Heptacloro, Heptacloro epóxido, Metoxicloro, Endosulfan I, Endosulfan II, Endrín, AlfaBHC, BetaBHC, DeltaBHC, Clordano, 4;4'DDD, 4;4'DDE, Endrín aldehído, Endrín cetona, Coliformes totales, Coliformes fecales, Enterococos fecales.		

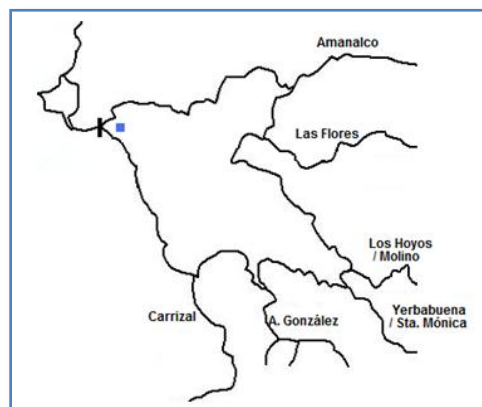
Fuente: MOTA, Karina. Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo.



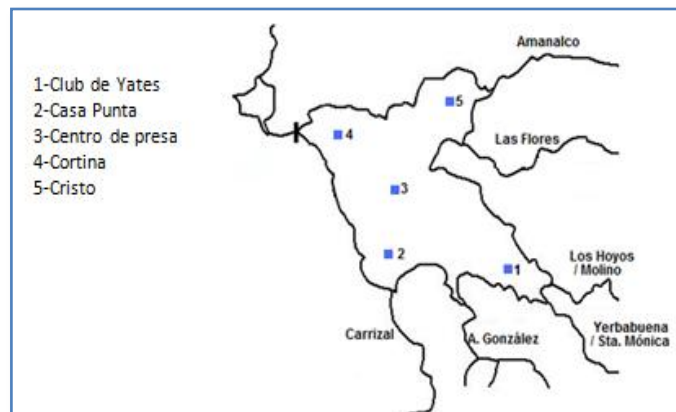
a. Estudio relativo a la Tabla 3.3



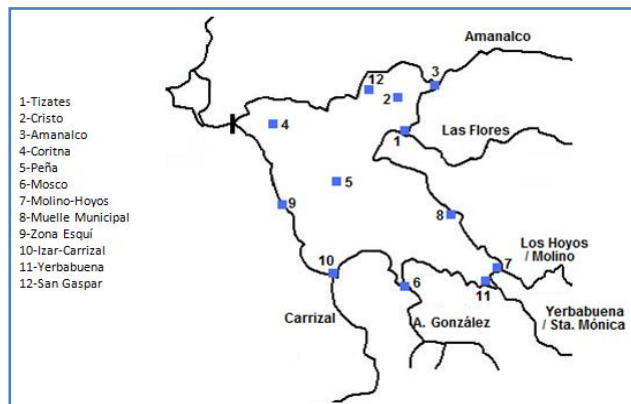
b. Estudio relativo a la Tabla 3.4



c. Estudio relativo de las Tablas 3.5 - 3.8



d. Estudio relativo a la Tabla 3.9



e. Estudio relativo a la Tabla 3.10

Figura 3.9 Ubicación aproximada de los sitios de muestreo. Fuente: MOTA, Karina. Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo.

Con base en la revisión bibliográfica, se encontraron resultados de los estudios que, con diferentes objetivos, se realizaron sobre el análisis de la calidad del embalse en el periodo de 1987 a 2007. Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 3.11 Estudio de Informe final de proyectos de control de malezas acuáticas 1987 IMTA

Parámetro	Unidad	Club de Yates	Casa-punta	Cortina	Jesucristo	Centro	Glez.	Sta. Mónica	Molino	Club Náutico	Iglesia	Embarcadero	Capitanía de Puerto	Mercado	Amanalco	Central	Efluente
Temperatura ambiente	°C	20.1	22.2	22.9	23.5	23.4	19.4	20.4	19.1	20.2	21.1	23.3	22.8	21.4	19.2	20	21.2
Temperatura del agua	°C	20.6	20.8	23	23.4	23.4	16.3	16.3	16.3	18.1	19.3	19.1	19.3	20.1	19	16.9	23.4
OD	mg/l	7.3	6.7	6.2	6.8	7.6	7.6	7.1	7.9	7.1	4	6.1	2.3	3	7.2	7.7	1.6
pH	Unidades pH	7.1	6.9	7.1	7	7	7.3	7.3	7.1	7.2	7	6.9	7.3	7	7	7.3	7
Transparencia (Secchi)	m	1.5	1.89	2.15	1.7	1.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Turbiedad	UTJ	7.5	10.2	8.7	8.9	9.5	9.8	26	11.6	24.1	18.6	27.8	19.3	50.1	23.8	30.7	10
Color	ptCo	18	11	23	43	30	28	79	28	31	35	30	21	71	40	85	33
DBO	mg/l	3	1	2	2	2	1	2	1	1	5	7	4	11	6	1	2
DQO	mg/l	13	9	18	14	14	15	16	17	21	41	55	41	96	40	18	13
P-orto	mg/l	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.56	0.66	0.57	1.28	0.03	0.01	0.01
P-total	mg/l	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.06	0.01	0.12	1.04	1.38	0.77	2	0.3	0.01	0.01
N-org	mg/l	0.48	0.46	0.46	0.43	0.47	0.22	0.65	0.26	0.66	1.28	2.68	0.805	5.02	1.15	0.68	0.436
NH3 amoniac	mg/l	0.07	0.12	0.12	0.14	0.19	0.02	0.02	0.01	0.05	0.162	2.37	1.78	3.14	0.18	0.05	0.29
NO3 nitratos	mg/l	0.007	0.004	0.026	0.017	0.016	0.376	0.165	0.216	0.19	0.18	0.298	1.385	0.474	0.583	0.185	0.057
NO2 nitritos	mg/l	0.006	0.008	0.008	0.008	0.008	0.025	0.027	0.047	0.012	0.105	0.104	0.217	0.077	0.027	0.02	0.013
SO4 sulfatos	mg/l	3	2	2	3	3	2	2	3	3	7	9	9	15	5	5	3
Dureza Total	CaCO3 mg/l	68	68	66	68	66	50	61	61	80	82	84	95	103	72	57	72
alcalinidad	mg/l	77	67	68	66	67	47	51	60	75	86	77	88	99	71	46	74
Conductividad	µmhos/cm	133	137	144	141	142	85	86	78	212	240	259	232	280	170	189	190
SSF	mg/l	18	6	10	20	15	17	32	19	109	152	30	63	655	62	44	14
SSV	mg/l	9	5	6	7	7	9	10	11	16	26	22	12	110	12	9	6
SST	mg/l	27	11	16	27	22	26	42	30	125	178	52	75	765	74	53	20

Fuente: Archivo Histórico del Agua.

Tabla 3.12 Estudio de evaluación de la calidad del agua en la presa Valle de Bravo 1996, tesis de licenciatura de Ingeniería Civil

Parámetro	Unidad	Amanalco	Centro de la presa	El carrizal	Cortina	Muelle municipal	Río el molino	González
DBO5	mg/l	10.72	4.99	5.87	3.75	5.33	5.65	6.8
pH	Unidades pH	7.9	8.00	7.9	8	8	8.1	-
Temperatura ambiente	°C	25	25	25	25	15	25	25
Temperatura agua	°C	22	22	22	21	22	22	21
Color	UPT-CO	11	11	13	12	12	11	15
Oxígeno disuelto	mg/l	7.6	7.6	7.6	7.5	6.7	7.6	6
conductividad	μmhos/cm	<134	<129	<135	<134	<134	<132	<132
Grasas y aceites	mg/l	1.9	1.7	1	2.2	1.6	2.2	2.7
Sólidos sedimentables	ml/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sólidos totales	mg/l	120	148	134	98	149	142	181
Sólidos Suspendidos	mg/l	15	17	12	8	21	12	-
Sol. Disueltos Totales	mg/l	105	131	122	90	128	130	-
Cloruros	mg/l	82	75	74	51	77	70	-
DQO	mg/l	13.4	7.14	7.16	5.36	6.28	5.2	8
Nitrato	mg/l	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	-
Nitritos	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-
Boro	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-
Alcalinidad	mg/l CaCo3	65.3	62.5	52	49.8	61.9	65.3	-
Acidez Total	mg/l CaCo4	1.8	2.2	2.6	1.7	3.1	2.2	-
Dureza Total	mg/l CaCo5	145	148	144	116	140	159	-
Dureza de Calcio	mg/l CaCo6	38	28	29	27	33	25	-
Dureza de Magnesio	mg/l CaCo7	104	120	116	118	107	134	-
S.A.A.M.	mg/l	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.10	-
Fosfatos	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-
Fierro	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	-
Coliformes Totales	NMP	<33	<210	<30	<30	<32	<30	-

Fuente: Archivo Histórico del Agua.

Tabla 3.13 Estudio de evaluación de la calidad del agua en la presa Valle de Bravo 1996, tesis de licenciatura de Ingeniería Civil

Parámetros	Unidades	1998			1999			2000		
		Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
pH	Unidades pH	6.85	8.4	7	6.93	8.9	6.509	9.02	9.02	9.02
Coliformes Totales	NMP/100 ml	0	11000	2900	1	430	75.067	40	41	40.5
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	0	430	104	1	65	20	20	140	66.667
Color	Unidades Pt-Co	5	10	7.2	5	15	10.375	7.5	17.5	10
Turbiedad	U.T.N.	0.9	7.5	2.6	1.9	44	11.41	1.5	7.6	3.98
Sabor	Característico	NE	NE	NE	NE	NE	NE	0	0	0
Olor	Ausente	1	3	1.8	1.14	4.7	2.389	1.5	2.6	2.14
Sulfatos (como SO4 -2)	mg/l	0.17	3.77	1.17	0.71	15.62	8.665	2.23	5.81	4.824
Cianuro (CN)	mg/l	0.003	0.003	0.003	0.002	0.034	0.009	0	0	0.002
Cloruros (Cl)	mg/l	1.9	8.9	3.93	0.94	24	4.543	1.82	4.04	2.772
Dureza total (como CaCO3)	mg/l	50.7	74.2	58.1	52.92	259.7	70.506	52.7	61.5	56.42
Fluoruros (como F)	mg/l	0.052	0.318	0.137	0.06	0.152	0.117	0.09	0.17	0.122
Nitratos (N-NO3)	mg/l	0.11	0.215	0.163	0.018	3.47	0.363	0.01	0.15	0.076
Nitritos (N-NO2)	mg/l	0.0015	0.024	0.0096	0.0046	0.093	0.025	0	0.02	0.01
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/l	0.08	0.26	0.155	0.04	0.77	0.167	0.14	0.26	0.202
Sodio (Na)	mg/l	6.35	1124.732	82.665	4.4565	12.082	8.109	7.86	9.81	9.075
Bario (Ba)	mg/l	0.0059	0.043	0.0199	0.0093	0.0501	0.023	0.01	0.02	0.013
Aluminio (Al)	mg/l	0.015	0.229	0.113	0.029	0.383	0.197	0.07	0.15	0.111
Cadmio total (Cd)	mg/l	ND	ND	ND	0.0081	0.0081	0.008	0	0	0
Cromo (Cr)	mg/l	ND	ND	ND	0.0125	0.0147	0.001	0.01	0.01	0.008
Cobre (Cu)	mg/l	0.028	0.028	0.028	0.0065	0.0148	0.002	0.01	0.01	0.011
Fierro (Fe)	mg/l	0.039	0.296	0.127	0.014	1.099	0.17	0.05	0.26	0.147
Plomo (Pb)	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Manganeso (Mn)	mg/l	0.01	0.048	0.022	0.005	0.07	0.02	0.01	0.02	0.012
Zinc (Zn)	mg/l	0.014	0.116	0.052	0.008	0.061	0.03	0.02	0.05	0.03
Arsénico (As)	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Mercurio (Hg)	mg/l	0.004	0.019	0.0115	ND	ND	ND	0	0	0
SAAM	mg/l	0.03	0.03	0.03	0.07	0.45	0.201	0.1	0.42	0.24
Fenoles Totales	mg/l	0	0	0	0.002	0.007	0.005	0	0	0
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	mg/l	52	152	101	52	132	102.55	85	113.3	102.46
24-D	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-	-	-
Aldrín	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Dieldrín	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Heptacloro	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Heptacloro Epóxido	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Hexaclorobenceno	µg/l	NE	NE	NE	ND	ND	ND	0	0	0
Metoxicloro	µg/l	NE	NE	NE	ND	ND	ND	0	0	0
BHC g, Lindano	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Clordano	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
4;4 - DDT	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Bromodiclorometano	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Bromoformo	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Cloroformo	mg/l	0.0032	0.0032	0.0032	0.00113	0.00113	0.001	0	0	0
Dibromoclorometano	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0

TRIHALOMETANOS TOTALES		0.0032	0.0032	0.0032	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Radiactividad		ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
ALFA TOTAL		ND	ND	ND	0.03	0.04	0.033	ND	ND	ND
Sólidos Solubles	Bq/l	ND	ND	ND	0.02	0.02	0.02	ND	ND	ND
Sólidos Insolubles	Bq/l	ND	ND	ND	0.01	0.02	0.013	ND	ND	ND
BETA TOTAL		ND	ND	ND	0.11	0.11	0.11	ND	ND	ND
Sólidos Solubles	Bq/l	ND	ND	ND	0.06	0.06	0.06	ND	ND	ND
Sólidos Insolubles	Bq/l	ND	ND	ND	0.05	0.05	0.05	ND	ND	ND
Endosulfan I	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Endosulfan II	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Endrín	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Toxafeno	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
4;4 - DDD	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Dicloroprop	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Endosulfan Sulfato	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Endrín aldehído	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
5-Hidroxicamba	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
4-Nitrofenol	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Pentaclorofenol	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Picloram	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
2,4,5-T	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Bentazon	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
BHC a	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
BHC b	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
BHC d	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
2,3 D (AC. 2,4 Diclorofenoxiacético)	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Acifluorfen	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
2,4 DB	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
4;4 - DDE	µg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Bromoforno	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Cloroformo	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0
Dibromoclorometano	mg/l	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0	0	0

*NE: No estudiado; ND: No determinado.

Fuente: Archivo Histórico del Agua.

Tabla 3.14 Estudio de Plan para la gestión integral del agua y recursos asociados de la cuenca de Valle de Bravo, Estado de México (1999-2006)

Parámetro	Unidades	Valor promedio (CNA/IDECA 1999)	Valor promedio (CNA/IDECA 2000)	Valor promedio (CNA/IMTA 2001)	Valor promedio (CNA/ACUAGRANJAS, 2002)	Valor promedio (CNA/ACUAGRANJAS, 2003)	Valor promedio (CNA/ACUAGRANJAS, 2004)	Valor promedio (CNA/ACUAGRANJAS, 2005)	Valor promedio (CNA/ACUAGRANJAS, 2006)
pH	Unidades pH	6.8	7.1	8.7	7.12	6.06	8.5	8.77	8.48
Conductividad	µmhos/cm	133	126	108.67	146.94	125.35	137.5	14.78	150.09
Turbiedad	UTN	3.6	3.8	ND	5.5	8.97	23.74	12.5	12.38
Alcalinidad	mg/l	81.7	92.4	ND	65.5	81.5	89.2	77.84	ND
Dureza total	mg/l	76.1	84.7	ND	58.7	71.5	59.2	58.9	ND
Transparencia	m	1.4	2.23	1.41	1.26	ND	1.3	0.83	0.94
DBO ₅	mg/l	5	ND	ND	4.24	5.8	3.2	3.62	ND
DQO	mg/l	8	8	13.56	10.33	11	6.18	10.84	11.48
NTK	mg/l	0.74	0.68	ND	0.57	0.52	0.4	0.85	0.78
N-amoniacal	mg/l	0.08	0.12	0.37	0.14	0.21	0.24	0.2	0.22
Nitritos	mg/l	0.006	0.003	0.028	0.02	0.14	0.01	0.017	0.024
Nitratos	mg/l	0.106	0.116	0.232	0.106	0.184	0.2	0.195	0.425
Fosfato total	mg/l	0.145	0.066	ND	0.182	0.071	0.034	0.053	0.049
Ortofosfatos	mg/l	0.024	0.004	0.176	0.077	ND	ND	0.088	0.04
Grasas y aceites	mg/l	0.2	0.33	ND	0	0.4	0.87	0.75	0.7
SAAM	mg/l	0.104	0	ND	0.011	ND	ND	4.57	0.23
Sólidos Totales	mg/l	107	126	ND	105.91	93.05	91	82.65	102.29
Sólidos Fijos	mg/l	36	40	ND	23.63	25.76	26.1	ND	ND
Sólidos Volátiles	mg/l	71	86	ND	81.19	67.2	65	ND	ND
Sólidos Disueltos	mg/l	82	92	ND	97.18	83.58	82.58	55.6	84.41
Sólido Suspendido	mg/l	25	34	ND	8.74	9.47	8.41	27.05	20.27
Coliformes totales	NMP/100 ml	9000	19	ND	7021.44	6477.91	5379.81	23682.13	ND
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	120	4	ND	3401.66	4012.75	508.18	17127.46	62313.67

*NE: No estudiado; ND: No determinado.

Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Tabla 3.15 Estudio de evaluación de la calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo 2001, tesis de licenciatura en Biología

Parámetro	Unidades	1-Club de Yates	2 - El Carrizal	3-Centro	4-Obra de toma (cortina)	5-Amanalco
DQO	mg/l	22.392	11.4712	26.5	11.822	12.132
DBO5	mg/l	2.864	1.812	2.382	1.74	2.032
OD	mg/l	6.364	5.666	5.46	5.576	5.582
Nitritos-NO2	mg/l	0.0152	0.01686	0.01344	0.0147	0.01416
Nitratos-NO3	mg/l	0.478	0.43	0.47	0.42	0.1562
Nitrógeno amoniacal -NH3	mg/l	0.2562	0.1898	0.4274	0.4082	0.4282
P-PO4	mg/l	0.0664	0.0614	0.0664	0.0628	0.0654
P total	mg/l	0.28	0.2478	0.293	0.2434	0.286
SAAM	mg/l	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Dureza total	mg/l	65.02	64.54	65.8	62	65.86
Dureza de Calcio	mg/l	31.38	28.08	31.92	33.72	28.6
Dureza de magnesio	mg/l	33.08	36.44	33.9	28.34	37.6
Sulfatos	mg/l	75.86	58.8	58.16	56.34	62.74
pH	Unidades pH	8.416	8.48	8.282	8.214	8.162
Alcalinidad total CaCO3	mg/l	69.52	73.54	71	71.76	70.56
Alcalinidad a la fenoltaleina CaCO3	mg/l	1.03	1.21	0.85	1.39	2.97
cloruros	mg/l	3.938	3.22	2.93	3.072	2.488
Temperatura	°C	22.2	21.4	20.8	21.2	21.5
Sólidos totales	mg/l	101.11	92.728	100.096	93.942	94.802
Sólidos suspendidos	mg/l	11.8	5.2	11.3	5.1	5.2
Sólidos disueltos	mg/l	89.306	87.532	88.786	88.842	89.606
Conductividad	µmhos/cm	105.06	102.94	104.42	104.52	105.38
Profundidad	Secchii/m	2.058	1.706	1.902	2.068	1.838
Coliformes Totales	NMP/100 ml	392.8	116.4	1095.6	407	508.6
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	152	15	23.25	10	165.5
Estreptococos fecales	NMP/100 ml	523.4	505.4	65.8	366.4	256.6

Fuente: <http://dgb.unam.mx/index.php/catalogos>

Tabla 3.16 Estudio de evaluación de la calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo

Parámetro	Unidades	1-Club de Yates	2-El Carrizal	3-Centro	4-Obra de toma (cortina)	5-Amanalco
DQO	mg/l	9.38	11.31	10.81	11.46	14.06
DBO5	mg/l	1.89	1.76	1.70	1.43	2.44
OD	mg/l	8.01	7.59	7.12	7.75	7.55
Nitritos-NO2	mg/l	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Nitratos-NO3	mg/l	0.47	0.35	0.34	0.43	0.30
Nitrógeno amoniacal-NH3	mg/l	0.08	0.10	0.09	0.09	0.18
P-PO4	mg/l	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
P total	mg/l	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05
SAAM	mg/l	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Dureza total	mg/l	50.47	52.37	52.10	53.48	53.87
pH	Unidades pH	8.84	8.75	9.06	8.95	8.92
Alcalinidad total CaCO3	mg/l	78.29	77.11	77.71	79.17	72.83
Alcalinidad a la fenoltaleína CaCO3	mg/l	6.43	6.14	5.28	5.57	3.84
cloruros	mg/l	3.41	2.89	2.71	3.06	2.70
Temperatura	°C	22.21	21.93	22.21	21.79	22.50
Sólidos totales	mg/l	110.04	128.24	107.56	114.09	114.99
Sólidos suspendidos	mg/l	5.00	3.29	3.11	3.41	4.34
Sólidos disueltos	mg/l	105.75	125.38	105.09	111.16	111.20
Profundidad	Secchii/m	2.09	1.82	1.91	1.77	1.75
Conductividad	µmhos/cm	144.59	159.70	134.24	137.53	138.99
Coliformes Totales	NMP/100 ml	447.14	42.00	56.86	391.43	276.43
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	189.29	2.71	16.29	62.57	58.00
Estreptococos fecales	NMP/100 ml	72.43	262.71	1326.71	15.43	28.29
Dureza de Calcio	mg/l	31.47	29.43	27.33	29.50	32.10
Dureza de magnesio	mg/l	28.43	31.60	34.83	36.10	36.93
Sulfatos	mg/l	33.25	27.75	31.35	32.05	33.95

Fuente: <http://dgb.unam.mx/index.php/catalogos>

Evaluación de la calidad del agua

Desde el punto de vista normativo para la evaluación de la calidad del agua del vaso de la presa Valle de Bravo se consideran la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y, la NOM-127-SSA1-1994 que establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua, para uso y consumo humano, que deben cumplir en todos los sistemas de abastecimiento público y privado y a cualquier persona física o moral que la distribuya en todo el territorio nacional.

Por otro lado, y 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 a algunos parámetros 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, el agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a 0, en tanto que el agua en excelentes condiciones tendrá un valor de índice cercano a 100 (SARH 1979). El ICA se calcula a partir de una ponderación de 18 parámetros

físico-químicos, Tabla 3.17. El cálculo del ICA se realizará con los parámetros con que cuente la estación de monitoreo, en caso de que no existan los 18 parámetros, y se ajustará la importancia relativa.

Fórmula del ICA:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad [3.1]$$

donde:

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

Para el cálculo del ICA se obtienen los índices de calidad de los parámetros a analizar y el peso ponderando que cada parámetro tiene, de acuerdo a la Tabla 3.17; posteriormente se calcula el índice general de calidad del agua y se compara con la Tabla 3.18 para obtener la calificación del agua en función del ICA.

Tabla 3. 17 Índice de Calidad individual para cada parámetro

Parámetro	Índice de calidad individual	Unidades	Wi	Observaciones
pH	$I_{pH} = 10^{0.2335 * pH + 0.44}$			pH < 6.7
	$I_{pH} = 100$	-	1	6.7 < pH < 7.3
	$I_{pH} = 10^{4.22 - 0.293 * pH}$			pH > 7.3
Color	$I_C = 123 * C^{-0.295}$	Unidades platino	1	
Turbiedad	$I_T = 108 * T^{-0.178}$	UTJ	0.5	
Grasas y Aceites	$I_{GyA} = 87.25 * GyA^{-0.298}$	mg/l	2	
Sólidos Suspendidos	$I_{SS} = 266.5 * SS^{-0.37}$	mg/l	1	
Sólidos Disueltos	$I_{SD} = 109.1 - 0.0175 * SD$	mg/l	0.5	
Conductividad Eléctrica	$I_{CE} = 540 * CE^{-0.379}$	µmhos/cm	2	
Alcalinidad	$I_A = 105 * A^{-0.186}$	mg/l	1	
Dureza Total	$I_D = 10^{1.974 - 0.00174 * D}$	mg/l	1	
Nitratos	$I_{NO_3} = 162.2 * NO_3^{-0.343}$	mg/l	2	
Nitrógeno Amoniacal	$I_{NH_3} = 45.8 * NH_3^{-0.343}$	mg/l	2	
Fosfatos Totales	$I_{PO_4} = 34.215 * PO_4^{-0.46}$	mg/l	2	
Cloruros	$I_{CL} = 121 * CL^{-0.233}$	mg/l	0.5	
Oxígeno Disuelto	$I_{OD} = 100 * (OD / OD_{SAT})$	-	5	OD=oxígeno disuelto [mg/l]; OD _{SAT} = oxígeno disuelto de saturación [mg/l]
Demanda Bioquímica De Oxígeno	$I_{DBO} = 120 * DBO^{-0.673}$	mg/l	5	
Coliformes Totales	$I_{CT} = 97.5 * CT^{-0.27}$	NMP/100 ml	3	
Coliformes Fecales	$I_{CF} = 97.5 * (5 * CF)^{-0.27}$	NMP/100 ml	4	
Detergentes (SAAM)	$I_{SAAM} = 100 - 16.678 * SAAM + 0.1587 * SAAM^2$	mg/l	3	

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

Tabla 3. 18 Calificación del agua en función del ICA

ICA		USOS DEL AGUA					
Valor	Criterio General	Abastecimiento 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	Dudoso para especies sensibles						
60	Poco contaminado			Dudoso	Solo Organismos muy resistentes		
50	Contaminado	Dudoso	Dudoso para el contacto directo	Uso muy restringido	Restringido		
40			Sin contacto con el agua				
30	Altamente Contaminado	Inaceptable	Uso muy restringido	Inaceptable	Inaceptable		
20			Inaceptable				
10			Inaceptable				
0						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.

Criterios de cálculo para el Índice de Calidad del Agua (ICA)

La aplicación de las ecuaciones para el cálculo del ICA por parámetro a los datos de calidad del agua puede generar valores del ICA mayores a 100, por lo que es necesario tomar en cuenta ciertos criterios de cálculo en la metodología, basados en el comportamiento matemático de las ecuaciones.

- *Potencial de hidrógeno.* Para valores de pH menores a 6.7 se usará la ecuación $I_{pH} = 10 \cdot 0.2335 \cdot pH + 0.44$; en el caso de que el pH sea mayor o igual a 6.7 y menor que 7.58 se aplicará la ecuación $I_{pH} = 100$. Cuando el pH sea mayor o igual a 7.58 se usará la ecuación $I_{pH} = 10 \cdot 4.22 - 0.293 \cdot pH$.
- *Color.* Los datos de las concentraciones de color que se utilizarán en el cálculo serán de color verdadero. Para concentraciones menores a 2.018 unidades de Pt-Co se asignará el valor de ICA igual a 100.
- *Turbiedad.* Para concentraciones menores a 1.54 UTM se asignará un valor de ICA de 100.
- *Grasas y aceites.* Cuando se tienen datos menores de 0.633 mg/l, se debe asignar un valor de ICA de 100.
- *Sólidos suspendidos.* Para concentraciones menores de 14.144 mg/l se asigna un valor de ICA de 100.
- *Sólidos disueltos.* Para concentraciones menores a 520 mg/l se asigna un valor de ICA de 100, y para concentraciones mayores a 6234 mg/l se asigna un valor de cero.
- *Conductividad eléctrica.* Cuando se tienen concentraciones menores a 85.60 μ mhos/cm, se debe asignar un ICA de 100.
- *Alcalinidad.* Para concentraciones menores de 1.3 se asigna un ICA de 100.
- *Dureza total.* Para concentraciones mayores a 2500 mg/l se asignará un ICA de cero.
- *Nitrógeno de nitratos.* Se asigna un valor de ICA de 100 para concentraciones menores a 4.097 mg/l.

- *Nitrógeno amoniacal*. Para concentraciones menores de 0.11 mg/l se asigna un ICA de 100.
- Fosfatos totales. Se asigna un valor de ICA de 100 para concentraciones menores o iguales a 0.0971 mg/l.
- Cloruros. Para concentraciones menores a 2.351 se asignará un ICA de 100.
- *Oxígeno disuelto*. El oxígeno se disuelve en el agua por el contacto del aire con la superficie del agua, hasta alcanzar el punto de saturación a una temperatura determinada. A la temperatura de 0°C el punto de saturación del oxígeno disuelto es de 14.6 ppm. Esta concentración disminuye al aumentar la temperatura del agua, de manera que a 15°C la concentración de saturación del oxígeno disuelto es de 10 ppm. Es por este motivo que, cuando no se cuente con el dato de la temperatura ambiente, no se podrá realizar el cálculo del oxígeno disuelto y se considerará inexistente. Para calcular la concentración de OD en equilibrio con aire saturado en agua, se usará la ecuación :

$$\ln(OD) = -139.34411 + \left[1.575701 \frac{10^5}{T}\right] - \left[6.642308 \frac{10^7}{T^2}\right] + \left[1.2438 \frac{10^{10}}{T^3}\right] - \left[8.621949 \frac{10^{10}}{T^4}\right] \quad [3.2]$$

donde la temperatura T está en grados Kelvin ($T = 273.15 + T_{\text{ambiente}}$). Posteriormente con la ecuación

$I_{OD} = \frac{OD}{OD_{\text{sat}}} \times 100$ se calcula el índice del OD.

- *Demanda bioquímica de oxígeno*. Se asigna un ICA de 100 para concentraciones menores o iguales a 1.311 mg/l.
- *Coliformes totales*. Cuando se tiene un valor de coliformes totales de 0 NMP/100 ml, se asigna un índice de 100.
- *Coliformes fecales*. Cuando se tiene un valor de coliformes fecales de 0 NMP/100 ml, se asigna un índice de 100.
- SAAM. Se asigna un valor de ICA de cero cuando se tengan concentraciones mayores de 6.384 mg/l.

Evaluación de la calidad del agua del vaso de la presa Valle de Bravo

Como parte de las actividades del proyecto PAPIIT IN107710 “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota”, y, con la finalidad de tener información actualizada sobre la calidad del agua del vaso de la presa Valle de Bravo, se llevaron a cabo 3 campañas de muestreo, dos durante 2010 y una durante 2011. Los sitios de muestreo fueron determinados a partir de un análisis digital de imágenes satelitales correspondientes a la zona del embalse. En campo se realizaron las actividades necesarias para la obtención y preservación de muestras. Algunos de los parámetros fueron medidos in situ, otros fueron determinados el mismo día del muestreo con equipo de campo, y el resto fueron determinados en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería al día siguiente del muestreo.

Además se determinó el Índice de Calidad del Agua (ICA) para calificar la calidad del agua del embalse de Valle de Bravo en dos diferentes períodos, el primero, que va de 1987 a 2006 con base en los resultados de los estudios encontrados en la revisión bibliográfica y, el segundo, que abarca las tres campañas de muestreo realizadas como parte del proyecto durante los años 2010 y 2011.

▪ Realización de las campañas de muestreo

Para la determinación de los sitios de muestreo de las campañas del proyecto, fueron utilizadas imágenes satelitales, las cuales se analizaron digitalmente por medio del software Ilwis, agrupando los diferentes datos de la imagen en clases espectrales.

Con base en el análisis espectral e incluyendo sitios de muestreo en todo el embalse, se definió la ubicación de 50 sitios. La Figura 3.10 es resultado del análisis digital y muestra la ubicación de los sitios propuestos para el muestreo. Así también se aprecia un bandeo (color rojo) que proviene de un fallo del sensor Landsat desde el 31 de mayo de 2003, el cual se experimentó en uno de sus componentes llamado SLC (scan line correction), lo que ocasionó que este deje de funcionar. El SLC se encargaba de remover el efecto del movimiento en “zigzag” del campo de visión del satélite producido por la combinación de los movimientos conocidos como along track y across track. Sin el funcionamiento del SLC, las imágenes captadas por el Landsat ETM+ presentan patrones de trazos en zigzag a través del recorrido del satélite. Si bien es cierto que la información que no ha sido captada por el sensor no se puede recuperar, se puede todavía conseguir alrededor el 80% de los datos captados por el sensor. Es importante mencionar que el bandeo se presenta indistintamente, es decir, no presenta siempre en las mismas coordenadas geográficas.

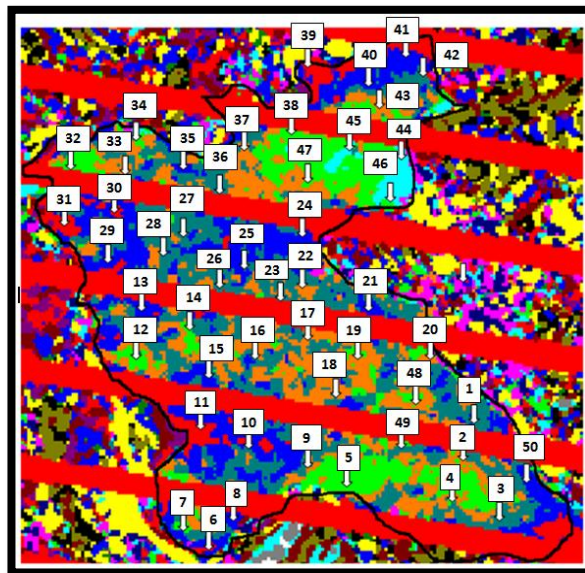


Figura 3.10 Imagen de la región correspondiente al embalse de Valle de Bravo con los 50 puntos de muestreo distribuidos por toda su área.

Fuente: MORALES, Daril. Análisis digital de imágenes satelitales para establecer sitios de muestreo en cuerpos de agua.

Procedimiento para recolección y preservación de muestras

Se tomaron muestras simples de agua para su posterior análisis (1/2 litro). Para la determinación de análisis físico-químicos se recolectaron muestras en envases limpios (1 litro), los cuales primeramente fueron enjuagados con el agua del vaso de la presa, para después tomar la muestra. Para la determinación de análisis bacteriológicos, se tomaron las muestras en frascos winkler, dichos frascos estaban estériles y declorados (con tiosulfato de sodio) por lo que se introducía el frasco bajo la superficie, teniendo especial cuidado en evitar que el agua que entraba al frasco tocara primero las manos de quien tomaba la muestra, pues eso provocaría la contaminación de dicha muestra; una vez que se tenía el volumen deseado (aproximadamente al hombro de la botella) en el frasco, éste se tapaba. Cada muestra fue marcada con un número con el que se le podría identificar, pues ese mismo número se registraba en la memoria del medidor multiparamétrico con GPS HANNA HI 9828, almacenando las coordenadas y la hora del muestreo, así como otros parámetros.

Una vez que las muestras fueron recolectadas y los frascos fueron tapados y etiquetados, se conservaron en hielo hasta que fueron estudiadas.

Medición en campo

En el sitio de muestreo se determinaron los siguientes parámetros:

- | | | |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------|
| ✓ <i>Temperatura</i> | ✓ <i>Conductividad</i> | ✓ <i>Salinidad</i> |
| ✓ <i>pH</i> | ✓ <i>Resistividad</i> | ✓ <i>Presión atmosférica</i> |
| ✓ <i>OD</i> | ✓ <i>Sólidos disueltos totales</i> | ✓ <i>Turbiedad</i> |

Parámetros determinados con el medidor multiparamétrico con GPS HANNA HI 9828

Los parámetros antes mencionados, con excepción de la turbiedad, fueron obtenidos empleando el medidor multiparamétrico con GPS HANNA HI 9828; empleando este aparato, también fue posible conocer las coordenadas geográficas del sitio donde fueron obtenidas las muestras. La Figura 3.11 se muestra el medidor multiparamétrico con GPS.



Figura 3. 11 Medidor multiparamétrico con GPS HI 9828

Medición de turbiedad en campo

Se llevó a cabo la determinación de la turbiedad en campo 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 que está conectada al disco, para la cual el disco Secchi deja de ser visible (Figura 3.12).



Figura 3.12 Determinación de turbiedad por medio del disco Secchi

Análisis de muestras en campo

Se realizaron los siguientes análisis: fosfatos, nitrógeno amoniacal y nitratos. Para la realización de estos análisis se usó el Espectrofotómetro HACH DR 2800 para análisis de campo. Éste 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 HACH DR 2800, para la medición del parámetro correspondiente en mg/l. La Figura 3.13 muestra el espectrofotómetro usado en campo.



Figura 3.13 Manejo y operación de espectrofotómetro HACH DR 2800

Análisis de muestras en el laboratorio

Determinación de coliformes totales y fecales

Se utilizó el método de filtración de membrana que consiste en filtrar volúmenes específicos de la muestra a través de filtros de membrana que retienen los coliformes totales y otras clases de bacterias presentes en la muestra. 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 si se trataba de coliformes fecales. Las cajas de petri, previamente cerradas y etiquetadas, se colocan en la incubadora a 35°C durante 24 horas. Una vez transcurrido este tiempo se revisan para realizar el conteo de las colonias que se formaron.



Figura 3.14 Método de filtración 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 y el oxígeno disuelto luego de 5 días de incubación a 20 °C, dividido por el porcentaje de dilución. Para la determinación de este análisis se hicieron dos diluciones (5 y 10 %) para cada muestra. El agua de dilución se preparó añadiendo los siguientes nutrientes: sulfato de magnesio, cloruro calcio, cloruro férrico y disolución amortiguadora, 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 después dosificarle Tiosulfato de Sodio a la muestra, 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.



Figura 3.15 Determinación de DBO₅

Determinación de sólidos suspendidos totales (SST)

Se filtraron 100 ml de la muestra haciendo pasar el agua a través del crisol Gooch, al que previamente se le coloca un filtro de fibra de vidrio y un papel Whatman (puestos a peso constante), 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 de la siguiente forma:

$$SST \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] = \frac{W_{SST} [\text{mg}] - W_{CG} [\text{mg}]}{V_m [\text{l}]} \quad [3.3]$$

Donde:

- SST = Sólidos suspendidos totales
- W_{SST} = Peso total del crisol Gooch con contenidos de sólidos suspendidos
- W_{CG} = Peso del crisol Gooch
- V_m = Volumen de la muestra

Para llevar a cabo la determinación de sólidos suspendidos totales se emplearon crisoles Gooch con filtro, que estaban a peso constante.



Figura 3.16 Muestras colocadas en el desecador



Figura 3.17 Preparación de crisoles



Figura 3.18 Cálculo del peso total del crisol Gooch con contenidos de sólidos suspendidos

Determinación de la turbiedad

La determinación de la turbiedad se llevó a cabo en laboratorio empleando un nefelómetro Hach 2100^a. 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.

▪ Índice de Calidad del Agua

Período 1987-2006

Para este período se utilizaron los datos de calidad de prácticamente todos los estudios encontrados, con las siguientes excepciones:

1. El trabajo del Instituto de Ecología (2007) no se incluyó debido a que la información presentada en él fue insuficiente; y,
2. Para los lapsos en los que se tuvieron dos estudios disponibles se consideró lo siguiente: Para los años 1999 - 2000 se eligió el estudio del IMTA sobre el de la CONAGUA porque presenta un promedio anual por parámetro y, para los años 2001 y 2002 se tomó en cuenta la tesis de licenciatura de “Evaluación de la calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo” en lugar del estudio del IMTA porque considera varios sitios de muestreo.

La Tabla 3.19 muestra los sitios y años de muestreo correspondientes así como el ICA obtenido.

Período 2010-2011

En las Tablas 3.20, 3.21 y 3.22 se muestran los resultados del ICA obtenido de cada uno de los sitios de muestreo para las diferentes campañas que se llevaron a cabo durante el proyecto PAPIIT 107710 “Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota” (Ver Anexo I Datos obtenidos de las campañas de muestreo). Cabe señalar que en algunas estaciones no fue determinado ya que los puntos de muestreo coincidían con el bandeado. Las celdas que se encuentran marcadas en color rojo son estaciones donde hacen falta datos para realizar el cálculo. Las campañas de muestreo se realizaron de la siguiente manera, dos en época de estiaje y uno en época de lluvias, con lo que se pretende tener resultados más representativos.

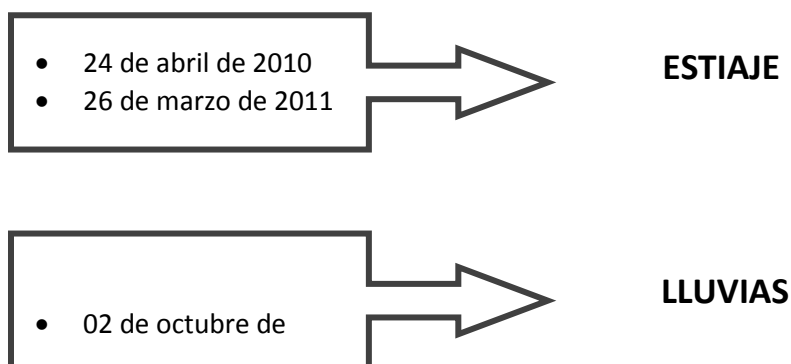


Tabla 3. 19 Fecha, ubicación de las estaciones de muestreo y el ICA obtenido correspondientes al periodo 1987-2002

Numero	Estaciones	Año	ICA	Calificación	Ubicación aproximada de las estaciones de muestreo
1	Amanalco (descarga)	1987	67	Poco contaminado	
		1996	66	Poco contaminado	
2	Centro presa	1987	81	Aceptable	
		1996	69	Poco contaminado	
		2001	66	Poco contaminado	
		2002	75	Aceptable	
3	Carrizal (descarga)	1987	84	Aceptable	
		1996	70	Aceptable	
4	Cortina	1987	79	Aceptable	
		1996	70	Aceptable	
		1998	62	Poco contaminado	
		1999*	65	Poco contaminado	
		2000*	78	Aceptable	
		2001**	80	Aceptable	
		2002**	65	Poco contaminado	
		2003	57	Poco contaminado	
		2004	56	Poco contaminado	
5	Muelle Municipal	1987	58	Poco contaminado	
		1996	67	Poco contaminado	
6	Molino (descarga)	1987	88	No contaminado	
		1996	68	Poco contaminado	
7	González (descarga)	1987	87	No contaminado	
		1996	57	Poco contaminado	
8	Club de Yates	1987	77	Aceptable	
		2001	66	Poco contaminado	
		2002	73	Aceptable	
9	Casa Punta	1987	86	No contaminado	
		2001	67	Poco contaminado	
		2002	70	Aceptable	
10	Cristo	1987	79	Aceptable	
		2001	71	Aceptable	
		2002	78	Aceptable	
11	Sta. Mónica (descarga)	1987	79	Aceptable	
12	Club Náutico (descarga)	1987	82	Aceptable	
13	Iglesia (descarga)	1987	58	Poco contaminado	
14	Capitania del puerto (descarga)	1987	52	Poco contaminado	
15	Mercado (descarga)	1987	45	Contaminado	
16	Efluente (descarga)	1987	62	Poco contaminado	

Fuente: MOTA, Karina. Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo, partir de los resultados obtenidos de el Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala en coordinación con los gobiernos del Distrito Federal y Estado de México, CNA y el Plan para la gestión integral del agua y recursos asociados de la cuenca de Valle de Bravo, Estado de México, IMTA. ** Resultados obtenidos del Plan para la gestión integral del agua y recursos asociados de la cuenca de Valle de Bravo, Estado de México, IMTA y la Tesis de Licenciatura de Evaluación de la calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo.

Tabla 3. 20 ICA obtenido de las estaciones de muestreo correspondiente a la primera campaña de muestreo, proyecto PAPIIT 107710 "Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota".

No.	Longitudes				Latitudes				ICA
0	100 °	8 "	2.2 "	W	19 °	11 '	11 "	N	
1	100 °	8 "	1.8 "	W	19 °	11 '	11 "	N	80
2	100 °	8 '	8 "	W	19 °	11 '	1.1 "	N	80
3	100 °	7 '	53 "	W	19 °	10 '	40 "	N	59
4	100 °	8 '	15 "	W	19 °	10 '	41 "	N	79
5	100 °	8 '	44 "	W	19 °	10 '	33 "	N	77
6	100 °	8 '	32 "	W	19 °	10 '	19 "	N	51
7	100 °	8 '	47 "	W	19 °	10 '	36 "	N	73
8	100 °	8 '	42 "	W	19 °	10 '	49 "	N	83
9	100 °	8 '	37 "	W	19 °	10 '	59 "	N	82
10	100 °	8 '	47 "	W	19 °	11 '	1 "	N	82
11	100 °	8 '	60 "	W	19 °	11 '	2.7 "	N	
12	100 °	9 '	25 "	W	19 °	10 '	50 "	N	83
13	100 °	9 '	45 "	W	19 °	10 '	57 "	N	82
14	100 °	9 '	33 "	W	19 °	11 '	7.1 "	N	83
15	100 °	9 '	21 "	W	19 °	11 '	10 "	N	82
16	100 °	9 '	12 "	W	19 °	11 '	15 "	N	81
17	100 °	9 '	1.9 "	W	19 °	11 '	21 "	N	
18	100 °	8 '	55 "	W	19 °	11 '	22 "	N	82
19	100 °	8 '	36 "	W	19 °	11 '	28 "	N	82
20	100 °	8 '	23 "	W	19 °	11 '	35 "	N	
21	100 °	8 '	26 "	W	19 °	11 '	49 "	N	83
22	100 °	8 '	47 "	W	19 °	11 '	47 "	N	81
23	100 °	8 '	54 "	W	19 °	11 '	45 "	N	74
24	100 °	9 '	3.3 "	W	19 °	11 '	57 "	N	82
25	100 °	9 '	18 "	W	19 °	11 '	52 "	N	56
26	100 °	9 '	26 "	W	19 °	11 '	50 "	N	82
27	100 °	9 '	46 "	W	19 °	11 '	56 "	N	78
28	100 °	9 '	54 "	W	19 °	11 '	58 "	N	82
29	100 °	10 '	15 "	W	19 °	12 '	2.5 "	N	80
30	100 °	10 '	17 "	W	19 °	12 '	8.1 "	N	57
31	100 °	10 '	28 "	W	19 °	12 '	12 "	N	81
32	100 °	10 '	37 "	W	19 °	12 '	21 "	N	83
33	100 °	10 '	24 "	W	19 °	12 '	29 "	N	83
34	100 °	10 '	9.6 "	W	19 °	12 '	43 "	N	80
35	100 °	9 '	51 "	W	19 °	12 '	39 "	N	82
36	100 °	9 '	36 "	W	19 °	12 '	37 "	N	81
37	100 °	9 '	18 "	W	19 °	12 '	45 "	N	82
38	100 °	9 '	6 "	W	19 °	12 '	52 "	N	
39	100 °	8 '	38 "	W	19 °	13 '	9.6 "	N	80
40	100 °	8 '	28 "	W	19 °	13 '	12 "	N	55
41	100 °	8 '	14 "	W	19 °	13 '	7.2 "	N	
42	100 °	8 '	16 "	W	19 °	13 '	0.8 "	N	79
43	100 °	8 '	24 "	W	19 °	12 '	55 "	N	55
44	100 °	8 '	32 "	W	19 °	12 '	49 "	N	
45	100 °	8 '	33 "	W	19 °	12 '	44 "	N	
46	100 °	8 '	41 "	W	19 °	12 '	31 "	N	83
47	100 °	8 '	58 "	W	19 °	12 '	22 "	N	82
48	100 °	8 '	10 "	W	19 °	11 '	20 "	N	
49	100 °	7 '	58 "	W	19 °	11 '	11 "	N	
50	100 °	7 '	51 "	W	19 °	11 '	4.2 "	N	83
51	100 °	8 '	7.4 "	W	19 °	11 '	14 "	N	
52	100 °	7 '	44 "	W	19 °	10 '	48 "	N	

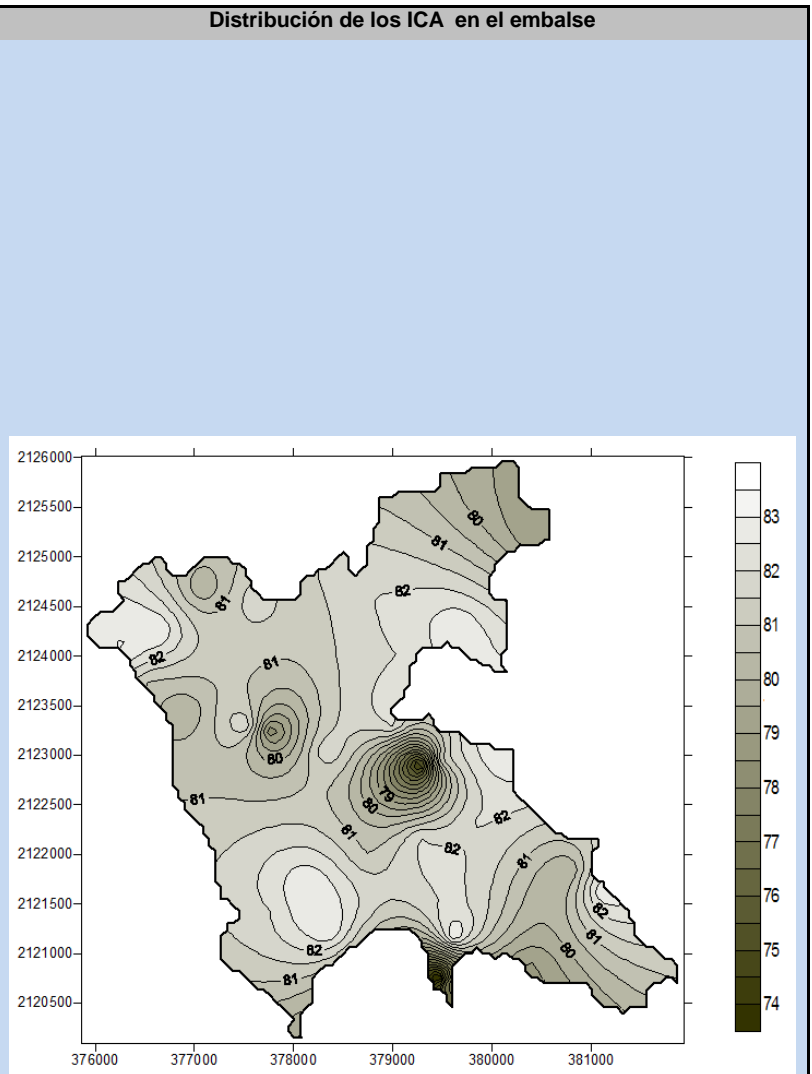


Tabla 3. 21 ICA obtenido de las estaciones de muestreo correspondiente a la segunda campaña de muestreo, proyecto PAPIIT 107710 "Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota".

No.	Longitudes				Latitudes				ICA	Distribución de los ICA en el embalse
1										
2	100 °	7 "	43.7 "	W	19 °	10 '	47.2 "	N	76	
3	100 °	7 '	58.2 "	W	19 °	10 '	36 "	N	70	
4	100 °	8 '	12.9 "	W	19 °	10 '	41.8 "	N	74	
5	100 °	8 '	9.4 "	W	19 °	10 '	59.5 "	N	77	
6	100 °	8 '	36.7 "	W	19 °	11 '	0 "	N	73	
7	100 °	8 '	48.3 "	W	19 °	10 '	50.9 "	N	82	
8	100 °	9 '	0.2 "	W	19 °	10 '	58.9 "	N		
9	100 °	9 '	29.4 "	W	19 °	10 '	47.2 "	N	74	
10	100 °	9 '	37.2 "	W	19 °	10 '	30.1 "	N	56	
11	100 °	9 '	45.2 "	W	19 °	10 '	34.8 "	N	76	
12	100 °	9 '	23.4 "	W	19 °	11 '	3.2 "	N	100	
13	100 °	9 '	41.3 "	W	19 °	11 '	10.7 "	N	80	
14	100 °	9 '	22 "	W	19 °	11 '	37.2 "	N	79	
15	100 °	9 '	37.3 "	W	19 °	11 '	27 "	N	81	
16	100 °	10 '	0.3 "	W	19 °	11 '	31.3 "	N	88	
17	100 °	9 '	59.8 "	W	19 °	11 '	51.3 "	N	80	
18	100 °	9 '	41.8 "	W	19 °	11 '	41.5 "	N	94	
19	100 °	9 '	35.7 "	W	19 °	11 '	57.9 "	N	83	
20	100 °	9 '	27.5 "	W	19 °	12 '	2 "	N	84	
21	100 °	9 '	44.5 "	W	19 °	12 '	14.2 "	N	86	
22	100 °	9 '	53 "	W	19 °	12 '	8.8 "	N	89	
23	100 °	10 '	13.4 "	W	19 °	12 '	6.3 "	N	85	
24	100 °	10 '	28.1 "	W	19 °	12 '	18.3 "	N	83	
25	100 °	10 '	27.1 "	W	19 °	12 '	36.9 "	N	71	
26	100 °	10 '	6.9 "	W	19 °	12 '	20.4 "	N	85	
27	100 °	10 '	5.6 "	W	19 °	12 '	35.8 "	N	85	
28	100 °	10 '	0.9 "	W	19 °	12 '	44.3 "	N	87	
29	100 °	9 '	45 "	W	19 °	12 '	35.8 "	N	90	
30	100 °	9 '	32.6 "	W	19 °	12 '	29.4 "	N	91	
31	100 °	9 '	25.1 "	W	19 °	12 '	43.1 "	N	87	
32	100 °	9 '	7.7 "	W	19 °	12 '	44.1 "	N	92	
33	100 °	8 '	49.3 "	W	19 °	12 '	42.7 "	N	96	
34	100 °	8 '	58.8 "	W	19 °	13 '	11.9 "	N	96	
35	100 °	8 '	44.9 "	W	19 °	13 '	2.4 "	N	95	
36	100 °	8 '	30.7 "	W	19 °	13 '	13.7 "	N	94	
37	100 °	8 '	25.7 "	W	19 °	13 '	6.3 "	N	71	
38	100 °	8 '	36.3 "	W	19 °	12 '	53.8 "	N	94	
39	100 °	8 '	31.6 "	W	19 °	12 '	39.5 "	N	98	
40	100 °	8 '	32.3 "	W	19 °	12 '	25.3 "	N	68	
41	100 °	9 '	0.2 "	W	19 °	12 '	27.9 "	N	96	
42	100 °	9 '	1 "	W	19 °	12 '	12.4 "	N	97	
43										
44	100 °	9 '	10.5 "	W	19 °	11 '	53 "	N	61	
45	100 °	9 '	4.8 "	W	19 °	11 '	39.5 "	N	97	
46										
47	100 °	8 '	46.5 "	W	19 °	11 '	33.1 "	N	100	
48										
49	100 °	8 '	10.4 "	W	19 °	11 '	19.5 "	N	100	
50	100 °	7 '	57.6 "	W	19 °	11 '	11.2 "	N	100	

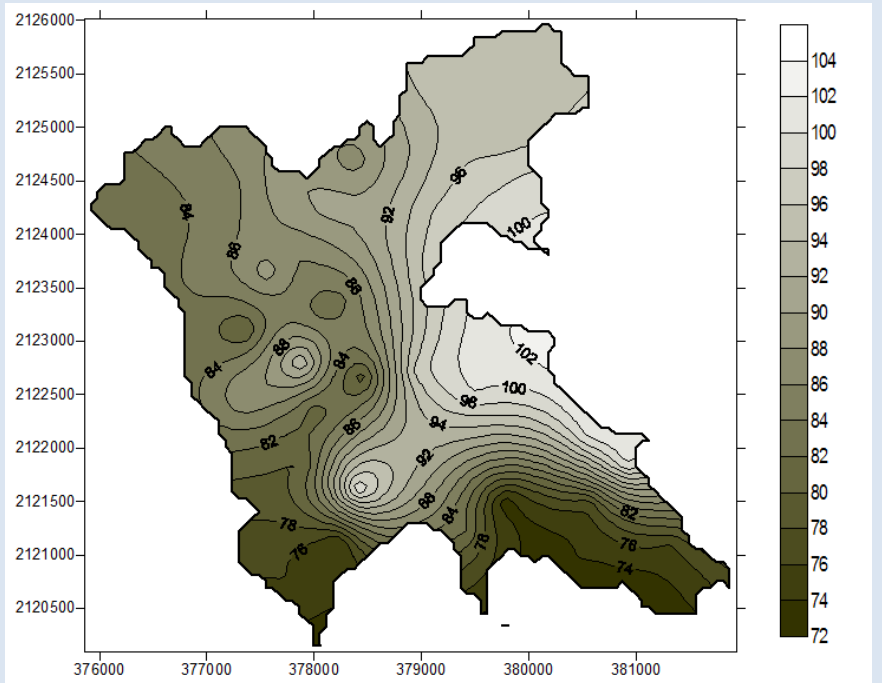
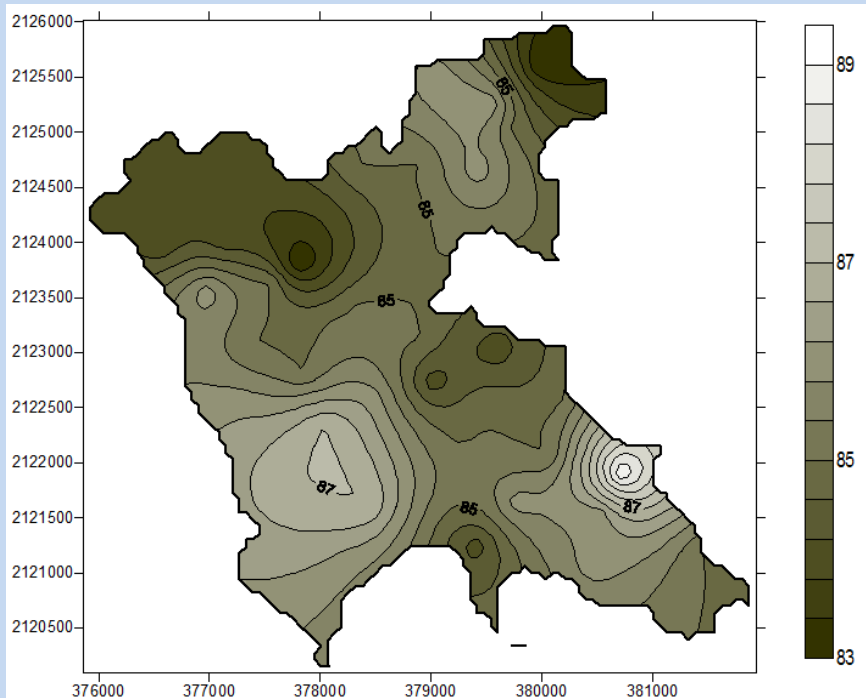


Tabla 3. 22 ICA obtenido de las estaciones de muestreo correspondiente a la tercera campaña de muestreo, proyecto PAPIIT 107710 "Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la percepción remota".

No.	Longitudes				Latitudes				ICA	Distribución de los ICA en el embalse
1	100 °	8 "	4.4 "	W	19 °	11 '	13.3 "	N	89	
2	100 °	7 "	39 "	W	19 °	10 '	51.2 "	N	85	
3	100 °	7 '	58 "	W	19 °	10 '	41.1 "	N	62	
4	100 °	8 '	13 "	W	19 °	10 '	45.5 "	N	86	
5	100 °	8 '	11 "	W	19 °	11 '	1.3 "	N	86	
6	100 °	8 '	37 "	W	19 °	11 '	4.2 "	N	86	
7	100 °	8 '	49 "	W	19 °	10 '	51.6 "	N	84	
8	100 °	9 '	1.1 "	W	19 °	10 '	58.1 "	N	85	
9	100 °	9 '	28 "	W	19 °	10 '	47 "	N	86	
10	100 °	9 '	37 "	W	19 °	10 '	29.7 "	N	63	
11	100 °	9 '	45 "	W	19 °	10 '	35.3 "	N	86	
12	100 °	9 '	22 "	W	19 °	11 '	3.3 "	N	87	
13	100 °	9 '	41 "	W	19 °	11 '	11.6 "	N	87	
14	100 °	9 '	22 "	W	19 °	11 '	35.6 "	N	86	
15	100 °	9 '	37 "	W	19 °	11 '	27 "	N	87	
16	100 °	10 '	2.6 "	W	19 °	11 '	33.9 "	N	86	
17	100 °	10 '	0.6 "	W	19 °	11 '	51 "	N	85	
18	100 °	9 '	43 "	W	19 °	11 '	42 "	N	85	
19	100 °	9 '	35 "	W	19 °	11 '	57.5 "	N	85	
20	100 °	9 '	26 "	W	19 °	12 '	3.2 "	N	85	
21	100 °	9 '	44 "	W	19 °	12 '	14.4 "	N	83	
22	100 °	9 '	53 "	W	19 °	12 '	8.9 "	N	85	
23	100 °	10 '	13 "	W	19 °	12 '	6.3 "	N	86	
24	100 °	10 '	27 "	W	19 °	12 '	17.7 "	N	84	
25	100 °	10 '	27 "	W	19 °	12 '	36.9 "	N	62	
26	100 °	10 '	7.1 "	W	19 °	12 '	20 "	N	84	
27	100 °	10 '	7.3 "	W	19 °	12 '	35.1 "	N	84	
28	100 °	10 '	2.3 "	W	19 °	12 '	44.7 "	N	84	
29	100 °	9 '	46 "	W	19 °	12 '	34.8 "	N	84	
30	100 °	9 '	34 "	W	19 °	12 '	28.6 "	N	84	
31	100 °	9 '	25 "	W	19 °	12 '	43.6 "	N	85	
32	100 °	9 '	6.6 "	W	19 °	12 '	45.3 "	N	85	
33	100 °	8 '	49 "	W	19 °	12 '	42 "	N	86	
34	100 °	9 '	3.3 "	W	19 °	13 '	11.5 "	N	86	
35	100 °	8 '	44 "	W	19 °	13 '	2.2 "	N	86	
36	100 °	8 '	31 "	W	19 °	13 '	13.4 "	N	83	
37	100 °	8 '	26 "	W	19 °	13 '	6.1 "	N	58	
38	100 °	8 '	39 "	W	19 °	12 '	55 "	N	85	
39	100 °	8 '	32 "	W	19 °	12 '	38.7 "	N	85	
40	100 °	8 '	33 "	W	19 °	12 '	24.5 "	N	62	
41	100 °	9 '	4.3 "	W	19 °	12 '	30 "	N	85	
42	100 °	9 '	4.5 "	W	19 °	12 '	12.9 "	N	85	
43	100 °	9 '	6.1 "	W	19 °	11 '	52.7 "	N	85	
44	100 °	9 '	11 "	W	19 °	11 '	53.6 "	N	57	
45	100 °	9 '	3.4 "	W	19 °	11 '	39.6 "	N	84	
46	100 °	8 '	55 "	W	19 °	11 '	21.8 "	N	85	
47	100 °	8 '	47 "	W	19 °	11 '	33.4 "	N	85	
48	100 °	8 '	43 "	W	19 °	11 '	49.3 "	N	84	
49	100 °	8 '	22 "	W	19 °	11 '	34.4 "	N	85	
50	100 °	8 '	27 "	W	19 °	11 '	18.4 "	N	85	



4. Metodología para el análisis multitemporal de imágenes que permita conocer cualitativamente la calidad del agua del vaso de la presa: Valle de Bravo

El análisis multitemporal permite analizar el factor tiempo en el estudio de las imágenes satelitales, con lo que se puede realizar un seguimiento de cómo va variando un determinado fenómeno a través del tiempo.

De acuerdo a diversos autores, la realización de este tipo de análisis constituye un método efectivo para la detección de cambios en las coberturas terrestres, dada la alta correlación existente entre la variación espectral en la imagen y el cambio en la cubiertas; y, a partir de su detección, control y análisis rápido y eficiente permite evaluar dichos cambios y sus posibles consecuencias. Por ello, en el ámbito mundial, este tipo de técnicas han sido ampliamente utilizadas en la identificación de cambios en la cobertura y usos de la tierra, pues esta herramienta sirve para el monitoreo de fenómenos naturales u otro tipo de modificaciones causadas por las actividades humanas.

El análisis multitemporal que se lleva a cabo en este trabajo permite conocer la variación cualitativa de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo y, se concatena con la revisión bibliográfica presentada en el capítulo anterior, pues entre los alcances del análisis se busca correlacionar las imágenes satelitales con los resultados de los muestreos realizados en campo.

La metodología empleada en este trabajo para llevar a cabo el análisis multitemporal se ilustra en la Figura 4.1.

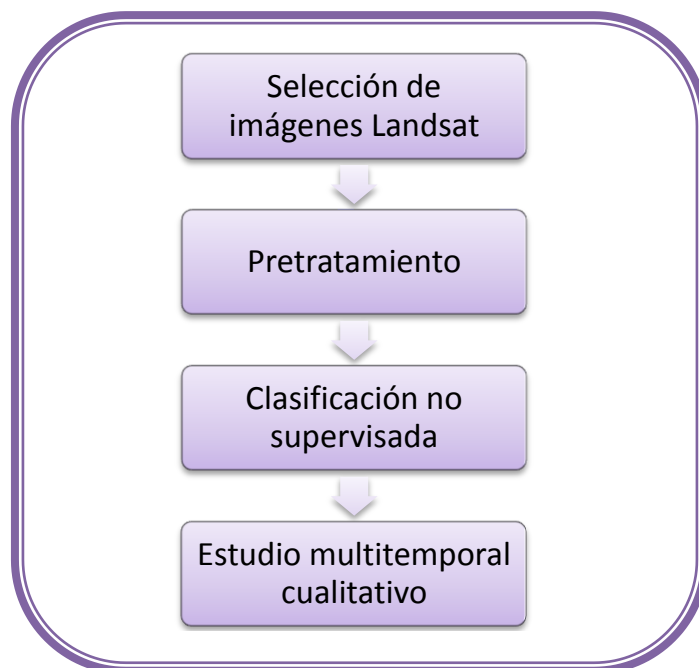


Figura 4.1 Flujo metodológico del análisis multitemporal.

Para poder llevar a cabo un análisis multitemporal se requiere disponer de información que incluye: ubicación geográfica exacta y número abundante de sitios de muestreo, medición de parámetros de calidad del agua que puedan correlacionarse con las imágenes satelitales y que las fechas de muestreo correspondan a las fechas de las imágenes. Por tal motivo, el presente trabajo se desarrolló para las campañas de muestreo 2010-2011 con las imágenes satelitales del mismo periodo.

4.1 Selección de imágenes satelitales

Para la selección de imágenes satelitales se tuvieron ciertas consideraciones tales como: coincidencia de la fecha en que se llevaron a cabo las campañas de muestreo y que la nubosidad presente no afectara la calidad de las imágenes.

Elección del satélite

Se eligió el satélite Landsat 7 ETM+ (Figura 4.2) para la adquisición de las imágenes porque las características en su funcionamiento se adecuaban a las necesidades del proyecto (riqueza espectral, periodo de cobertura, resolución espacial); además de que actualmente la descarga de imágenes es gratuita debido al error en el sensor que genera el bandeo en las imágenes así que, como parte del proyecto se tomaron para cada campaña cerca de 50 puntos de muestreo, finalmente las imágenes pueden ser utilizadas para el objetivo de este trabajo.

La operación de este satélite es administrada por la NASA (National Space and Space Administration) y la producción y comercialización de imágenes depende de la USGS (United States Geological Survey).

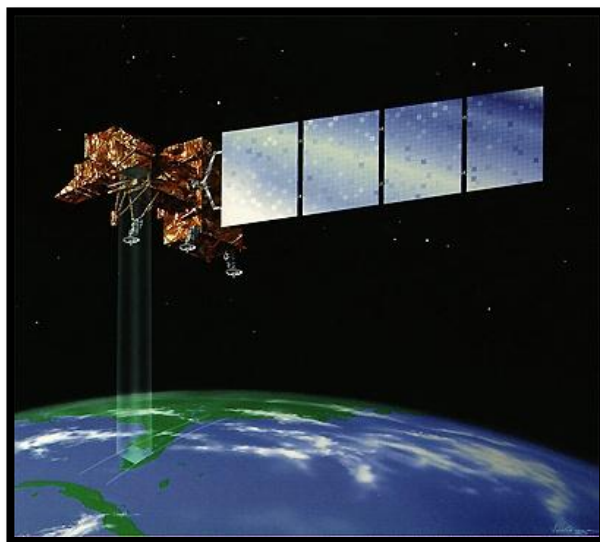


Figura 4.2 Satélite Landsat 7 ETM+.
Fuente: www.satimagingcorp.com

El Landsat 7 ETM+ puede adquirir imágenes en un área que se extiende desde los 81° de latitud sur hasta los 81° de latitud norte y en todas las longitudes del globo terrestre. Su órbita es realizada en aproximadamente 99 minutos, permitiendo al satélite dar 14 vueltas a la Tierra por

día, y cubrir la totalidad del planeta en 16 días. La órbita es descendente, o sea de norte a sur. Es un satélite helio sincronizado, es decir, que siempre pasa a la misma hora por un determinado lugar.

Un factor importante es que la resolución temporal del LANDSAT 7 ETM+ es igual que la del Landsat 5 TM (16 días) y, el tamaño de escena (área de cobertura) también ya que para ambos es de 170 x 185 km; con la conservación de dichos parámetros técnicos se facilita que el proceso de captura de imágenes se pueda realizar con la misma referencia lo que permite una perfecta integración entre el procesamiento de las imágenes del LANDSAT 7 ETM+ con datos históricos del LANDSAT 5 TM existentes desde 1984. Esto es especialmente útil cuando es necesario utilizar los dos tipos de datos de un mismo lugar en forma simultánea, por ejemplo, para un estudio multitemporal.

Una imagen LANDSAT 7 ETM+ está compuesta por 8 bandas espectrales que pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Características de las bandas espectrales de LANDSAT 7 ETM+.

No. de banda	Banda espectral	Resolución espacial (metros)	Resolución espectral (micrones)
1	Visible (azul)	30	0.45 a 0.52
2	Visible (verde)	30	0.52 a 0.61
3	Visible (rojo)	30	0.63 a 0.69
4	Infrarrojo cercano	30	0.76 a 0.90
5	Infrarrojo medio	30	1.55 a 1.75
6L 6H	Infrarrojo térmico	60	10.40 a 12.50
7	Infrarrojo medio	30	2.08 a 2.35
8	Pancromático	15	0.52 2.35

Elección de la imagen satelital

La fuente de datos de la cual se obtuvieron las imágenes utilizadas en este trabajo es la USGS (United States Geological Survey). En su sitio web se puede encontrar el archivo de imágenes Landsat, donde actualmente la descarga de las imágenes o escenas es gratuita por el error en el sensor del satélite que anteriormente ya ha sido mencionado. Pero, primeramente hay que registrarse como usuario de la página para poder descargar imágenes, ya que en algunos casos las imágenes no se encuentran disponibles así que hay que solicitarlas.

Para ubicar la escena en donde se encuentra el área de estudio se pueden emplear los diferentes *Map layers* que se ofrecen en la barra de herramientas, como por ejemplo, *cities* (muestra las ciudades más representativas), *water* (muestra los ríos y los contornos de cuerpos de agua), *north*

arrow (muestra la flecha indicando el norte), etc. También otra herramienta que ayuda a facilitar la búsqueda es la resolución, que puede ser de 240m o 1000m (Figura 4.3).

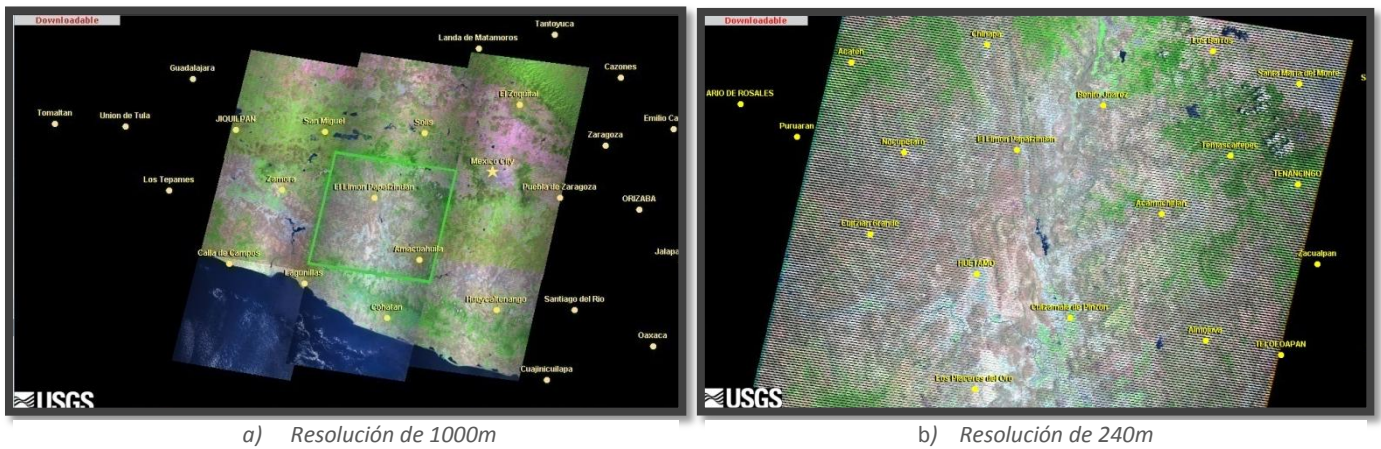


Figura 4.3 Opciones de resolución empleando *cities* como Map Layers Fuente: Sitio web de la USGS

Ya ubicada el área de estudio, podemos buscar la fecha de interés y examinar otro factor determinante que es la nubosidad. El área de estudio de este trabajo se puede ver en la escena de la Figura 4.4.

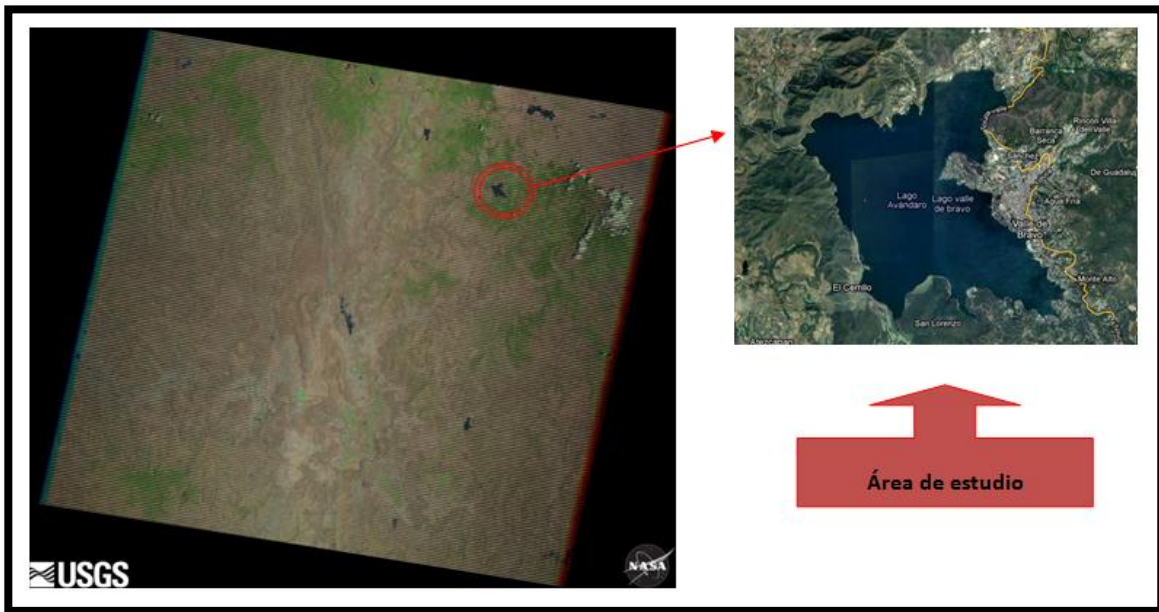


Figura 4.4 Escena que contiene el área de estudio, el embalse de Valle de Bravo.

La presencia de nubosidad en la escena puede afectar de forma importante la información que contiene, por ello también se nos indica el porcentaje de nubosidad en la escena para poder determinar si puede o no llegar a ser útil, pues hay casos en donde la nubosidad llega a ser del 100% en la escena (Figura 4.5).

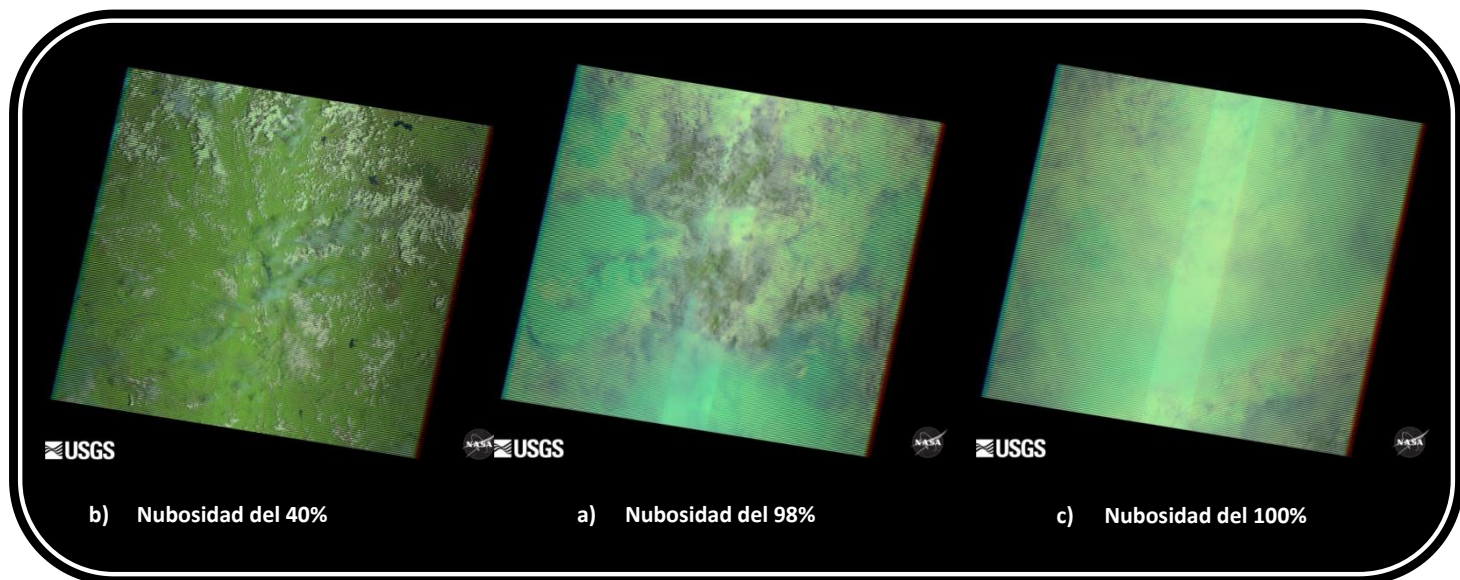


Figura 4.5 Diferentes casos de presencia de nubosidad en las imágenes satelitales de Landsat 7 ETM+

En las imágenes empleadas para el análisis multitemporal la presencia de nubosidad es prácticamente nula, esto se puede apreciar en la Figura 4.6, donde puede apreciarse que en las dos fechas pertenecientes a la época de estiaje no hay presencia de nubosidad y, para la fecha correspondiente a la época de lluvias se presenta un 11% de nubosidad en la parte baja de la escena, que no afecta el área de estudio.

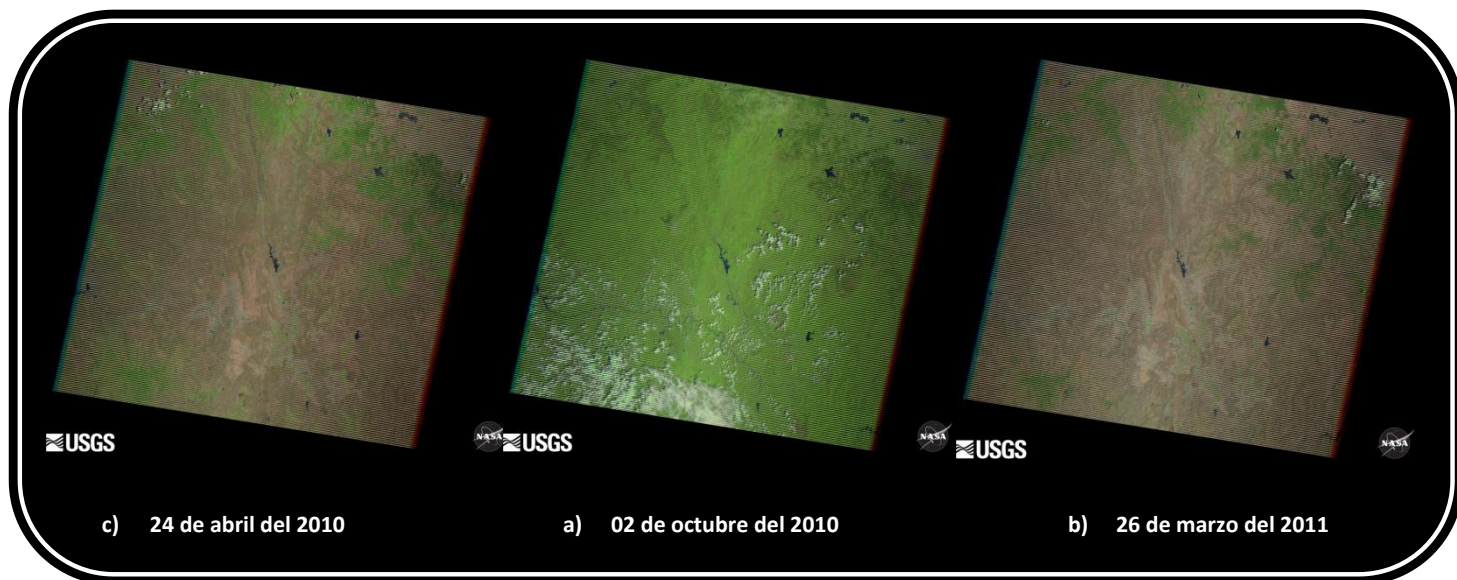


Figura 4.6 Nubosidad presente en las imágenes satelitales de Landsat 7 ETM+ empleadas en el análisis.

Las escenas de interés deben ser descargadas y guardadas en un equipo de cómputo en donde se tenga instalado el software adecuado para su procesamiento y visualización.

La información de cada escena se descarga en un archivo en formato *tar* y, para poder ser procesada primeramente se necesita descomprimir toda la información en una misma carpeta del equipo de cómputo donde se encuentra instalado el software para que pueda tenerse acceso.

Es importante mencionar que en este trabajo se emplean únicamente las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 ya que su resolución espacial es compatible, lo que facilita la manipulación de la información. Cabe aclarar que esto no afecta los resultados del análisis.

4.2 Pretratamiento

Como se mencionó en el Capítulo 2, las imágenes satelitales son matrices de celdas o píxeles, por lo que para poder ser procesadas a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) tiene que ser necesariamente mediante un modelo ráster. Por ello se requiere un software que emplee para el procesamiento de la información tal modelo de datos y, actualmente existen muchas opciones.

La característica más importante de un Sistema de Información Geográfica (SIG) es su capacidad de análisis y modelación espacial. Esta capacidad constituye la mayor diferencia entre un SIG y un sistema para cartografía automatizada. Estas funciones para análisis espacial usan los atributos espaciales y no espaciales de la base de datos para responder preguntas sobre el mundo real.⁶

Elección del SIG

Para el desarrollo del análisis y modelación que este trabajo requiere se ha elegido trabajar con ILWIS 3.7.1, puesto que ofrece una interfaz amigable (Figura 4.7) y cuenta con amplias posibilidades de análisis y modelación espacial.

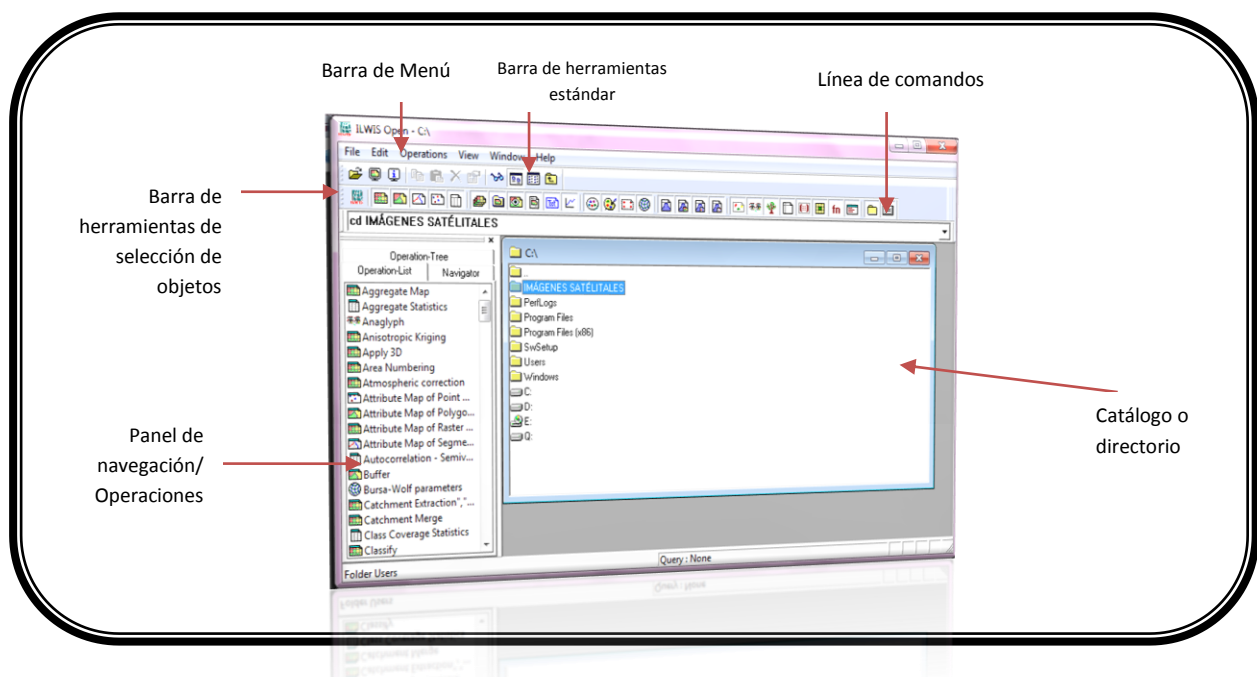


Figura 4.7 Ventana principal Ilwis 3.7.1

El software ILWIS (Integrated Land and Water Information System) es un Sistema de Información Geográfica (SIG) y software de percepción remota para el manejo de información geográfica vectorial y raster, con capacidad para hacer procesamiento digital de imágenes.

Inicialmente ILWIS fue desarrollado y distribuido por ITC Enschede (International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation) bajo la modalidad shareware en los Países Bajos, pero desde el 1 de julio de 2007 se distribuye de conformidad con los términos de la licencia de documentación libre GNU, pasando a ser software libre.⁷

ILWIS permite la digitalización, edición, análisis y representación de *geodatos* (datos geográficos) y, a partir de los cuales se puede generar información espacial, modelos espaciales y evaluar diferentes procesos de la superficie de la tierra.

Preparación y visualización de datos (Importación imágenes)

Primeramente, al iniciar una actividad en Ilwis, en el directorio hay que ubicarse en la dirección donde está contenida la información de las imágenes digitales que ha sido descargada.

Para poder manipular la información contenida en las imágenes digitales se requiere importarlas a Ilwis. El procedimiento se presenta en la Figura 4.8, esto es para que el programa reconozca las imágenes y permita visualizarlas.

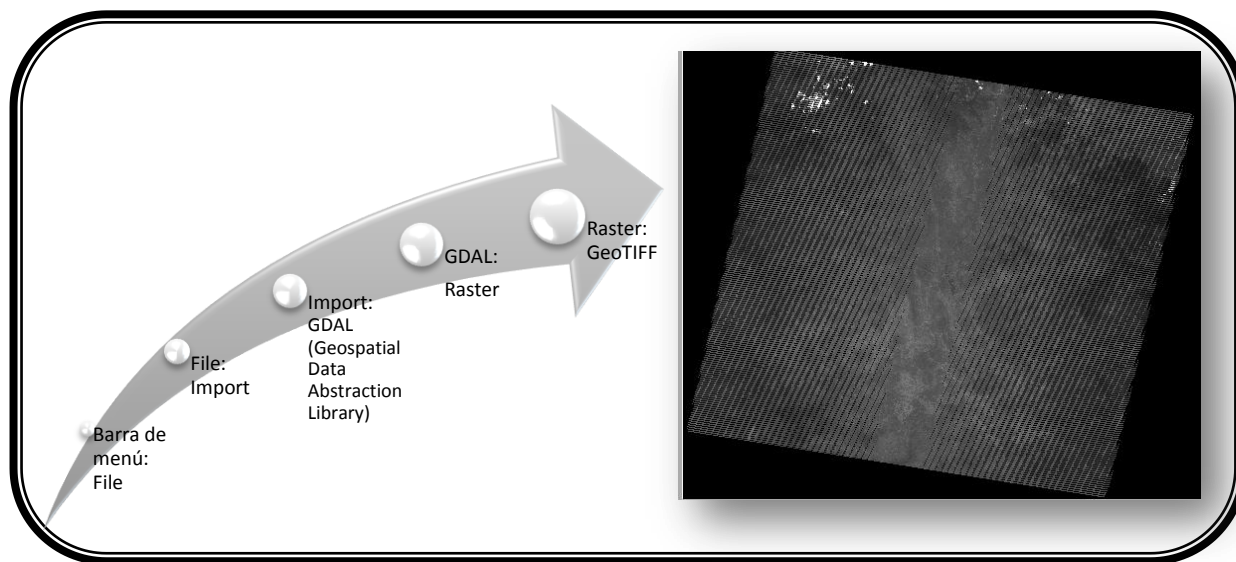


Figura 4.8 Banda 1 importada a Ilwis

El procedimiento se lleva a cabo para cada una de las bandas que serán tomadas en cuenta en el análisis. En la Figura 4.8 se observa la imagen importada como un mapa raster (representación gray, stretch de 0 a 255 y luz normal) de la banda 1 del 25 de abril del 2010.

En el directorio se puede observar las imágenes importadas que se han generado, por lo que ya es posible trabajar con base en ellas para los análisis posteriores. Es importante tomar en cuenta que al generar información nueva a través del SIG (en este caso Ilwis) un solo procedimiento puede

implicar más de un archivo en el directorio exterior al programa, por lo que es recomendable manipular la información únicamente a través del catálogo que se despliega dentro del programa.

Recorte de las imágenes satelitales

La imagen satelital que contiene el sitio de estudio de este trabajo abarca un área muy extensa en comparación del área de interés por lo que, conviene hacer un recorte de la imagen en donde se precise únicamente la porción que nos interesa, todo esto con la finalidad de facilitar el análisis.

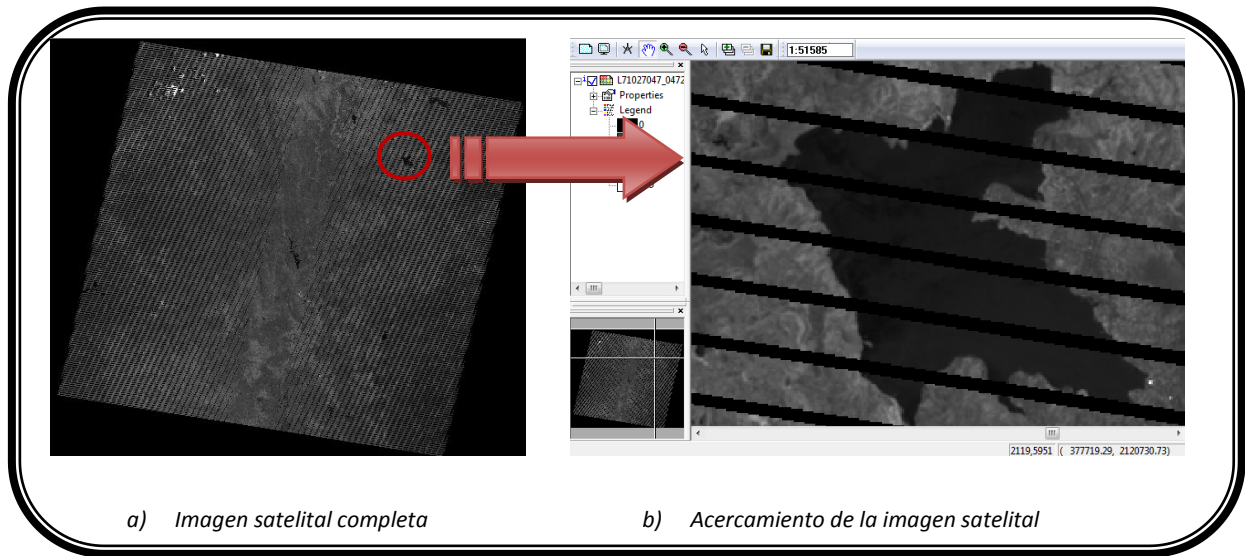


Figura 4.9 Delimitación del área de interés de la imagen satelital de la banda 4 de la fecha del 25 de abril del 2010.

Para elegir las coordenadas del recorte se recurre a la imagen satelital de la banda 4 ya que en esta se definen mejor los cuerpos de agua; en ella se hace un acercamiento y delimita el área a ser recortada (Figura 4.9).

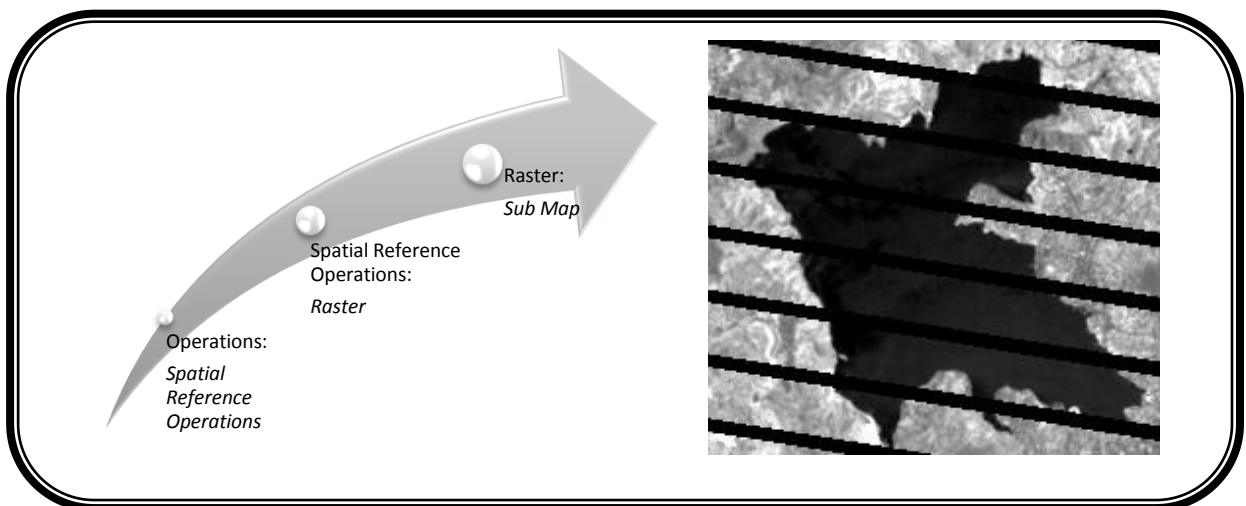


Figura 4.10 Procedimiento para llevar a cabo un recorte

En la Figura 4.10 se presenta el procedimiento que se lleva a cabo en Ilwis para realizar el recorte; en la ventana de diálogo de *Sub Map* se elige el mapa raster al que se le realizará el recorte, se dan las coordenadas y se nombra el nuevo archivo que contendrá el recorte. Para este trabajo las coordenadas que definen el recorte son las siguientes:

- ✓ *Coordenadas inicio:* 375278.60, 2126236.46
- ✓ *Coordenadas opuestas:* 382232.97, 2119838.86

Nuevamente este procedimiento se lleva a cabo para las imágenes importadas de cada banda.

Análisis de componentes principales

El siguiente paso es hacer el análisis de componentes principales, a través del cual se busca recabar la información más importante que proporciona el conjunto de todas las bandas. Esto se debe a que como se mencionó en el Capítulo 2, existe una correlación importante entre las diferentes bandas, lo que ocasiona que se genere mucha información redundante, incrementándose en gran medida la carga de información computacional al someterlas a los diferentes análisis y procesos.

El análisis inicia al generar o calcular la matriz de varianza-covarianza, que se obtiene a partir de los recortes de las diferentes bandas, con ellos se genera un *Map List*; para poder emplear esta operación, las bandas de entrada (en nuestro caso, los recortes) deben usar el dominio de la imagen o el dominio del mismo valor, y la misma georeferencia.

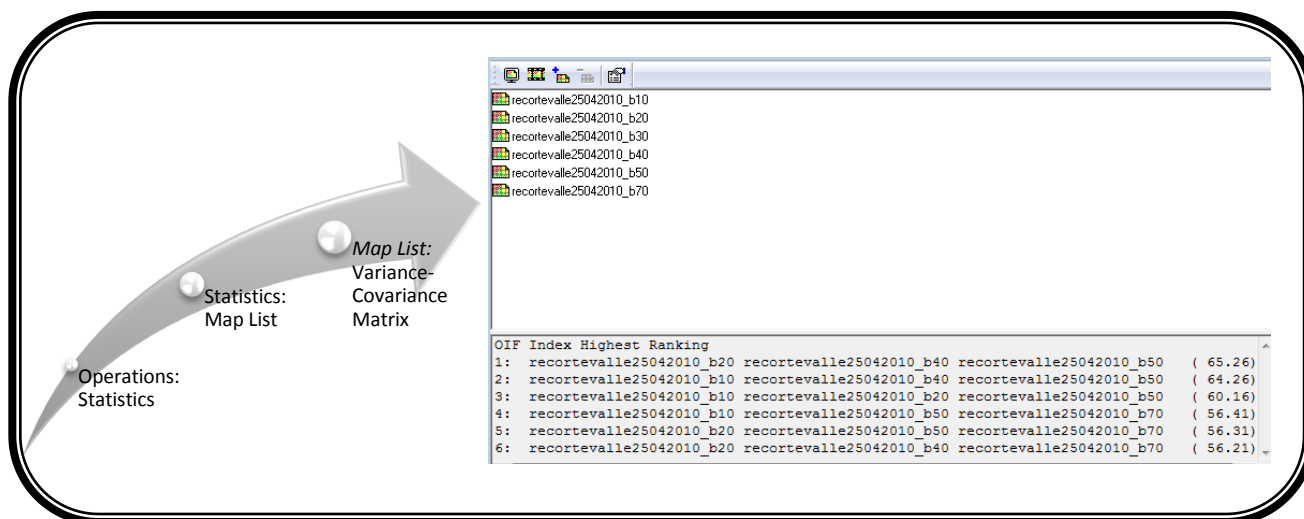


Figura 4.11 Generación de la matriz varianza-covarianza y cuadro de diálogo del *Map List* que conforma la matriz.

La matriz calculada contiene los valores de varianza y covarianza; que como se mencionó en el Capítulo 2, la primera se refiere a la variación de los valores de los píxeles dentro de una banda (o mapa raster) únicamente y, la segunda se trata de una medida que expresa la variación de los valores de los píxeles en dos bandas diferentes. Asimismo, también calcula la media y la desviación estándar de cada banda.

Además de los cálculos anteriores, esta operación nos muestra en el cuadro de diálogo de *Map List* (Figura 4.11) el factor de ajuste óptimo (OIF, Optimum Index Factors) que se puede utilizar para seleccionar la combinación óptima de tres bandas de una imagen satelital con el que desea crear una *composición de color*. La combinación óptima de bandas de todas las posibles combinaciones de 3 bandas es la que tiene la mayor cantidad de información (es igual a la suma más alta de las desviaciones estándar), con la menor cantidad de duplicación (la más baja correlación entre los pares de bandas).

Después de haber calculado la matriz de varianza-covarianza, se inicia el análisis de componentes principales, del cual se obtiene la matriz de salida que denota los coeficientes de transformación y, un *Map List* (o Lista de mapas) de salida que, contiene el conjunto nuevo de bandas que han sido transformadas, llamadas también componentes principales.

Tales componentes se enumeran en orden decreciente de la varianza, ya que existen tantos componentes principales como bandas originales. Los primeros dos o tres componentes llevarán la mayor parte de la información y el resto únicamente mostrarán variaciones menores que, en algunos casos solamente se tratará de ruido. De acuerdo con esto último, se puede establecer que al mantener sólo los primeros componentes se contará con la mayor parte de la información y los últimos no añaden información significativa por lo tanto puede ser descartados.

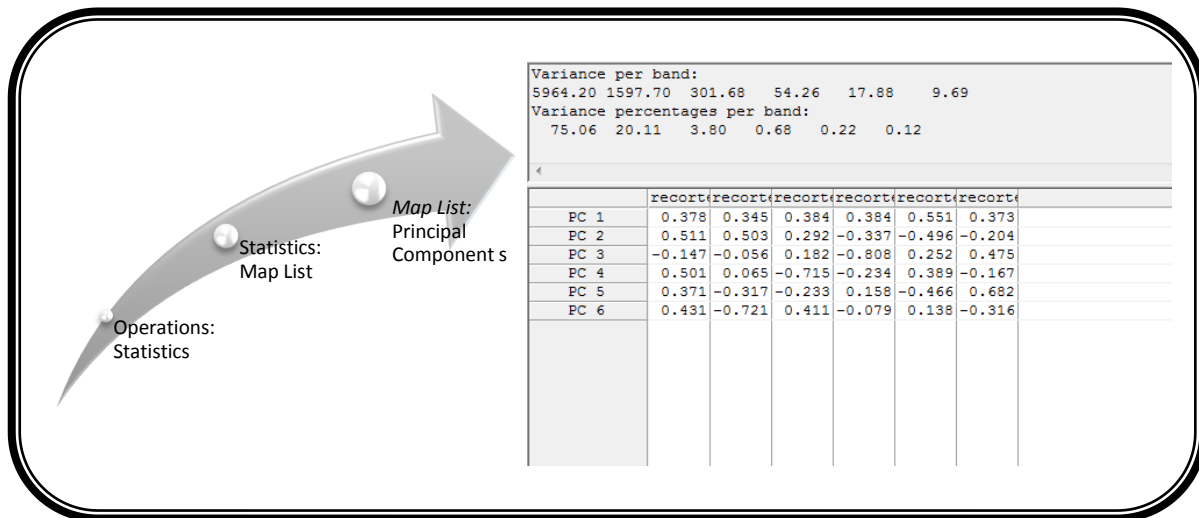


Figura 4.12 Generación de los componentes principales y cuadro de diálogo de salida

Así que, para que Ilwis realice el análisis requiere que se defina el número de componentes principales deseados y darle la indicación del *Map List* que contiene la matriz de varianza-covarianza.

Además de proporcionarnos la matriz que contiene los coeficientes de transformación, indica la cantidad de varianza de cada componente. De la Figura 4.12, puede apreciarse que se solicitaron los 6 componentes principales pero, se observa que la varianza de los últimos tres componentes es menor al 1% por lo que se entiende que su cálculo no sea necesario.

4.3 Clasificación no supervisada

La clasificación no supervisada es también conocida como *proceso de clustering*. En este método se busca establecer grupos (clusters) que, tienden a un mismo comportamiento espectral sin tener un conocimiento previo acerca de la naturaleza de tales clusters, es decir, el software partiendo de un determinado algoritmo programado, divide el conjunto de píxeles en clusters basándose en los valores espectrales para luego continuar con su identificación ya que el software no proporciona el significado de las clases espectrales obtenidas sino que es responsabilidad del usuario concluir con el procedimiento.

El software empleado en este trabajo nos ofrece una operación que realiza tal proceso y, para crear el número de clusters deseado se utiliza una forma generalizada del algoritmo de cuantificación de Heckbert, el cual consiste en dividir recurrentemente el espacio de color en particiones rectangulares, esto es, subdividir en varias ocasiones el cubo de color en cajas rectangulares cada vez más pequeñas. Primero el algoritmo proyecta todos los vectores a los ejes coordenados, el punto medio de los valores proyectados es el punto de corte de esa partición lo que conduce a igualar el número de colores Subconjunto 1 y Subconjunto 2 en ambas nuevas particiones.

El software puede generar los clusters deseados partiendo de hasta 4 bandas o mapas raster y genera además del mapa raster de salida, una tabla de atributos (Figura 4.13), en donde se despliega para cada cluster el valor medio, predominante, mínimo y máximo de cada banda o mapa raster de entrada.

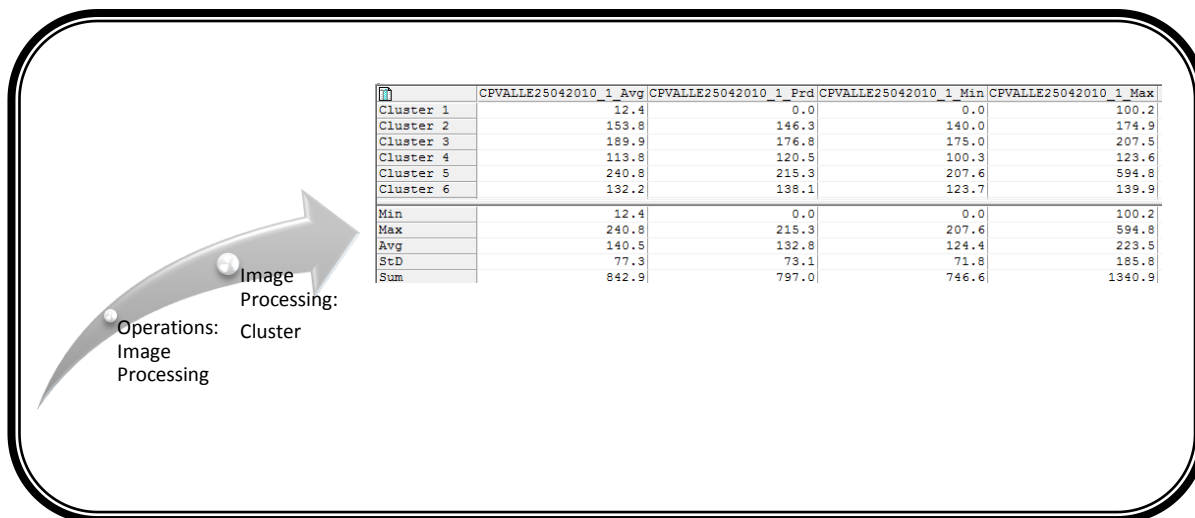


Figura 4.13 Generación de la operación CLUSTER y la tabla de salida del proceso.

En la primera fase de la operación, un histograma multidimensional de las bandas de entrada se calcula. El histograma es una representación multidimensional del espacio característico. En la segunda fase, tal espacio característico se divide en varias cajas para obtener el número deseado de grupos (clusters).

Después de que se lleva a cabo la clasificación el número de grupos están disponibles en el mapa raster de salida y, cada pixel tiene un nombre de clase como por ejemplo, Cluster 1, Cluster 2,..., etc.; estos grupos se llaman clases espectrales.

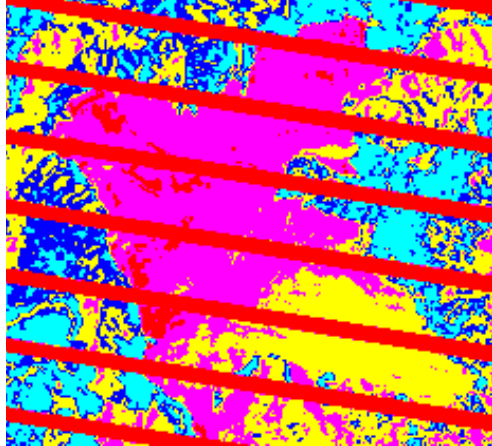
Generación de clusters

En el presente trabajo, únicamente se emplea como mapa raster de entrada el primer componente principal ya que, como se mencionó anteriormente, en éste se encuentra concentrada la mayor cantidad de información de todas las bandas de interés.

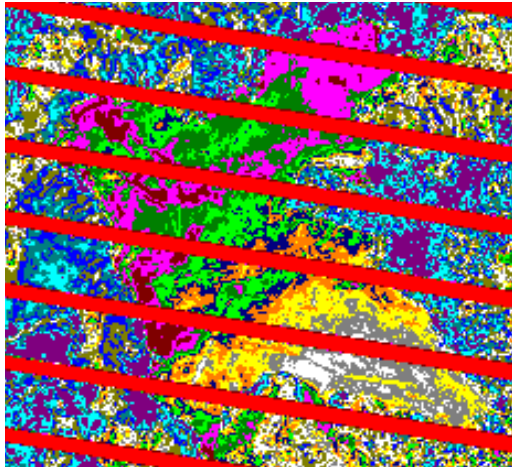
Determinación del número de clusters

Continuando con la fase de clasificación, ahora el objetivo es identificar el número apropiado de clusters que debe ser aplicado, para ello se observó la variación del mapa raster modificando dicho número hasta obtener una calidad adecuada de la imagen, es decir, que la visualización del área de estudio estuviera clara y bien diferenciada, sin que la imagen se observará *pixelada*.

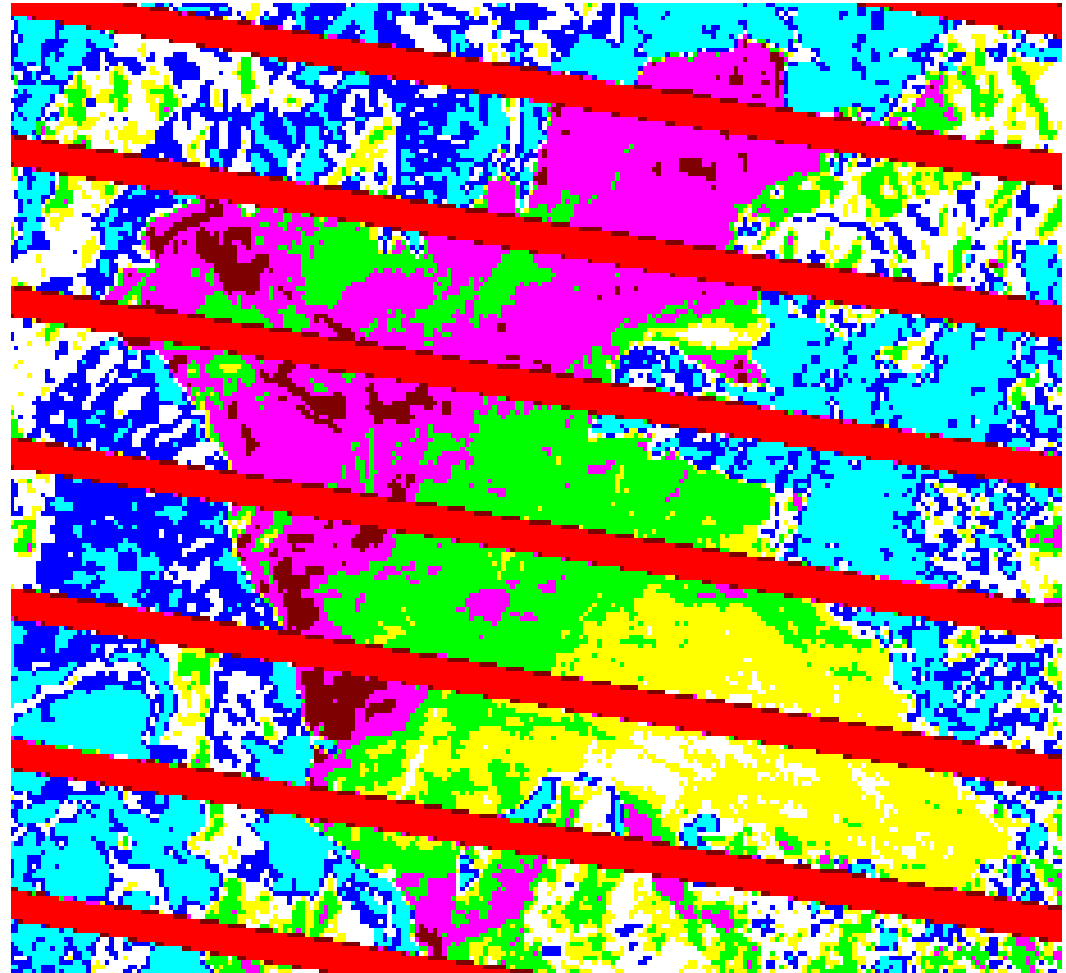
En las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 pueden observarse los mapas raster más representativos obtenidos en esta fase del análisis al ir variando el número de clusters para las diferentes campañas de muestreo y, los mapas con la calidad adecuada seleccionados para proseguir con el estudio; el inciso *a)* indica la imagen en la cual el número de clusters es muy bajo, es decir, aún no está siendo representada toda la información contenida en la imagen; el inciso *b)* indica la imagen en la cual el número de clusters es muy alto, por lo que la imagen se ve *pixeleada*; y, el inciso *c)* indica la imagen que cuenta con la calidad adecuada.



a) 5 Clusters, imagen muy pobre de información.

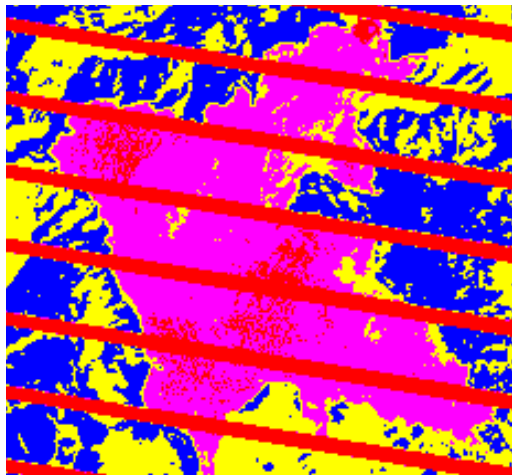


b) 15 Clusters, imagen pixelada.

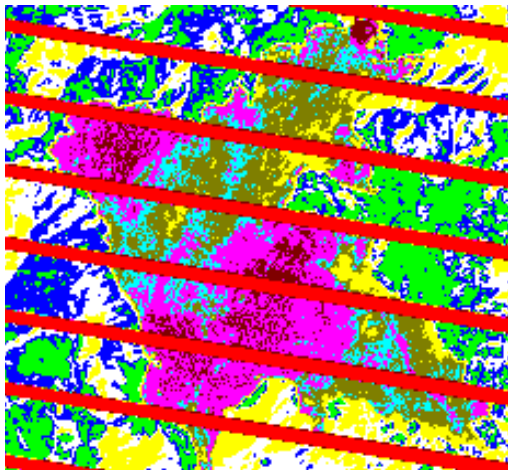


c) 8 Clusters, imagen que cuenta con la calidad adecuada.

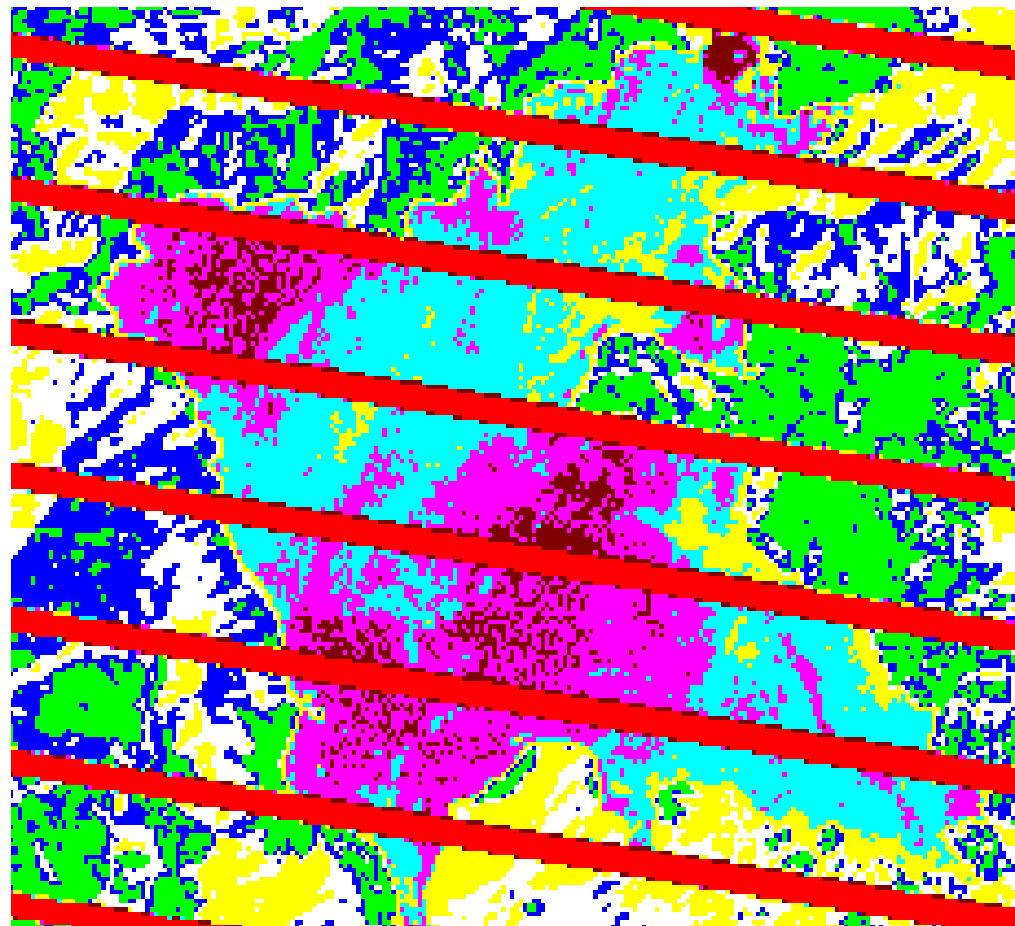
Figura 4.14 Imágenes cluster correspondientes a la primer campaña de muestreo (25 de abril del 2010).



a) 5 Clusters, imagen muy pobre de información.

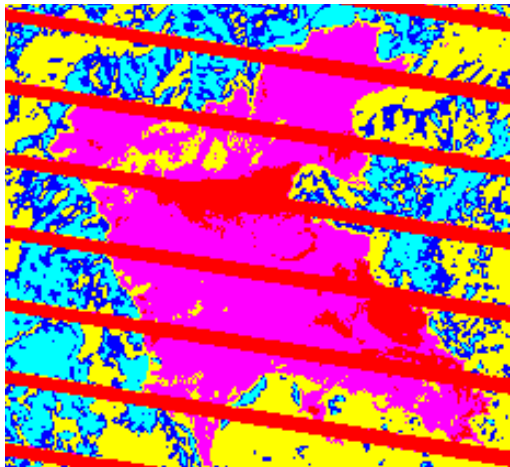


b) 9 Clusters, imagen pixeleada.

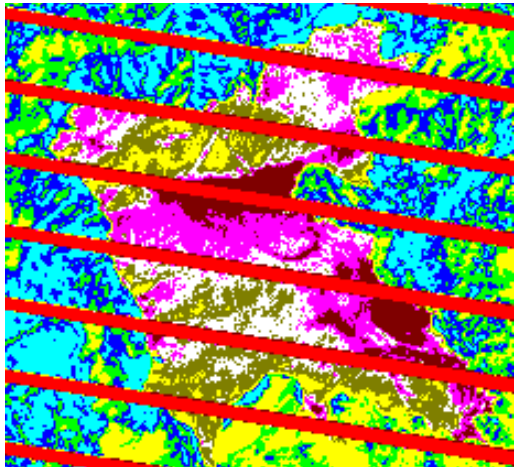


c) 8 Clusters, imagen que cuenta con la calidad adecuada.

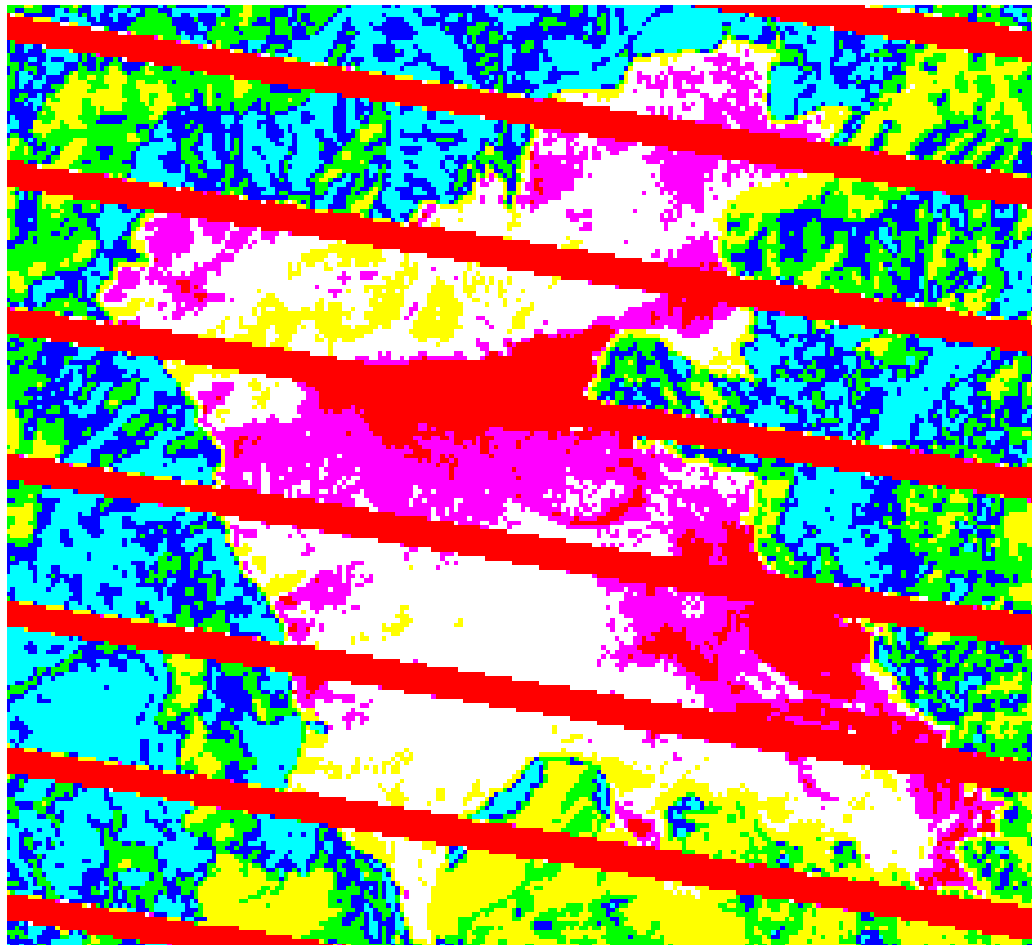
Figura 4.15 Imágenes cluster correspondientes a la segunda campaña de muestreo (02 de octubre de 2010).



a) 5 Clusters, imagen muy pobre de información.



b) 9 Clusters, imagen pixelada.



c) 7 Clusters, imagen que cuenta con la calidad adecuada.

Figura 4.16 Imágenes cluster correspondientes a la tercer campaña de muestreo (26 de marzo de 2011).

4.4 Estudio multitemporal cualitativo de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo

Con el objetivo de conocer la variación cualitativa del embalse de la presa de Valle de Bravo se llevó a cabo un estudio multitemporal pero, bajo dos diferentes perspectivas, los resultados obtenidos de los trabajos de campo realizados durante la investigación como parte del proyecto PAPIIT IN107710 “Monitoreo de la Calidad del Agua mediante el uso de la Percepción Remota” que se presentan en el Capítulo 3 y, desde el análisis de las imágenes satelitales que se ha venido detallando en el presente Capítulo.

Así también, durante este estudio se hace una comparación entre los resultados obtenidos en ambos análisis.

Edición de los resultados

Para poder llevar a cabo la comparación de los resultados entre ambos análisis, primeramente se requiere que se encuentren bajo un mismo formato, así que, a continuación se describen brevemente los ajustes que se hicieron previamente mediante el uso de software auxiliar.

- **Imágenes satelitales**

Para mejorar la calidad visual de las imágenes satelitales obtenidas en el proceso de clustering se utilizaron los software libres, Inkscape 0.48 y, GIMP 2. El primero es un editor multiplataforma de gráficos vectoriales que soporta desde características sencillas como trazos y textos hasta metadatos, vectorización de archivos gráficos, capas, etcétera. Y, GIMP 2 se trata de un programa de edición de imágenes digitales en forma de mapa bits que, permite el tratado de las imágenes en capas, para poder modificar cada objeto de la imagen en forma totalmente independiente a las demás capas de la imagen.

Así que, empleando las herramientas de ambos programas se logró generar un contorno con el cual se define mucho mejor la superficie que comprende el vaso de la presa de Valle de Bravo y, además, se eliminó toda el área que la rodeaba pues no son necesarios ya que quedan fuera del interés de este estudio (Figura 4.17).

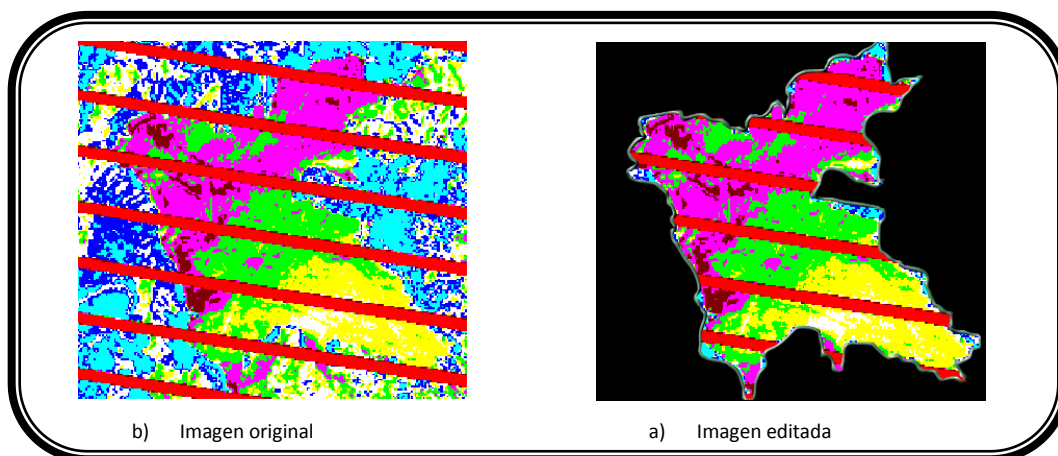


Figura 4.17 Mejoras en la calidad visual en la presentación de los resultados obtenidos mediante el análisis de imágenes satelitales.

Cabe mencionar que todas estas mejoras no se llevaron a cabo mediante los filtros que ofrece el SIG Ilwis debido al bandedo que se presenta en todas las imágenes, pues genera confusión en las funciones de filtrado y, por ello no se logra mejorar la calidad visual de la presentación de los resultados.

▪ **Resultados de los trabajos de campo**

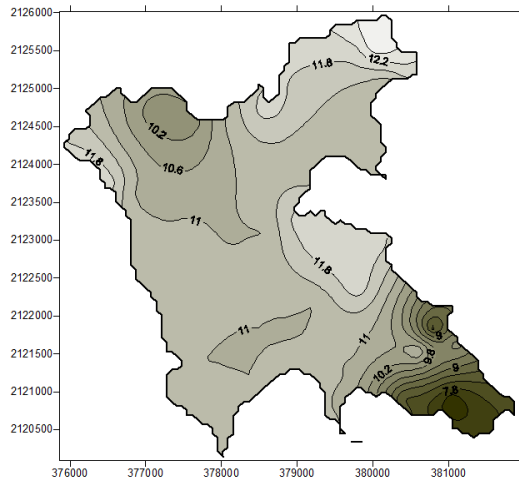
Para el análisis y representación de los datos de calidad del agua obtenidos para las tres campañas de muestreo que comprende el proyecto PAPIIT IN107710 “Monitoreo de la Calidad del Agua mediante el uso de la Percepción Remota” se recurrió al programa SURFER 8, ya que es un software que convierte los datos en contorno, superficie, vector y mapas; así pues, está orientado a la representación topográfica de variables localizadas espacialmente así como también a la generación de modelos tridimensionales como curvas de nivel.

El objetivo de la aplicación de dicho software en este trabajo es la generación de curvas de *iso-concentración* para cada uno de los parámetros determinados durante los trabajos de campo y laboratorio, pues de esta manera la visualización de los resultados permite compararlos con los obtenidos del análisis proveniente de las imágenes satelitales.

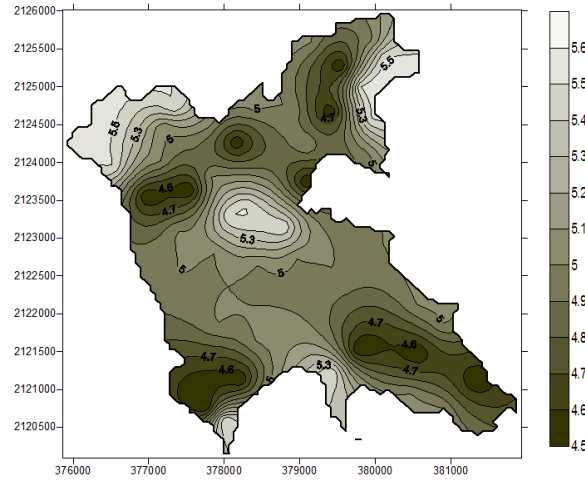
Como se estableció en el Capítulo 1, en cuanto al ámbito de estudios de la calidad del agua, la aplicación de imágenes satelitales se restringe a ciertos parámetros; en el presente trabajo se toman en cuenta: turbiedad, sólidos suspendidos y, temperatura, así que únicamente se generan las curvas de iso-concentración para estos parámetros.

Presentación multitemporal de resultados

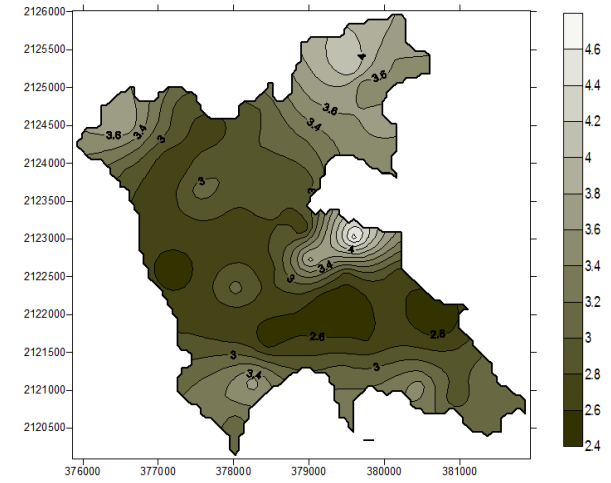
En las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se encuentran las curvas de iso-concentración para los parámetros mencionados y, en la Figura 4.21 se encuentran los clusters obtenidos para las tres campañas de muestreo; todas ellas llevan un orden multitemporal con la finalidad de poder observar el comportamiento del embalse en un lapso de tiempo.



c) Primera campaña de muestreo (25 de abril de 2010).

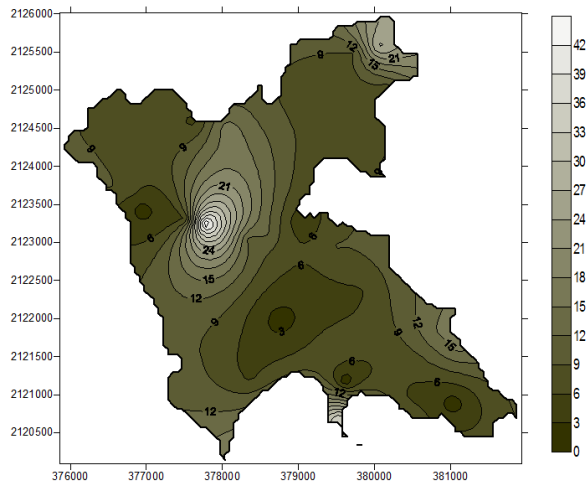


b) Segunda campaña de muestreo (02 de octubre de 2010).

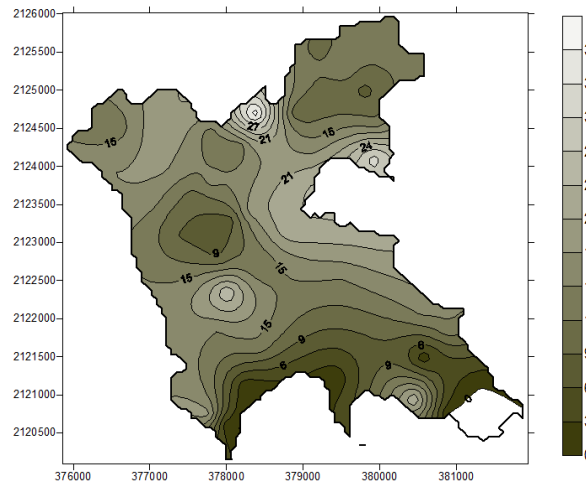


a) Tercera campaña de muestreo (26 de marzo de 2011).

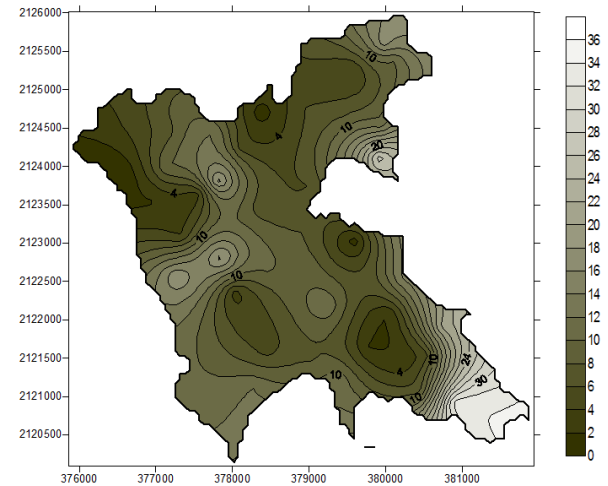
Figura 4.18 Curvas de isoconcentración en orden multitemporal del parámetro de turbiedad (en UTJ).



a) Primera campaña de muestreo (25 de abril de 2010).

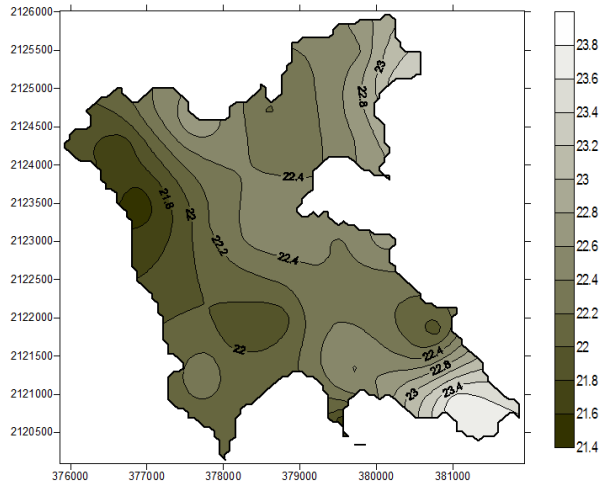


b) Segunda campaña de muestreo (02 de octubre de 2010).

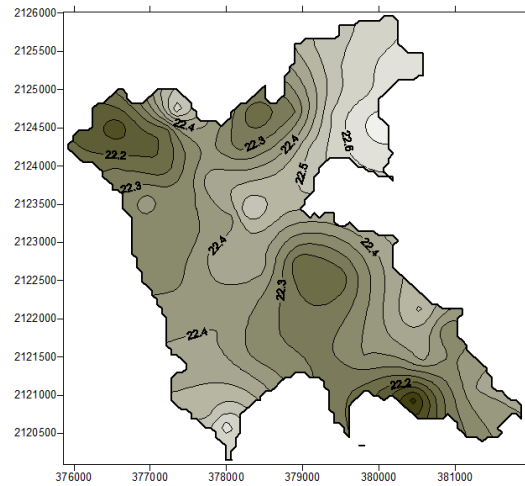


c) Tercera campaña de muestreo (26 de marzo de 2011).

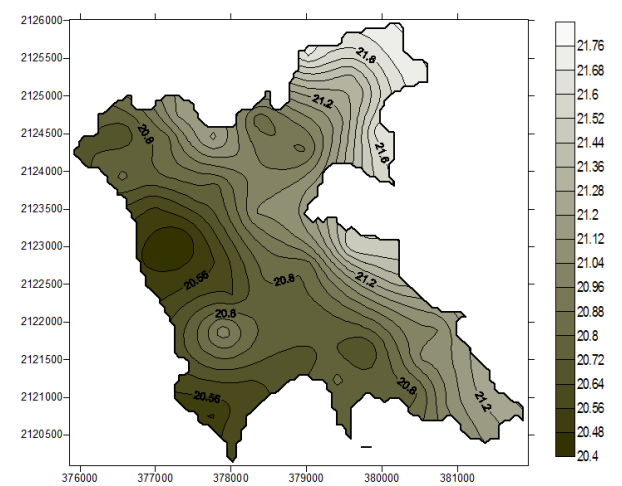
Figura 4.19 Curvas de isoconcentración en orden multitemporal del parámetro de sólidos suspendidos (mg/l).



a) Primera campaña de muestreo (25 de abril de 2010).

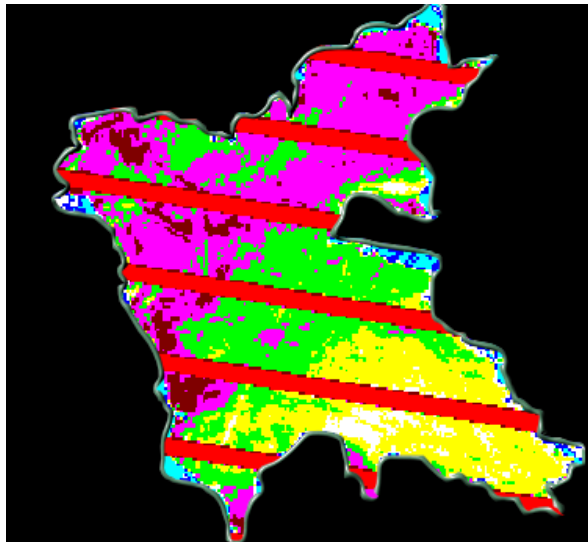


b) Segunda campaña de muestreo (02 de octubre de 2010).

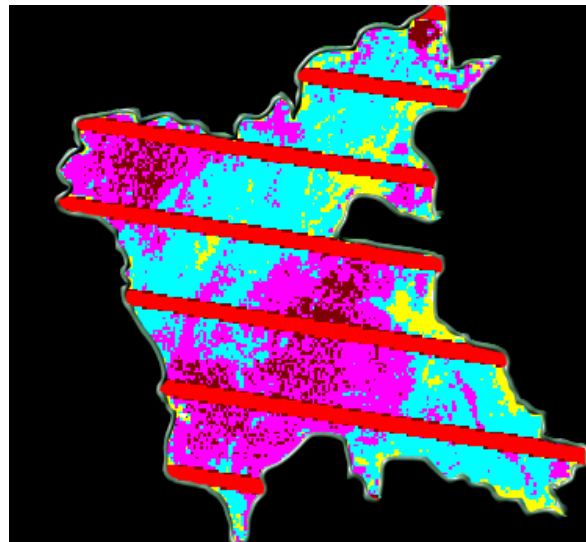


c) Tercera campaña de muestreo (26 de marzo de 2011).

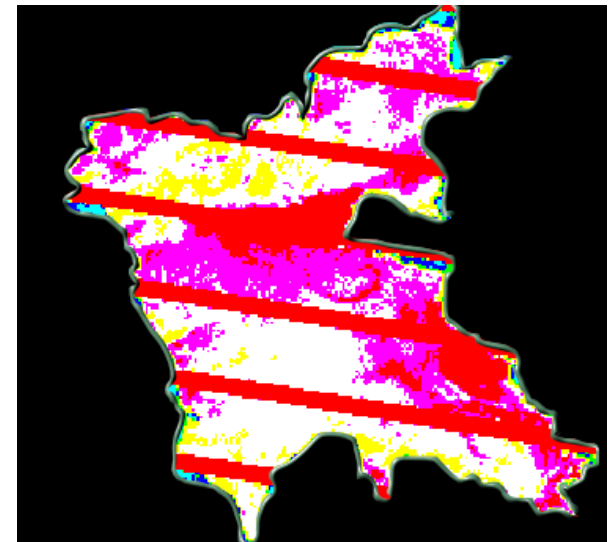
Figura 4.20 Curvas de isoconcentración en orden multitemporal del parámetro de temperatura (en °C).



a) Primera campaña de muestreo (25 de abril de 2010).



b) Segunda campaña de muestreo (02 de octubre de 2010).



c) Tercera campaña de muestreo (26 de marzo de 2011).

Figura 4.21 Presentación multitemporal de los Clusters obtenidos en el Capítulo 3 (coincidentes a las fechas en que se llevaron a cabo las campañas de muestreo).

Observando las curvas de isoconcentración para el parámetro de turbiedad (Figura 4.18) vemos que, los mayores picos en las tres fechas coinciden en la zona norte-oriente del embalse. Durante los trabajos de campo se pudo observar que esa zona se encuentra cubierta en ciertas partes por una capa superficial de espuma y, crecimiento de lirio acuático y microalgas, además de que el agua se percibió jabonosa. Esto se debe a que justo en este sitio se ubica la descarga más importante, la de Amanalco. El rango de variación está entre 3 a 12.2 UTJ.

En la Figura 4.19 se aprecian las curvas de isoconcentración para el parámetro de sólidos suspendidos y, como condición coincidente para las tres fechas puede verse que en la zona que colinda con la población se encuentran niveles altos. El rango de variación es bastante amplio ya que va de 4 a 27 mg/l.

En las imágenes se observa que, al centro del embalse se tiene el efecto de todas las descargas y, el mayor tiempo de retención y remoción se tiene justo en la cortina por eso allí mejora la calidad del agua.

Además puede notarse cierta similitud entre el comportamiento de los datos para los parámetros de turbiedad y sólidos disueltos; esto se debe a que la turbiedad se genera también por la presencia de sólidos en suspensión con dispersión desde muy pequeña hasta muy gruesa, por lo que estos dos parámetros guardan una estrecha relación.

De nuevo, en las curvas de isoconcentración de la Figura 4.20 se observa que los picos en las temperaturas se encuentran en la misma zona que en el caso del parámetro de turbiedad pero, además en el caso de las dos fechas coincidentes a la época de estiaje se ve el embalse segmentado, ya que la zona oriente presenta en ambos caso las mayores temperaturas. Mientras que para la fecha concerniente a la época de lluvias la temperatura presenta una mayor variación a lo largo de toda el área. Como vemos, este parámetro se mantiene entre un rango de 20.56°C a 23.4 °C.

Pero además del Índice de Calidad del Agua (ICA), que fue determinado en el capítulo anterior, se tiene una normativa que regula los parámetros fijando límites máximos permisibles dependiendo del aprovechamiento que se le vaya a dar al agua; durante este capítulo únicamente se abordaran las que están vinculadas con nuestro caso estudio.

Primeramente tenemos la NOM-001-SEMARNAT-1996 que señala los límites máximos permisibles en las descargas de aguas residuales a cuerpos de agua y bienes nacionales; y, la NOM-127-SSA-1996 que indica la calidad del agua para uso y consumo humano. Ambas normas son de observancia obligatoria. Y aunque la primera norma se refiere a la calidad del agua en las descargas, se utilizó como marco de referencia para la interpretación de los datos de calidad, ya que, algunos parámetros obtenidos en los sitios de muestreo en el vaso rebasaron inclusive los límites máximos permisibles de las descargas.

De las normas únicamente se tomaron las Tablas 4.2 y 4.3 ya que son las que contienen los límites máximos permisibles de los parámetros que se emplean en este trabajo. Al verificar los datos obtenidos en los trabajos de campo, se determina que únicamente se rebasan los límites de turbiedad mientras que la temperatura y los sólidos disueltos están dentro de lo establecido.

Tabla 4.2 Límites máximos permisibles que se establecen en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Parámetro mg/l (excepto cuando se especifica)	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Aguas costeras						Suelo				
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales Naturales (B)		
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	
Materia Flotante (3)	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2	
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150	
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Fosforo total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

(1) Instantáneo
 (2) Muestra Simple Promedio Ponderado
 (3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.
 P.D.= Promedio Diario; P.M. = Promedio Mensual;
 N.A. = No es aplicable.
 (A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

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

Tabla 4.3 Límites máximos permisibles que se establecen en la NOM-127-SSA-1996.

Característica	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Fuente: Secretaría de Salud.

En la Figura 4.21 se encuentra la presentación multitemporal de los clusters obtenidos en este Capítulo y, se observa que las familias de clusters se mantienen sobre todo en la zona central del embalse y en la zona contigua a la población de Valle de Bravo. Se puede observar en el caso de la segunda campaña de muestreo una mayor homogeneidad del embalse, esto se debe a que la imagen pertenece a la época de lluvias y esto favorece tal situación.

Comparativa entre el análisis de las imágenes satelitales y las curvas de isoconcentración de los trabajos de campo.

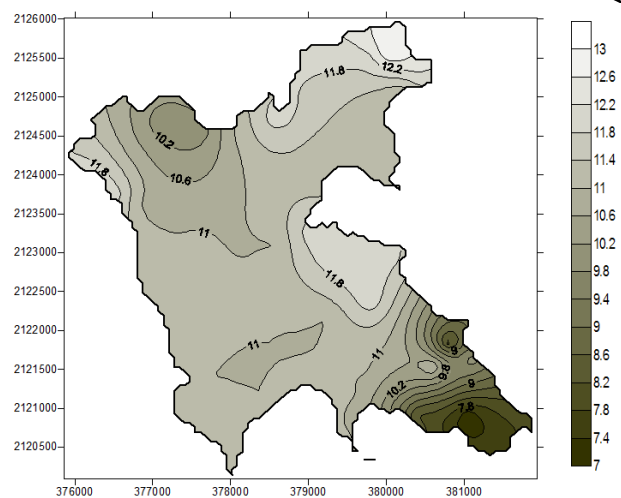
Ahora, con la finalidad de poder observar la aplicación práctica que se lleva a cabo en este campo de estudio en conjunción de la percepción remota con los SIG, se realiza una comparativa visual entre los resultados obtenidos del análisis de las imágenes satelitales con los resultados de los trabajos de campo.

Con ello lo que se busca obtener es la determinación de la calidad y dirección de los resultados bajo el análisis de las imágenes satelitales que se llevó a cabo con ayuda del SIG, es decir, las condiciones de acuerdo a las que estuvo sujeto como, qué bandas y componentes principales se tomaron en cuenta, el tipo de clasificación, entre otras; ya que dicha combinación de condiciones favorece el estudio de un parámetro en particular.

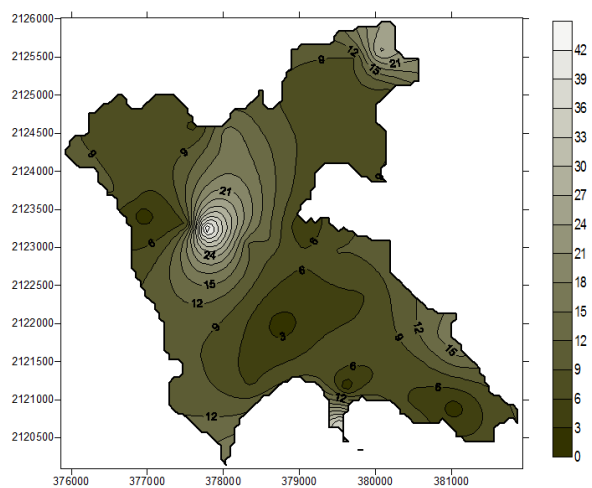
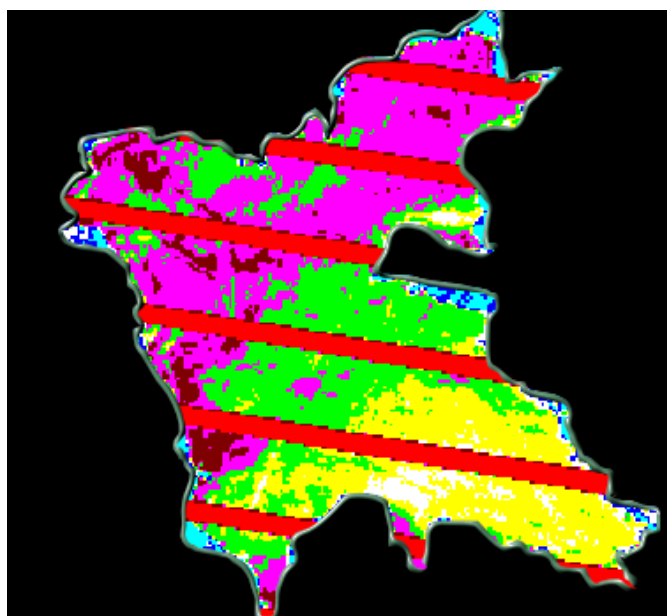
En las Figuras 4.22, 4.23 y 4.24 se contrastan los resultados de ambos análisis para poder facilitar la identificación del parámetro que se visualiza bajo estas condiciones de análisis.

Al observar el comportamiento de las tres imágenes clusters y compararlas a las que representan los trabajos de campo vemos que, al zonificar las imágenes el parámetro que está siendo visualizado a través de los cluster es el de sólidos suspendidos. Aunque cabe aclarar que debido a la relación tan estrecha que se mantiene entre turbiedad y sólidos suspendidos también llega a ser representativo para este otro parámetro.

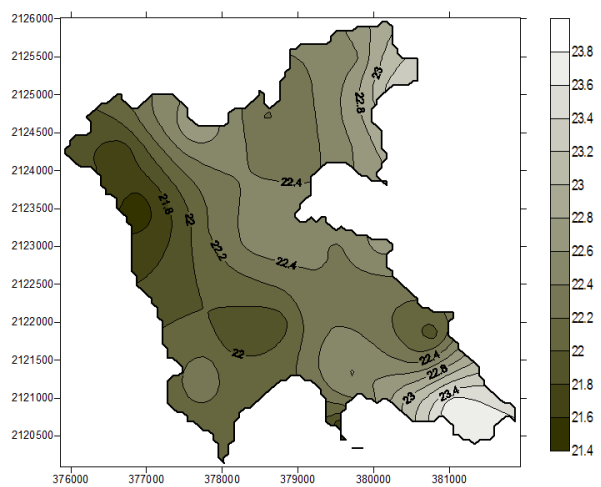
Retomando las condiciones iniciales en las que se basa el procedimiento de análisis llevado a cabo durante este Capítulo, se sabe que las bandas que se tomaron en cuenta no favorecen el estudio de la temperatura, por ello las imágenes clusters no son representativas para dicho parámetro.



a) Turbiedad

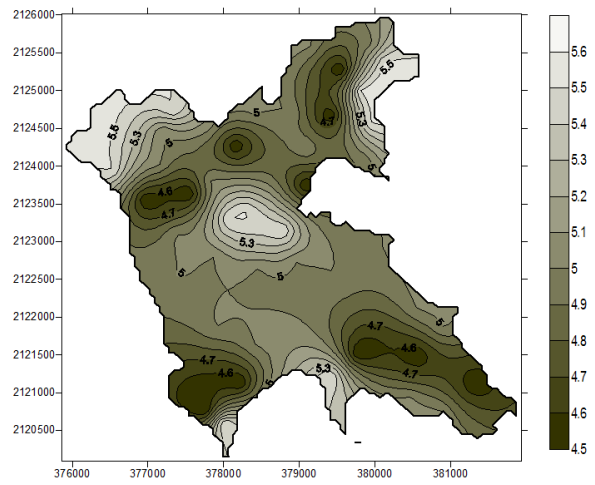


b) Sólidos suspendidos

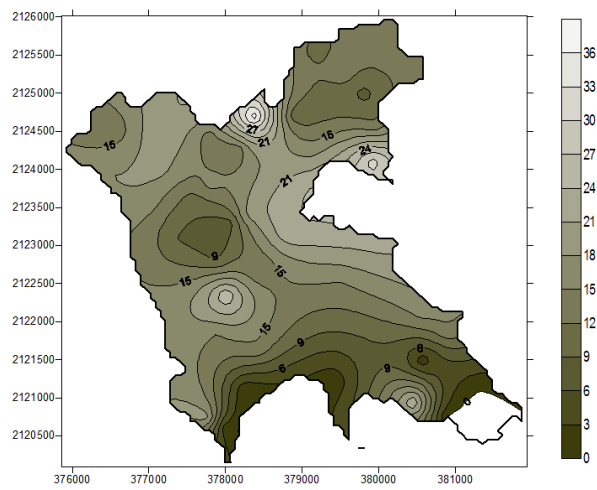
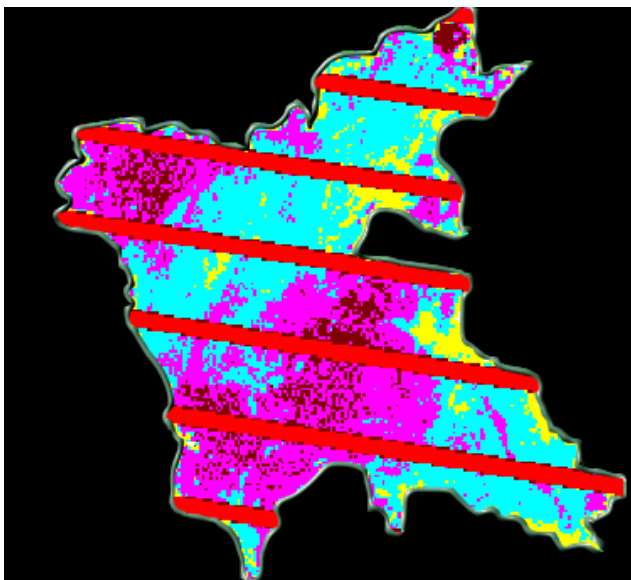


c) Temperatura

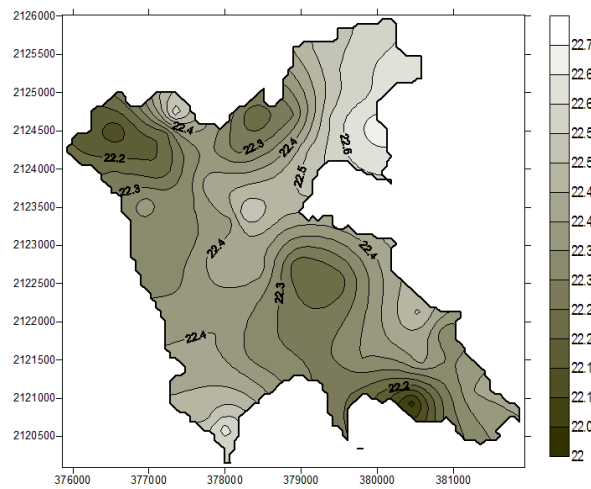
Figura 4.22 Comparativa entre ambos métodos (Imágenes satelitales – Trabajos de campo) correspondiente la primera campaña de muestreo.



a) Turbiedad

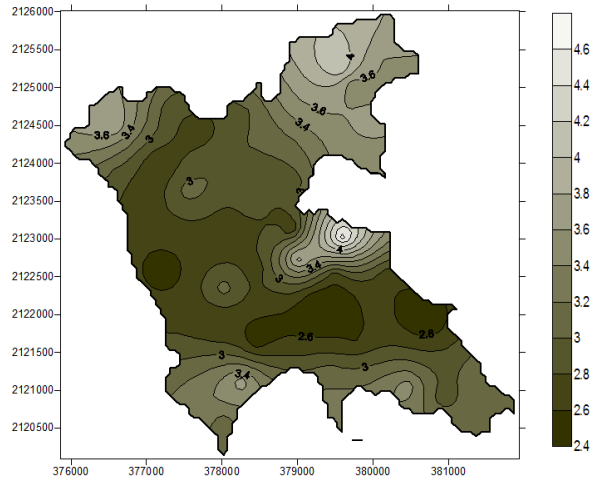
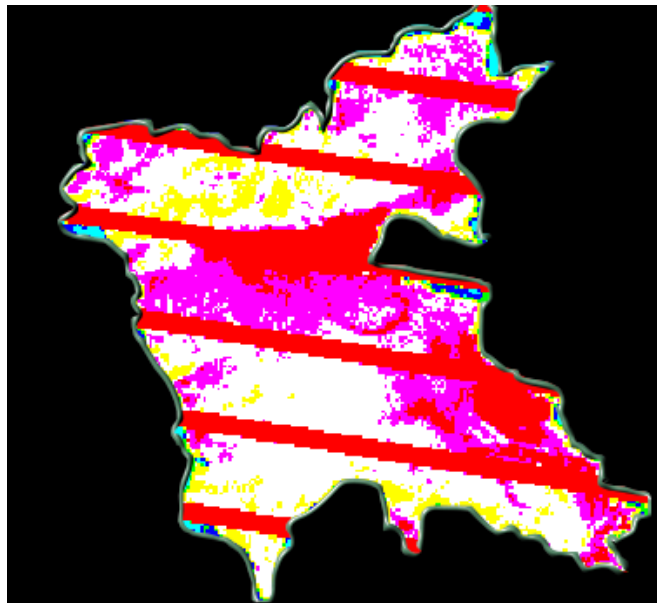


b) Sólidos suspendidos

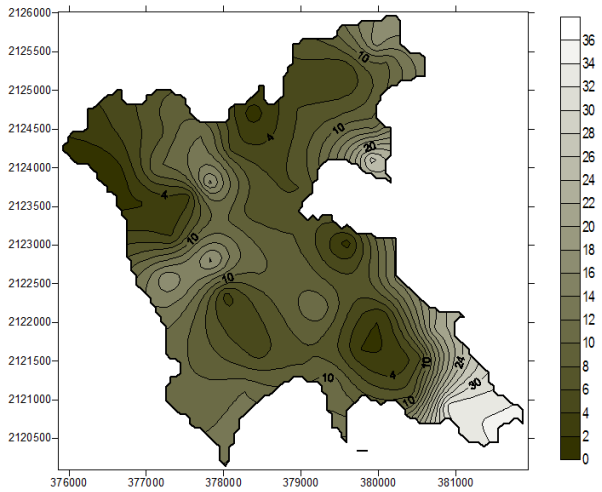


c) Temperatura

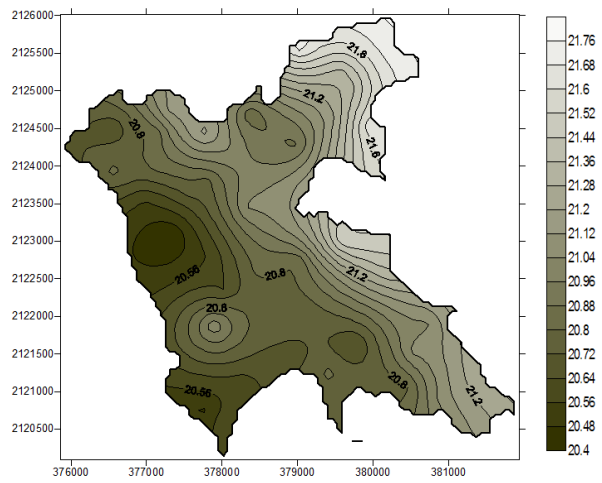
Figura 4.23 Comparativa entre ambos métodos (Imágenes satelitales – Trabajos de campo) correspondiente la segunda campaña de muestreo.



a) Turbiedad



b) Sólidos suspendidos



c) Temperatura

Figura 4.24 Comparativa entre ambos métodos (Imágenes satelitales – Trabajos de campo) correspondiente la tercera campaña de muestreo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones de este trabajo en orden de desarrollo son:

- El vaso de la presa de Valle de Bravo es una vasta extensión que abarca una superficie de 2,900 hectáreas por lo que llevar a cabo un monitoreo multitemporal para poder detectar cambios en las condiciones ambientales se ve enormemente favorecido a través del empleo de la percepción remota, ya que se pueden identificar variaciones importantes mediante el análisis de las imágenes satelitales; por lo que este tipo de estudios es una de las aportaciones más destacadas de dicha herramienta, ya que facilita el estudio de procesos dinámicos ambientales y más aún tratándose de grandes extensiones que podrían llevar mayor tiempo haciéndolo mediante actividades en campo únicamente.
- La aplicación de la percepción remota como parte de un sistema complejo e integrado de captura profunda de información acerca de diversos parámetros físicos, del modelaje, de la administración de proyectos y de la predicción de resultados constituye una herramienta valiosa que demanda de una alta especialización científica; ya que, para atacar problemas complejos se requiere de una extensa investigación y desarrollo de nuevos métodos y técnicas.
- La percepción remota es una herramienta cuantitativa y cualitativa que facilita la interpretación y la elaboración de modelos ambientales predictivos y que por tanto participa en el proceso de planeación socioeconómica.
- Es importante conocer los fundamentos que integran a la percepción remota y los SIG para poder tener una mejor interpretación y comprensión de la información que nos ofrecen, como también las particularidades del o los elementos que se tienen en estudio, ya que a partir de eso se puede definir las herramientas óptimas para poder llevar a cabo un objetivo, esta manera la elección tanto del satélite como de las bandas espectrales depende del tipo de estudio y superficie terrestre de interés.
- El agua pura tiene particularidades espectrales, por lo que cambios en ellas permiten identificar características cualitativas de los cuerpos de agua. Así pues, el agua pura es un elemento que presenta una excelente reflectancia y débil absorción en la región espectral visible, así que el estudio de sus características debe llevarse a cabo en esta región; mientras que en la región del infrarrojo sucede todo lo contrario, por lo tanto favorece la distinción de las fronteras entre los suelos y el agua.
- Entre más elementos integren un sistema, mayor incertidumbre en los resultados se tendrá, en el caso del proceso que involucra la percepción remota se encuentran elementos muy variados, desde el mismo entorno ambiental hasta diversos equipos electrónicos; por ello al realizar un análisis digital de las imágenes es necesario identificar de manera precisa las correcciones necesarias para obtener resultados más certeros, además de los posibles realces que ayuden a mejorar la interpretación de la imagen.
- Comparando la calidad de agua determinada a través de las campañas de muestreo con los límites máximos permisibles establecidos en las normas mexicanas NOM-127-SSA1-1994 y

NOM-001-SEMARNAT-1996, puede concluirse que el agua no tiene las características adecuadas para consumo humano así como tampoco cumple con los límites máximos que debe tener el agua en las descargas.

- De acuerdo con el ICA, la calidad del agua del embalse de encuentra entre poco contaminado y aceptable; debe resaltarse que hay puntos de muestreo donde la calidad obtenida es considerada como aceptable pero no recomendable para actividades de recreación en general así como dudoso para la pesca y vida acuática respecto a especies sensibles.
- Los resultados obtenidos en los trabajos de campo aportan un mapeo de las condiciones ambientales más detallado en comparación con trabajos realizados anteriormente ya que los puntos de muestreo fueron determinados empleando el SIG, así que estas condiciones permiten llevar a cabo una comparación entre dichos resultados y los obtenidos a través de las imágenes satelitales.
- El monitoreo multitemporal llevado a cabo durante las tres campañas de muestreo permite observar que en general el comportamiento espectral del embalse se mantiene estable, lo que resulta coincidente con los resultados obtenidos en laboratorio y campo.
- La comparación entre las imágenes satelitales obtenidas después de su procesamiento y las curvas de isoconcentración permite identificar que la combinación de bandas empleada en el análisis favorece la observación del parámetro de sólidos suspendidos; cabe señalar que aunque no se encuentra en el contenido de este trabajo, para los demás parámetros de igual forma una combinación de bandas óptima permite su observación empleando la percepción remota.
- A pesar de que son pocos los parámetros que son observables mediante esta herramienta, se puede tener un control sobre la calidad del agua en general, ya que estos parámetros se encuentran vinculados entre sí con los demás.
- Es posible conocer la calidad del agua de forma cuantitativa empleando los valores de radiancia medida de las bandas mediante modelos matemáticos, que son particulares para cada embalse u objeto de estudio; para ello se requiere contar con datos de campos coincidentes con la fecha de la adquisición de la imagen. De esta manera y, a través de una regresión lineal múltiple se obtengan las relaciones empíricas.
- La implantación de la percepción remota implica un costo inicial considerable ya que es necesario contar con capacitación del personal, software, equipos de cómputo, la obtención de las imágenes satelitales, etcétera; por ello resulta muy factible llevar a cabo un análisis de costo-beneficio para determinar si es de utilidad para las aplicaciones en las que se pretende utilizar. La percepción remota ofrece grandes beneficios cuando, los objetos de estudio comprenden grandes áreas, están ubicados en zonas poco accesibles, no es necesaria la precisión respecto a la escala, la información requiere ser manipulada en in SIG.

Las recomendaciones son las siguientes:

- Debido a las diversas descargas que se tienen en la periferia del vaso de la presa de Valle de Bravo es de mucha utilidad llevar a cabo un monitoreo a través de la percepción remota para identificar posibles focos de contaminación como, descargas clandestinas o infiltraciones que estén dañando la calidad del agua.
- Sería muy factible que para futuros estudios se tenga un registro de la ubicación exacta de los puntos de muestreo y, que sean los suficientes para lograr que los resultados que se obtengan sean realmente representativos del embalse.
- Es importante que los parámetros de calidad a determinar en las campañas de muestreo a futuro sean coincidentes para poder obtener un conocimiento más sustentado de la evolución de la calidad del agua.
- Para obtener un Índice de Calidad del Agua (ICA) más preciso es necesario determinarlo con los 18 parámetros físico-químicos que se establecen; aunque dentro de este análisis no se toman en cuenta otros posibles contaminantes que afectan la calidad del agua como, los insecticidas o metales pesados que se encontraron en estudios realizados al embalse.
- Fomentar el monitoreo continuo de calidad del agua del embalse de la presa de Valle de Bravo, ya que a pesar de que cuenta con un comité encargado de procurar su control y cuidado hasta ahora no tienen implantado como tal un estudio de este tipo y, en las diferentes campañas de muestreo que se llevaron a cabo se pudo observar zonas con aguas jabonosas y presencia de maleza acuática.
- Promover el mejoramiento de la calidad del embalse ya que a pesar de que de acuerdo con el análisis del ICA se registra entre poco contaminada y aceptable, no cumple con las normas NOM-127-SSA1-1994 y NOM-001-SEMARNAT-1996, que son de carácter obligatorio.
- Regular las descargas que van directo al embalse sin un previo tratamiento ya que estas son parte de los principales contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

Libros:

1. CHUVIECO, Emilio. **Fundamentos de teledetección especial**. Editoriales Rialp, S.A. España. 1990.
2. BARRETT, E.C. [et al]. **Introduction to Environmental Remote Sensing**. Chapman and halllimited. London. 1976.
3. BERNHARDSEN, Tor. **Geographic Information Systems: An introduction**. 2nd ed. John Wiley & Sons. USA. 1999.
4. BUZAI, Gustavo. **La exploración geodigital. Implementación, proyecto de investigación y resolución de problemáticas geográficas y medioambientales a través de la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con las computadoras personales**. Lugar Editorial. Buenos Aires. 2000.
5. ELACHI, Charles. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing**. 2nd ed. John Wiley & Sons. USA. 2006.
6. ENGMAN, Edwin Taylor [et al]. **Remote sensing in hydrology**. Chapman and Hall. England. 1991.
7. ERICKSON, J. **La exploración de la Tierra desde el espacio**. McGraw-Hill. España. 1992.
8. LANTAD, Nieves [et al]. **Sistemas de Información geográfica. Prácticas con Arc View**. Alfaomega. España. 2004.
9. LILLEDAND, Thomas [et al]. **Remote sensing and image interpretation**. 5th ed. John Wiley & Sons. USA. 2004.
10. PEÑA, Juan. **Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio. Entrada, manejo, análisis y salida de datos espaciales. Teoría general y práctica para ESRI ArcGIS 9**. Editorial Club Universitario. España.
11. REES, W.G. **Physical principles of remote sensing**. 2nd ed. Cambridge University Press. England. 2011.
12. SANCHEZ, Julio [et al]. **Space image processing**. CRC Press. USA. 1999.
13. RENCZ, Andrew (Ed). **Remote Sensing for the Earth Sciences Manual of Remote Sensing**. 3rd Ed. John Wiley & Sons. USA. 1999.

Artículos:

1. Comisión Nacional del Agua. **Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala en coordinación con los gobiernos del Distrito Federal y Estado de México**. 1998.
2. Comisión Nacional del Agua. **Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala en coordinación con los gobiernos del Distrito Federal y Estado de México**. 1999.
3. Comisión Nacional del Agua. **Estudio de calidad de las fuentes de aprovechamiento del Sistema Cutzamala en coordinación con los gobiernos del Distrito Federal y Estado de México**. 2000.
4. Comisión de Cuenca Valle de Bravo – Amanalco. **Plan para la gestión integral del agua y recursos asociados de la cuenca de Valle de Bravo, Estado de México**. 2010.
5. Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco. **Cuenca de Valle de Bravo-Amanalco** [en línea]. Extraído el 20 de junio de 2011, de <http://cuencaamanalcovalle.org>

6. MARTÍNEZ, Julio. **Percepción remota “Fundamentos de la Teledetección Espacial”** [en línea]. Comisión Nacional del Agua. Subgerencia de Información Geográfica del Agua (SIGA). 2005. Extraído el 11 de agosto de 2011, de <http://siga.cna.gob.mx/>
7. OLVERA Viascan, Víctor. **Informe final de proyectos de control de malezas acuáticas**. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 1987.
8. PÉREZ, Gustavo [et al]. Calidad del agua en la Cuenca Valle de Bravo Amanalco, una propuesta para su manejo. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ecología. 2007.
9. SHORT, Nicholas. **The Remote Sensing Tutorial** [en línea]. 2011. Extraído el 4 de agosto de 2011, de <http://rst.gsfc.nasa.gov>
10. Universidad de Murcia. **Herramientas de Teledetección aplicadas a la gestión de los recursos hídricos (2008). Material de clase** [en línea]. 2010. Extraído el 2 de febrero de 2011, de <http://ocw.um.es/ciencias/herramientas-de-teledeteccion-aplicadas-a-la/material-de-clase>
11. YÉBENES Gómez, Álvaro [et al]. **Clasificación de imágenes por satélite**. Universidad de Valencia. Extraído el 14 de septiembre de 2011, de <http://mural.uv.es/>

Páginas Web:

1. ILWIS Department, International Institute for Aerospace Survey & Earth Sciences Enschede, The Netherlands. **ILWIS 2.1 FOR Windows. The Integrated Land Water Information System. User's Guide** [en línea]. 1997. Extraído el 20 de marzo de 2011, de <http://www.itc.nl/ilwis/>
2. United States Geological Survey (USGS). USGS Global Visualization Viewer [en línea]. En: <http://glovis.usgs.gov/>

Tesis:

1. CORTES Morales, Roberto Salvador. **Evaluación de la calidad bacteriológica y físico química de la presa Valle de Bravo**. Tesis de licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. 2002.
2. MORALES Hernández, Daril. **Análisis digital de imágenes satelitales para establecer sitios de muestreo en cuerpos de agua**. México. Tesina de Especialidad en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado de Ingeniería. 2011.
3. MOTA, Karina. **Estudio de la calidad del agua del vaso de la presa de Valle de Bravo**. México. Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 2010.
4. VELAZCO Hernández, Arturo. **Evaluación de la calidad del agua en la presa Valle de Bravo**. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Civil. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores, Acatlán. 1996.
5. VILLANUEVA Beltrán, José Trinidad. **Evaluación de la carga externa de fósforo y nitrógeno en la presa Valle de Bravo y propuesta de solución**. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Campus Morelos. 2001.

Cursos:

1. MENÉNDEZ Martínez, Carlos Manuel. **Índices de la calidad del agua**. Curso de Administración de la calidad del agua. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Ladsat. 2011.
2. VÁZQUEZ González, Alba Beatriz. **Curso de Sistemas de Información Geográfica**. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Ladsat. 2011.

Legislación:

1. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, "Límites máximos permisibles de contaminantes en las descarga de aguas residuales en aguas y bienes nacionales" [en línea]. Extraído el 18 de marzo de 2011, de:
<http://www.semarnat.gob.mx/servicios/antiores/otroleyes/normas/Pages/normasoficialesmexicana svigentes.aspx>
2. Norma Oficial Mexicana 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" [en línea]. Extraído el 18 de marzo de 2011, de:
<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>