



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

---

**“PERCEPCIÓN REMOTA Y SUS APLICACIONES A  
LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA”**

**T E S I S**

QUE OPTA POR EL GRADO DE:

**INGENIERA CIVIL**

PRESENTA:

**KARINA AVALOS PIÑA**

DIRECTOR DE TESIS:

**M.I. ALBA BEATRIZ VÁZQUEZ GONZÁLEZ**



**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**2012**

## **JURADO ASIGNADO**

<b>Presidente:</b>	M.I. Agustín Deméneghi Colina
<b>Vocal:</b>	M.I. Alba Beatriz Vázquez González
<b>Secretario:</b>	M.I. Guillermo Mancilla Urrea
<b>Primer suplente:</b>	M.I. Nikte Norma Ocampo Guerrero
<b>Segundo suplente:</b>	M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de formar parte de su grandiosa comunidad, especialmente a la Facultad de Ingeniería por todos los conocimientos adquiridos y experiencias vividas.

A mis padres, por todo su apoyo, cariño, confianza y por siempre darme lo mejor de su ser. No puedo expresar con palabras todo lo que me han dado.

A mis hermanas, por todos sus regaños y consejos... por soportarme y estar siempre a mi lado.

A mi abuelitos, por estar al pendiente de mí y mis hermanas cuando éramos pequeñas. Por todos sus cuidados y el amor que nos siguen dando.

A mis tíos y tías, por siempre preocuparse por nosotras y ayudarnos cuando más los necesitamos.

A la maestra Alba, por invitarme a participar en el proyecto de investigación del cual se originó el presente trabajo, estar siempre al pendiente su avance y por todas las aportaciones que hizo para mejorarlo.

A mis amigos, por todos los momentos que vivimos y sobrevivimos juntos.

## *AGRADECIMIENTO*

Agradezco a la DGAPA por el financiamiento otorgado al proyecto IN107710 "*MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE EL USO DE LA PERCEPCIÓN REMOTA*", a través del **PROGRAMA DE APOYO A PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (PAPIIT)**. Sin este apoyo, esta Tesis no podría haberse realizado.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>2</b>
<b>1.1 FUNDAMENTOS</b>	<b>2</b>
<b>1.2 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA</b>	<b>5</b>
TEORÍA ONDULATORIA	5
TEORÍA CUÁNTICA	6
<b>1.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO</b>	<b>7</b>
<b>1.4 ABSORCIÓN Y DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA</b>	<b>9</b>
ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA	9
DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA	11
<b>1.5 TERMINOLOGÍA Y UNIDADES DE MEDIDA</b>	<b>12</b>
<b>2. SENSORES Y PLATAFORMAS</b>	<b>13</b>
<b>2.1 TIPOS DE SENSORES</b>	<b>14</b>
<b>SENSORES PASIVOS</b>	<b>14</b>
Sensores fotográficos	14
Explorador de Barrido	14
Explorador de Empuje	17
Tubos de Vidicón	18
Radiómetros de Microondas	18
<b>SENSORES ACTIVOS</b>	<b>18</b>
Radar	18
Lidar ( <i>Light Detection and Ranging</i> )	18
<b>2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS SENSORES</b>	<b>19</b>
<b>CARACTERÍSTICAS ORBITALES</b>	<b>19</b>
Órbita Geoestacionaria	20
Órbita Polar	20

<b>RESOLUCIÓN</b>	<b>21</b>
<b>Resolución Espacial</b>	<b>21</b>
<b>Resolución Espectral</b>	<b>22</b>
<b>Resolución Radiométrica</b>	<b>23</b>
<b>Resolución Temporal</b>	<b>24</b>
<b>2.3 PRINCIPALES SATÉLITES DE LOS RECURSOS NATURALES Y METEOROLÓGICOS</b>	<b>25</b>
<b>SATÉLITES METEOROLÓGICOS DE ÓRBITA GEOESTACIONARIA</b>	<b>25</b>
<b>Meteosat</b>	<b>26</b>
<b>SATÉLITES METEOROLÓGICOS DE ÓRBITA POLAR</b>	<b>27</b>
<b>2.4 PRINCIPALES SATÉLITES USADOS EN PERCEPCIÓN REMOTA</b>	<b>28</b>
<b>LANDSAT</b>	<b>28</b>
<b>SPOT</b>	<b>30</b>
<b>ENVISAT</b>	<b>32</b>
<b>TERRA</b>	<b>33</b>
<b>EO-1</b>	<b>34</b>
<b>IRS (Indian Remote Sensing Satellite)</b>	<b>34</b>
<b>SATELITES DE ALTA RESOLUCIÓN</b>	<b>35</b>
<i>IKONOS</i>	<i>35</i>
<i>QUICKBIRD</i>	<i>35</i>
<i>ORBVIEW</i>	<i>36</i>
<i>FORMOSAT – 2</i>	<i>36</i>
<b>3. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES</b>	<b>37</b>
<b>3.1 PREPROCESAMIENTO Y RECTIFICACIÓN DE LA IMAGEN</b>	<b>38</b>
<b>RESTAURACIÓN DE LÍNEAS O PÍXELES PERDIDOS</b>	<b>38</b>
<b>BANDEADO DE LA IMAGEN</b>	<b>39</b>
<b>CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA</b>	<b>40</b>
<b>CORRECCIÓN GEOMÉTRICA</b>	<b>40</b>
<b>3.2 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DIGITAL DE LA IMAGEN</b>	<b>42</b>
<b>REALCE DE IMAGEN</b>	<b>42</b>
<b>Realce de Contraste</b>	<b>42</b>
<i>Expansión Lineal</i>	<i>43</i>
<i>Histograma Ecuilizado</i>	<i>43</i>
<i>Expansión Espacial de Contraste</i>	<i>44</i>
<b>Realce Local o Espacial</b>	<b>44</b>
<b>VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES MULTIBANDA</b>	<b>45</b>
<b>Composición de Color</b>	<b>45</b>
<b>Composición de Falso Color (CFC)</b>	<b>47</b>
<b>TRANSFORMACIONES DE LA IMAGEN</b>	<b>48</b>
<b>Estadísticas Multibanda</b>	<b>48</b>

<b>Análisis de Componentes Principales</b>	<b>48</b>
<b>3.3 CLASIFICACIÓN DIGITALES</b>	<b>49</b>
<b>SUPERVISADA</b>	<b>49</b>
<b>NO SUPERVISADA</b>	<b>50</b>
<b>4. EXPERIENCIAS MUNDIALES DE APLICACIÓN DE LA PERCEPCIÓN REMOTA EN LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA</b>	<b>52</b>
<b>Panorama General</b>	<b>52</b>
<b>4.1 PROGRAMAS INTERNACIONALES DEDICADOS A LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD AGUA</b>	<b>54</b>
<b>AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (ESA)</b>	<b>54</b>
<b>Monitoreo de la Calidad del Agua del Lago de Garda (Italia) a través de Datos Multitemporales obtenidos del Sensor Meris (ENVISAT) (2003)</b>	<b>54</b>
<b>Iniciativa TIGER (a partir del 2002)</b>	<b>55</b>
<i>Monitoreo de la Calidad del Agua del Lago Manzalah, Egipto</i>	<i>57</i>
<b>AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS (EPA U.S.)</b>	<b>58</b>
<b>Desarrollo de Indicadores de Calidad del Agua usando la Percepción Remota (2006)</b>	<b>58</b>
<b>CENTRO Y LABORATORIO DE RECURSOS HÍDRICOS Y PERCEPCIÓN REMOTA, UNIVERSIDAD DE MINNESOTA</b>	<b>59</b>
<b>Monitoreo de la Calidad del Agua en las grandes Regiones de Lagos del Estado (a partir del 2000)</b>	<b>59</b>
<i>Mapa Interactivo</i>	<i>60</i>
<b>TENDENCIAS RECIENTES DE LAS SUPERFICIES OCUPADAS POR EL LAGO DE CUITZEO, MÉXICO.</b>	<b>63</b>
<b>5. CASO ESTUDIO: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL VASO DE LA PRESA VALLE DE BRAVO</b>	<b>68</b>
<b>5.1 PRESA VALLE DE BRAVO</b>	<b>68</b>
<b>LOCALIZACIÓN</b>	<b>68</b>
<b>ANTECEDENTES</b>	<b>69</b>
<b>DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA</b>	<b>69</b>
<b>DIMENSIONES Y CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO</b>	<b>69</b>
<b>POBLACIÓN</b>	<b>70</b>
<b>ACTIVIDADES ECONÓMICAS</b>	<b>71</b>
<b>CONTAMINACIÓN</b>	<b>73</b>
<b>5.2 SITIOS DE MUESTREO</b>	<b>74</b>

<b>5.3 TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO</b>	<b>76</b>
<b>CAMPAÑAS DE MUESTREO</b>	<b>76</b>
<b>TOMA DE MUESTRAS Y SU CONSERVACIÓN</b>	<b>76</b>
<b>DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD</b>	<b>77</b>
<b>Determinación de Parámetros en Sitio</b>	<b>77</b>
<i>Parámetros determinados con un Medidor Multiparamétrico</i>	<i>77</i>
<i>Disco de Secchi</i>	<i>78</i>
<b>Determinación de Parámetros posteriores al muestreo</b>	<b>79</b>
<i>Parámetros determinados con Espectrofotómetro</i>	<i>79</i>
<i>Parámetros determinados en el laboratorio</i>	<i>80</i>
<u><i>Coliformes Totales y Fecales</i></u>	<i>80</i>
<u><i>Demanda Bioquímica de Oxígeno</i></u>	<i>81</i>
<u><i>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</i></u>	<i>83</i>
<u><i>Turbiedad</i></u>	<i>84</i>
<b>5.4 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN</b>	<b>85</b>
<b>5.5 GENERACIÓN DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA A TRAVÉS DE LA CORRELACIÓN DE DATOS DE CAMPO E IMÁGENES SATELITALES</b>	<b>88</b>
<b>5.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>90</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>106</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>106</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>107</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>108</b>

## INTRODUCCIÓN

El objetivo general de esta tesis fue el de investigar, presentar y analizar los fundamentos de la percepción remota y sus principales aplicaciones a la evaluación de la calidad del agua.

La percepción remota es una técnica aplicada en diversos campos de ingeniería y otras ciencias. Esta técnica es utilizada para obtener cierta información sobre la superficie terrestre desde distancias relativamente grandes, mediante el análisis e interpretación de imágenes satelitales.

Los procesos llevados a cabo en un análisis de percepción remota, siguen fundamentos básicos de la física los cuales son explicados en el Capítulo I. También se hablará de la interacción de los diversos elementos que intervienen la percepción remota, desde la captura de imágenes hasta su procesamiento y análisis de la información obtenida.

El Capítulo II presenta los principales sensores y plataformas utilizados para la captura de imágenes satelitales, así como con sus características más relevantes.

Es importante comprender los datos proporcionados por los sensores para darles una interpretación adecuada. Para esto las imágenes se someten a diversos procesos de preprocesamiento, procesamiento, análisis y clasificación presentados en el Capítulo III.

Actualmente existen diversos programas internacionales dedicados a la evaluación de la calidad del agua que utilizan las técnicas de percepción remota. En el Capítulo IV se presentaran algunos de ellos y su importancia en la gestión de los recursos hídricos de la Tierra ya que existen áreas en donde se tiene un acceso limitado de agua.

Finalmente en el Capítulo V se presenta el caso estudio "Evaluación de la calidad del agua del vaso de la Presa Valle de Bravo" para el cual se usaron imágenes del satélite Landsat 7. Habitualmente las imágenes satelitales tienen un costo, pero debido a una falla en el bandeado de las imágenes capturadas, estas pudieron obtenerse totalmente gratis. En este capítulo también se presenta información de la región de estudio, los sitios de muestreo analizados durante tres campañas de muestreo, que incluyen los trabajos de campo y laboratorio llevados a cabo para la recolección y análisis de muestras, así como las conclusiones obtenidas después del procesamiento y análisis de la información obtenida. .

El financiamiento para la investigación del cual forma parte este trabajo fue obtenido a través del proyecto IN107710 "Monitoreo de la calidad del agua mediante el uso de la Percepción Remota" a través del Programa de apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), de la DGAPA.

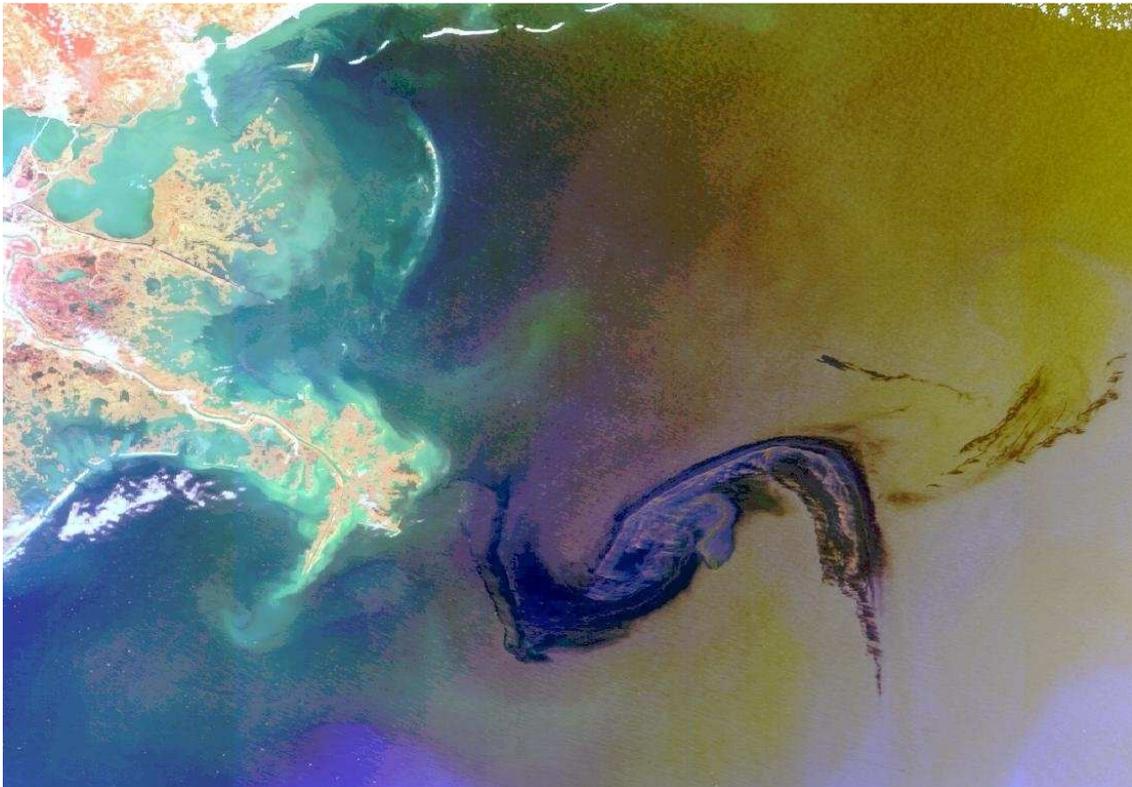
## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 FUNDAMENTOS

La percepción remota puede definirse como una técnica aplicada para obtener información confiable sobre las propiedades de ciertas superficies u objetos, desde distancias relativamente grandes mediante la obtención de imágenes tomadas por diversos sensores montados sobre plataformas espaciales.

Estas imágenes son procesadas e interpretadas para producir datos que pueden aplicarse en los campos de la ingeniería, agricultura, geología, geografía, oceanografía, ecología, incluso para fines militares.

En la Figura 1.1 se muestra una imagen del satélite ENVISAT tomada el 29 de Abril del 2010, en ella se puede apreciar un derrame de petróleo sobre el Golfo de México ocasionado después de que un incendio hiciera explotar una plataforma petrolera cerca de las costas de Louisiana y Mississippi. El derrame puede identificarse como el remolino de color púrpura oscuro en la parte inferior central.



**FIGURA 1.1 DERRAME DE PETRÓLEO SOBRE EL GOLFO DE MÉXICO VISTO DESDE EL ESPACIO**

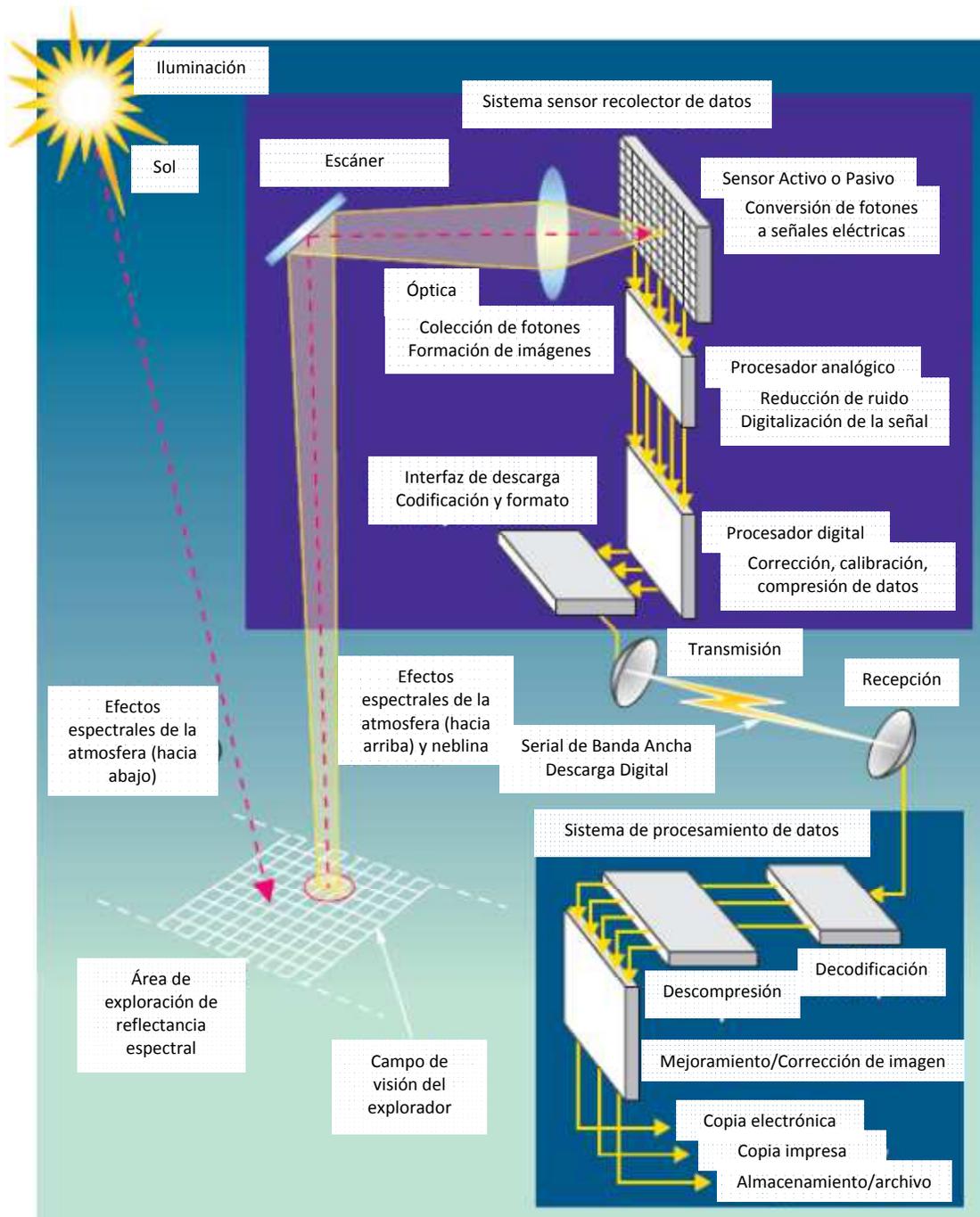
Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2010

El proceso de recolección de estos datos se ven involucrados diversos elementos, los cuales se muestran en la Figura 1.2:



**FIGURA 1.2 PROCESOS INVOLUCRADOS EN LA PERCEPCIÓN REMOTA.**  
Fuente: Adaptado por el autor de varias fuentes (ver Referencias)

La percepción remota se lleva a cabo, debido a la interacción de energía solar realizada entre el sensor y el objeto de estudio. La Figura 1.3 muestra el flujo de información en un sistema típico de percepción remota.



**FIGURA 1.3 DISEÑO DE UN TÍPICO SENSOR ÓPTICO ELECTRÓNICO**

Fuente: Revista Crosslink, Aerospace Corporation. 2004.

(Adaptado por el autor)

## 1.2 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Las propiedades de este tipo de energía pueden explicarse con dos teorías: la teoría ondulatoria y la del movimiento de partículas o teoría cuántica. Ambas teorías se complementan ya que la luz presenta el comportamiento de ambas.

### TEORÍA ONDULATORIA

Según esta teoría la energía electromagnética consta de dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: el eléctrico y el magnético. Dichos campos se mueven continuamente a la velocidad de la luz y es así como la energía se transmite (Figura 1.4).

Dicho flujo de energía cuenta con las siguientes características:

- Longitud de onda ( $\lambda$ ): es la distancia existente entre dos crestas sucesivas de la onda, generalmente es medida en metros (m), centímetros (cm), micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) o nanómetros (nm).
- Frecuencia (F): es el número de ciclos que pasan por un punto fijo en determinada unidad de tiempo ( $\text{Hz}$ ,  $\text{s}^{-1}$ )

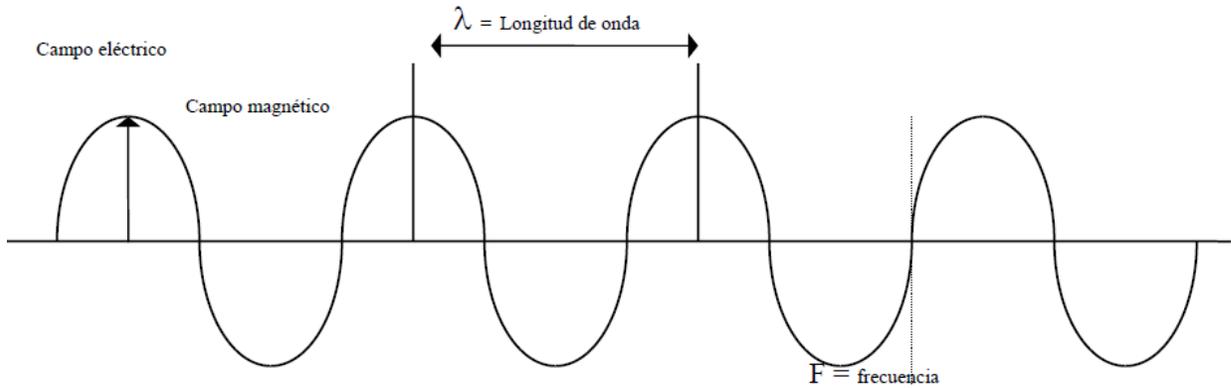
Ambas tienen una relación inversamente proporcional, es decir, a mayor longitud de onda, será menor la frecuencia y viceversa:

$$c = \lambda F \dots (1.1)$$

Donde,  $c$  = Velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

$\lambda$  = Longitud de onda (m)

F = Frecuencia ( $\text{s}^{-1}$ )



**FIGURA 1.4 ESQUEMA DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA**  
 Fuente: "La Percepción Remota" Uriel Pérez G. 2005

### TEORÍA CUÁNTICA

Esta teoría nos dice que la energía fluye en forma de una corriente partículas sin masa llamadas fotones, de esta se deriva una expresión con la que podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre y cuando se conozca su frecuencia.

$$Q = h F \dots (1.2)$$

Donde,  $Q$  = Energía radiante de un fotón (J)

$h$  = Constante de Planck ( $6.6 \times 10^{-34}$  J•s)

$F$  = Frecuencia ( $s^{-1}$ )

Haciendo la sustitución de (1.1) en (1.2):

$$Q = \frac{h c}{\lambda} \dots (1.3)$$

Analizando la ecuación, podemos ver que a mayor longitud de onda, la cantidad de energía transportada será menor y viceversa. Es decir, la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que en las de longitudes de onda más cortas.

### 1.3 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

De las formulas anteriores, se puede deducir que cualquier tipo de energía radiante se puede describir en función de su longitud de onda o frecuencia. El espectro electromagnético está constituido por una serie de longitudes de onda en donde cada serie tiene un comportamiento similar (Figura 1.5).

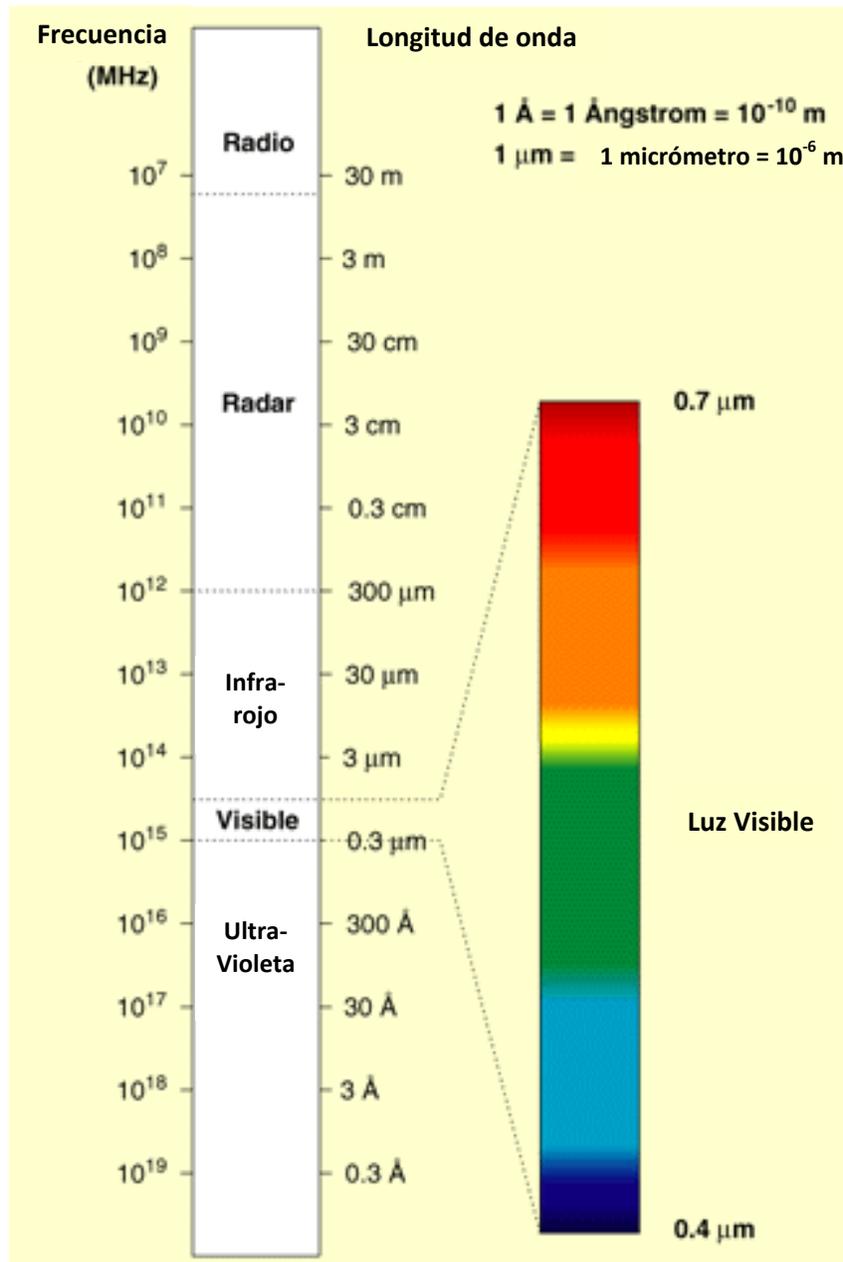


FIGURA 1.5 REPRESENTACIÓN DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.  
 Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011

El espectro electromagnético comprende desde longitudes de onda cortas hasta más largas, en el Cuadro 1.1 se muestra la longitud de cada banda con respectivas unidades.

**CUADRO 1.1 BANDAS Y LONGITUDES DE ONDA DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO**

BANDA	LONGITUD DE ONDA
Rayos Gamma	< 0.03 nm
Rayos X	0.03 nm – 3 nm
Ultravioleta	3 nm – 0.40 μm
<b>Espectro visible</b>	
• Violeta	0.40 μm – 0.45 μm
• Azul	0.45 μm – 0.50 μm
• Verde	0.50 μm – 0.57 μm
• Amarillo	0.57 μm – 0.59 μm
• Naranja	0.59 μm – 0.61 μm
• Rojo	0.61 μm – 0.70 μm
Infrarrojo Próximo	0.70 μm – 1.50 μm
Infrarrojo Medio	1.50 μm – 3.00 μm
Infrarrojo Lejano o térmico	3.00 μm – 14.00 μm
Microondas	1 mm – 30 cm
Radio	> 30 cm

Fuente: “Teledetección Aeroespacial” Seco Hernández Ricardo, 2002. (Adaptada por el autor)

Las bandas más utilizadas para la realización de algún estudio de percepción remota son el espectro visible, la infrarroja y la microondas. La región visible proporciona información concerniente a las características del agua, mientras que la región del infrarrojo define las fronteras entre los cuerpos de agua y el suelo. En el Cuadro 1.2 se muestran las principales características de cada banda del espectro.

**CUADRO 1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS BANDAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO**

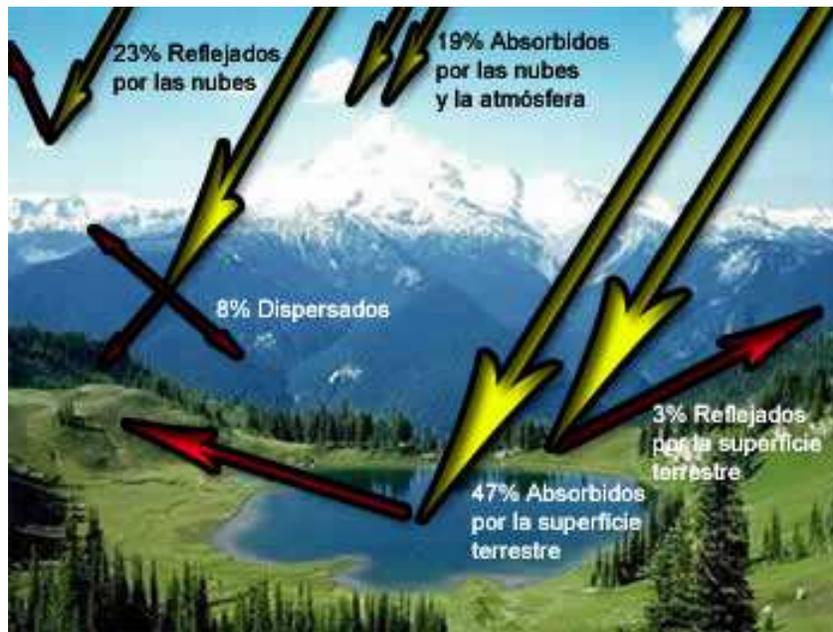
BANDA	CARACTERÍSTICAS
<b>Espectro visible</b>	Única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, siendo la máxima la radiación solar. Las tres bandas elementales de este espectro son: Azul 0.40 μm – 0.50 μm Verde 0.50 μm – 0.60 μm Roja 0.60 μm – 0.70 μm
<b>Infrarrojo Próximo</b>	Tiene la capacidad para distinguir masas vegetales y concentraciones de humedad.
<b>Infrarrojo Medio</b>	Aquí interactúan los procesos de reflexión de la luz solar y emisión de la superficie terrestre.
<b>Infrarrojo Lejano</b>	No toda esta banda es utilizable ya que algunos gases de la atmosfera, como el CO <sub>2</sub> o vapor de agua, absorben parte de la radiación.
<b>Microondas</b>	Este tipo de radiación es capaz de penetrar en las nubes, niebla y lluvia. Sirve para describir la rugosidad de alguna superficie.

Fuente: “Fundamentos de Teledetección Espacial” Chuvieco Emilio, 1990. (Adaptada por el autor)

## 1.4 ABSORCIÓN Y DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

Como ya se ha mencionado, la atmósfera es el medio por donde viaja el flujo de radiación de la superficie terrestre al sensor. La interacción con ciertos gases causan efectos de absorción y dispersión que interfieren con la transmisión del flujo de energía.

En la Figura 1.6 se ejemplifica el balance de la radiación solar en interacción con la atmósfera, se puede ver que el 50% de los rayos solares es reflejado y dispersado antes de llegar a la superficie.



**FIGURA 1.6 BALANCE DE LA RADIACIÓN SOLAR EN INTERACCIÓN CON LA ATMÓSFERA**

Fuente: "La Tierra a Vista de Satélite, Introducción a la Teledetección"  
 Jordi Vivancos, Albert Llastarri, Mònica Grau, Daniel Vivancos. 2005.

Los efectos de la atmósfera sobre la radiación electromagnética pueden variar por: las diferentes distancias de recorrido, la intensidad de la señal emitida, la longitud de onda y las condiciones atmosféricas del momento de la observación.

### ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

La atmósfera tiende a comportarse como un filtro con ciertas longitudes de onda, de tal forma que algunas bandas del espectro no son captadas eliminando la posibilidad de hacer un análisis de percepción remota. Los principales gases causantes del efecto de absorción en la atmósfera se muestran en el Cuadro 1.3.

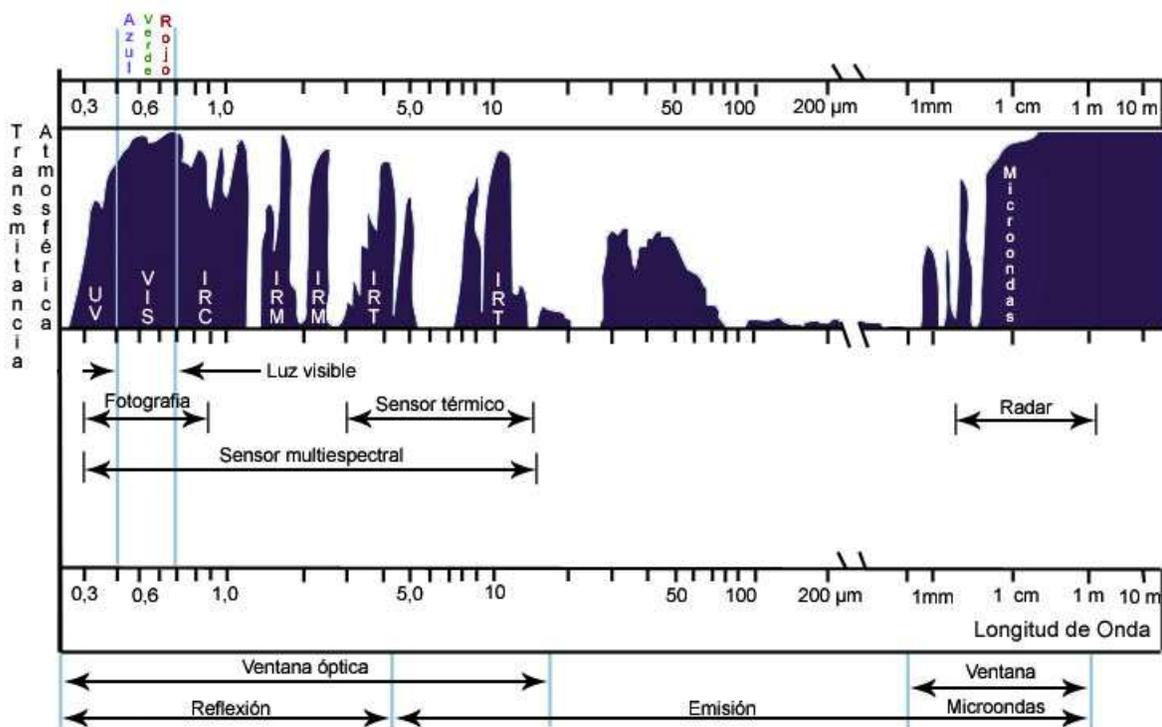
**CUADRO 1.3 GASES CAUSANTES DEL EFECTO DE ABSORCIÓN EN LA ATMÓSFERA.**

GAS	EFFECTOS
<b>Oxígeno (O<sub>2</sub>)</b>	Filtra las radiaciones ultravioletas por debajo de 0.1 μm, pequeños sectores en el infrarrojo térmico y las microondas.
<b>Ozono (O<sub>3</sub>)</b>	Elimina la radiación ultravioleta inferior a 0.3 μm, así como un sector aproximado de 27 mm de microondas.
<b>Vapor de agua</b>	Absorbe ondas en torno a los 6 μm y otras menores entre 0.6 y 2 μm.
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	Absorbe el infrarrojo térmico hasta 15 μm con efectos importantes en el infrarrojo medio desde 2.5 μm hasta 4.5 μm.

Fuente: "Fundamentos de Teledetección Espacial"  
 Chuvieco Emilio, 1990. (Adaptada por el autor)

Como consecuencia de esta absorción la observación se reduce a determinadas bandas del espectro, conocidas como ventanas atmosféricas, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta. Es decir, son aquellas bandas del espectro con longitudes de onda en donde la mayoría de la radiación puede atravesar.

Estas "ventanas" facilitan el proceso de recolección de datos y el diseño de sensores espaciales se ajusta a estas bandas para evitar interferencias que nos impidan observar un objeto o fenómeno.



**FIGURA 1.7 VENTANAS ATMOSFÉRICAS**

Fuente: "La Tierra a Vista de Satélite, Introducción a la Teledetección"  
 Jordi Vivancos, Albert Llastarri, Mònica Grau, Daniel Vivancos. 2005

Las principales ventanas atmosféricas (Figura 1.7) son:

- Espectro visible e infrarrojo cercano, situada entre 0.3 y 1.35  $\mu\text{m}$ .
- Infrarrojo medio: de 1.5 a 1.8  $\mu\text{m}$ , 2.0 a 2.4  $\mu\text{m}$ , 2.9 a 4.2  $\mu\text{m}$  y 4.5 a 5.5  $\mu\text{m}$ .
- Infrarrojo térmico: entre 8 y 14  $\mu\text{m}$ .
- Microondas: por encima de 200  $\mu\text{m}$ , la atmósfera es prácticamente transparente.

Incluso si en el proceso de recolección de datos se usan las ventanas atmosféricas, este se ve interferido hasta cierto punto por la dispersión y la absorción de la atmósfera. Por eso, los datos deben ajustarse posteriormente mediante una manipulación digital.

### DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA

La dispersión de la radiación electromagnética es causada por su interacción con los gases, partículas atmosféricas en suspensión o gotas de agua. Esta interacción da un aporte adicional a la radiación proveniente de la superficie terrestre.

Los principales tipos de dispersión se describen en el Cuadro 1.4.

CUADRO 1.4 PRINCIPALES TIPOS DE DISPERSIÓN PRESENTES EN LA ATMÓSFERA

DISPERSIÓN	SE PRESENTA	MOLÉCULA DE DISPERSIÓN
<b>Rayleigh</b>	<p>Cuando la longitud de onda de la radiación es más grande que el diámetro de las moléculas de gas responsables de la dispersión.                      Es decir, las longitudes de onda corta se dispersan con mayor facilidad.</p>	Diversos gases de la atmósfera
<b>Mie</b>	<p>Cuando la longitud de onda de radiación es similar al tamaño de la partícula responsable de la dispersión.</p>	Vapor de agua, polvo, aerosoles
<b>No Selectiva</b>	<p>Cuando la longitud de onda de la radiación es más pequeña que el diámetro de la partícula</p>	Agua

Fuente: "Fundamentos de Teledetección Espacial"  
 Chuvieco Emilio, 1990. (Adaptada por el autor)

## 1.5 TERMINOLOGÍA Y UNIDADES DE MEDIDA

La terminología más común en el proceso de adquisición de datos de la percepción remota se muestra en el Cuadro 1.5, con sus respectivas unidades de medición.

CUADRO 1.5 TERMINOLOGÍA Y UNIDADES DE MEDIDA.

	CONCEPTO	SÍMBOLO	UNIDAD
<b>Energía radiante</b>	Indica el total de energía radiada en todas direcciones.	Q	J
<b>Densidad radiante</b>	Total de energía radiada en todas direcciones por unidad de volumen.	W	J/m <sup>3</sup>
<b>Flujo radiante</b>	Total de energía radiada en todas direcciones por unidad de tiempo.	$\phi$	W
<b>Emitancia radiante</b>	Total de energía radiada en todas direcciones desde una unidad de área y por unidad de tiempo.	M	W/m <sup>2</sup>
<b>Emitancia radiante espectral</b>	Total de energía radiada en todas direcciones desde una unidad de área de una determinada longitud de onda y por unidad de tiempo.	M $\lambda$	W/m <sup>2</sup> $\mu$ m
<b>Irradiancia</b>	Total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo.	E	W/m <sup>2</sup>
<b>Irradiancia espectral</b>	Total de energía radiada sobre una unidad de área de una determinada longitud de onda y por unidad de tiempo.	E $\lambda$	W/m <sup>2</sup> $\mu$ m
<b>Intensidad radiante</b>	Total de energía radiada por unidad de tiempo y por un ángulo tridimensional referente a la sección completa de la energía transmitida.	I	W/sr
<b>Radiancia</b>	Total de energía radiada por unidad de área y por un ángulo de medida.	L	W/m <sup>2</sup> sr
<b>Radiancia espectral</b>	Total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por un ángulo de medida.	L $\lambda$	W/m <sup>2</sup> sr $\mu$ m
<b>Emisividad</b>	Relación entre la emitancia de una superficie y la de un emisor perfecto a la misma temperatura.	$\epsilon$	1
<b>Reflectividad</b>	Relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie.	$\rho$	1
<b>Absortividad</b>	Relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie.	$\alpha$	1
<b>Transmitividad</b>	Relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.	$\tau$	1

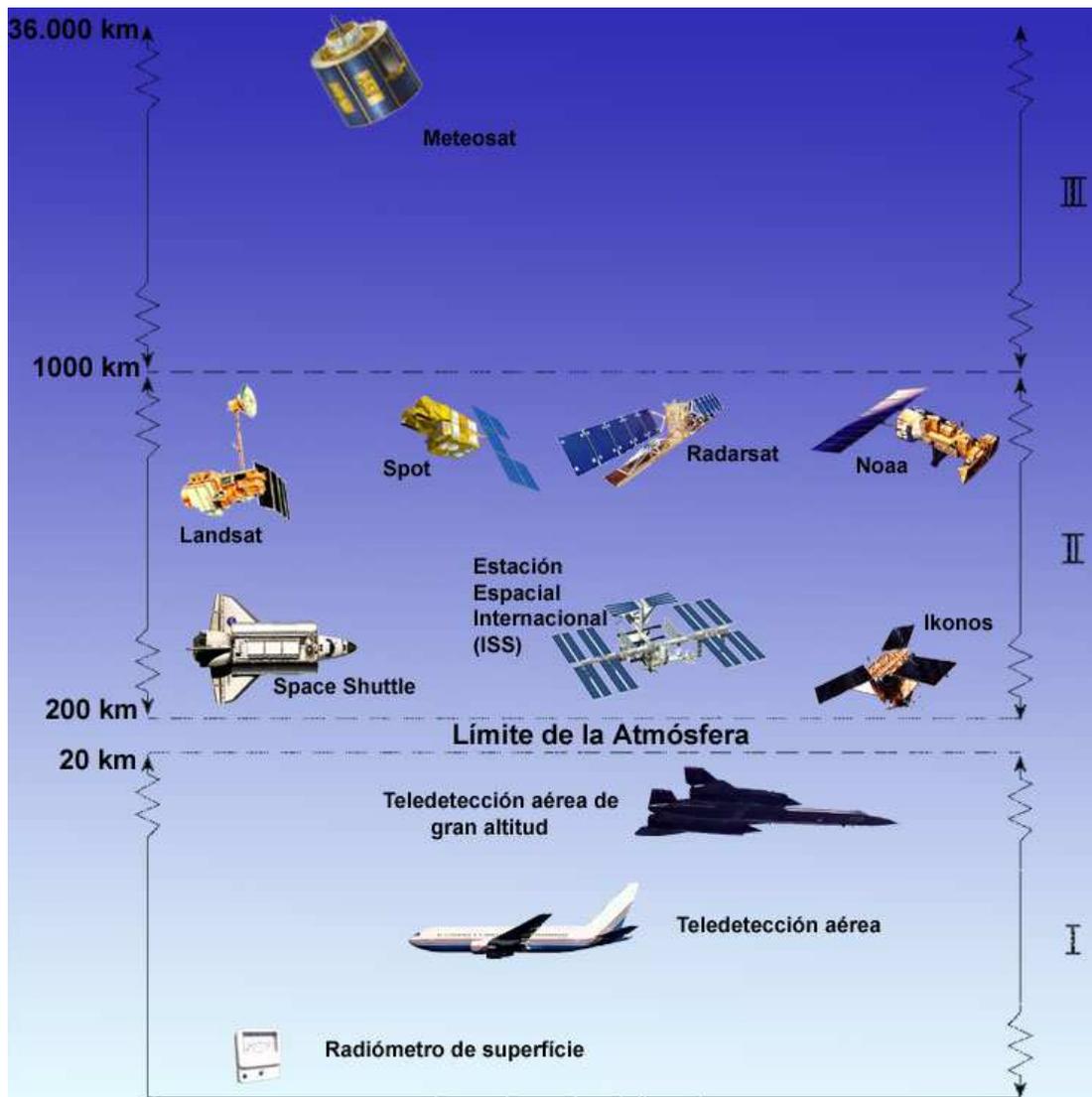
Fuente: "Fundamentos de Teledetección Espacial"  
Chuvieco Emilio, 1990. (Adaptada por el autor)

sr, estéreo-radian, medida del ángulo tridimensional referente a la sección.

## 2. SENSORES Y PLATAFORMAS

Un sensor es un instrumento tecnológico cuya función es captar imágenes a distancia. Los diferentes sensores están diseñados para captar información de las diferentes regiones del espectro electromagnético, cada una de estas regiones se denomina canal o banda. Generalmente son desarrollados para operar en la banda infrarroja y en la microondas.

La Figura 2.1 muestra las plataformas de teledetección. Una plataforma es donde se ubica el sistema sensor, estas pueden ser de tipo terrestre, aérea o espacial. El presente trabajo se enfoca en las plataformas espaciales.



**FIGURA 2.1 PLATAFORMAS DE TELEDETECCIÓN**

Fuente: "La Tierra a Vista de Satélite, Introducción a la Teledetección"  
 Jordi Vivancos, Albert Llastarri, Mònica Grau, Daniel Vivancos. 2005.

## 2.1 TIPOS DE SENSORES

Pueden clasificarse de acuerdo a la forma de detectar la energía procedente de los diversos objetos a estudiar.

La Figura 2.2 resume los tipos de sensores que están siendo usados y desarrollados en estudios de percepción remota.

### SENSORES PASIVOS

No emiten ningún tipo de energía, se limitan a detectar la radiación electromagnética reflejada o emitida de fuentes naturales de energía, en este caso la del Sol. Ejemplos de este tipo de son los sensores de los programas LANDSAT, SPOT, CBERS, IKONOS y Quickbird.

Pueden dividirse en tres categorías generales:

#### Sensores fotográficos

##### Óptico electrónicos

- Exploradores de barrido
- Exploradores de empuje
- Tubos de Vidicón

##### De antena

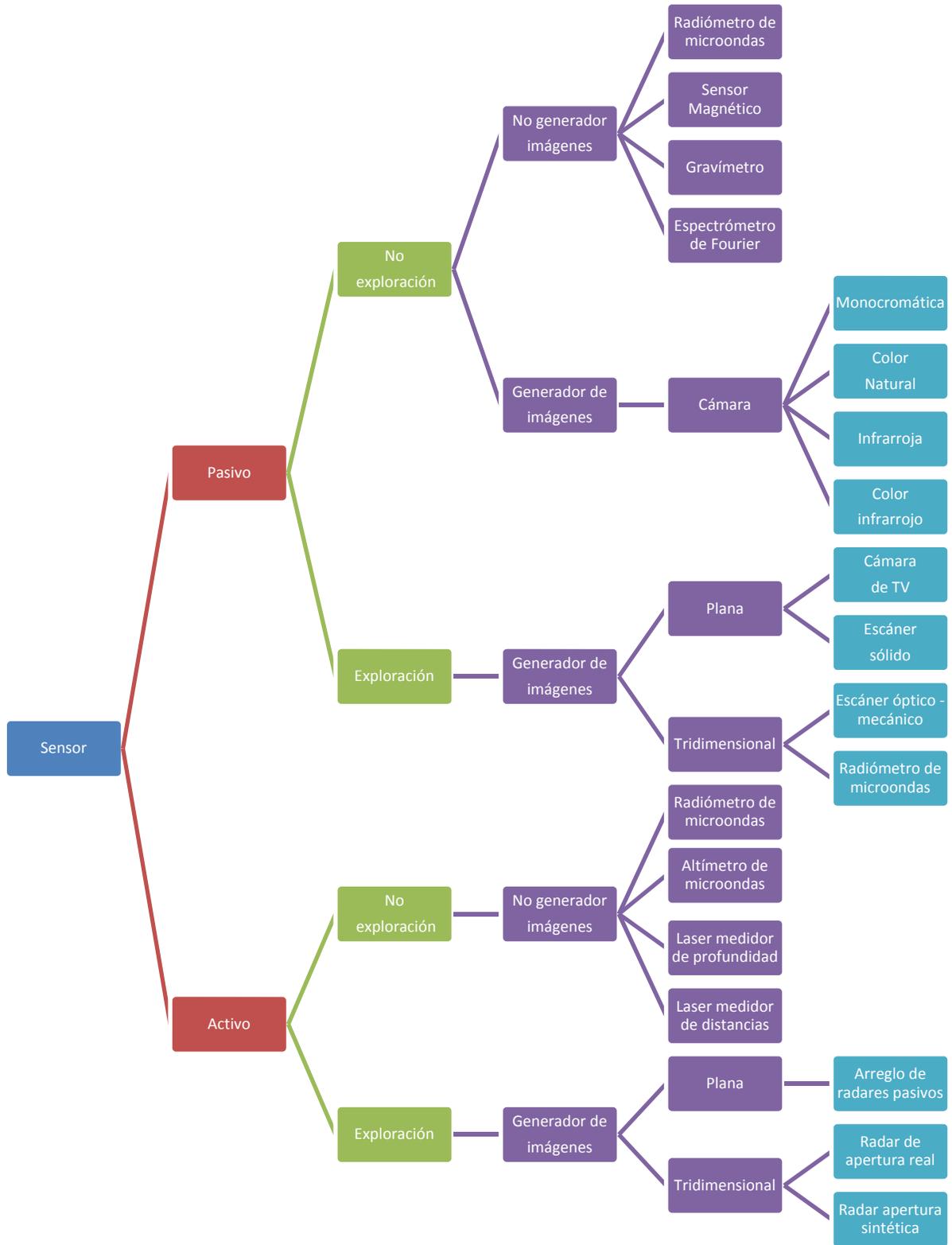
- Radiómetros de microonda

#### Sensores fotográficos

Basan su funcionamiento en la impresión de un objeto sobre películas fotosensibles, contando con un sistema óptico que permite controlar las condiciones de exposición. Actualmente siguen siendo un medio muy utilizado, especialmente en plataformas aéreas. Ejemplos de estos sensores son las cámaras fotográficas, cámaras de televisión (vidicón) y el ojo humano.

##### *Explorador de Barrido*

Es un sistema de detección electrónica con un mecanismo de óptica similar al de la fotografía, el cual permite explorar sistemáticamente la superficie terrestre, facilitando la transmisión a distancia de las imágenes captadas.



**FIGURA 2.2 TIPOS DE SENSORES**

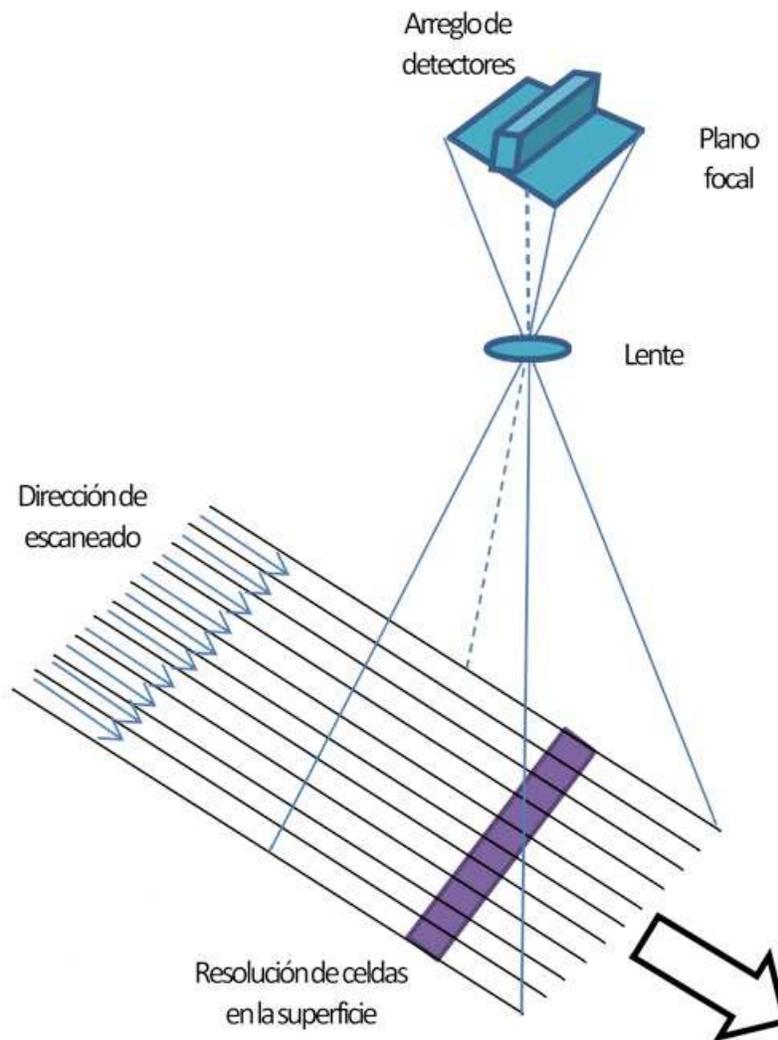
Fuente: "The Remote Sensing Tutorial" Dr. Nicholas M. Short, Sr. 2010.  
 (Adaptado por el autor).

Cuenta con un espejo móvil oscilatorio, que permite explorar una franja de terreno por ambos lados. Inmediatamente después de ser captada, la radiancia recibida se envía a detectores que la amplifican y la convierten en una señal eléctrica asignándole un valor numérico (Figura 2.3).

Estos valores se reciben a determinados intervalos, los cuales determinan la unidad mínima de información adquirida por el sensor, la cual se denomina pixel. Los pixeles están relacionados con el tipo de superficie observada.

Los exploradores de barrido multiespectral descomponen la señal en diferentes longitudes de onda y son enviadas a un detector sensible a dicha longitud de onda.

Trabajan en longitudes de onda mayores del visible (infrarrojo y térmico), además se puede manipular la información captada por los sensores digitalmente y trabajarla en la computadora.



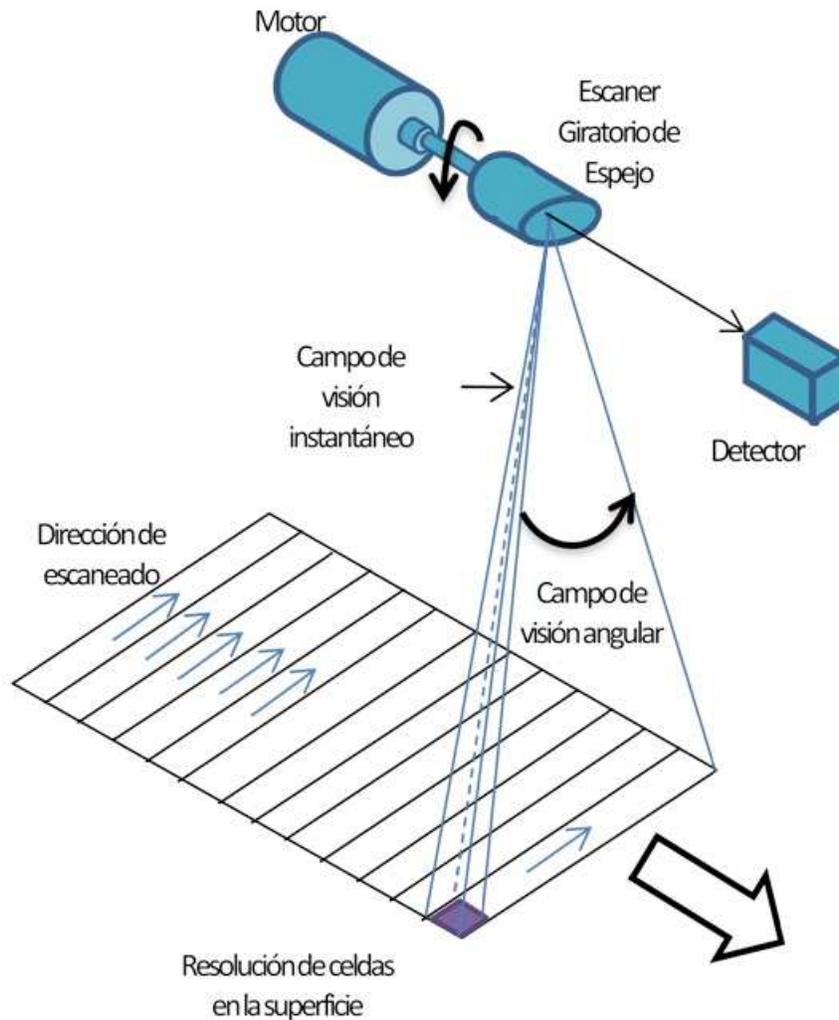
**FIGURA 2.3 DIAGRAMA DE UN EXPLORADOR DE BARRIDO**  
 Fuente: "The Remote Sensing Tutorial" Dr. Nicholas M. Short, Sr. 2010.  
 (Adaptado por el autor)

*Explorador de Empuje*

El dispositivo de exploración es un arreglo de detectores que permite registrar la energía de una franja de la superficie terrestre en forma simultánea, aumentando el campo de visión del sensor. Envían la señal a los detectores por franja, en lugar de pixel, lo cual agiliza la transmisión de datos. Cada banda espectral requiere su propio arreglo de detectores, esto se traduce en una mayor resolución espacial sin sacrificar la resolución espectral (Figura 2.4).

Una limitante de estos exploradores es que su exploración se limita al espectro visible e infrarrojo cercano.

El sistema de detectores del satélite SPOT en su modo multibanda es un ejemplo de la utilización de esta tecnología.



**FIGURA 2.4 DIAGRAMA DE UN EXPLORADOR DE EMPUJE.**  
 Fuente: "The Remote Sensing Tutorial" Dr. Nicholas M. Short, Sr. 2010  
 (Adaptado por el autor)

### *Tubos de Vidicón*

Su funcionamiento es similar al de la cámara de televisión, la imagen se enfoca sobre un foco conductor, construyéndose una réplica electrónica de la imagen original. Puede trabajar en forma pancromática o multibanda.

### *Radiómetros de Microondas*

Estos sensores operan en longitudes de onda larga, generalmente 1 y 100 mm. Por lo tanto, su funcionamiento no se ve afectado por las condiciones atmosféricas ni de iluminación. Están compuestos de un elemento direccional, un receptor (recepción y amplificación de microondas) y un detector. Su desventaja es que cuenta con una resolución espacial baja.

## **SENSORES ACTIVOS**

Detectan la respuesta reflejada por objetos (o la superficie terrestre en general) a los que se les suministra energía generada artificialmente por el mismo sensor. Estos sistemas tienen la ventaja de poder operar en horarios nocturnos o superficies con cobertura nubosa, también son utilizados para estudios oceanográficos. Los más utilizados son el radar y lidar. Ejemplos de estos son los programas RADARSAT, JERS, ERS y SIR.

### *Radar*

Es un radiómetro activo, trabaja en la banda de microondas entre 0.1 cm y 1 m. Gracias a su flexibilidad puede trabajar en cualquier condición atmosférica. Su desventaja es que tienen una baja resolución espacial, debido al escaso diámetro de la antena.

### *Lidar (Light Detection and Ranging)*

El lidar trabaja de manera similar al radar pero con tecnología láser, dicho láser emite pulsos de luz polarizada entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano. Se utilizan principalmente para topografía de precisión desde aviones.

Existen tres tipos: de resonancia, absorción diferencia y de fluorescencia inducida. Cabe mencionar que el lidar de fluorescencia inducida permite detectar manchas de aceite, algas y contaminantes del agua.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS SENSORES

Las características de un sistema sensor son:

### Tipo de órbita

#### Resolución

- Radiométrica
- Espacial
- Espectral
- Temporal

### CARACTERÍSTICAS ORBITALES

El tipo de órbita del satélite está relacionada con el objetivo de la misión, velocidad, de la distancia a la Tierra y los patrones de observación requeridos para llevarla a cabo: monitoreo continuo, cobertura deseada a ciertos intervalos de tiempo, cobertura global.

Los parámetros que definen el tipo de órbita se presentan en el cuadro 2.1.

**CUADRO 2.1 PARÁMETROS QUE DETERMINAN EL TIPO DE ÓRBITA.**

PARÁMETRO	NOMBRE
<b>Forma</b>	Circular Elíptica Parabólica Hiperbólica
<b>Inclinación</b>	Ecuatorial: En el plano del ecuador Semi-Polar: Oblicua al eje del Ecuador Polar: Oblicua al eje de la Tierra
<b>Periodo</b>	Geosíncrona Heliosíncrona
<b>Recurrencia</b>	Recurrente Semi-recurrente

Fuente: "The Remote Sensing Tutorial" Dr. Nicholas M. Short, Sr. 2010  
(Adaptado por el autor)

En los sistemas de percepción remota las órbitas más utilizadas son las órbitas geostacionarias y polares.

### Órbita Geoestacionaria

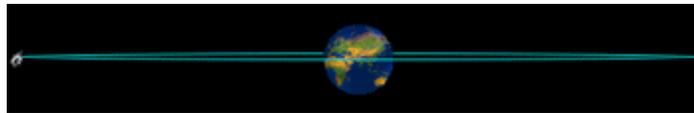
Situadas sobre el Ecuador, de altitudes hasta 3600 km. Los satélites con esta órbita se mueven en la misma dirección de la Tierra y su velocidad se ajusta para mantener su posición sobre un punto determinado de la superficie terrestre. Cuando una órbita geosíncrona se mantiene en el plano ecuatorial, recibe el nombre de geoestacionaria (Figura 2.5).

Las principales ventajas de los satélites con órbitas geoestacionarias son:

- Observan permanentemente una determinada porción de la superficie terrestre, dos satélites geoestacionarios colocados en polos opuestos podrían proporcionar una visión de todo el planeta.
- La gran área de visión y el corto período de repetición los hacen muy útiles para estudios meteorológicos y oceanográficos.
- Uso efectivo de las telecomunicaciones.

Mientras que, las principales desventajas de los satélites con órbitas geoestacionarias son:

- No se obtiene una resolución aceptable sobre las regiones polares.
- Las dificultades técnicas y económicas de poner un satélite en una órbita alta sin poder asegurar un desempeño adecuado de los sensores a bordo.



**FIGURA 2.5 ÓRBITA GEOESTACIONARIA**

Fuente: "La Tierra a Vista de Satélite, Introducción a la Teledetección"  
Jordi Vivancos, Albert Llastarri, Mònica Grau, Daniel Vivancos. 2005.

### Órbita Polar

Su altura oscila entre 300 y 1500 km, giran en un plano paralelo al eje de rotación de la Tierra. Estos satélites pasan sobre un determinado punto a la misma hora cada día, y con cada vuelta se escanea una nueva franja de la superficie de terrestre, se requieren cierto número de vueltas para obtener toda la superficie del planeta.

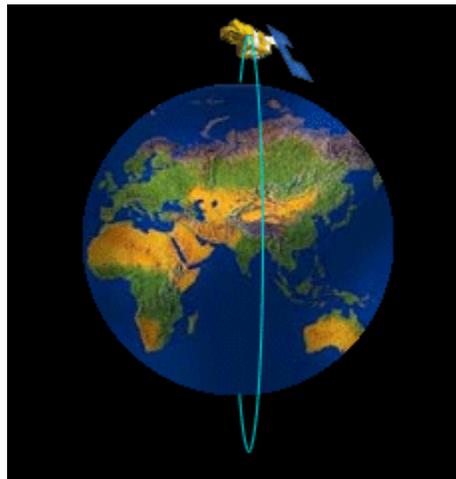
Algunos satélites escanean una franja ancha cada vez cubriendo la totalidad de la superficie terrestre en pocas vueltas. Sin embargo, los llamados satélites de alta resolución, captan franjas muy finas y por lo tanto tardan mucho más tiempo en completar la totalidad de la superficie (Figura 2.6).

Las principales ventajas de los satélites con órbitas polares son:

- La facilidad técnica y económica de colocar el sistema en una órbita baja y de obtener un desempeño adecuado de los sensores a bordo.
- La posibilidad de auxiliar el sistema con misiones tripuladas.

Mientras que, las principales desventajas de los satélites con órbitas polares son:

- La frecuencia de cobertura es baja, del orden de días a semanas.
- La pérdida de datos por cobertura nubosa, pequeña área de cobertura y baja recurrencia.



**FIGURA 2.6 ÓRBITA POLAR**

Fuente: "La Tierra a Vista de Satélite, Introducción a la Teledetección"  
 Jordi Vivancos, Albert Llastarri, Mònica Grau, Daniel Vivancos. 2005.

## RESOLUCIÓN

Se refiere a la habilidad de registrar información de detalle, discriminándola. La precisión de la información obtenida no sólo se refiere al detalle espacial que proporciona el sensor, sino que también al número y anchura de las bandas que alberga, a su frecuencia temporal y a su capacidad de para distinguir variaciones en la energía detectada.

### Resolución Espacial

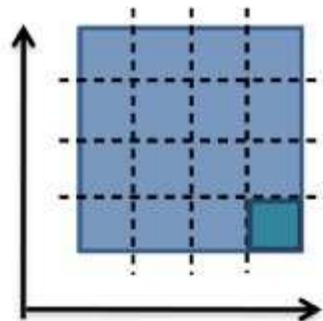
Se refiere al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen, es decir, la mínima unidad de información incluida en la imagen y se denomina pixel. Se mide en unidades de longitud sobre el terreno y depende de la apertura focal del sensor y altura sobre la superficie.

El Cuadro 2.2 muestra la resolución espacial de algunos sistemas sensores y la Figura 2.7 muestra la representación de la resolución espacial.

**CUADRO 2.2 RESOLUCIÓN ESPACIAL DE ALGUNOS SISTEMAS SENSORES**

SISTEMA SENSOR	COBERTURA (m)
QUICKBIRD	2.8
IKONOS	4 x 4
SPOT-HRV	20 X 20
LANDSAT(7)-ETM+	60 x 60
ENVISAT-MERIS	300 / 1200
NOAA-AVHRR	1100 x 1100
METEOSAT	5000 x 5000

Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011  
(Adaptado por el autor)



Dimensión Espacial

- Fila/Columna Coordenadas

Resolución Espacial

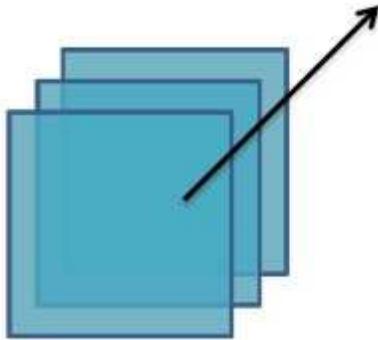
- Tamaño del píxel

**FIGURA 2.7 REPRESENTACIÓN DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL.**

Fuente: "Guide to Satellite Remote Sensing of the Marine Environment"  
Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO. 1992.

### Resolución Espectral

Indica el número y amplitud de las bandas espectrales que puede detectar un sistema sensor. Este brindará información más detallada mientras más bandas proporcionen y más estrechas sean. La Figura 2.8 muestra la representación de la resolución espectral.



Dimensión Espectral

- Numero de bandas espectrales

Resolución Espectral

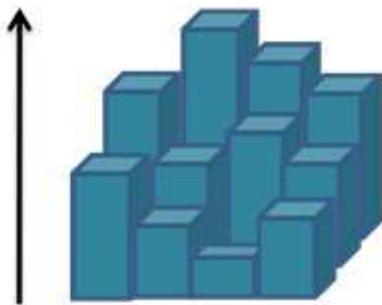
- “Ancho” de bandas espectrales

**FIGURA 2.8 REPRESENTACIÓN DE LA RESOLUCIÓN ESPECTRAL.**

Fuente: “Guide to Satellite Remote Sensing of the Marine Environment”  
Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO. 1992.

**Resolución Radiométrica**

Es la capacidad que tiene el sistema de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe, es decir, el número máximo de niveles digitales que puede detectar un sensor óptico-electrónico. Los primeros sensores ofrecían desde 64 (ojo humano) hasta 128 niveles digitales, actualmente el NOAA-AVHRR ofrece más de 1024. La Figura 2.9 muestra la representación de la resolución radiométrica.



Dimensión Radiométrica

- Valores numéricos de píxeles

Resolución Radiométrica

- Niveles de intensidad

**FIGURA 2.9 REPRESENTACIÓN DE LA RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA.**

Fuente: “Guide to Satellite Remote Sensing of the Marine Environment”  
Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO. 1992

### Resolución Temporal

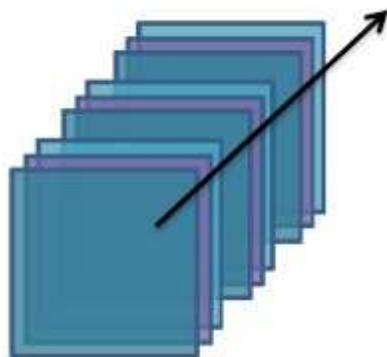
Se refiere a la frecuencia con que el sensor adquiere datos de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura esta función de la órbita del satélite (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente al ángulo de observación y de apertura.

El Cuadro 2.3 muestra la resolución temporal de algunos sistemas sensores y la Figura 2.10 muestra la representación de la resolución temporal.

**CUADRO 2.3 RESOLUCIÓN TEMPORAL DE ALGUNOS SISTEMAS SENSORES**

SISTEMA SENSOR	CICLO COBERTURA
QUICKBIRD	1 a 3.5 días
IKONOS	3 días
SPOT-HRV	26 días
LANDSAT(7)-ETM+	16 días
ENVISAT-MERIS	3 días
NOAA-AVHRR	6 hrs
METEOSAT	30 minutos

Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011  
(Adaptado por el autor)



- Dimensión Temporal
  - Observaciones repetidas del objeto
- Resolución Temporal
  - Tiempo entre observaciones

**FIGURA 2.10 REPRESENTACIÓN DE LA RESOLUCIÓN TEMPORAL.**

Fuente: "Guide to Satellite Remote Sensing of the Marine Environment"  
Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO. 1992

## 2.3 PRINCIPALES SATÉLITES DE LOS RECURSOS NATURALES Y METEOROLÓGICOS

Los satélites meteorológicos proporcionan datos actualizados de las condiciones meteorológicas que afectan a grandes áreas geográficas (excepto las regiones polares).

### SATÉLITES METEOROLÓGICOS DE ÓRBITA GEOESTACIONARIA

Actualmente están en operación cinco satélites:

- GOES E (Este) y GOES W (Oeste) (EE.UU)
- GMS (Japón)
- GOMS (Rusia)
- INSAT (India)
- METEOSAT de la Agencia Espacial Europea (ESA)

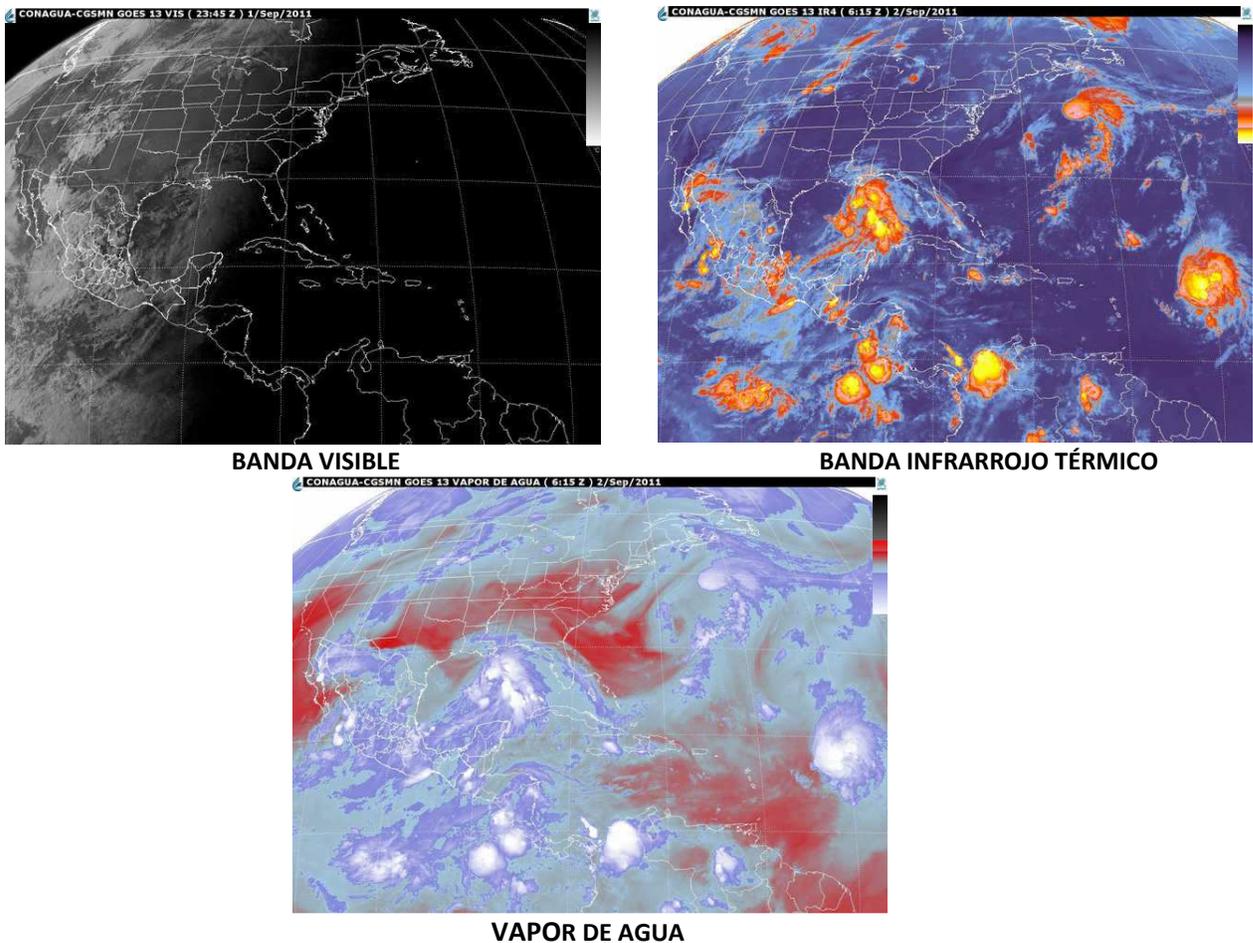


FIGURA 2.11 IMÁGENES DEL SATÉLITE GOES ESTE MOSTRANDO EL TERRITORIO NACIONAL

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional. 2011

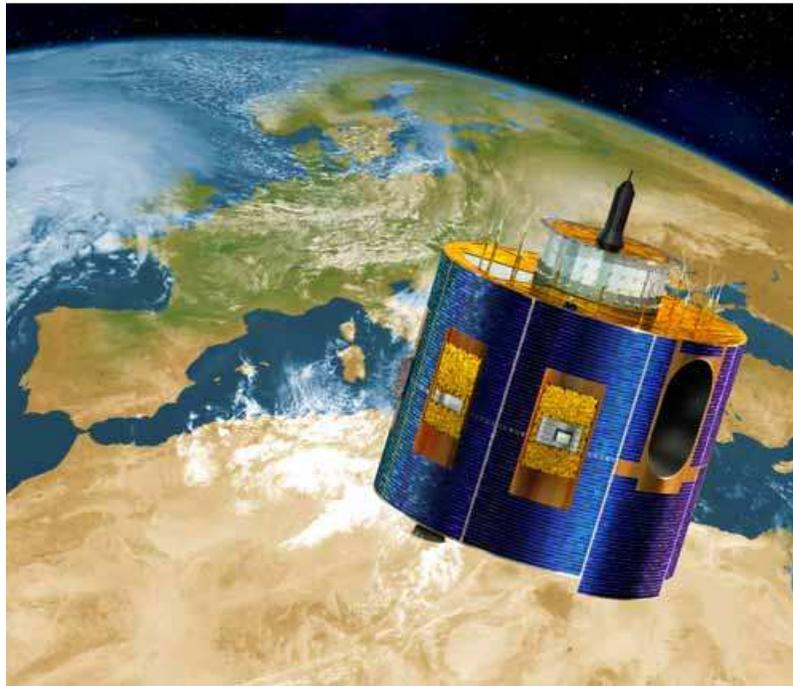
Sus características comunes son:

- Alta resolución temporal: 30 minutos.
- Baja resolución espacial: 2.5 a 5 km/píxel
- Captan las bandas: Visible, infrarrojo térmico y vapor de agua.

La Figura 2.11 muestra las diferentes bandas usadas por el Servicio Meteorológico Nacional, utilizadas para detectar y dar seguimiento a fenómenos meteorológicos severos (tormentas, frentes fríos o huracanes). También se usan para estimar la intensidad de la precipitación. Esta información se usa en la elaboración pronósticos meteorológicos para cada región del país.

### **Meteosat**

Este satélite cuenta con dimensiones de 2.1 m de diámetro y 3.195m de alto. Gira a 100 rpm sobre su eje principal. En cada giro, escanea una franja de 5 km de ancho del este al oeste. La franja está dividida en 2.500 áreas de escaneo. La figura 2.12 muestra una imagen del satélite Meteosat y el cuadro 2.4 algunas especificaciones de su sistema sensor.



**FIGURA 2.12 IMAGEN CONCEPTUAL DEL SATÉLITE METEOSAT**

Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011

**CUADRO 2.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA SENSOR MSS**

SISTEMA DE SENSOR	RESOLUCIÓN ESPECTRAL (μm)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)	FRECUENCIA TEMPORAL	ALTITUD ORBITAL (km)	PERIODO OPERACIONAL
<b>MSS</b>	canal 1: 0.4 – 1.1	2500×2500	Geoestacionario 30 min	36000	23/11/1977 -
	canal 2: 10.5 – 12.5	5000×5000			
	canal 3: 5.7 – 7.1	5000×5000			

Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011

### SATÉLITES METEOROLÓGICOS DE ÓRBITA POLAR

Los más conocidos son los de la serie NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), están en órbita desde 1970. El más moderno es el NOAA 8-11, equipado con radiómetros avanzados de resolución muy elevada (AVHRR) que escanean en cinco canales. Gracias al escáner AVHRR se pueden confeccionar mapas de vegetación y formación de las nubes, medir la temperatura y la humedad de la atmósfera y la superficie terrestre.

Además del escáner AVHRR (cuyas especificaciones técnicas pueden verse en el cuadro 2.5), disponen de los sensores TOMS, SBUV/2 y ERBE. El sensor TOMS mide la concentración de Ozono.

**CUADRO 2.5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA SENSOR AVHRR**

SISTEMA DE SENSOR	RESOLUCIÓN ESPECTRAL (μm)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)	FRECUENCIA TEMPORAL	ALTITUD ORBITAL (km)	PERIODO OPERACIONAL
<b>AVHRR</b>	canal 1: 0.58 – 0.68	1100×1100	6 horas	850 km, cuasipolar, heliosincrónica	1983 -
	canal 2: 0.72 – 1.10				
	canal 3: 3.55 – 3.93				
	canal 4: 10.30 – 11.30				
	canal 5: 11.50 – 12.50				

Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011

## 2.4 PRINCIPALES SATÉLITES USADOS EN PERCEPCIÓN REMOTA

Son satélites de órbita polar diseñados para la observación del medio ambiente de la Tierra y la evaluación de sus recursos naturales.

### LANDSAT

Los satélites Landsat disponen de dos sensores, **MSS** (*Multispectral scanner*) y **TM** (*Thematic mapper*), de 6 y 8 bits de mayor resolución radiométrica respectivamente.

El satélite Landsat 7 incorpora el sensor **ETM** (*Enhanced Thematic Mapper*) que añade a las bandas ya disponibles en el TM, un canal pancromático con resolución espacial de 15 metros. Su órbita se sitúa a 705 Km de altitud, y sobrevuela la misma zona cada 16 días. En el cuadro 2.6 se muestran las características técnicas de la serie Landsat y en la Figura 2.13 una imagen conceptual de la satélite Landsat 7.

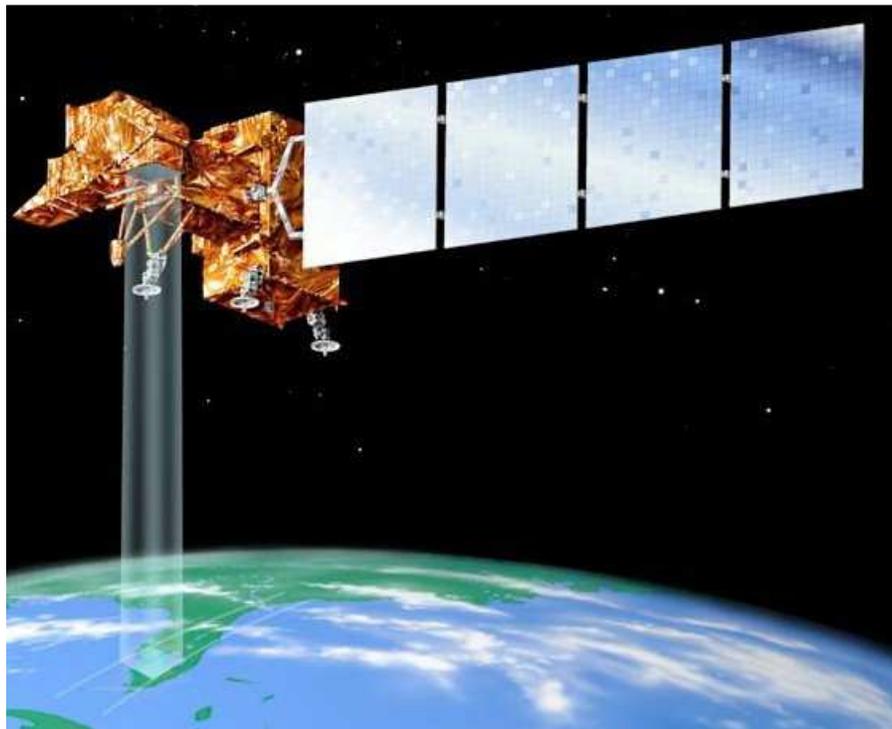


FIGURA 2.13 IMAGEN CONCEPTUAL DEL SATÉLITE LANDSAT

Fuente: NASA. 2010

**CUADRO 2.6 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA SERIE LANDSAT**

	PERIODO OPERACIONAL	ALTITUD (km)	FRECUENCIA TEMPORAL	SENSOR	BANDA: INTERVALO ESPECTRAL ( $\mu\text{M}$ )	RESOLUCIÓN ESPACIAL (M)
<b>Landsat 1</b>	23/07/1972 06/01/1978	918	18	RBV	Canal 1: 0.48 – 0.57 Canal 2: 0.58 – 0.68 Canal 3: 0.70 – 0.83	80 x 80 80 x 80 80 x 80
				MSS	Canal 4: 0.50 – 0.60 Canal 5: 0.60 – 0.70 Canal 6: 0.70 – 0.80 Canal 7: 0.80 – 1.10	79 x 79 79 x 79 79 x 79 79 x 79
<b>Landsat 2</b>	22/01/1975 25/02/1982	918	18	Idéntico al Landsat 1		
<b>Landsat 3</b>	05/03/1978 31/11/1982	918	18	RBV	Canal 1: 0.50 – 0.75	40 x 40
				MSS	Canal 4: 0.50 – 0.60 Canal 5: 0.60 – 0.70 Canal 6: 0.70 – 0.80 Canal 7: 0.80 – 1.10	79 x 79 79 x 79 79 x 79 79 x 79
<b>Landsat 4</b>	16/07/1982 02/1983	710	16	TM	Canal 1: 0.45 – 0.52 Canal 2: 0.52 – 0.60 Canal 3: 0.63 – 0.69 Canal 4: 0.76 – 0.90 Canal 5: 1.55 – 1.75 Canal 6: 10.40 – 12.50 Canal 7: 2.08 – 2.35	30 x 30 30 x 30 30 x 30 30 x 30 30 x 30 120 x 120 30 x 30
				MSS	Canal 4: 0.50 – 0.60 Canal 5: 0.60 – 0.70 Canal 6: 0.70 – 0.80 Canal 7: 0.80 – 1.10	79 x 79 79 x 79 79 x 79 79 x 79
<b>Landsat 5</b>	01/03/1984	710	16	Idéntico al Landsat 4		
<b>Landsat 6</b>	05/10/1993 05/10/1993	705	16	Fallos en el sistema		
<b>Landsat 7</b>	15/04/1999	705	16	ETM	Canal 1: 0.45 – 0.52 Canal 2: 0.52 – 0.60 Canal 3: 0.63 – 0.69 Canal 4: 0.76 – 0.90 Canal 5: 1.55 – 1.75 Canal 6: 10.40 – 12.50 Pancromática: 0.50 – 0.73	30 x 30 30 x 30 30 x 30 30 x 30 30 x 30 60 x 60 15 x 15

Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011  
(Adaptado por el autor)

## SPOT

El proyecto SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre) es una iniciativa francesa en colaboración con Bélgica y Suecia. El primer lanzamiento de esta serie fue en 1986 y hasta la fecha se han puesto en órbita 5 satélites. El más reciente Spot-5 se puso en órbita el 4 de mayo del 2002. Los satélites se sitúan en órbita heliosíncrona casi polar con una frecuencia de paso de 26 días. Los satélites 1, 2 y 3 contaban con el sensor HRV (High Resolution Visible) que proporcionaba imágenes las bandas visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Tiene mayor resolución espacial que el Landsat.

En el Cuadro 2.7 se muestran las bandas espectrales y resoluciones de la serie Spot, mientras que la Figura 2.14 una imagen conceptual del satélite SPOT.



**FIGURA 2.14 IMAGEN CONCEPTUAL DEL SATÉLITE SPOT**

Fuente: Spot Image. 2010.

CUADRO 2.7 BANDAS ESPECTRALES Y RESOLUCIONES DE LA SERIE SPOT

SENSORES	ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	TAMAÑO DE PÍXELES	BANDAS ESPECTRALES
<b>Spot 5</b>	Pancromático	2,5 m o 5 m	0.48 - 0.71 $\mu\text{m}$
	B1: verde	10 m	0.50 - 0.59 $\mu\text{m}$
	B2: rojo	10 m	0.61 - 0.68 $\mu\text{m}$
	B3: infrarrojo cercano	10 m	0.78 - 0.89 $\mu\text{m}$
	B4: infrarrojo medio (MIR)	20 m	1.58 - 1.75 $\mu\text{m}$
<b>Spot 4</b>	Monoespectral	10 m	0.61 - 0.68 $\mu\text{m}$
	B1: verde	20 m	0.50 - 0.59 $\mu\text{m}$
	B2: rojo	20 m	0.61 - 0.68 $\mu\text{m}$
	B3: infrarrojo cercano	20 m	0.78 - 0.89 $\mu\text{m}$
	B4: infrarrojo medio (MIR)	20 m	1.58 - 1.75 $\mu\text{m}$
<b>Spot 1</b>	Pancromático	10 m	0.50 - 0.73 $\mu\text{m}$
<b>Spot 2</b>	B1: verde	20 m	0.50 - 0.59 $\mu\text{m}$
<b>Spot 3</b>	B2: rojo	20 m	0.61 - 0.68 $\mu\text{m}$
	B3: infrarrojo cercano	20 m	0.78 - 0.89 $\mu\text{m}$

Fuente: Spot Image. 2011.

En el satélite SPOT-4 se modificaron los sensores, introduciéndose el HRVIR que añade a los canales del HRV una banda infrarroja. Se incorporó también el sensor VEGETATION orientado al seguimiento diario de la cobertura vegetal a escala regional o planetaria (la anchura de imagen es de 2250 Km y la resolución espacial de 1.15 Km).

SPOT-5 mejora notablemente la resolución espacial de las imágenes (1 píxel = 5m) además, incorpora capacidades estereoscópicas y una nueva versión del sensor VEGETATION, que mejora el estudio dinámico de la cobertura vegetal.

**ENVISAT**

El Envisat, de la Agencia Espacial Europea, es actualmente el satélite medioambiental más avanzado del mundo. Entre los parámetros que detecta se incluyen la presencia de gases en la atmósfera, concentración de fitoplancton en los mares y corrientes submarinas o incendios en zonas muy alejadas.

En el Cuadro 2.8 se muestran las características técnicas de los sistemas sensores del ENVISAT, mientras que la Figura 2.15 una imagen del satélite SPOT.

**CUADRO 2.8 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS SISTEMAS SENSORES DEL ENVISAT**

SISTEMA SENSOR	RESOLUCIÓN ESPECTRAL (µm)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)	ANCHURA DE ESCANEADO (km)	FRECUENCIA TEMPORAL	ALTITUD ORBITAL	PERIODO OPERACIONAL
<b>ASAR</b>	5,6 cm (C-banda)	30×30 150×150 1000×1000	100 / 400	35 días / variable		
<b>MERIS</b>	15 canales: 0,390 - 1,040	300 / 1200	1250	~3 días		
<b>AATSR</b>	canal 1: 1,58 - 1,64 canal 2: 3,55 - 3,93 canal 3: 10,4 - 11,3 canal 4: 11,5 - 12,5 canal 5: 0,556 canal 6: 0,659 canal 7: 0,0.865	1000×1000	500	~6 días	800 km, cuasipolar helio- sincrónica	Marzo 2002 - ~
<b>GOMOS SCIAMA CHY MIPAS</b>	Mediciones atmosféricas	-	-	1 día		

Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011



Figura 2.15 Imagen del satélite ENVISAT  
 Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011

## TERRA

Fue puesto en órbita por la NASA el 18 de diciembre de 1999. Es el primero del programa Earth Observing System (EOS), en el que participan las agencias espaciales de EEUU, Canadá y Japón. Su objetivo científico es el de efectuar la primera verificación completa de la salud del planeta Tierra. En particular, la misión está diseñada para estudiar el funcionamiento de los ciclos del carbono y de la energía.

Terra dispone de cinco sensores que miden aspectos específicos de nuestro planeta:

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) FOTOSENSOR desarrollado para obtener mapas detallados de la temperatura, reflectancia y elevación de la superficie terrestre.

CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) Mide el balance global de radiación de la Tierra. Aporta también datos sobre las propiedades de las nubes y su papel en los flujos de radiación desde la superficie terrestre hasta las zonas altas de la atmósfera.

MISR (Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer) Explora la superficie terrestre con nueve cámaras, cada una de ellas apuntando a un ángulo de observación diferentes. Las imágenes que toman son en cuatro bandas: azul, verde, rojo, e infrarrojo próximo. Este modelo de captación distingue los diferentes tipos de nubes, los aerosoles y las cubiertas de la superficie terrestre.

MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer ) Escanea cada punto del planeta cada 1 o 2 días en 36 bandas espectrales. Gracias a esta amplia capacidad de captación, este sensor percibe más datos de los signos vitales de la Tierra que los otros sensores del satélite Terra. También mide el porcentaje de la superficie de la Tierra cubierta por nubes. Combinando las lecturas de MODIS con los datos de MISR y CERES, es posible establecer el impacto de nubes y aerosoles en el balance energético de la Tierra. Detecta emisiones de incendios.

MOPITT (Measurement of Pollution in the Troposphere) Diseñado para captar datos de la baja atmósfera y observar su interacción con la biosfera marina y terrestre. Con los datos que aporta se estudia la distribución, el transporte y las fuentes de monóxido de carbono y de metano en la atmósfera.

## EO-1

Lanzado el 21 de Noviembre del año 2000 y es la continuación de las misiones Landsat. Cuenta con tres sensores de teledetección:

**ALI** (*Advanced Land Imager*) Captador de Imágenes Terrestres

**Hyperion** (*Imaging Spectrometer*) Es el primer sensor hiperespectral desde satélite. Dispone de 220 bandas que cubren de 0.4 – 2.5  $\mu\text{m}$  con 30 metros de resolución. Cada escena cubre 7.5 X 100 Km. capta los colores de las imágenes de la superficie de la Tierra sin dejar áreas descubiertas, tiene la habilidad de discriminar imágenes.

**LEISA/AC** (*Linear Imaging Spectrometer Array/Atmospheric Corrector*) es un conjunto de tecnologías que capturan imágenes hiperespectrales. Cuando las imágenes transmitidas por satélites son distorsionadas por los gases en la atmósfera, este sensor restaura las imágenes a su forma original.

## IRS (Indian Remote Sensing Satellite)

El primer satélite de la familia el IRS-1C fue lanzado el 28 de Diciembre de 1995 por un cohete ruso. Tienen una órbita heliosíncrona, de 907 km de altitud y frecuencia de paso de 24 días. Dispone de los sensores LISS (4 bandas espectrales) y WiFS (Wide Field Sensor) especializado en estudios de vegetación.

## SATELITES DE ALTA RESOLUCIÓN

Son instrumentos muy complejos, con una demanda creciente por sus numerosas aplicaciones en campos muy diversos como: la cartografía, la identificación de recursos naturales, la gestión de riesgos y la defensa. Los más destacados son los siguientes:



Satélite IKONOS

### *IKONOS*

Satélite comercial puesto en órbita en Septiembre del 1999. IKONOS puede distinguir objetos de menos de un metro cuadrado en el suelo. Este nivel de resolución, desde una altitud de órbita de 680 km representa un avance considerable en resolución de imagen comparado con los sistemas anteriores.

#### **Datos técnicos:**

Órbita heliosíncrona: 681 km; 14 órbitas al día a 7 km/seg. Resolución en blanco y negro: 1 m. Resolución e imágenes a color (4 bandas) 4 m. Las imágenes cubren una superficie de 11 km x 11 km. Es programable y su toma de imágenes orientable, permite revisar un mismo sitio en menos de 3 días.

### *QUICKBIRD*

QuickBird, lanzado en Octubre de 2001, es el satélite comercial de mayor resolución que hay en funcionamiento. Recoge imágenes de la superficie de la Tierra durante las horas de sol, está diseñado para cubrir grandes áreas con gran eficacia y precisión, puede adquirir anualmente imágenes de hasta 75 millones de metros cuadrados de la superficie de la Tierra. Aplicaciones a la cartografía, urbanismo, investigación meteorológica y vigilancia militar.



Satélite QUICKBIRD

#### **Datos técnicos:**

Órbita heliosíncrona de 600 Km. Resolución espacial de: 61 cm (Blanco y negro) y 2.5 m (Color a 4 bandas). Área cubierta por cada imagen: superficie de 16,5 km x 16,5 km.



Satélite ORBVIEW

### *ORBVIEW*

Satélite comercial norteamericano de la empresa Orbimage.

**Datos técnicos:**

Resolución espacial: 1m en modo pancromático y 4m en modo multiespectral (4 bandas). Cobertura de la escena: 8 Km x 8 Km. Altitud orbital: 470 Km.

### *FORMOSAT – 2*

Satélite de alta resolución operado por el NSPO (National Space Programme Office) de Taiwan fué lanzado el 20 de mayo de 2004.

**Datos técnicos:**

Resolución: de imágenes en blanco y negro de 2 m de resolución, imágenes color de 8 m de resolución (4 bandas espectrales: infrarrojo cercano, rojo, verde y azul). Cobertura de 24 km x 24 km por escena.



Satélite FORMOSAT-2

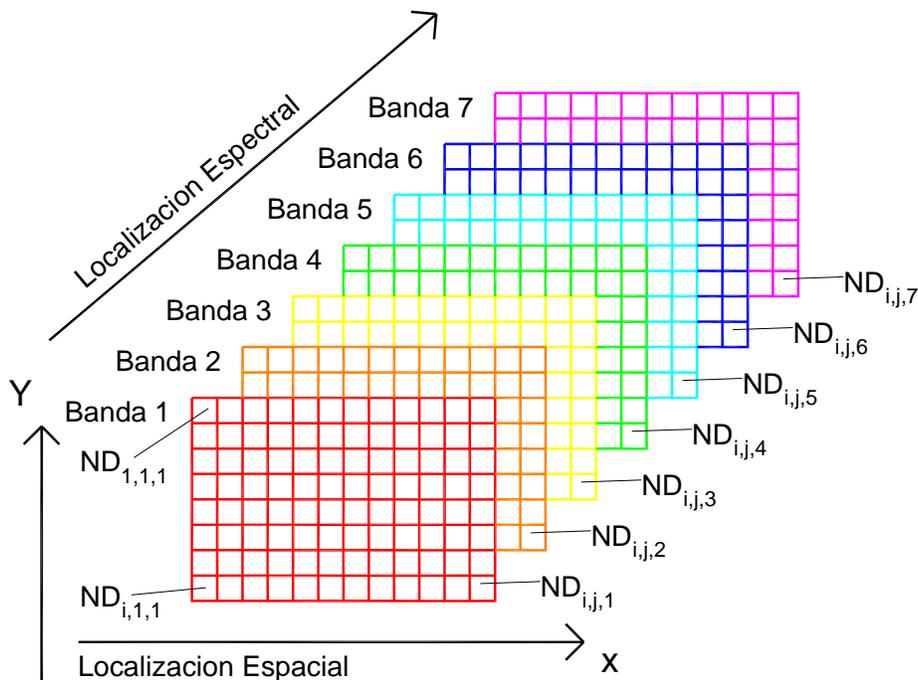
### 3. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES

En percepción remota se deben comprender los datos proporcionados por los sensores para darles una interpretación adecuada.

Dicho esto, es muy importante conocer las diferencias entre una imagen satelital y una fotografía. Las imágenes satelitales son captadas por medio de un fotosensor electrónico o mediante la respuesta producida por una emisión de radar. Su formato es digital, lo cual permite que de su proceso de análisis se obtenga información más detallada. Las fotografías tienen un formato analógico, se obtienen mediante películas fotográficas y diversos procesos de revelado químico. Si se desean analizar primero deben ser convertidas a una imagen digital por medio de un escáner.

El formato analógico guarda los datos continuamente, por ejemplo: cuando se toma una foto, toda la información se extiende sobre la imagen. El formato digital guarda cada bloque de información diferenciadamente; al acercarnos con el zoom se ven cuadritos de distintas tonalidades.

Se puede decir que una imagen digital está compuesta por una matriz de cuadrados, los cuales se denominan píxeles. Un pixel representa una unidad mínima de información de una imagen digital. La intensidad de cada pixel corresponde al brillo promedio o intensidad de la radiación medida electrónicamente sobre el área que se está explorando, dicha intensidad se define con un número entero llamado nivel digital (ND).

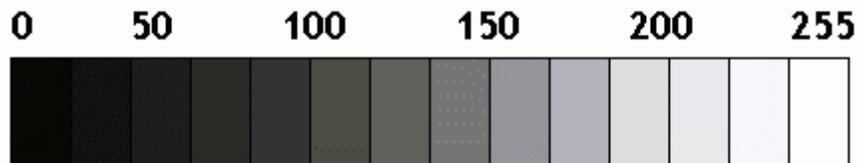


**FIGURA 3.1 ORGANIZACIÓN DE UNA IMAGEN DIGITAL**

Fuente: "Fundamentos de Teledetección Espacial", Chuvieco Emilio, 1990.  
 (Adaptada por el autor)

En la Figura 3.1 se presenta la organización de una imagen digital y se observa que tiene tres dimensiones: las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras que la tercera se refiere a su dimensión espectral. Las filas de la matriz representan la dirección Norte-Sur, mientras que las columnas la orientación Oeste-Este.

Normalmente el ND de un pixel va de 0 (negro) a 255 (blanco), así se puede tener una imagen monocroma. Por convención, las medidas más intensas están codificadas en blanco y las más débiles en negro. En la Figura 3.2 se observan distintos tonos de grises y sus correspondiente ND.



**FIGURA 3.2 DISTINTOS TONOS DE GRISES Y SU VALOR DE ND CORRESPONDIENTE.**

Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011

### 3.1 PREPROCESAMIENTO Y RECTIFICACIÓN DE LA IMAGEN

Al adquirir imágenes a través de sensores remotos, se presentan una serie de alteraciones debidas al proceso de captación de datos. Entonces es necesario preprocesar los datos captados antes de analizarlos. Las correcciones que se hacen son:

- Restauración de líneas o pixeles perdidos
- Bandeado de la imagen
- Corrección atmosférica
- Corrección geométrica

#### RESTAURACIÓN DE LÍNEAS O PÍXELES PERDIDOS

Cuando el sensor no está funcionando correctamente puede suceder que una línea o pixel tenga valores ND muy bajos o nulos. Se pueden identificar en la imagen como líneas blancas o negras, o pixeles aislados.

Para estimar el valor ND de los pixeles perdidos se considera que los ND de los pixeles vecinos tienen a asociarse espacialmente. Es decir, los valores de radiancia provenientes de una superficie terrestre tienden a correlacionarse con los valores de superficies vecinas. La solución a este problema es sustituir el ND del pixel perdido por su valor precedente o posterior.

$$ND_{ij} = ND_{i-ij} \quad (3.1)$$

Donde:

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

$ND_{i-j}$  es el ND del pixel en la línea precedente, si estamos sustituyendo por una línea posterior el subíndice a utilizar es  $ND_{i+j}$

### BANDEADO DE LA IMAGEN

Los exploradores de barrido cuentan con varios detectores por banda, su exploración se hace en varias líneas simultáneamente. Estos detectores deben traducir la señal detectada uniformemente para que la radiancia recibida no se codifique en ND distintos.

El fenómeno de bandeo se debe a una mala calibración entre los detectores de banda que forman el sensor y es especialmente visible al explorar zonas de baja radiancia (zonas marinas o con sombra). El efecto es periódico, ya que cada detector registra una de cada  $n$  líneas ( $n$  = número de detectores por banda).

Para corregir el bandeo se asume que en caso de estar bien calibrado, los histogramas (ND vs Frecuencia) obtenidos por cada detector serían similares entre si y similar al histograma global de la imagen que se toma como referencia.

Primero se calculan los coeficientes de ajuste  $a_i$  y  $b_i$  para hacer una correlación lineal de cada uno de los detectores.

$$a_i = \frac{s}{s_i} \quad (3.2)$$

$$b_i = ND - a_i ND_i \quad (3.3)$$

Donde:

$s$  es la desviación estándar del histograma global

$s_i$  es la desviación estándar del histograma parcial

$ND$  es la media del histograma global

$ND_i$  es la media del histograma parcial

Entonces los ND de la imagen se recalculan como:

$$ND'_{ij} = a_i ND_{ij} + b_i \quad (3.4)$$

### CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

En esta corrección se evalúan y tratan de eliminar las distorsiones de la atmósfera que causan que los valores de radiancia detectados por el sensor no correspondan exactamente a la radiancia de la superficie terrestre. Estas distorsiones se deben principalmente a la dispersión y, en menor grado, a la atenuación que sufre la radiación de la atmósfera.

La dispersión depende de la longitud de onda, así como de la presencia de vapor de agua y aerosoles variables en el tiempo y espacio. Debido a estas variaciones, la dispersión atmosférica no es constante en una imagen y puede haber zonas más afectadas que otras.

El método más común para corregir la radiancia atmosférica es el de Corrección del Histograma por sus Valores Mínimos. Este método considera que las áreas correspondientes a zonas de sombra o agua clara deben presentar un valor de radiancia muy cercana a cero. La corrección se efectúa al restar a todos los ND de cada banda el ND mínimo de esa misma banda, situando el histograma en cero.

### CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

Los datos obtenidos por un sensor pueden ser afectados por distorsiones geométricas debidas a la geometría del sensor, inestabilidad en la plataforma e incluso a la rotación de la Tierra y su curvatura.

Las imágenes obtenidas no están referenciadas geográficamente, de tal forma que se deben de transformar las coordenadas de la imagen en coordenadas cartográficas (siendo las más comunes las coordenadas UTM) poder integrarla con otras capas de información o con otras imágenes en un entorno geográfico.

Para corregir todas las distorsiones geográficas a la vez, se realiza una transformación dada con los siguientes polinomios:

$$x = a_0 + a_1r_n + a_2c_n \quad (3.5)$$

$$y = b_0 + b_1r_n + b_2c_n \quad (3.6)$$

Donde:

$r_n$  es el numero de renglón

$c_n$  es el numero de columna

$x$  y  $y$  son las coordenadas del mapa

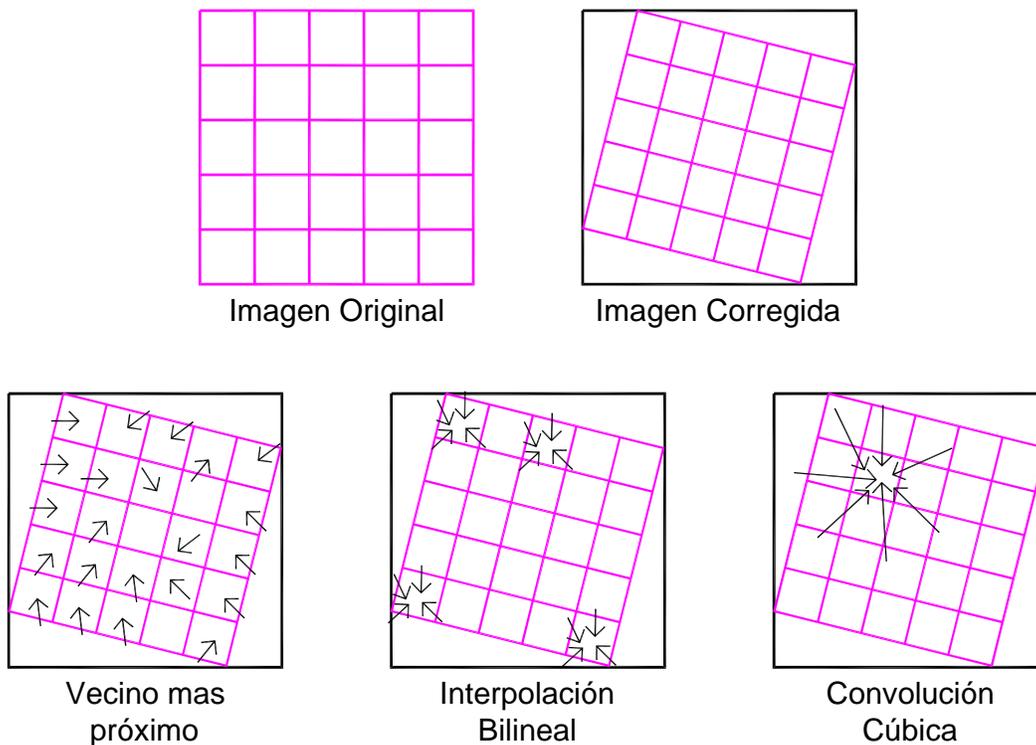
Para hacer la transformación se deben calcular los coeficientes de los polinomios ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ) y seleccionar puntos que puedan localizarse en el mapa ( $x$ ,  $y$ ) y en la imagen (renglón, columna). Estos puntos deben ser perfectamente identificables en la imagen y mapa, además de que no estén sujetos a cambios temporales como por ejemplo carreteras, vías de ferrocarril, presas, etc. Entre más puntos se seleccionen menor será el error en cuanto a su localización real.

La exactitud de la transformación se obtiene con el promedio de los errores en los puntos de referencia, este error es llamado error medio cuadrático (RMS) y se valora comparando las coordenadas calculadas con la transformación y las reales. Si el valor no es satisfactorio se calcula de nuevo la ecuación de ajuste y el proceso termina cuando todos los puntos presentan un valor de RMS dentro de los límites establecidos como aceptables.

Después de la transformación se procede a relacionarla con la imagen haciendo una referencia para cada pixel, es decir, se geo-referencia la imagen: se le asignan coordenadas a cada pixel de la imagen, aun así su geometría no está corregida por las distorsiones geométricas.

Esta última corrección requiere que se transformen los ND de la imagen original a la posición de la imagen corregida. Para esta transformación se aplican diversos métodos de interpolación para calcular los valores radiométricos de los pixeles en la nueva imagen, se utilizan tres métodos (ejemplificados en la Figura 3.3) dependiendo de la complejidad de la transformación realizada y del tipo de datos:

- 1. Método del vecino más próximo.** Sitúa en cada pixel de la imagen corregida el valor del pixel más cercano en la imagen original. Es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los valores originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que se produce en rasgos lineales de la imagen (como carreteras), ya que una vez corregidas aparecerían como líneas quebradas.
- 2. Interpolación bilineal.** Se promedian los valores de los cuatro pixeles más cercanos de la imagen original. Este promedio se pondera según la distancia del pixel original al corregido. Este método reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales pero difumina los contrastes espaciales de la imagen original.
- 3. Convulsión cúbica.** Se considera un promedio ponderado de los 16 pixeles más próximos. La imagen corregida es la más correcta pero se requiere de un volumen de cálculo mucho mayor.



**FIGURA 3.3 DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN**

Fuente: "Fundamentos de Teledetección Espacial", Chuvieco Emilio, 1990.  
 (Adaptada por el autor)

### 3.2 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DIGITAL DE LA IMAGEN

Después de que la imagen se ha sometido a los procesos de corrección radiométrica y geométrica, se procede a mejorar la interpretación visual de la imagen para que los datos de interés presentes en ella sean más evidentes.

#### REALCE DE IMAGEN

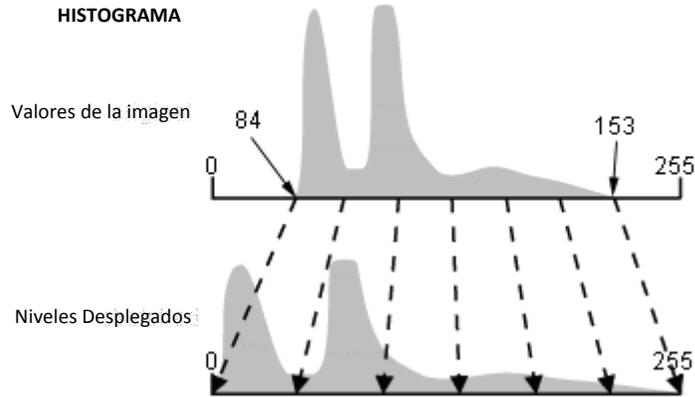
##### Realce de Contraste

El objetivo del realce de contraste es mejorar la interpretación visual de una imagen, haciendo evidentes las características en la escena. El ojo humano es excelente en distinguir las características especiales de una imagen, pero pobre en la discriminación de diferencias sutiles como la reflectancia. Usando las técnicas de realce de contraste, estas pequeñas diferencias se vuelven fácilmente observables.

Las técnicas utilizadas para el realce de contraste son:

*Expansión Lineal*

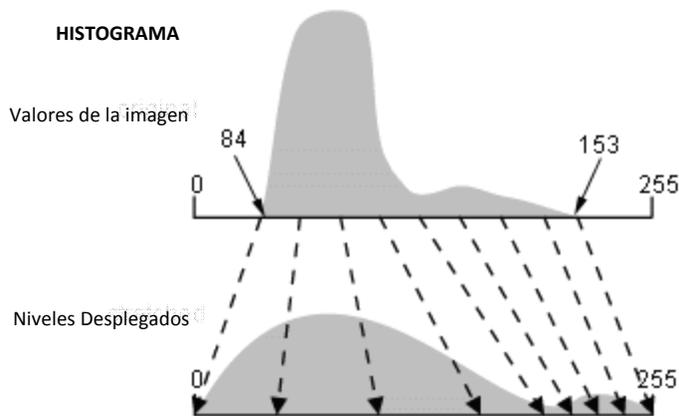
Es el realce de contraste más simple. Un valor de ND mínimo del histograma original se asigna al negro extremo (0), y el ND máximo se asigna al blanco extremo (255); el resto de los valores se distribuyen linealmente entre ambos extremos. Un inconveniente es que al usar el ND mínimo en cero y el máximo en 255 todavía produce, en la mayoría de los casos, una imagen bastante oscura. Incluso aunque todos los tonos de gris sean utilizados, la mayoría de los píxeles son desplegados en gris medio.



**FIGURA 3.4 REALCE DE CONTRASTE POR EXPANSIÓN LINEAL.**  
 Fuente: "Fundamentals of Remote Sensing" Canada Center for Remote Sensing. 2012.

*Histograma Ecuilizado*

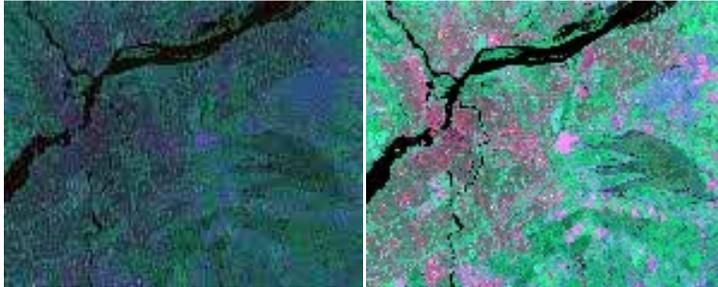
Es una técnica de expansión no lineal. Los ND son redistribuidos considerando su frecuencia. Es decir, aquellos ND con el mayor número de píxeles serán los que, proporcionalmente, ocupen un mayor ámbito de visualización en el monitor. Esta técnica ofrece mejores resultados que los de la expansión lineal.



**FIGURA 3.5 REALCE DE CONTRASTE POR HISTOGRAMA ECUALIZADO.**  
 Fuente: "Fundamentals of Remote Sensing" Canada Center for Remote Sensing. 2012.

*Expansión Espacial de Contraste.*

Es muy similar a la expansión lineal, sólo que en esta técnica se restringe el contraste a un ámbito específico de ND en donde la cubierta de interés se manifieste con mayor claridad (Figura 3.6). Esta técnica es muy usada cuando se quiere resaltar solamente cierto tipo de cubierta, por ejemplo agua.



**FIGURA 3.6 IMAGEN ANTES Y DESPUÉS DE SER SOMETIDA A LA EXPANSIÓN ESPACIAL DE CONTRASTE.**

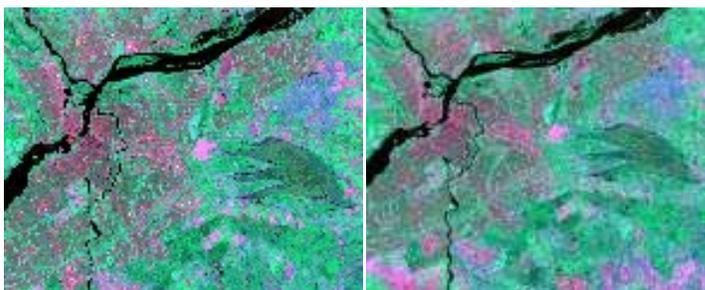
Fuente: “Fundamentals of Remote Sensing” Canada Center for Remote Sensing. 2012.

**Realce Local o Espacial**

Los procedimientos de realce espacial modifican los valores de píxeles en una imagen. Comúnmente se usan filtros para corregir y restaurar imágenes afectadas por un mal funcionamiento del sistema; también se usan para realzar las imágenes para una interpretación visual y extraer ciertas características de la imagen.

Los filtros espaciales están diseñados para resaltar o suprimir las características específicas de una imagen en función de su frecuencia espacial. La frecuencia espacial se refiere a la desigualdad en las variaciones de los ND en una imagen. En áreas de frecuencia espacial alta, los ND cambian abruptamente sobre un número relativamente pequeño de píxeles y se les conoce como imágenes ásperas. Las áreas de imágenes suaves se caracterizan por una frecuencia espacial baja, donde los ND cambian gradualmente sobre un gran número de píxeles.

Un filtro de bajo paso sirve para filtrar frecuencias altas obteniendo como resultado una imagen con apariencia suave y homogénea (Figura 3.7). Este filtro es utilizado para restaurar errores aleatorios que pueden presentarse en los ND de la imagen.

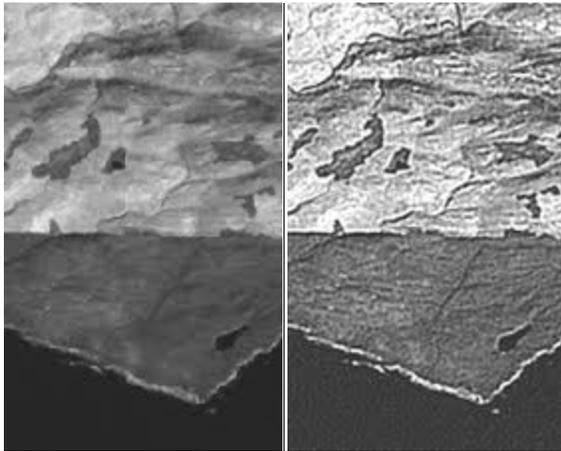


**FIGURA 3.7 IMAGEN ANTES Y DESPUÉS DE SER SOMETIDA AL FILTRO DE BAJO PASO.**

Fuente: “Fundamentals of Remote Sensing” Canada Center for Remote Sensing. 2012.

Los filtros de paso alto funcionan de forma contraria a los filtros de bajo paso y sirven para agudizar la aparición de los detalles finos de una imagen (Figura 3.8). Estos filtros se encargan de acentuar las frecuencias altas y disminuir frecuencias bajas.

Dentro de los filtros de alto paso se encuentran los filtros gradiente o direccionales y están diseñados para destacar características lineales o bordes, tales como caminos o límites del campo. Estos filtros también se pueden diseñar para mejorar características que están orientadas en cierta dirección.



**FIGURA 3.8 IMAGEN ANTES Y DESPUÉS DE SER SOMETIDA AL FILTRO DE ALTO PASO.**

Fuente: “Fundamentals of Remote Sensing” Canada Center for Remote Sensing. 2012.

### **VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES MULTIBANDA**

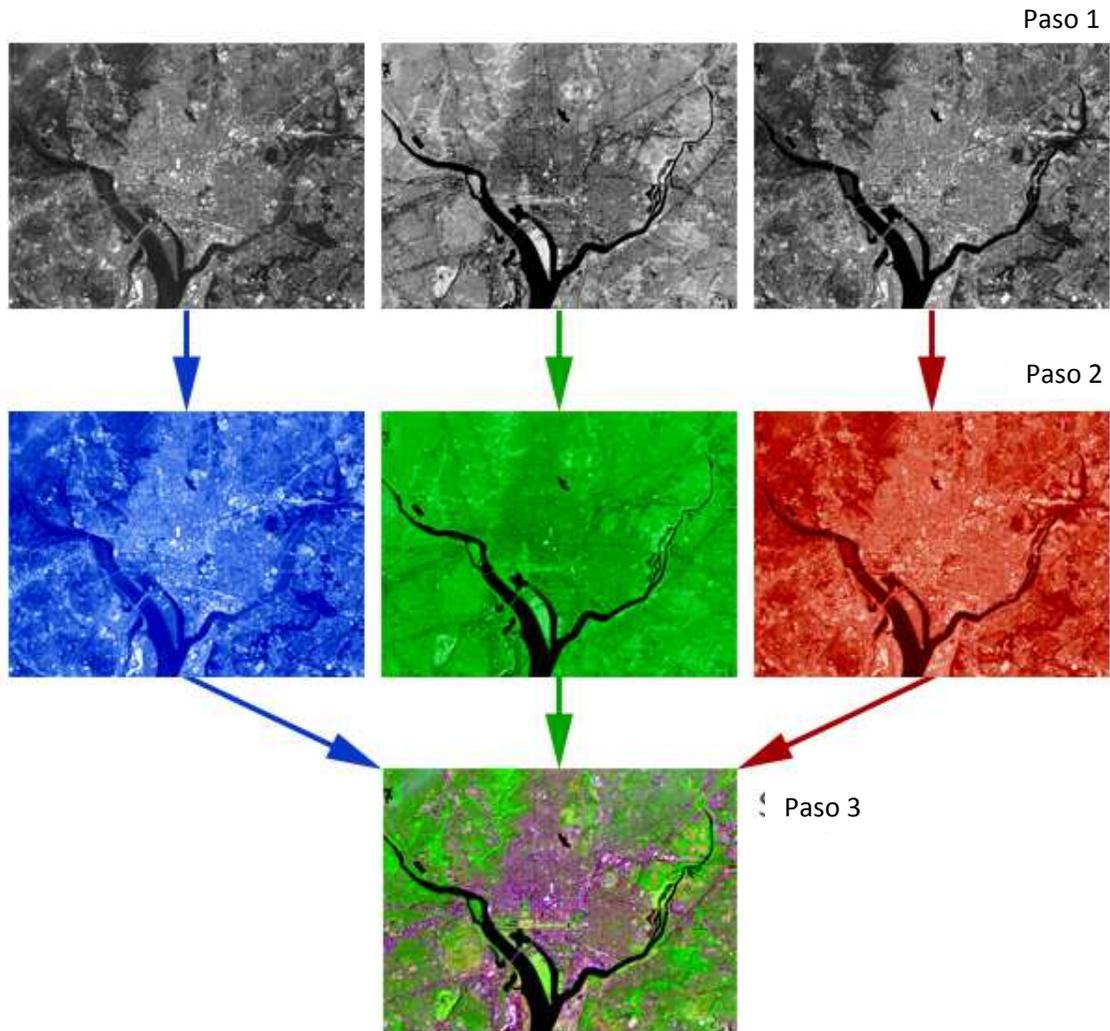
La información de energía electromagnética capturada se almacena en diferentes bandas separadas dependiendo del sensor con las que fue recopilada la información. Dichas bandas, pueden integrarse en una composición de color y hacer tantas combinaciones de bandas como se requiera.

El ojo humano sólo es capaz de apreciar los colores azul, verde y rojo, siendo los demás colores combinaciones de estos tres. Por esta razón se utilizan estos colores para las composiciones de color de la imagen. En la Figura 3.9 se muestra las tres componentes de color y el resultado de la combinación de bandas en una imagen.

#### **Composición de Color**

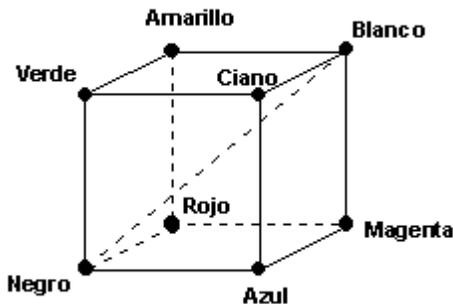
En esta composición se le asigna uno de los colores primarios a cada banda, en la Figura 3.10 se presenta el cubo de color y las respectivas combinaciones que dan origen a los demás. Una combinación de pixeles con valores de ND altos producen colores claros, mientras que las combinaciones de pixeles con ND bajos producen colores oscuros. Dependiendo de la combinación específica de rojo, verde y azul se generara un color diferente.

Después se procede a almacenar los valores para el rojo, verde y azul y a cada valor representa una intensidad relativa (con valores de 0 a 255). Las tres intensidades juntas definen el color final y los valores de pixeles de las 3 imágenes de entrada son usados para definir los valores correspondientes a los pixeles en la composición.



**FIGURA 3.9 RESULTADO DE LA COMBINACIÓN DE BANDAS EN UNA IMAGEN**

Fuente: "The Landsat 7 Compositor". National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2012

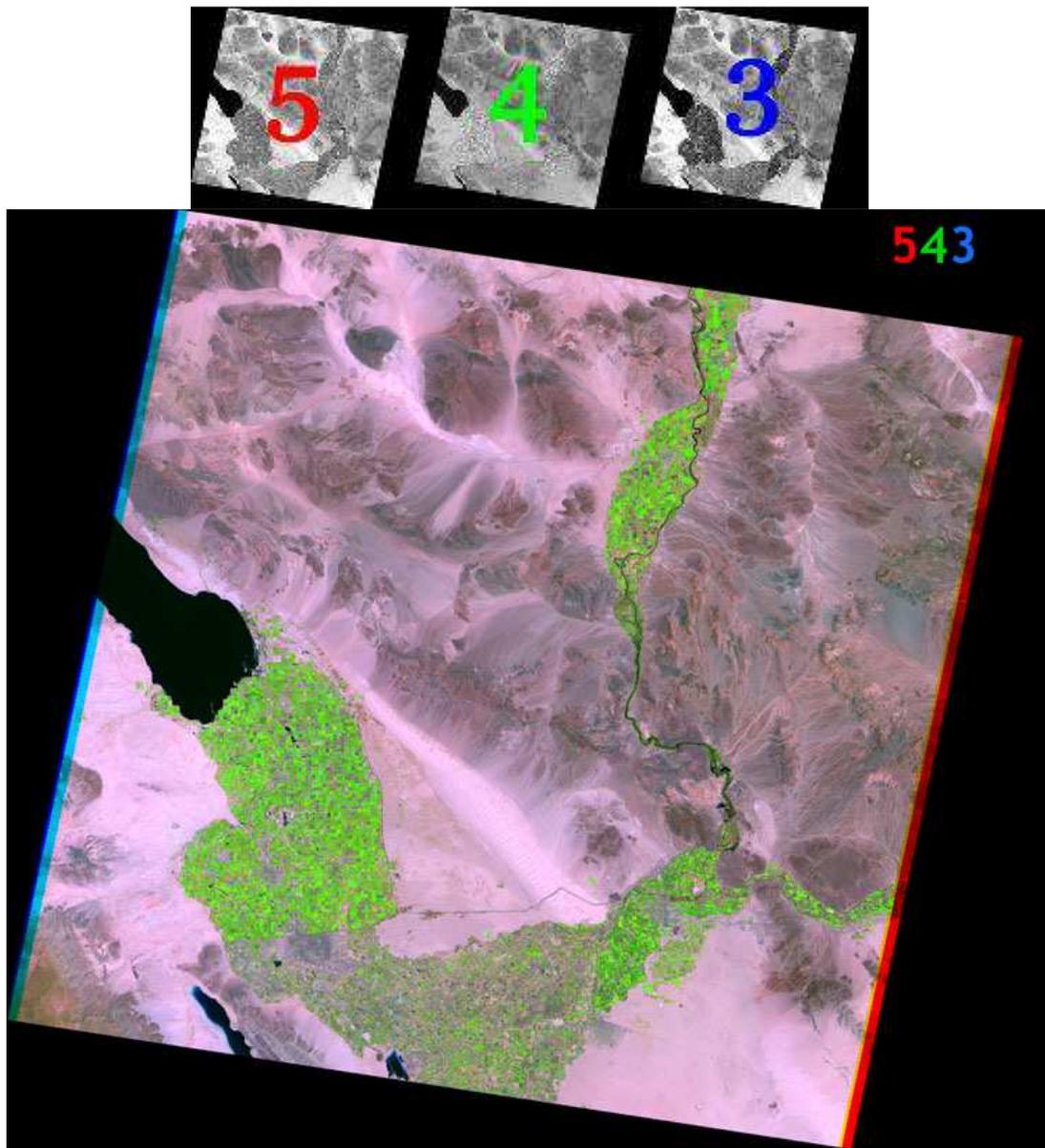


**FIGURA 3.10 CUBO DE COLOR**

Fuente: "Curso Básico De Teledetección Con Envi". Eduardo Iturrate, ESTUDIO ATLAS S.L. 1998.

### Composición de Falso Color (CFC)

Esta composición las bandas se combinan de manera muy específica para crear una imagen de composición en color. El color rojo se asigna a la banda del cercano infrarrojo, el verde a la banda de rojo visible y el azul a la banda visible del verde. Así la vegetación aparecerá rojiza, el agua azulosa y el suelo en tonos gris y marrón. Para las imágenes del Landsat (imágenes TM) la combinación que es usada más frecuentemente es asignar los colores rojo, verde y azul a las bandas 5, 4 y 3 respectivamente (Figura 3.11).



**FIGURA 3.11 RESULTADO DE LA COMBINACIÓN DE BANDAS 543 DEL SATÉLITE LANDSAT 7.**  
Fuente: "The Landsat 7 Compositor". National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2012

## TRANSFORMACIONES DE LA IMAGEN

Las transformaciones de imagen involucran la manipulación de múltiples bandas con datos, ya sea a partir de una imagen multiespectral o de dos o más imágenes de la misma área adquiridas en diferentes momentos (es decir, datos multitemporales de imágenes).

Las transformaciones de imagen tienen como objetivo generar “nuevas” imágenes de dos o más fuentes que resaltan características particulares de interés, aportando más información que las imágenes originales.

Sin embargo, es difícil ver varias bandas diferentes de una imagen al mismo tiempo. Entonces existen varios métodos para formar algún tipo de imagen compuesta que reduzca las bandas espectrales originales a una o dos, pero que al mismo tiempo preserve la información visual útil de todas las bandas que la conforman.

### Estadísticas Multibanda

La distribución de los valores de los datos en una sola banda se representarse gráficamente usando un histograma y matemáticamente por las estadísticas de la varianza, la cual es una representación de las diferencias entre todos los valores de los píxeles y el valor medio de la banda.

La correlación entre dos o más bandas se representa gráficamente mediante una gráfica de dispersión y matemáticamente por las estadísticas de la covarianza. En la gráfica de dispersión, los puntos indican los valores de los píxeles y tiene dos dimensiones, en el eje horizontal los valores de una banda y en el eje vertical los valores de la otra. Los valores de la matriz de covarianza indican una correlación: grandes valores negativos suponen una correlación negativa y valores positivos una correlación positiva y valores de covarianza cercanos al cero indican una débil o nula correlación.

Las bandas individuales de una imagen multiespectral tienen una alta correlación frecuentemente, lo cual implica que hay redundancia en los datos y la información se está repitiendo. Para evaluar el grado de correlación entre bandas individuales puede usarse una matriz de correlación. Esta matriz es de covarianza y los valores cercanos al cero representan una pequeña correlación. Usando los coeficientes de correlación de la matriz, las bandas que presenten una correlación baja pueden excluirse y por lo tanto la mayor cantidad de información de la imagen será incluida en la composición multibanda.

### Análisis de Componentes Principales

El objetivo de esta transformación es reducir la dimensionalidad (es decir, el número de bandas), y comprimir la mayor cantidad de información de las bandas originales en un menor número de

bandas. Las "nuevas" bandas resultado de este procedimiento estadístico se denominan componentes.

Este proceso intenta maximizar (estadísticamente) la cantidad de información (o varianza) a partir de los datos originales en el menor número de componentes nuevos. Por ejemplo una imagen multiespectral conformada por siete bandas puede ser transformada de tal manera que los tres primeros componentes principales contengan más del 90 por ciento de la información de las bandas originales.

Estas transformaciones, pueden ser usadas para mejorar la interpretación visual o para reducir el número de bandas utilizadas para los procedimientos de clasificación digital, analizados en la siguiente sección.

### **3.3 CLASIFICACIÓN DIGITAL**

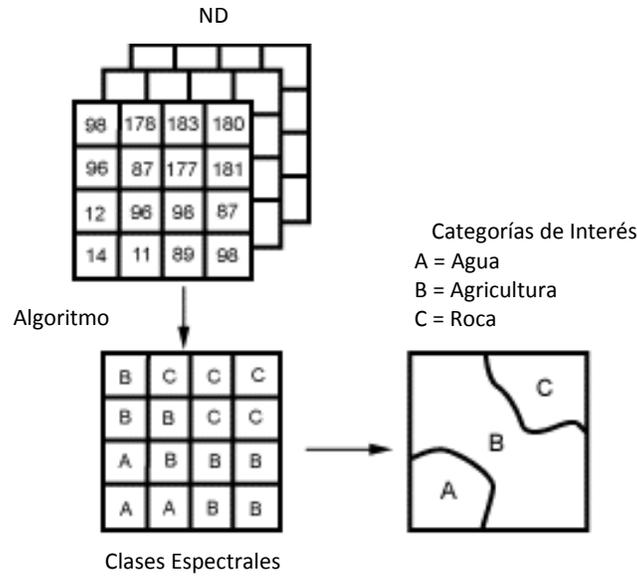
Es la última fase del procesamiento digital de imágenes. La clasificación de una imagen conlleva operaciones que identifican digitalmente y clasifican los píxeles de la imagen definiendo su ND. Generalmente se lleva a cabo utilizando múltiples bandas, y en este proceso se asigna a cada píxel una clase particular basada en su radiancia. Los procesos de clasificación se pueden dividir en dos grandes subdivisiones: clasificación supervisada y clasificación no supervisada.

#### **SUPERVISADA**

En la clasificación supervisada, el analista identifica en la imagen las muestras representativas de los diferentes tipos de cobertura (categorías de interés) en la superficie. Estas muestras se conocen como campos de entrenamiento.

La selección de los campos de entrenamiento se basa en la familiaridad del analista con el área geográfica y su conocimiento de los tipos de cobertura presentes en la imagen. Por lo tanto, el analista es el que va a "supervisar" la clasificación de un conjunto de clases específicas (Figura 3.12).

A partir de los ND de los píxeles pertenecientes a los campos para cada categoría, se calculan diversos elementos estadísticos: media, desviación estándar, número de píxeles con valor predominante, número total de píxeles seleccionado. Esto para cada categoría y para todas las bandas que intervendrán en la clasificación.

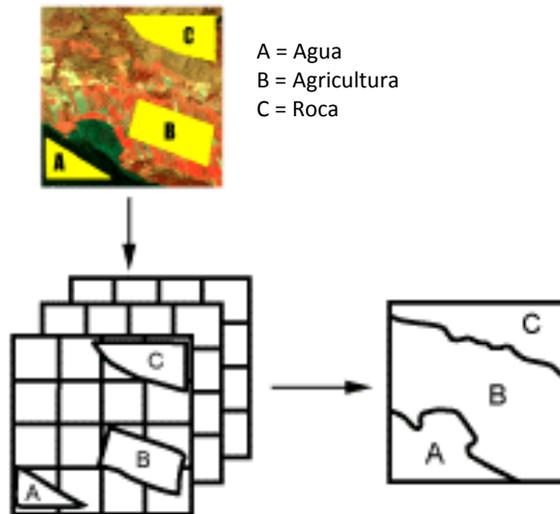


**FIGURA 3.12 CLASIFICACIÓN SUPERVISADA**

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

**NO SUPERVISADA**

En este método se definen las clases espectrales presentes en la imagen. Estas clases forman agrupaciones de píxeles con un comportamiento espectral homogéneo, después el usuario interpreta el significado de esas categorías (Figura 3.13).



**FIGURA 3.13 CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA**

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

El proceso utilizado para definir las agrupaciones espectrales es el siguiente:

1. Seleccionar de las bandas espectrales, originales o provenientes de alguna transformación, que intervendrán en el análisis.
2. Seleccionar un criterio para medir la similitud entre los píxeles que componen la imagen.
3. Seleccionar de un criterio para agrupar píxeles similares. Buscando grupos de píxeles con ND similares, para después interpretar las clases de interés para el usuario.

Se puede programar a la computadora para que clasifique automáticamente a píxeles de número digital similar en una misma clase. Esta clasificación podrá tener clases espectrales que no necesariamente correspondan con las clases que interesan al analista. Por esto, a menudo se realiza la clasificación de imágenes utilizando la clasificación supervisada, en donde el analista “entrena” a la computadora sobre las clases que son de interés para él.

## 4. EXPERIENCIAS MUNDIALES DE APLICACIÓN DE LA PERCEPCIÓN REMOTA EN LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

### Panorama General

En el Capítulo 1 se definió a la percepción remota como una técnica usada para obtener información sobre las propiedades de ciertas superficies u objetos, mediante un sensor desde distancias relativamente grandes. La percepción remota nos permite tener un conocimiento del espacio que nos rodea, la Tabla 4.1 muestra los diversos campos de aplicación de acuerdo con la Agencia Espacial Europea (ESA).

**TABLA 4.1 CAMPOS DE APLICACIÓN DE LA PERCEPCIÓN REMOTA DE ACUERDO CON LA ESA**

CAMPO	APLICACIONES
AGRICULTURA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayuda a incrementar el rendimiento de cultivos.</li> <li>• Ayuda a vigilar extensión y salud de las zonas forestales como indicador del cambio climático.</li> <li>• Monitoreo en el uso del suelo y analizar la transición que sufren los hábitats naturales al transformarse en zonas agrícolas.</li> </ul>
ATMÓSFERA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analizar la química de la atmósfera.</li> <li>• Estudiar las diversas variables que contribuyen al cambio climático.</li> <li>• Analizar las propiedades de las nubes para mejorar las técnicas de predicción de precipitaciones.</li> <li>• Detección de niveles de ozono y sus efectos de contaminación</li> <li>• Detección de fenómenos naturales y meteorológicos.</li> <li>• Modelación de procesos de radiación para comprender los ciclos de energía entre la superficie terrestre y la atmosfera.</li> <li>• Medición de vectores de viento para implementar modelos meteorológicos, así como para apoyar proyectos de energía renovable en parques eólicos.</li> </ul>
GEOLOGÍA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudio detallado del geoide de la Tierra para comprender mejor su composición interna y la topografía dinámica de los océanos del mundo.</li> <li>• Se ha observado que el campo geomagnético sigue patrones similares a los de la circulación atmosférica. Por lo tanto, el monitoreo en las variaciones geomagnéticas globales ayudan en la predicción de huracanes y las tendencias climáticas.</li> <li>• Monitoreo del movimiento de tectónica de placas y la predicción de la actividad sísmica.</li> </ul>
AGUA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo de los recursos hídricos de la Tierra.</li> <li>• Monitoreo de la calidad del agua.</li> </ul>

<p><b>SUPERFICIE TERRESTRE</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoreo de la humedad del suelo para crear modelos hidrológicos que ayuden en la gestión del agua, así como en la comprensión de la química del suelo.</li> <li>• Creación de modelos digitales de elevación para el mapeo de grandes áreas y en el seguimiento de cambios en la elevación de áreas de subsidencia de la Tierra.</li> <li>• Desarrollo urbano e industrial, desde la ingeniería civil hasta la exploración de yacimientos de petróleo. También para fines de planificación urbana y control de población.</li> <li>• Monitoreo de vegetación enfocado a la creación de programas dirigidos al desarrollo de políticas alimentarias internacionales.</li> <li>• Implantación de técnicas de conservación de humedales, así como de la fauna y flora que en ellos habitan.</li> </ul>
<p><b>OCÉANOS Y COSTAS</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudio de la geomorfología costera y su continuo cambio debido a la erosión, cambios en el nivel del mar y el impacto humano.</li> <li>• Estudio del color del océano principalmente utilizado para controlar la proliferación de algas y distribución de plancton.</li> <li>• Estudio de corrientes oceánicas y topografía.</li> <li>• Monitoreo de movimiento de olas en rutas de barcos y diseños de estructuras como plataformas y torres petroleras.</li> <li>• Estudio de la temperatura superficial de los océanos en modelos de predicción meteorológica.</li> <li>• Monitoreo espacial y estacional de zonas de pesca para tener un control del tráfico de barcos.</li> </ul>
<p><b>NIEVE Y HIELO</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudio de los diversos terrenos permanentemente congelados en el mundo y su impacto en la vegetación, ciclos hidrológicos y mantenimiento de rutas de gas y petróleo que atraviesan la zona.</li> <li>• Estudio de las diferentes formas de hielo marino y el impacto que tienen en el cambio climático del planeta.</li> <li>• Monitoreo de hielo y nieve en las partes más inaccesibles del mundo para el estudio de migración animal, balance de la masa de hielo, movimiento de icebergs.</li> </ul>
<p><b>DESASTRES NATURALES</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Predicción de sequías.</li> <li>• Predicción de terremotos y erupciones volcánicas.</li> <li>• Identificación de incendios en zonas forestales o industriales.</li> <li>• Monitoreo de inundaciones.</li> <li>• Predicción de trayectorias de huracanes.</li> <li>• Predicción de deslizamientos de tierra.</li> <li>• Monitoreo para controlar la propagación de derrames petroleros, asegurando su limpieza oportuna y reducir su impacto.</li> </ul>

Fuente: ESA Earthnet Online. 2011  
 (Adaptado por el autor)

## **4.1 PROGRAMAS INTERNACIONALES DEDICADOS A LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD AGUA**

La gestión de los recursos hídricos de la Tierra es de gran importancia, en especial en áreas del mundo donde se tiene un acceso limitado del agua. Por lo tanto resulta crucial entender el ciclo hidrológico para controlar los efectos de contaminación que lo puedan afectar y usar adecuadamente este escaso recurso.

La percepción remota solo puede medir la energía reflejada o emitida de la superficie del agua, su aplicación se limita solo a las características del agua que pueden detectarse en las regiones visible e infrarroja del espectro electromagnético.

La intensidad y color de la luz es modificada por el volumen del agua y sus contaminantes, así que se pueden establecer relaciones empíricas entre ciertos parámetros de calidad del agua y la reflectancia de una muestra. La atenuación de la luz en el agua varía con la longitud de onda de la luz y con la naturaleza, concentración y color del contaminante presente en el agua. La región infrarroja ha sido usada para medir las diferencias de temperatura en el agua. La región de microondas, no se usa para determinar indicadores de calidad del agua debido a que no hay o es casi nula la penetración de esta energía dentro del agua.

Entonces, los parámetros de calidad que se pueden cuantificar mediante percepción remota son: turbiedad, color, sólidos suspendidos, temperatura y clorofila. Los tres primeros indicadores han sido utilizados satisfactoriamente en diversos programas internacionales de evaluación del agua. La detección de capas de aceite u otros contaminantes superficiales no pueden cuantificarse, debido a que no causan un cambio en la respuesta espectral del agua.

### **AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (ESA)**

#### **Monitoreo de la Calidad del Agua del Lago de Garda (Italia) a través de Datos Multitemporales obtenidos del Sensor Meris (ENVISAT) (2003)**

El lago Garda es el más importante de Italia y se localiza al norte del país, representa más del 80% del total de los lagos italianos. Cuenta con cuatro cuencas importantes: Maggiore, Como, Iseo y Garda. El objetivo de monitorear la calidad del agua es para garantizar a los habitantes de la zona una buena calidad de vida, salud, medio ambiente y además para impulsar la economía de la región.

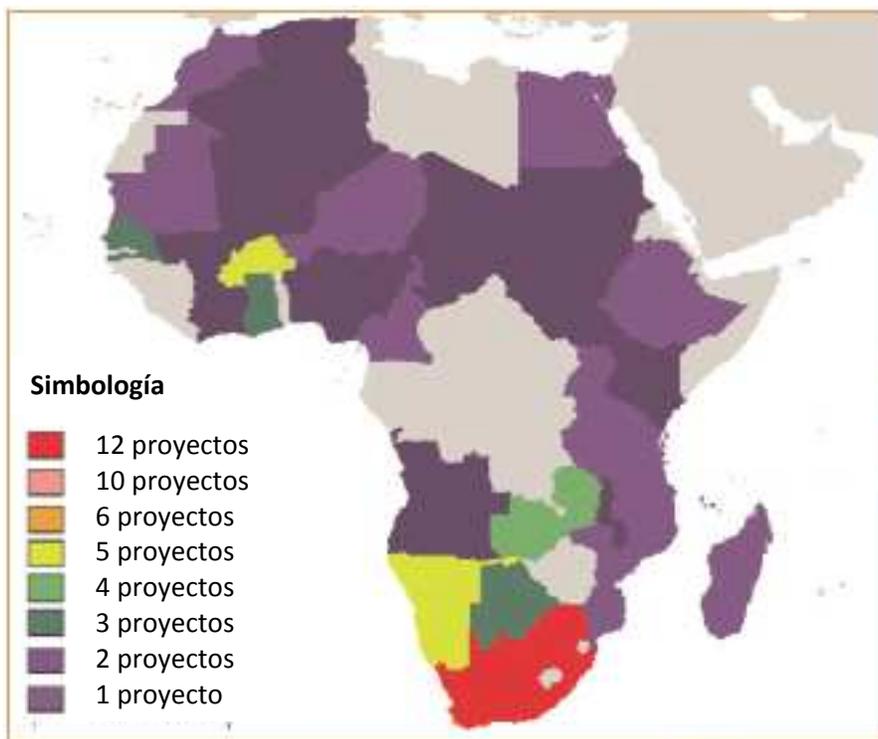
Las imágenes de este estudio fueron adquiridas por el satélite ENVISAT Meris, las cuales fueron procesadas y comparadas con los datos obtenidos en campo casi simultáneamente.

Se optó por el uso de satélites para monitorear la calidad del agua de este lago, ya que se consideró que su tecnología podría ayudar a la protección y mantenimiento de este gran recurso, ya que puede brindar información de parámetros de calidad muy aproximados a los reales.

### Iniciativa TIGER (a partir del 2002)

TIGER II es la continuación del programa TIGER I lanzado en 2002. Su objetivo principal es el de diseñar, desarrollar e implantar el monitoreo de la calidad del agua por medio de técnicas de observación de la Tierra desde el espacio (EO – Earth Observation). Esta centrado en el uso de la tecnología espacial para la gestión de recursos hídricos en África y proveer soluciones concretas a los problemas de abastecimiento del agua en el continente.

La primera etapa del programa contó con 50 proyectos de investigación, en los cuales se vieron involucrados más de 150 científicos africanos pertenecientes a las instituciones de investigación científica más reconocidas en África. Los proyectos se distribuyeron por todo el continente en 27 países. En la Figura 4.1 se muestra la distribución geográfica de los proyectos de la primera etapa del programa.



**FIGURA 4.1 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS PROYECTOS DEL PROGRAMA TIGER I**

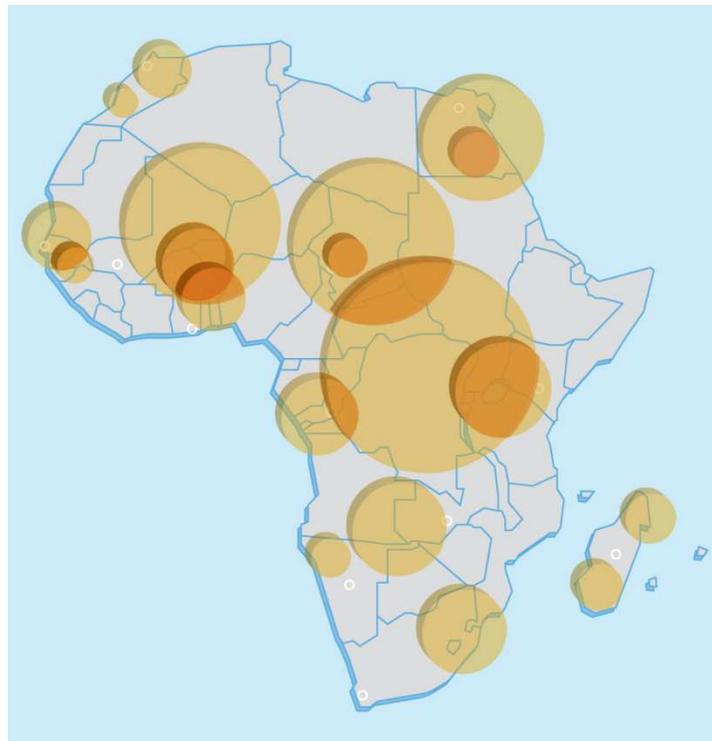
Fuente: 2005 – 2008 Report, The Tiger Initiative. 2009.

La investigación se vio beneficiada gracias a que se tuvo acceso a la información de varios satélites: ENVISAT, ERS, RADARSAT, Landsat, SPOT-4 y ALOS.

Además participaron algunas instituciones no africanas en los proyectos de investigación, algunos de los países e instituciones participantes fueron:

- Austria – Universidad Tecnológica de Vienna
- Alemania – Centro de Investigación Aeroespacial Alemana
- Bélgica – Universidad de Liege
- España – Laboratorios PiLDo
- Estados Unidos – Universidad de Texas A&M
- Holanda – Universidad Tecnológica de Delft, Instituto de Educación del Agua UNESCO-IHE
- Italia – Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO)
- Reino unido – Universidad de Durham
- Suecia – SwedPower
- Suiza – Instituto Federal Suizo

La segunda etapa del programa empezará en el 2012, para la cual se han preseleccionado 20 propuestas de proyectos relacionados con el estudio del ciclo del agua y a implantar nuevas técnicas de monitoreo de los recursos hídricos, en la Figura 4.2 se pueden observar las zonas de estudio preliminares.



**FIGURA. 4.2 ZONAS DE ESTUDIO PRELIMINARES DEL PROGRAMA TIGER II**  
Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2011

El objetivo de esta segunda fase es desarrollar sistemas eficientes de observación mediante técnicas EO y así aprender más sobre el ciclo del agua, el mejoramiento del control de los recursos hídricos para desarrollar medidas de mitigación contra los diversos cambios ocasionados por el cambio climático. Estos cambios pueden reflejarse en la variación de la precipitación y evaporación de los cuerpos de agua, produciendo efectos adversos sobre la disponibilidad del agua. Dicho esto, el monitoreo de la calidad de las agua es crucial en las zonas de escasos recursos hidrológicos, tales como África.

#### *Monitoreo de la Calidad del Agua del Lago Manzalah, Egipto*

Uno de los proyectos de la primera etapa fue el monitoreo de la calidad del agua del lago Manzalah, localizado en Egipto (Figura 4.3).

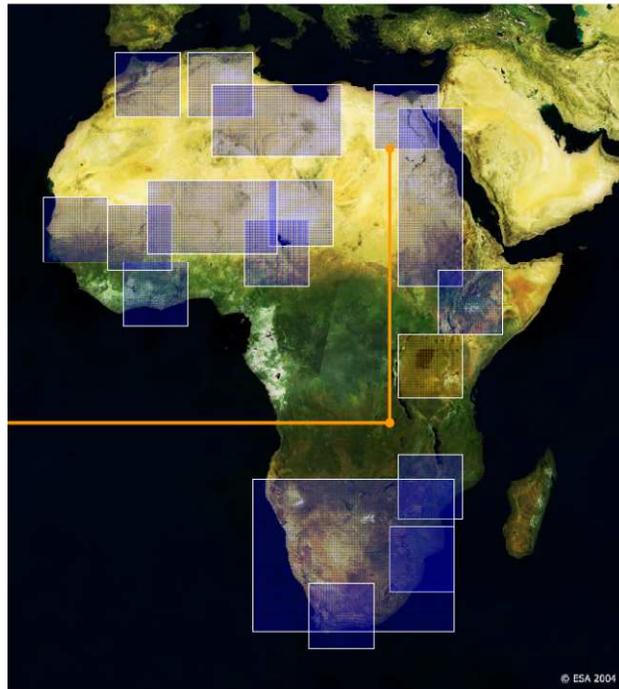
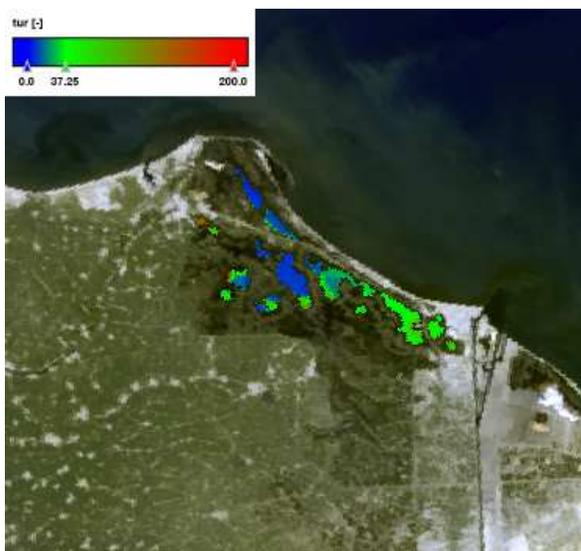


Figura 4.3 Localización del Lago Manzalah, Egipto.  
Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2009

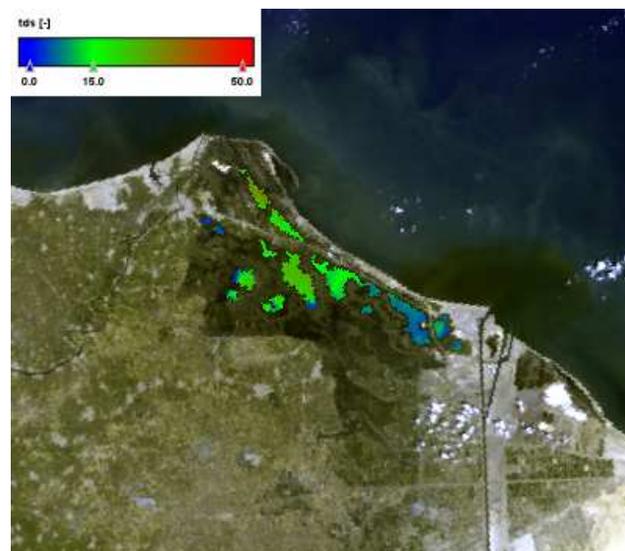
Los lagos son una valiosa fuente de agua dulce en Egipto, por ello el agua debe ser usada cuidadosamente para satisfacer las diversas necesidades de la población: domésticas, agrícolas e industriales.

Las técnicas EO se adaptaron a las necesidades específicas del usuario y condiciones locales. El proyecto se enfocó a los diferentes aspectos de gestión del agua como son la caracterización de

las cuencas, calidad del agua, exploración del agua subterránea, humedad del suelo y control de riego agrícola. En las Figuras 4.4 y 4.5 se aprecian los niveles de turbiedad y sólidos disueltos totales registrados en 2009 por el satélite ENVISAT.



**FIGURA 4.4 NIVELES DE TURBIEDAD REGISTRADOS EL 29 DE JULIO DE 2009 (ENVISAT, MERIS)**



**FIGURA 4.5 NIVELES DE SÓLIDOS DISUELTOS REGISTRADOS EL 11 DE SEPTIEMBRE DE 2009 (ENVISAT, MERIS)**

Fuente: ESA (Agencia Espacial Europea). 2009

En este estudio los parámetros de calidad del agua se midieron en espacios de tiempo más cortos a los de las pruebas convencionales, ya que así lo exigían los requerimientos de información del usuario. Se generaron datos semanales de niveles de turbiedad, clorofila y concentración de sólidos suspendidos.

#### **AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE ESTADOS UNIDOS (EPA U.S.)**

##### **Desarrollo de Indicadores de Calidad del Agua usando la percepción remota (2006)**

El objetivo de este programa es desarrollar y probar modelos que ayuden a supervisar, evaluar y cuantificar la distribución espacial y temporal de los parámetros de calidad del agua utilizando datos obtenidos mediante la percepción remota. Además se pretende desarrollar una base de datos para que los parámetros de calidad puedan ser medidos directamente con datos obtenidos de la percepción remota.

La división de la EPA encargada de este programa es la División de Exposición e Investigación Ecológica. Su intención es utilizar datos históricos de los ríos Ohio y Neuse para mejorar los algoritmos de medición de los parámetros de calidad del agua. Después se recopilarán datos actualizados del río Neuse y se verificará su utilidad para determinar dichos parámetros de calidad.

Una de las intenciones del programa es disminuir los costos de monitoreo, permitir que este se realice con mayor frecuencia y proporcionar los medios para un “muestreo” que abarque grandes extensiones espaciales, con un alto grado de precisión y todo esto se realice tiempo real.

### **CENTRO Y LABORATORIO DE RECURSOS HÍDRICOS Y PERCEPCIÓN REMOTA, UNIVERSIDAD DE MINNESOTA**

#### **Monitoreo de la Calidad del Agua en las grandes Regiones de Lagos del Estado (a partir del 2000)**

Aunque la protección de la calidad del agua es una prioridad en regiones con grandes extensiones de lagos, como la zona de Minnesota, el presupuesto es muy limitado y se debe restringir el número de lagos monitoreados. Como consecuencia de esto, no se pueden identificar y dar solución a todos los problemas referentes de los recursos hídricos de la zona.

En el centro y laboratorio de Recursos Hídricos y percepción remota de la Universidad de Minnesota, hay analistas buscando una forma innovadora para dar un monitoreo constante a los lagos. Con imágenes capturadas vía satélite por el Landsat, buscan estimar la claridad del agua, así como la determinación de vegetación acuática a nivel ciudad, regional y estatal.

Minnesota cuenta con una extensión de más de 148,000 km de ríos y arroyos. Se estima que el 40% de ellos, puede verse afectado por algún agente contaminante y hasta la fecha solo el 10% han sido evaluados. Se busca usar técnicas de percepción remota para la evaluación de ríos ya que se ha visto que para la evaluación de lagos ha tenido resultados satisfactorios. Sin embargo, los ríos y arroyos tienen algunos problemas en la evaluación con esta técnica:

- El flujo de agua está en constante movimiento.
- La resolución del Landsat (30 m) no es la adecuada para el estudio de ríos y arroyos.

Como solución se captan imágenes hiperespectrales de alta resolución con aviones ultraligeros “fly-overs” que sobrevuelan los tramos de río. Para calibrar los resultados, se toman simultáneamente muestras de agua del tramo de río a estudiar. En la Figura 4.6 se puede apreciar una fotografía de un avión tipo “fly-over”. Los sensores utilizados para la toma de estas imágenes son de bandas de 1 a 3 metros de resolución.



**FIGURA 4.6 AVIÓN TIPO “FLY-OVER” UTILIZADO PARA LA TOMA DE IMÁGENES DE RÍOS EN EL ESTADO DE MINNESOTA.**

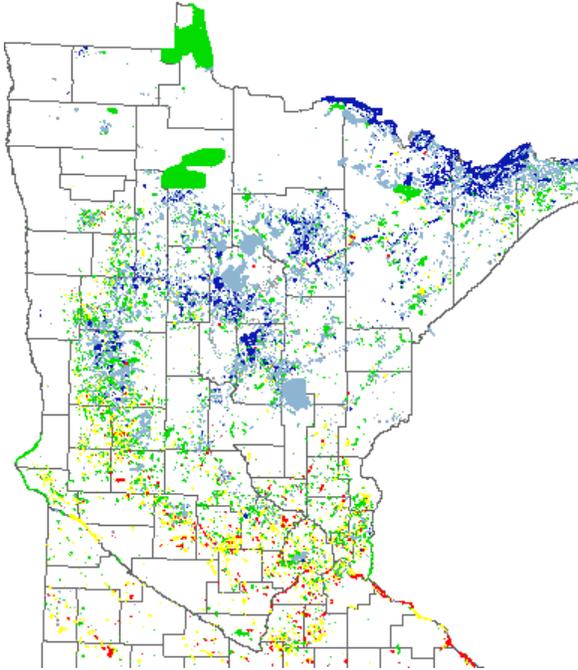
#### *Mapa Interactivo*

En el sitio de internet de la Universidad, se tiene acceso a un mapa interactivo que muestra los datos de calidad del agua obtenidos de 1975, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005 y 2008. Este mapa es llamado “Minnesota Lake Browser”.

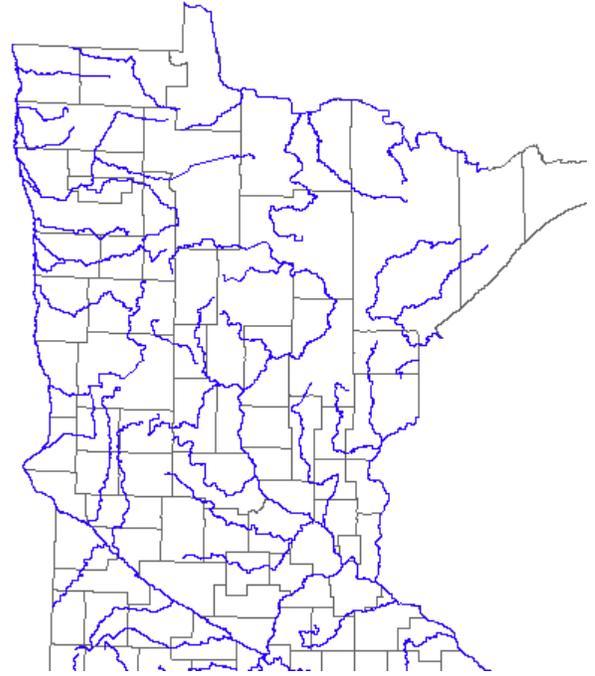
Generalmente se utiliza para encontrar el nivel de turbiedad en el lago que se requiera. También se puede agregar al mapa diversas características geográficas, como carreteras, ríos y ecoregiones.

En la Figura 4.7 se muestra el mapa con diversas características disponibles en el “Lake Browser”, cada una con su respectivo color indicativo.

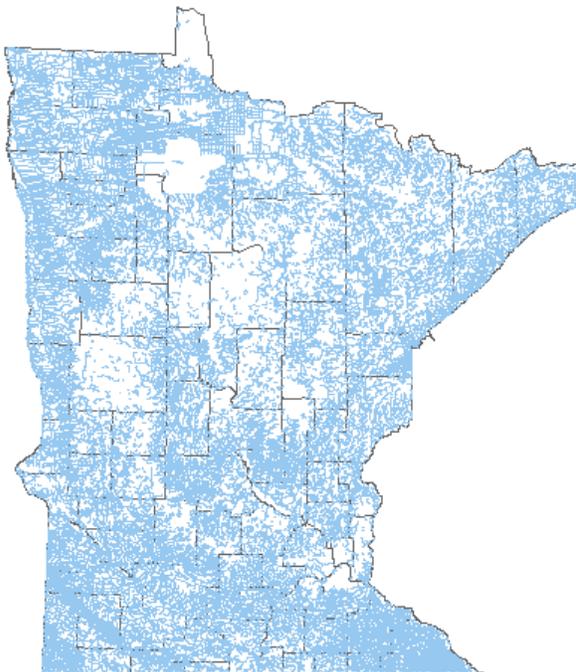




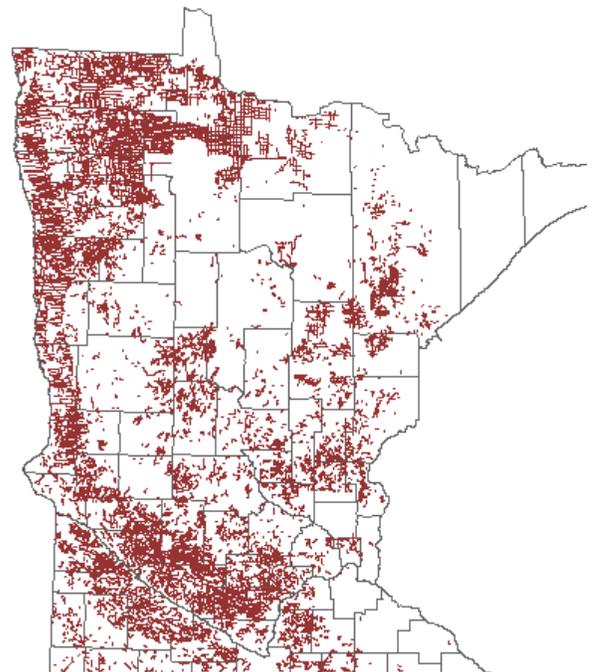
Diferentes profundidades que indican los niveles hasta la turbiedad del agua en los lagos de Minnesota



Ríos en el estado de Minnesota



Corrientes de agua en el estado de Minnesota



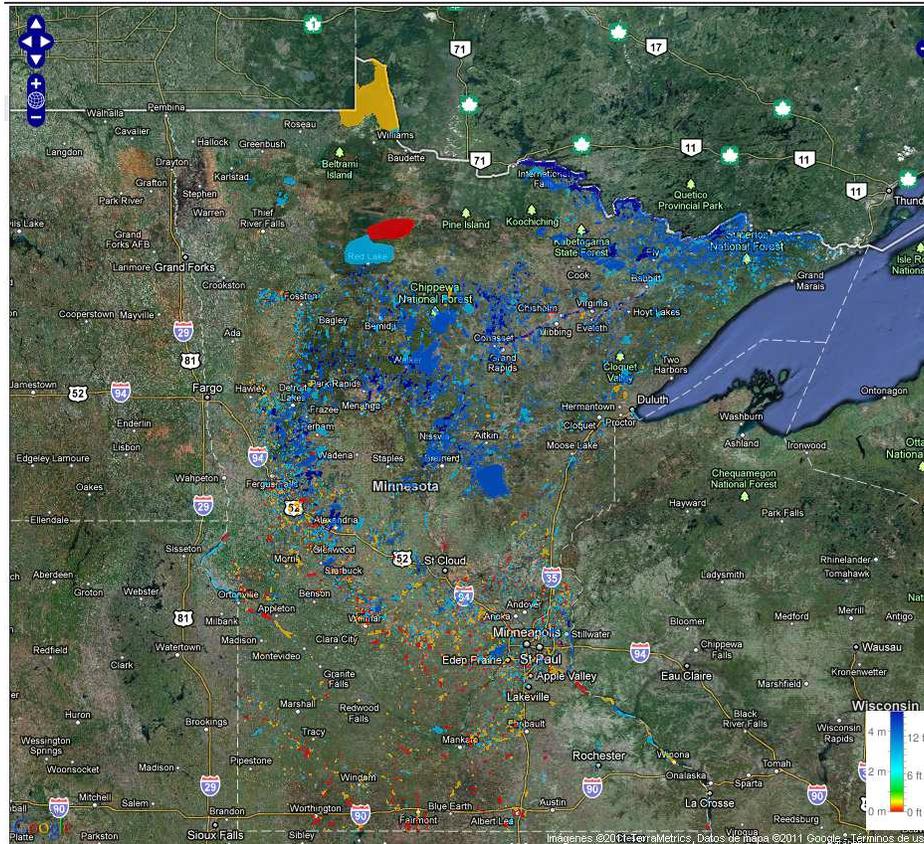
Zanjas de drenaje en el estado Minnesota

**FIGURA 4.7 ALGUNAS DE LAS CARACTERÍSTICAS DISPONIBLES DEL “MINNESOTA LAKE BROWSER”**

Fuente: Regional Water Clarity. 2005

Una vez encontrado un lago en particular, se puede obtener información más detallada acerca del mismo. Además también se está trabajando para vaciar información de años anteriores para tener un respaldo histórico. Este tipo de información visual facilita la identificación de áreas con cambios drásticos en la turbiedad.

En la Figura 4.8 se muestra la versión más reciente (2008) del “Lake Browser”, la cual está vinculada con el servicio de mapas del sitio Google.



**FIGURA 4.8 NIVELES HASTA LA TURBIEDAD DEL AGUA EN LOS LAGOS DE MINNESOTA (2008)**  
Fuente: University of Minnesota Lake Browser. 2008

En la Figura 4.9 se muestra la ventana del “Lake Browser” en su modo de búsqueda avanzada. Se ingresa el nombre del lago o da click en un lago sobre el mapa. Una vez seleccionado un lago, el buscador nos proporcionara los siguientes datos:

- Ecoregión a la que pertenece
- Condado al que pertenece
- Nombre del lago
- Cuenca del lago
- Ciudad / Pueblo

Además presenta un cuadro resumen del panorama general de toda la región, indicando: uso del suelo y claridad promedio del todos los lagos de la región.

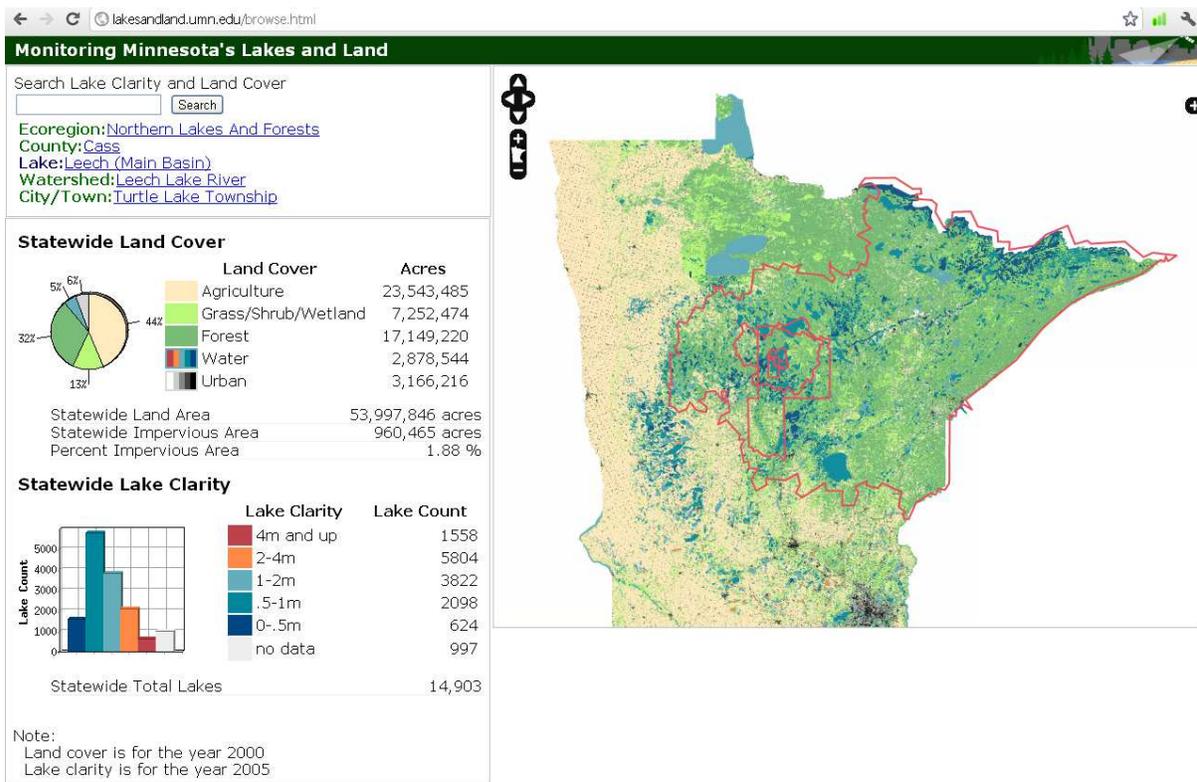


FIGURA. 4.9 VENTANA DE BÚSQUEDA AVANZADA DEL "LAKE BROWSER"

Fuente: Minnesota's Lakes and Land. 2011

Otros estados que también cuentan con mapas regionales similares son Wisconsin y Michigan.

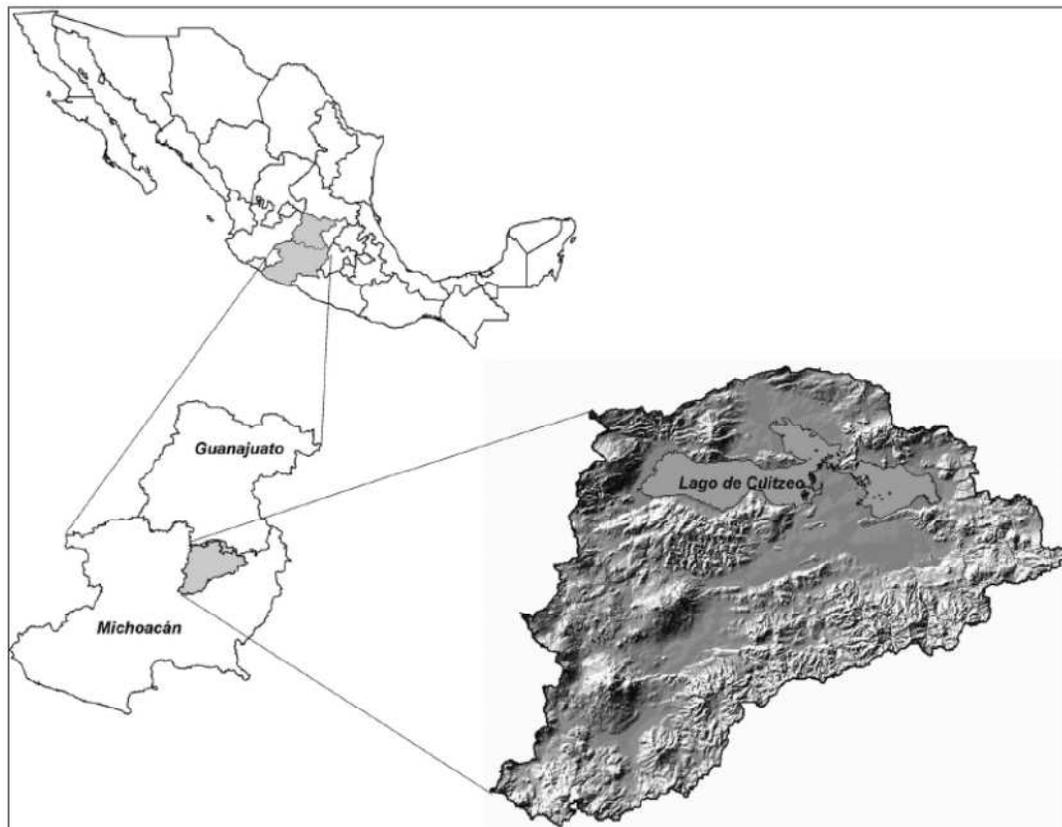
### TENDENCIAS RECIENTES DE LAS SUPERFICIES OCUPADAS POR EL LAGO DE CUITZEO, MÉXICO.

Esta fue una investigación financiada por el Programa SIMORELOS (CONACyT), dentro del proyecto de investigación *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca de Cuitzeo*. Se usaron imágenes satelitales proporcionadas por el Instituto de Geografía de la UNAM.

La cuenca del lago de Cuitzeo se ubica en la región hidrológica Lerma-Chapala, dentro del Sistema Volcánico Transversal en el centro occidente de México. La cuenca tiene una superficie

aproximada de 4 000 km<sup>2</sup> y cubre aproximadamente 300 km<sup>2</sup> del fondo de la cuenca (Figura 4.10).

El lago de Cuitzeo es el segundo cuerpo de agua continental más grande en México; y por su profundidad, el humedal continental más importante del país. El lago ha sido fuertemente impactado por las actividades humanas (urbanización y ganadería) desarrolladas en la cuenca que lo alimenta y por los cambios climáticos regionales y globales.

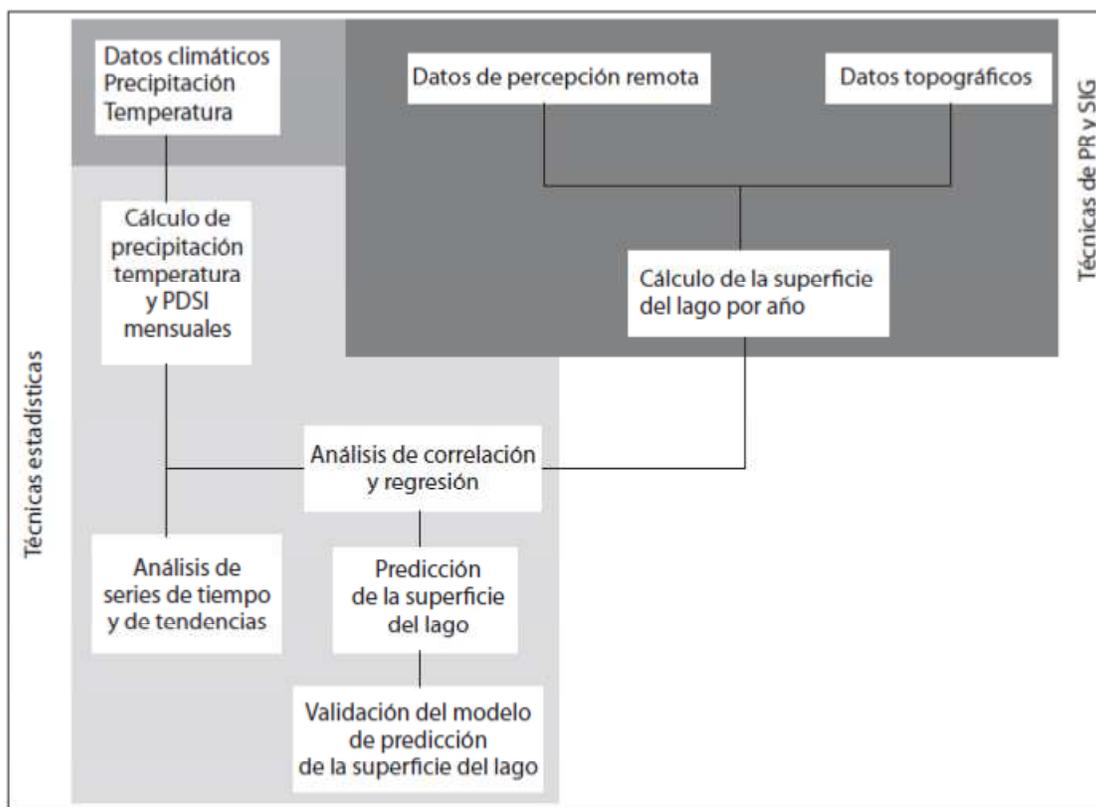


**FIGURA 4.10 ÁREA DE ESTUDIO.**

Fuente: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía Núm. 64, UNAM  
Manuel E. Mendoza, Gerardo Bocco, Erna López Granados y Miguel Bravo. 2007.

La investigación buscó describir y analizar la dinámica de cambio de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo a partir de la interpretación de imágenes de alta resolución (20 x 20 m y 30 x 30 m, Landsat ETM y MSS, respectivamente) en el periodo comprendido entre 1974 y 2001 e imágenes de baja resolución (1 km<sup>2</sup>, NOAA AVHRR) durante el periodo 1997 al 2000. Esto hizo posible proyectar la situación por la que puede atravesar el lago si los patrones de precipitación y temperatura se comportan de la misma manera que los registros históricos.

El análisis se apoyó en el uso intensivo de técnicas de percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis estadísticos (Figura 4.11).



**FIGURA 4.11 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN.**

Fuente: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía Núm. 64, UNAM  
Manuel E. Mendoza, Gerardo Bocco, Erna López Granados y Miguel Bravo. 2007

Con los datos diarios de precipitación y temperatura de las ocho estaciones meteorológicas localizadas alrededor de lago con los registros más amplios (Figura 4.12; Tabla 4.2) se calculó el Índice de Severidad de la Sequía (PDSI). Y con las series de tiempo se realizaron análisis de series de tiempo, frecuencia y tendencias.

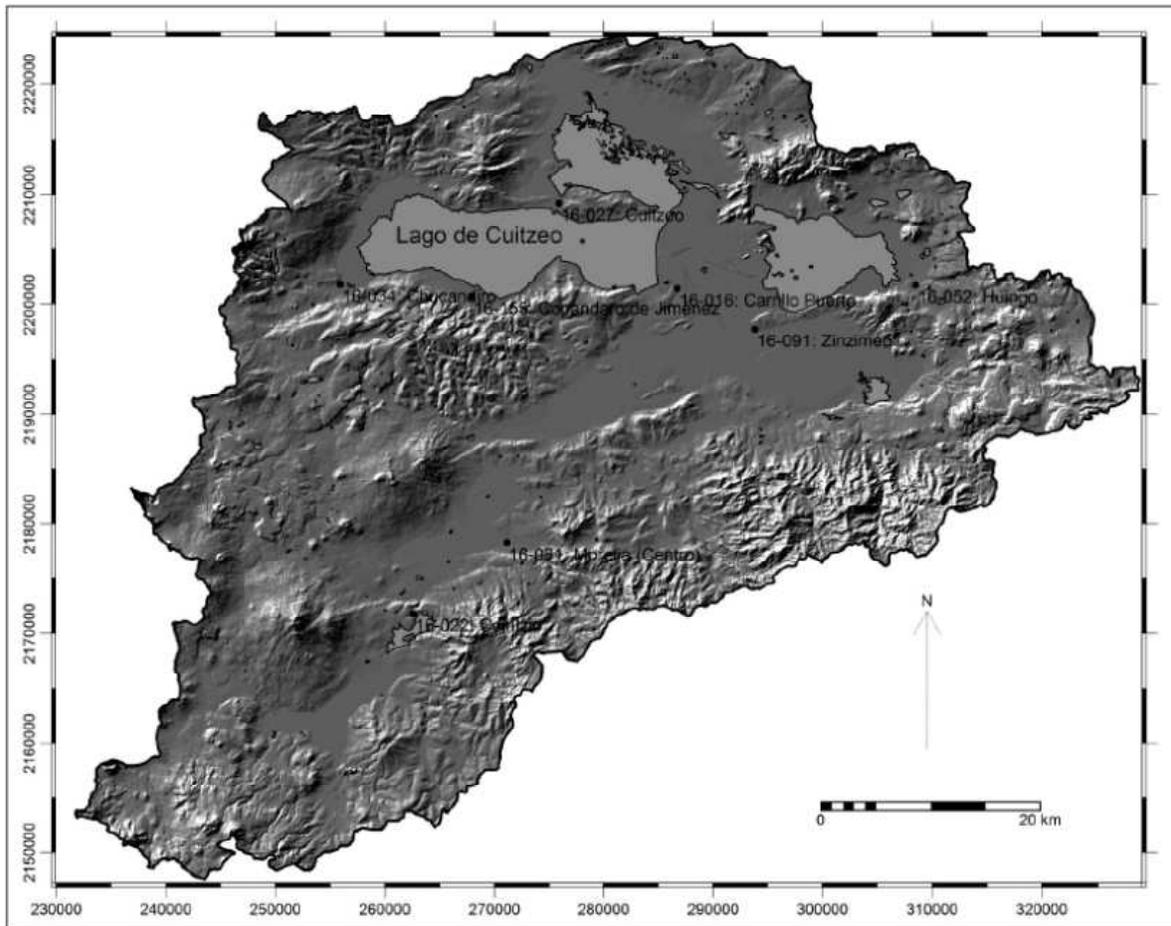
El PDSI se define como la cantidad de precipitación requerida para que un ecosistema, ciudad o zona agrícola opere normalmente durante un periodo, y depende del clima promedio del área y de las condiciones antes y durante el periodo en cuestión. Está basado en un balance hídrico que considera la variación del agua disponible para la vegetación.

Los datos climáticos utilizados en el índice son: precipitación mensual y temperatura media mensual. Realizando una normalización de las condiciones climáticas para cada zona; se pueden comparar dos o más sitios entre sí.

**TABLA 4.2 ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS EN LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO**

NOMBRE	CLAVE	AÑOS DE REGISTRO DE TEMPERATURA	AÑOS DE REGISTRO DE PRECIPITACIÓN
Carrillo Puerto	16016	31	32
Cuitzeo	16027	72	74
Chucándiro	16034	20	22
Huingo	16052	57	57
Morelia	16081	52	49
Zinzimeo	16091	30	33
Copándaro de Jiménez	16155	29	26
Cointzio	16022	57	61

Fuente: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía Núm. 64, UNAM  
 Manuel E. Mendoza, Gerardo Bocco, Erna López Granados y Miguel Bravo. 2007.



**FIGURA 4.12 MODELO DIGITAL DE TERRENO SOMBREADO CON LA DISTRIBUCIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS.**

Fuente: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía Núm. 64, UNAM  
 Manuel E. Mendoza, Gerardo Bocco, Erna López Granados y Miguel Bravo. 2007.

El método de investigación requirió la interpretación visual de fotografías aéreas con estereoscopios de espejos y de imágenes satelitales (Tabla 4.3). Con esto se generó una base de datos geográfica que integra todas las imágenes de satélite, fotografías aéreas y mapas disponibles para su revisión a lo largo de la investigación.

**TABLA 4.3 DOCUMENTOS AEROESPACIALES INTERPRETADOS VISUALMENTE EN ESTE TRABAJO**

DOCUMENTO AEROESPACIAL	TIPO	AÑO
Compuesto mensual del NDVI	NOA-AVHRR	1997 a 2001
Compuesto falso color	Landsat MSS	1976, 1986, 1979 y 1992
Compuesto falso color	SPOT	1996
Espaciomapa (representación del compuesto en falso color)	Landsat TM	1993
Fotografías aéreas	pancromáticas B/N, escala 1:50 000	1974
Fotografías aéreas	pancromáticas B/N, escala 1:37 000	2000

Fuente: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía Núm. 64, UNAM  
 Manuel E. Mendoza, Gerardo Bocco, Erna López Granados y Miguel Bravo. 2007.

Con las imágenes NOAA AVHRR se estimaron las superficies mensuales de los cuerpos de agua de Chapala y Cuitzeo para el periodo de 1997 al 2001, a través de su interpretación visual en pantalla. La resolución espacial y la respuesta espectral de estas imágenes permiten que la interpretación de la superficie de agua tenga errores de alrededor de 1 km<sup>2</sup>.

Con las imágenes de mayor resolución se estimaron las superficies del lago para la época de secas de los años 1974, 1976, 1986, 1992, 1993, 1996 y 2000. Por la resolución espacial y el contraste entre la respuesta espectral del agua y la tierra, se logra que la interpretación de la distribución del cuerpo de agua presente errores mínimos de interpretación.

## 5. CASO ESTUDIO: EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL VASO DE LA PRESA VALLE DE BRAVO

### 5.1 PRESA VALLE DE BRAVO

#### LOCALIZACIÓN

La Presa Valle de Bravo forma parte de la Cuenca Valle de Bravo-Amanalco localizada al poniente del Estado de México. Sus coordenadas geográficas son:

<b>LATITUD</b>	<i>Extremo Norte</i>	<b>19° 23' 05" N</b>
	<i>Extremo Sur</i>	<b>19° 05' 30" N</b>
<b>LONGITUD</b>	<i>Extremo Oriente</i>	<b>99° 52' 00" W</b>
	<i>Extremo Poniente</i>	<b>100° 11' 40" W</b>

La cuenca abarca una superficie de 61,593 hectáreas, incluye la mayor parte del municipio Valle de Bravo, Amanalco y superficies menores de los municipios de Donato Guerra, Villa de Allende y Villa Victoria. En la Figura 5.1 se muestran a dichos municipios pertenecientes a la región XV del Estado de México.



**FIGURA 5.1 MUNICIPIOS DE LA CUENCA VALLE DE BRAVO**  
Fuente: Portal Ciudadano del Gobierno de Estado de México. 2011.

## ANTECEDENTES

La Presa Valle de Bravo fue construida en 1947 como parte del Sistema Hidroeléctrico “Miguel Alemán”, el lago se formó como consecuencia del embalse de la presa. Dicho sistema estaba constituido por siete presas (cinco en el Estado de México y dos en Michoacán) actualmente ya no se encuentra en operación.

Estas presas ahora son parte del sistema hidráulico más importante del país, “El Cutzamala”. El cual abastece el equivalente al 40% de agua potable consumida de la zona metropolitana de la Ciudad de México y Toluca, es decir unos 15.6 metros cúbicos por segundo.

## DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

Esta es una cuenca de segundo orden (subcuenca) de la Cuenca Cutzamala, que a su vez se subdivide en siete cuencas de tercer orden (microcuenca):

1. Cuenca Río Amanalco
2. Cuenca Río Molino – Los Hoyos
3. Cuenca Río San Diego
4. El arroyo El Carrizal
5. El arroyo La Yerbabuena
6. Las Flores o El Tizate
7. Cuenca Cerrada de San Simón

El 53% de la Cuenca (31,646 ha) lo ocupan los bosques; el 32% (19,824 ha) la agricultura; el 4% los pastizales; el 0.5% de frutales, los cuerpos de agua el 3%, la mancha urbana ocupa el 6% y 1.5% restante está ocupado con diversos usos.

Predominan los suelos de origen volcánico, el 74% de la superficie total está cubierta por cenizas volcánicas.

El clima se define por su ubicación altitudinal: semicálido por debajo de la cota 2200 msnm. Templado subhúmedo en la parte central de la cuenca, entre los 2200 a los 3000 msnm. Semifrío subhúmedo arriba de los 3200 msnm.

## DIMENSIONES Y CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO

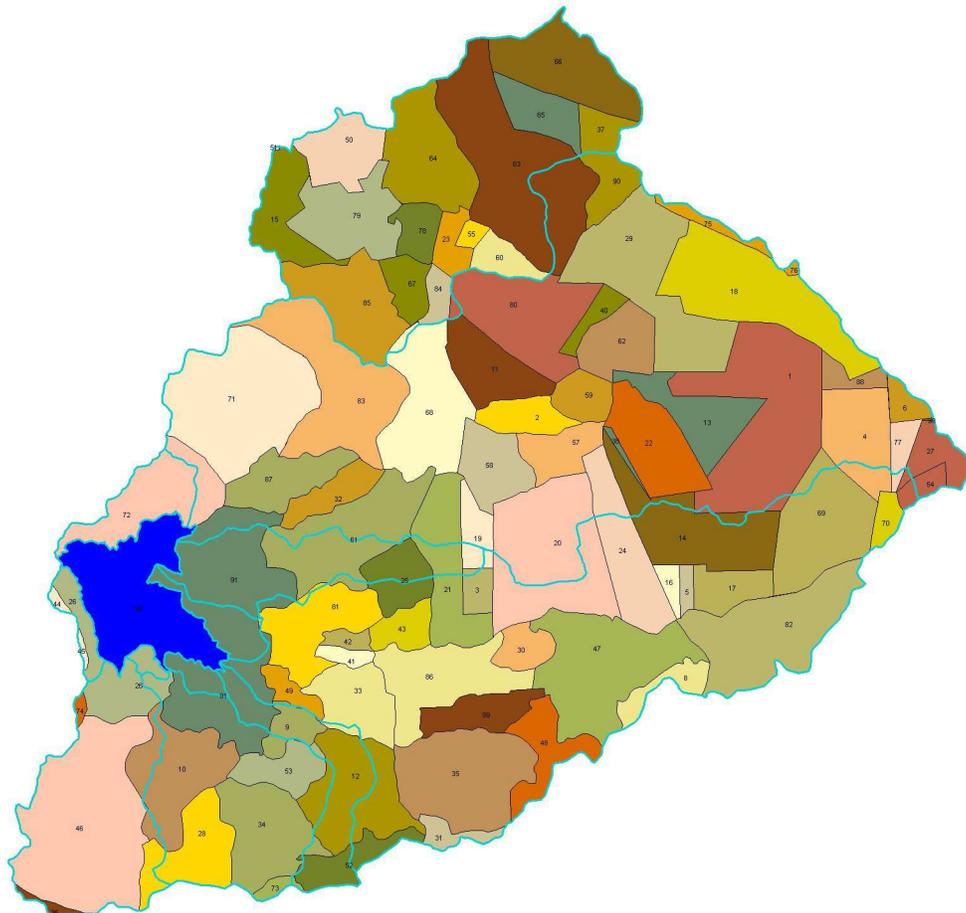
La presa tiene una superficie de 2,900 hectáreas y cuenta con una capacidad de almacenamiento de 457 millones de metros cúbicos. La profundidad promedio del lago es de 21 metros. Cerca de la cortina de la presa esta la zona más profunda del lago, la cual tiene una profundidad de 39 metros cuando el lago está en su máximo nivel.

La capacidad de almacenamiento de la presa ha disminuido un 21% desde su construcción debido al azolve (producto de la erosión provocada por deforestación y el mal empleo de prácticas agrícolas) acarreado por los ríos que desembocan en el embalse.

## POBLACIÓN

Hasta el año 2000, la cuenca estaba integrada por 95 localidades con 79,773 habitantes, de las cuales 94 son rurales y sólo una es urbana: la ciudad de Valle de Bravo, cuya población de 25,409 habitantes y representa al 31.85% de toda la cuenca (casi a una tercera parte del total).

En la Figura 5.2 se pueden apreciar las 95 localidades de la cuenca, la ubicación del Lago Valle de Bravo y sus afluentes.



**FIGURA 5.2 LOCALIDADES DE LA CUENCA VALLE DE BRAVO**

Fuente: "Descripción del medio social y económico de la Cuenca Valle de Bravo, Estado de México"  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA, 2005.

### ACTIVIDADES ECONÓMICAS

La producción de maíz es el principal producto agrícola en la cuenca y se destina básicamente al autoconsumo, además se producen diversos granos, hortalizas, frutales y una parte cultivada en superficies reducidas con riego son destinadas a la comercialización.

La ganadería consiste en ganado bovino, ocupa pocas superficies y hatos pequeños destinados a su comercialización.

En silvicultura, se explotan diversos recursos en superficies con diversas formas de tenencia concentradas en la subcuenca de la Presa y se dispone de aserraderos y viveros. La producción de flores es una actividad con poco tiempo de haberse iniciado, pero se cuenta con un determinado volumen de producción y de un mercado relativamente estable.

La piscicultura es una actividad de práctica relativamente reciente. Se concentra en el municipio de Amanalco, se producen diversas especies en el mercado local y regional.

En la figura 5.3 se pueden apreciar algunas de las actividades agrícolas, ganaderas, de silvicultura y piscicultura.



FIGURA 5.3 ACTIVIDADES ECONÓMICAS EN LA CUENCA VALLE DE BRAVO

Las principales actividades económicas de la cuenca son la industrial y de servicios, abarcan desde la industria eléctrica, de la construcción, la maderera y una gran variedad de centros agroindustriales. Por lo mismo, es importante que se cuente con una buena infraestructura en comunicaciones y transportes, servicios de alimentación y hospedaje.

Además, la belleza de la zona ha permitido su desarrollo turístico. Sus calles se caracterizan por su empedrado y desniveles con casas predominantemente blancas y aleros de madera y teja. En estas construcciones se han establecido restaurantes, hoteles, galerías de arte, artesanías y textiles.

En los alrededores se encuentran varios campos de golf y hoteles ecoturísticos. Se pueden realizar un gran número de actividades: senderismo, escalada de roca, vuelo en ala delta, bicicleta de montaña y una amplia variedad de deportes acuáticos. Otro atractivo de la zona es la culminación del viaje que las mariposas monarcas hacen desde Canadá hasta los bosques de la zona.

En la figura 5.4 se pueden apreciar algunas de las actividades turísticas de la zona.



FIGURA 5.4 ACTIVIDADES TURÍSTICAS EN LA CUENCA VALLE DE BRAVO

## CONTAMINACIÓN

Las principales fuentes de contaminación del lago son:

- a. Descargas de aguas residuales del municipio de Valle de Bravo y del resto de la Cuenca. (Figura 5.5)
- b. Químicos utilizados en la agricultura y acuicultura: uso excesivo de fertilizantes, pesticidas y herbicidas (agroquímicos).
- c. Desechos orgánicos y nutrientes de la acuicultura.
- d. Desechos sólidos.



**FIGURA 5.5 DESCARGA DE AGUA RESIDUAL AL LAGO VALLE DE BRAVO**

Como consecuencia, de las fuentes de contaminación mencionadas se tiene lo siguiente:

- a. Crecimiento de lirio y microalgas. Los diversos aportes nutrimentales propician su crecimiento incontrolado, en particular de la Anabaena. Se forma una capa verde en la superficie del lago que puede producir dermatitis en pieles sensibles, también puede afectar al hígado si es ingerida en altas concentraciones.
- b. Eutroficación del lago. La carga de nutrientes y el constante aporte de materia orgánica, propician que el lago se encuentre en estado eutrófico (sin oxígeno disuelto en el agua) de marzo a noviembre por debajo de los 10 metros de profundidad. Esto no permite que existan plantas o animales en el lago, excepto por algunos tipos de bacterias anaerobias. Considerando que la profundidad promedio del lago es de 21 metros, significa que en la mitad más profunda no hay presencia de plantas o peces.
- c. Presencia microbiológica: Reflejada con la presencia de coliformes fecales y bacterias patógenas (Figura 5.6) que representan una fuente de infecciones y enfermedades.



**FIGURA 5.6 CIANOBACTERIA EXTRAÍDA DEL LAGO VALLE DE BRAVO**

Fuente: "Las manzanas de Newton. Noticiero de la ciencia" Universidad Veracruzana. 2011.

## 5.2 SITIOS DE MUESTREO

El proyecto de investigación PAPIIT IN107710 “Monitoreo de la Calidad del Agua mediante el uso de la Percepción Remota”, tiene como objetivo generar una metodología para el monitoreo de la calidad del agua en la presa Valle de Bravo, a través de la obtención de modelos matemáticos que correlacionen mediciones de radiancia con datos de muestras tomadas en campo.

Se establecieron 50 sitios de muestreo, en el Cuadro 5.1 se presentan las coordenadas UTM de los mismos y en la Figura 5.7 se muestra su ubicación en un mapa del Vaso de la Presa Valle de Bravo.

**CUADRO 5.1 COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LOS SITIOS DE MUESTREO**

SITIO	COORDENADA X	COORDENADA Y	SITIO	COORDENADA X	COORDENADA Y
1	380716.04	2121910.04	26	377145.98	2123984.16
2	381444.76	2121225.91	27	377143.26	2124448.39
3	380902.38	2120918.93	28	377291.26	2124742.52
4	380462.20	2121057.06	29	377762.32	2124435.02
5	380526.71	2121542.37	30	378114.42	2124242.07
6	379770.79	2121636.46	31	378368.64	2124701.52
7	379408.98	2121251.49	32	378918.01	2124750.13
8	379056.87	2121453.63	33	379428.41	2124645.32
9	378257.21	2121117.69	34	379019.71	2125554.91
10	378014.16	2120587.46	35	379569.75	2125265.38
11	377764.10	2120761.28	36	379969.16	2125607.07
12	378447.47	2121617.52	37	380113.70	2125381.70
13	377891.29	2121876.38	38	379717.23	2125043.07
14	378468.66	2122610.36	39	379938.80	2124540.51
15	378025.88	2122348.92	40	379909.65	2124104.16
16	377267.91	2122566.11	41	378982.07	2124279.35
17	377329.84	2123091.39	42	378972.76	2123753.72
18	377853.71	2122811.21	43	378921.92	2123133.06
19	378078.85	2123286.21	44	378784.84	2123161.63
20	378339.95	2123459.71	45	378998.12	2122729.83
21	377807.78	2123807.57	46	379228.16	2122181.10
22	377543.81	2123640.25	47	379490.46	2122535.98
23	376967.92	2123564.18	48	379598.81	2123024.07
24	376558.49	2123917.40	49	380194.54	2122562.11
25	376577.07	2124507.53	50	380048.21	2122071.19

Fuente: Equipo de trabajo PAPIIT

Para definir la cantidad y ubicación de los sitios de muestreo, se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Se usaron imágenes del satélite Landsat 7, ya que han probado ser adecuadas para evaluaciones de cuerpos de agua superficiales en otras investigaciones. Las imágenes presentan un bandeo desde el 2003 debido a una falla en el dispositivo SLC (Scan Line Corrector) del sensor ETM+, su función era compensar el escaneado durante el movimiento orbital de la plataforma. Debido a esta falla, se pierde aproximadamente el 23% de la información captada. Esta situación no afecta la investigación, ya que los sitios de muestreo se ubicaron en áreas donde no haya bandeo.
- Mientras más sitios de muestreo se consideren en el análisis, será más fácil correlacionar los datos estadísticamente y se tendrá un margen de error relativamente bajo.
- Considerando que cuerpo de agua a estudiar es de gran tamaño, entre mas sitios de muestreo se ubiquen se tendrá una distribución de calidad del agua mas heterogénea.
- Se espera obtener diferentes valores en los parámetros de calidad, ya que existen factores externos que no permiten que se tenga una mezcla homogénea. Estos factores pueden ser: la cercanía del sitio de muestreo al embarcadero y zonas urbanas, así como a la desembocadura de ríos y arroyos.

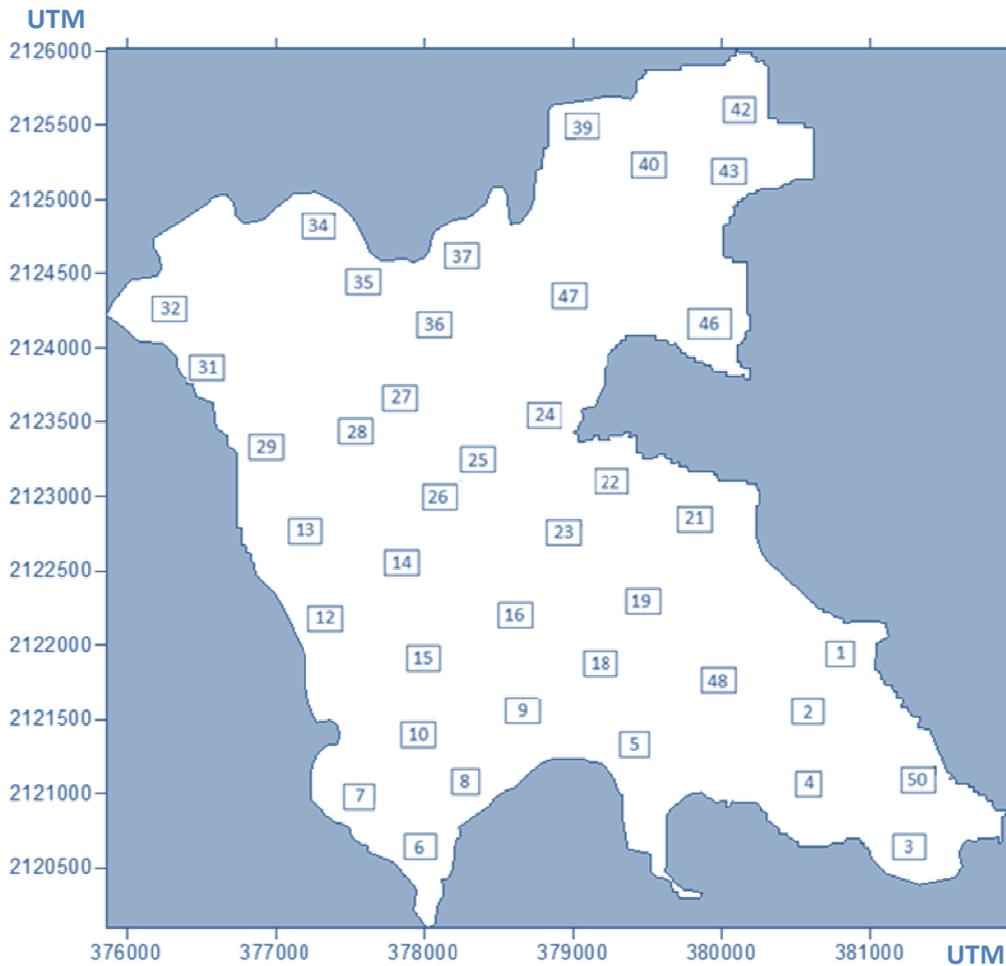


FIGURA 5.7 UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO EN EL VASO DE LA PRESA VALLE DE BRAVO

Fuente: Equipo de trabajo PAPIIT

## 5.3 TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO

### CAMPAÑAS DE MUESTREO

Se hicieron tres campañas de muestreo en el vaso de la Presa de Valle de Bravo, dos en el año de 2010 (24 y 25 de abril, y 2 y 3 de octubre de 2010) y una en el 2011 (26 y 27 de marzo). Fue necesario verificar con anticipación que el satélite LANDSAT cubriría el área del embalse para así obtener las imágenes correspondientes al día en que serían tomadas las muestras.

Para la planeación de los trabajos de campo que se realizaron en campo, se consideraron los siguientes aspectos:

- Selección de la temporada para el muestreo, tomando a consideración la variabilidad de la calidad del agua en vaso de la presa y buscando que las condiciones para la toma de muestras sean las óptimas. Para esto, el equipo de trabajo decidió que el muestreo se realizara antes de comenzar la época de lluvias (en época de estiaje) e inmediatamente después del periodo de lluvias.
- Verificación de las condiciones meteorológicas, tratando de evitar nubosidad. La generación de la imagen se puede ver afectada, ya que parte o la totalidad del embalse podrían estar ocultos, haciendo imposible el análisis de la imagen.

Después de la planeación correspondiente, se procedió viajar al lugar de estudio y tomar muestras de agua del lago, para su posterior análisis de calidad.

### TOMA DE MUESTRAS Y SU CONSERVACIÓN

Con ayuda de una lancha, se navegó en el embalse y se localizaron los sitios de muestreo en las coordenadas geográficas mencionadas con anterioridad. Para ubicar dichas coordenadas se utilizó un GPS y una brújula como medios de referencia.

Una vez localizado el sitio, la lancha se detenía y se procedía a tomar las muestras. Para almacenar las muestras se usaron botellas de PET con capacidades de 500 y 1500 ml, previamente lavadas. Para el caso de los análisis microbiológicos se usaron frascos estériles y declorados con tiosulfato de sodio.

Al momento de tomar las muestras, se medían al instante algunos parámetros de calidad del agua con la ayuda de un dispositivo llamado Medidor Multiparamétrico.

Finalmente, las muestras fueron guardadas en un contenedor térmico con hielos, ya que al mantenerlas a baja temperatura se garantiza la preservación de las muestras.

## DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD

Para cada uno de los 50 sitios, durante las tres campañas de muestreo, se determinaron parámetros de calidad al momento de la toma de la muestra y posteriormente en el laboratorio.

### Determinación de Parámetros en Sitio

#### *Parámetros determinados con un Medidor Multiparamétrico*

Un medidor multiparamétrico es un dispositivo compuesto por una computadora que almacena los datos medidos por una sonda inteligente, la cual cuenta con sensores que tienen una unión de fibra que permite una mayor sensibilidad y un interior de gel para una mejor resistencia agentes contaminantes.

Este dispositivo es muy fácil de usar, la sonda está conectada a la computadora y esta se sumerge en el agua, mientras la computadora registra los parámetros de calidad detectados. Todos los datos registrados pueden ser exportados fácilmente a cualquier computadora, ya que el dispositivo cuenta con conexión USB.

La mayor ventaja de usar este aparato es que solo se necesita de una medición para determinar los diferentes parámetros de calidad, además de que es muy rápido, requiere de unos cuantos segundos.



**FIGURA 5.8 MEDIDOR MULTIPARAMÉTRICO**

Fuente: Ficha técnica del “Medidor Multiparamétrico para calidad del agua HANNA HI 9828

En la Figura 5.8 se muestra el medidor multiparamétrico HANNA HI 9828, con el cual se determinaron parámetros de la calidad del agua indispensables en el desarrollo del modelo, los cuales fueron:

- pH
- Oxígeno disuelto (%; ppm; mg/l)
- Conductividad eléctrica (mS/cm)
- Resistividad ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ;  $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ ;  $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ )
- Sólidos disueltos totales o TDS (mg/l; ppm)
- Salinidad (PSU: Escala Práctica de Salinidad)
- Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

Es importante que al terminar la medición de cada muestreo la sonda se limpie con agua, de preferencia destilada, para evitar la alteración de datos en las muestras consecutivas.

#### *Disco de Secchi*

Es un instrumento compuesto por un círculo de 20 cm de diámetro, dividido en cuatro partes pintadas alternadamente en blanco y negro, atado a una cadena graduada. Con este aparato se puede determinar una medida de la claridad o transparencia del agua.

El procedimiento consiste en sumergir el disco en el agua hasta una profundidad en la que el disco deje de ser visible (Figura 5.9). El disco deja de ser visible debido a una propiedad óptica del agua que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos. Si el agua contiene sustancias y partículas en suspensión se magnifica el fenómeno, entonces mientras más sustancias estén presentes en el agua menor será la distancia a la que el disco dejara de ser visible.



**FIGURA 5.9 DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD POR MEDIO DEL DISCO DE SECCHI**

Fuente: Equipo de Trabajo PAPIIT

Cuando se realiza la prueba, es recomendable que una misma persona tome todas las lecturas para evitar diferencias de apreciación en las lecturas tomadas.

### **Determinación de Parámetros posteriores al muestreo**

Después de obtener las muestras del lago, se determinaron ciertos parámetros de calidad solo para seis sitios de muestreo. Esto es porque el tiempo que tarda la realización de la prueba, como el costo de los reactivos que se utilizan en las mismas, hacen inviable realizarlas para todos los sitios de muestreo.

#### *Parámetros determinados con Espectrofotómetro*

El espectrofotómetro, es un instrumento capaz de proyectar un haz de luz monocromática a través de la muestra, medir la cantidad de luz que es absorbida por la misma y compararla con otro haz de luz proyectado sobre un frasco con agua purificada y desionizada que servirá como referencia. Para la prueba se usó un espectrofotómetro HACH DR 2800 (Figura 5.10).



**FIGURA 5.10 ESPECTROFOTÓMETRO HACH DR 2800**

Fuente: Información de Producto: Analítica de Laboratorio ESPECTROFOTÓMETRO DR 2800 ECO

El dispositivo requiere la utilización de reactivos químicos, dependiendo del parámetro a determinar se utilizan diferentes reactivos. Su manejo resulta muy sencillo ya que los resultados se presentan en la pantalla en unidades de mg/l y se tiene la certeza de obtener resultados confiables.

Con este dispositivo se pudieron obtener los parámetros de:

- Nitrógeno amoniacal (NH<sub>4</sub>)
- Nitratos
- Fosfatos

#### *Parámetros determinados en el Laboratorio*

En el laboratorio ubicado en el departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la FI UNAM, se determinaron los siguientes parámetros de calidad:

- Coliformes totales y fecales
- DBO<sub>5</sub>
- Sólidos suspendidos totales
- Turbiedad

A continuación se explican aspectos muy generales de cómo se determinan los parámetros mencionados con anterioridad.

#### *Coliformes Totales y Fecales*

Es importante realizar un análisis bacteriológico del agua para evitar la propagación de epidemias como resultado de su contaminación.

Los coliformes son bacterias indicadoras de contaminación fecal y por lo tanto, de contaminación con organismos patógenos. La presencia de coliformes puede provenir de residuos humanos, animales o de la erosión del suelo, así como de la combinación de las tres.

Para determinarlas se aplicó el método del filtro de membrana (Figura 5.11): se hace pasar a través de un filtro de membrana, aplicando vacío, un volumen medido de la muestra (100 ml). Se coloca el filtro en un recipiente estéril y se incuba en contacto con un medio de cultivo durante 24 horas a una temperatura de 35 °C. Se usan dos medios de cultivo para la determinación de los coliformes: ENDO para determinar coliformes totales y MFC para coliformes fecales. Pasado el periodo de incubación se procede a revisar si hay las colonias de bacterias.

En todo momento se deben usar instrumentos perfectamente esterilizados, trabajar en una mesa estéril y con mecheros encendidos para esterilizar también el área de trabajo. La persona que realice la prueba debe lavarse las manos y no hablar al momento de realizarla. Esto para evitar la contaminación de los filtros y obtener resultados más confiables.



**FIGURA 5.11 APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL FILTRO DE MEMBRANA**  
 Fuente: Equipo de Trabajo PAPIIT

*Demanda Bioquímica de Oxígeno*

La DBO5 es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, bajo condiciones aerobias, en un periodo de 5 días y a 20°C.

En la realización de la prueba se debe considerar que la solubilidad del oxígeno en el agua es muy limitada, por lo que para valores altos de DBO deben hacerse diluciones. El agua de dilución se prepara conteniendo los nutrientes necesarios para la actividad biológica, además se airea para saturarla de oxígeno, antes de mezclarla con el agua residual. El Cuadro 5.2 muestra las diluciones recomendadas para la determinación de la DBO.

**CUADRO 5.2 DILUCIONES RECOMENDADAS PARA LA PRUEBA DE DBO**

PORCENTAJE DE DILUCIÓN	TIPO DE MUESTRA
0.1 – 1.0 %	Desechos industriales concentrados
1.0 – 5.0 %	Aguas negras crudas o sedimentadas
5.0 – 25.0 %	Efluentes oxidados
25.0 – 100.0 %	Aguas fluviales

Fuente: Manual de Prácticas de Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental  
 M.I. Alba Beatriz Vázquez González. 2006.

Para la preparación del agua de dilución se requiere airearla hasta la saturación y agregar el contenido de nutrientes necesarios para la actividad biológica. Por cada litro de agua de dilución se agrega 1ml de cada uno de los siguientes nutrientes: solución amortiguadora, Sulfato de Magnesio, Cloruro de Calcio y Cloruro Férrico.

En el caso de esta prueba, se prepararon dos litros de dilución: al 2.5% (25 ml de agua de muestra y 975 ml de agua de dilución) y 5.0% (50 ml de agua de muestra y 950 ml de agua de dilución). En la Figura 5.12 se presentan las muestras en incubación.



**FIGURA 5.12 CONSERVACIÓN DE LAS DILUCIONES POR 5 DÍAS A 20 °C**  
Fuente: Equipo de Trabajo PAPIIT

La  $DBO_5$  se obtiene como el cociente de la diferencia de oxígeno disuelto en el agua de muestra en el primer día ( $OD_{inicial}$ ) menos el oxígeno disuelto al quinto día ( $OD_{final}$ ), sobre el porcentaje de dilución (en forma decimal) al cual se realiza la prueba.

$$DBO_5 = \frac{OD_{inicial} - OD_{final}}{\% \text{ de dilución}} \dots (5.1)$$

### Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Se denomina como residuo no filtrable o material no disuelto ya que son partículas con diámetros de aproximadamente 1.5 micrómetros.

Imágenes del proceso de determinación pueden apreciarse en la Figura 5.13. Primero se filtra un volumen medido de la muestra (100 ml) a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio en un crisol Gooch previamente puesto a peso constante. Para acelerar la filtración de la muestra se utiliza una bomba de vacío y se conecta al matraz de filtración.

Después se colocan los crisoles en una estufa a una temperatura de entre 103 – 105 °C para eliminar el agua contenida en el filtro. Asegurando que los crisoles están libres de humedad, se procede a pesar nuevamente los crisoles.

Los crisoles se pesan con una balanza analítica para obtener datos más precisos.

El contenido de sólidos suspendidos totales de cada muestra se determina con el incremento, sobre el peso inicial. Siendo el inicial el peso de los crisoles antes de la filtración y el final el peso de los crisoles después de la filtración y el secado.



**FIGURA 5.13 DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES**

Fuente: Equipo de Trabajo PAPIIT

### Turbiedad

La turbiedad es una afectación de una propiedad óptica del agua que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos en lugar de ser transmitidos en línea recta.

Es causada por la presencia de partículas suspendidas y/o disueltas de origen orgánico y/o inorgánico. Para eliminar la turbiedad del agua se pueden usar procesos de coagulación, sedimentación o filtración.

Las pruebas de turbiedad deben realizarse el mismo día que es tomada la muestra. En caso de que no sea posible, las muestras deben conservarse en la obscuridad hasta por 24 horas y refrigeradas a 4 °C.

Para la determinación de la turbiedad se usó un Turbidímetro Nefelómetro, modelo HACH 2100A (Figura 5.14). Este aparato compara la intensidad de luz dispersada por la muestra con la intensidad de luz dispersada por un patrón estándar de referencia. Entre mayor sea la intensidad de luz dispersada mayor es la turbiedad. Los resultados se expresan en unidades de turbiedad nefelométricas, UTN.



**FIGURA 5.14 TURBIDÍMETRO CON EL QUE SE REALIZÓ LA DETERMINACIÓN DE TURBIEDAD**

Fuente: Manual de Instrucciones del Turbidímetro de laboratorio, Modelo 2100A

### 5.4 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para poder conocer la variabilidad de la calidad del agua del vaso de la Presa Valle de Bravo, se llevaron a cabo campañas de muestreo durante la temporada de estiaje y lluvias (Cuadro 5.3).

**CUADRO 5.3 FECHAS DE LOS MUESTREOS REALIZADOS EN EL VASO DE LA PRESA DE VALLE DE BRAVO.**

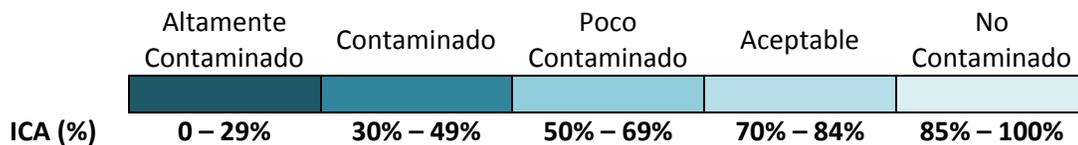
FECHA DEL MUESTREO	TEMPORADA
24 / abril / 2010	Estiaje
02 / octubre / 2010	Lluvias
26 / marzo / 2011	Estiaje

Fuente: Equipo de Trabajo PAPIIT.

La determinación de los parámetros de calidad del agua mencionados con anterioridad es importante para evaluar la evolución de la calidad del agua con respecto al tiempo. También para determinar que tan aceptable puede ser la calidad del agua para los diversos usos que tiene el agua.

Finalmente, todos los parámetros determinados en el muestreo se integran en lo que se conoce como Índice de Calidad del Agua (ICA), el cual facilita la evaluación de la calidad del agua.

La SEMARNAT define el ICA como “el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo expresado como porcentaje de agua pura; así, el agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a cero por ciento, en tanto que en el agua en excelentes condiciones el valor del índice será cercano a 100%”, y su calificación dependerá del uso que se le dará al agua. La Figura 5.15 indica los intervalos de las categorías del ICA representados en una escala grafica.



**FIGURA 5.15 INTERVALOS DE LAS CATEGORÍAS DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)**

Fuente: Elaborado por el autor.

Se formuló un modelo matemático para cada parámetro involucrado en el cálculo del ICA, dicho modelo convierte los datos físicos en correspondientes índices de calidad por parámetro (Ii). Debido a que la influencia de algunos parámetros es más significativa que la de otros, se introducen factores de ponderación (Wi) según su orden de relevancia (Cuadro 5.4). Finalmente, los índices por parámetro son promediados a fin de obtener el ICA de la muestra de agua.

CUADRO 5.4 PARÁMETROS DEL ICA SEGÚN SU IMPORTANCIA RELATIVA

PARÁMETRO	PESO (WI)	PARÁMETRO	PESO (WI)
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</b>	5.0	<b>Nitrógeno en nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>)</b>	2.0
<b>Oxígeno disuelto</b>	5.0	<b>Alcalinidad</b>	1.0
<b>Coliformes fecales</b>	4.0	<b>Color</b>	1.0
<b>Coliformes totales</b>	3.0	<b>Dureza total</b>	1.0
<b>Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)</b>	3.0	<b>Potencial de Hidrógeno (pH)</b>	1.0
<b>Conductividad eléctrica</b>	2.0	<b>Sólidos suspendidos</b>	1.0
<b>Fosfatos totales (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>)</b>	2.0	<b>Cloruros (Cl<sup>-1</sup>)</b>	0.5
<b>Grasas y aceites</b>	2.0	<b>Sólidos disueltos</b>	0.5
<b>Nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>)</b>	2.0	<b>Turbiedad</b>	0.5

Fuente: Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, 1999.

El valor del ICA se obtiene mediante la fórmula:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \dots (5.2)$$

Donde el subíndice i identifica a cada uno de los 18 parámetros, por lo que i = 1, 2, ..., 18, y n = 18.

La SEMARNAT propone una clasificación en donde se recomiendan los usos del agua respecto los intervalos de categorías del ICA, dicha clasificación se muestra en el Cuadro 5.5.

**CUADRO 5.5 ESCALA DE CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA USOS ESPECÍFICOS, SEGÚN SU ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)**

ICA		USOS DEL AGUA					
Valor (%)	Criterio General	Abastecimiento Público	Recreación General	Pesca y Vida Acuática	Industrial y Agrícola	Navegación	
100	No contaminado	No requiere purificación	Aceptable para cualquier deporte acuático	Aceptable para todos los organismos	No requiere purificación	Aceptable	
90		Requiere ligera purificación			Requiere ligera purificación para algunos procesos		
80	Aceptable	Mayor necesidad de tratamiento			Aceptable más no recomendable		Excepto especies muy sensibles
70			Dudoso para especies sensibles				
60	Poco contaminado	Dudoso	Dudoso	Solo organismos muy resistentes	Requiere tratamiento para uso en la mayor parte de la industria		
50							Evitar contacto con el agua
40	Contaminado	Inaceptable	Señal de contaminación	Inaceptable	Uso muy restringido		Contaminado
30			Inaceptable		Inaceptable		Inaceptable
20	Altamente Contaminado	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable		Inaceptable
10							
0							

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

## 5.5 GENERACIÓN DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA A TRAVÉS DE LA CORRELACIÓN DE DATOS DE CAMPO E IMÁGENES SATELITALES

Se presenta en este apartado una síntesis de la generación de modelos de calidad del agua para la presa Valle de Bravo, con base en *“Diseño de Modelos de Calidad del Agua mediante el uso de la Percepción Remota”*, Sepúlveda Hirose, Rodrigo Takashi, 2011. El documento citado, forma parte del proyecto PAPIIT IN107710 y presenta un algoritmo para la estimación de la calidad del agua por medio de la reflectancia de las imágenes captadas por las bandas del satélite Landsat 7 ETM+.

Se desarrollaron modelos para tres parámetros:

- Índice de Estado Trófico, a través de la profundidad del Disco de Secchi (PDS)
- Turbiedad
- Sólidos Disueltos Totales

Se usaron las mediciones de profundidad del disco de Secchi para calcular el Índice de Estado Trófico (IET), a través de una regresión lineal con la que se obtienen valores crecientes a mayor turbiedad del agua. Entonces, entre menor sean los valores de PDS, mayor será el valor del IET y el agua es más turbia. Al obtener el IET se puede tener una idea del estado trófico (cantidad de nutrientes en un lago y su relación con el crecimiento de la materia orgánica en el mismo) del embalse.

Así, el IET calculado será la variable dependiente del modelo buscado. Las variables independientes se buscaron probando diferentes combinaciones lineales entre el conjunto de reflectancias obtenido con las bandas del satélite Landsat 7.

Para obtener los valores de reflectancia de los sitios de muestreo, primero se debe obtener la radiancia en cada sitio extrayendo los niveles digitales y aplicar diversos coeficientes de calibración.

Con los valores de reflectancia obtenidos y el software estadístico Statplus 2009, se hicieron diversas combinaciones de datos de ingreso (bandas) para encontrar los modelos de regresión lineal más adecuados:

1. Primero se hicieron regresiones por pasos atrasadas para encontrar las bandas con información más significativa. Esta regresión examina el efecto combinado de las variables independientes que pueden intervenir en un fenómeno (variable dependiente), eliminándose las que tengan mayor relevancia en la relación. Así se puede conocer cuál es la aportación de cada una de las variables independientes respecto a las otras en la predicción de la variable dependiente.

- Finalmente se hicieron regresiones múltiples lineales, las cuales relacionan las variables independientes con una variable dependiente para poder estimarla. Esto se logra examinando la relación entre una variable dependiente y un sistema de variables independientes cuyos valores son conocidos en una cierta cantidad de sitios.

Este modelo es una herramienta muy utilizada en el estudio de muchos fenómenos, ya que a través de él se puede expresar la forma en que varía el valor de salida (o dependiente) con el cambio de las variables independientes.

Para los datos de entrada de cada modelo, se decidió generar números aleatorios para agrupar 30 sitios de muestreo por cada campaña y el resto se excluyeron para que pudieran ser utilizados como controles y así cotejar los valores de salida una vez generado el modelo.

Con los resultados de las dos primeras campañas de muestreo (25 de abril 2011 y 8 de octubre de 2011), se ingresaron 60 valores en el software StatPlus y se realizaron las combinaciones de las bandas [B1, B2, B3, B4, B5 y B7], [B1, B2, B3, B4 y B5], [B1, B2, B3 y B4] y [B1, B2 y B3].

Para seleccionar el modelo más adecuado, se estipuló que el índice de concordancia fuera el máximo y que el número de bandas utilizadas fuera el mínimo. De acuerdo con este criterio, los modelos que presentaron los mejores resultados fueron:

#### Índice de Estado Tráfico

$$IET = 51.466 - 92.645 B1 + 53.9 B2 + 75.42 B3 \dots (5.3)$$

Índice de concordancia: 0.873

#### Turbiedad

$$Turbiedad = 2.808 + 42.961 B1 + 1.994 B4 \dots (5.4)$$

Índice de concordancia: 0.893

#### Sólidos Disueltos Totales

$$SDT = 592.218 - 102.538 B2 + 75.42 \frac{B4}{B2} \dots (5.5)$$

Índice de concordancia: 0.896

Cabe mencionar que este modelo es de uso específico para el lago Valle de Bravo, pero la metodología que se empleó puede seguirse para generar los de otros embalses o cuerpos de agua.

## 5.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de calidad obtenidos de las tres campañas de muestreo y las calificaciones del ICA, se presentan agrupados como sigue:

### 1. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA MEDIDOS EN TODOS LOS SITIOS DE MUESTREO (en campo y laboratorio)

Cuadro 5.6	PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO (Época de Estiaje)
Cuadro 5.7	SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO (Época de Lluvias)
Cuadro 5.8	TERCERA CAMPAÑA DE MUESTREO (Época de Estiaje)

### 2. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA MEDIDOS SÓLO EN 6 SITIOS DE MUESTREO

Cuadro 5.9	PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO (Época de Estiaje)
Cuadro 5.10	SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO (Época de Lluvias)
Cuadro 5.11	TERCERA CAMPAÑA DE MUESTREO (Época de Estiaje)

### 3. CALIFICACIÓN DEL ICA PARA TODOS LOS SITIOS DE MUESTREO

Cuadro 5.12	PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO (Época de Estiaje)
Cuadro 5.13	SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO (Época de Lluvias)
Cuadro 5.14	TERCERA CAMPAÑA DE MUESTREO (Época de Estiaje)

Analizando los parámetros de calidad obtenidos en las tres campañas, se observó que durante la época de lluvias las concentraciones de los diversos contaminantes resultaron menores, por lo cual se asume que el agua de lluvias se diluye con el agua del embalse. Esto quiere decir que cada cambio de temporada, cuando llega la época de lluvias, el lago presenta una mayor capacidad de dilución.

De acuerdo al Cuadro 5.5 un agua clasificada como “no contaminada” tiene una mejor calidad que una clasificada como “Aceptable”. Comparando los valores del ICA de las tres campañas, puede apreciarse que los valores de calidad del agua en la época de lluvias tienen una mejor calificación que los valores de calidad en época de estiaje.

A pesar de que la calidad del agua fue mejor en la época de lluvias, las cantidades de coliformes fecales y totales fueron incontables. Esto es preocupante ya que uno de los fines del embalse es el recreativo, con actividades que implican el contacto directo con el agua durante todo el año y existe el riesgo constante de que contraigan alguna enfermedad.

Con los datos de calificaciones del ICA y con el fin de comparar la calidad del agua, se realizaron mapas de calidad para las tres campañas, los cuales muestran isolíneas del ICA en la superficie del embalse (Figuras 5.16, 5.17 y 5.18). La generación de estos mapas de calidad resulta muy ilustrativa ya que pueden observarse las variaciones temporales de los contaminantes, o en este caso del ICA, tanto en su distribución espacial y temporal.

Con la ayuda del programa Surfer 8 se realizaron diversas interpolaciones a partir del ingreso de una serie de datos: las coordenadas espaciales (X, Y) asociadas al valor (Z) del ICA correspondiente en dicha coordenada.

Una vez generados los mapas de calidad, se observó que la calidad del agua en el embalse disminuye cerca de la zona del embarcadero y de la desembocadura del río Amanalco. Por lo que se puede concluir que todavía se descargan aguas residuales en el vaso.

## PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA MEDIDOS EN TODOS LOS SITIOS DE MUESTREO (en campo y laboratorio)

CUADRO 5.6 PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO (ÉPOCA DE ESTIAJE)

Estación	pH	OD (%)	OD (mg/l)	C.E. (μS/cm)	C.E. (μS/cm A)	Resistividad (MΩ•cm)	TSD (mg/l)	Salinidad (PSU)	Temp (°C)	Presión (mbar)	PDS (m)	Índice de Estado Trófico (IET)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/l)
1	9.44	103.7	7.37	138	130	0.0073	69	0.06	21.92	827.1	1.00	60.00	8.0	14.9
2	9.45	103.4	7.30	138	131	0.0073	69	0.06	22.27	827.9	1.00	60.00	11.0	9.2
3	9.40	102.8	7.05	144	141	0.0069	72	0.07	23.79	828.1	1.00	60.00	7.1	1.5
4	9.48	102.3	7.12	143	138	0.0070	72	0.07	23.02	827.9	1.10	58.62	8.2	6.3
5	9.49	103.1	7.36	145	136	0.0069	73	0.07	21.69	827.8	1.08	58.89	11.0	36.5
6	9.36	93.1	6.55	151	144	0.0066	76	0.07	22.42	827.6	1.07	59.02	11.0	1008.7
7	9.46	103.4	7.33	141	133	0.0071	71	0.07	21.99	827.4	1.09	58.76	11.0	410.2
8	9.51	110.0	7.72	139	132	0.0072	69	0.06	22.58	827.2	1.21	57.25	11.0	0.9
9	9.41	108.7	7.61	144	138	0.0069	72	0.07	22.59	826.9	1.23	57.01	11.0	6.4
10	9.57	109.7	7.69	146	139	0.0069	73	0.07	22.55	826.8	1.14	58.11	11.0	8.9
11	9.47	108.8	7.66	144	137	0.0069	72	0.07	22.39	826.8				
12	9.48	108.9	7.67	121	115	0.0082	61	0.06	22.13	823.4	1.10	58.62	11.0	5.5
13	9.49	110.2	7.69	134	127	0.0075	67	0.06	22.28	818.2	1.28	56.44	11.0	8.9
14	9.53	112.3	7.88	142	134	0.0070	71	0.07	21.91	817.2	1.05	59.30	11.0	6.7
15	9.53	109.9	7.70	144	136	0.0069	72	0.07	21.92	816.5	1.10	58.62	11.0	4.4
16	9.52	109.5	7.67	145	136	0.0069	72	0.07	21.88	815.5	1.11	58.49	11.0	1.5
17	9.55	109.7	7.65	144.00	136.00	0.0100	72.00	0.07	22.09	815.1				
18	9.51	111.6	7.73	148	141	0.0068	74	0.07	22.37	814.7	1.03	59.57	11.0	4.6
19	9.54	111.7	7.75	150	142	0.0067	75	0.07	22.27	814.2	1.14	58.11	12.0	5.6
20	9.52	112.0	7.71	146.00	139.00	0.0100	73.00	0.07	22.65	814.2				
21	9.53	113.5	7.82	150	144	0.0067	75	0.07	22.68	814.3	1.09	58.76	12.0	10.5
22	9.49	109.4	7.58	152	145	0.0066	76	0.07	22.35	814.0	1.06	59.16	12.0	9.2
23	9.52	112.3	7.76	155	148	0.0065	78	0.07	22.47	813.9	1.00	60.00	12.0	791.3

24	9.52	112.0	7.73	152	145	0.0066	76	0.07	22.53	813.8	0.83	62.69	12.0	3.8
25	9.54	115.4	7.96	155	148	0.0065	77	0.07	22.53	813.5	0.91	61.36	11.0	12.5
26	9.56	113.4	7.84	156	148	0.0064	78	0.07	22.44	813.3	1.07	59.02	11.0	11.4
27	9.56	112.1	7.78	150	142	0.0067	75	0.07	22.18	813.1	0.72	64.74	11.0	45.6
28	9.56	112.5	7.85	151	142	0.0066	75	0.07	21.93	813.1	1.10	58.62	11.0	6.2
29	9.56	108.1	7.61	150	140	0.0067	75	0.07	21.49	813.0	1.15	57.98	11.0	1.9
30	9.55	107.8	7.58	154	144	0.0065	77	0.07	21.53	813.0	0.95	60.74	11.0	6.0
31	9.53	109.5	7.66	156	146	0.0064	78	0.07	21.78	813.0	1.00	60.00	12.0	9.3
32	9.58	115.8	8.10	157	148	0.0064	79	0.07	21.82	813.1	0.92	61.20	12.0	9.3
33	9.57	114.5	8.03	157	148	0.0064	79	0.07	21.68	813.4	1.00	60.00	11.0	7.9
34	9.52	108.5	7.50	156	148	0.0064	78	0.07	22.37	813.3	1.00	60.00	10.0	8.4
35	9.51	112.3	7.70	155	149	0.0065	77	0.07	22.79	813.3	1.03	59.57	10.0	5.4
36	9.48	111.6	7.70	161	154	0.0062	81	0.08	22.55	813.4	1.00	60.00	11.0	16.5
37	9.50	113.4	7.88	157	149	0.0064	79	0.07	22.18	813.5	1.05	59.30	12.0	9.9
38	9.45	104.0	7.22	158	150	0.0063	79	0.07	22.19	813.4				
39	9.45	107.6	7.43	158	151	0.0063	79	0.07	22.54	813.8	0.86	62.18	12.0	9.1
40	9.49	114.9	7.87	161	155	0.0062	80	0.08	22.93	813.9	0.89	61.68	13.0	27.8
41	9.44	109.9	7.44	160	156	0.0062	80	0.07	23.57	813.9				
42	9.51	118.8	8.07	161	156	0.0062	80	0.08	23.31	813.7	0.88	61.84	12.0	109.6
43	9.49	117.0	7.96	159	154	0.0063	80	0.07	23.24	813.6	0.80	63.22	11.0	7.9
44	9.52	118.4	8.13	160	153	0.0063	80	0.07	22.76	813.3				
45	9.53	121.2	8.29	160	154	0.0062	80	0.07	22.93	813.1				
46	9.54	116.1	7.99	157	149	0.0064	78	0.07	22.56	812.9	1.00	60.00	11.0	8.3
47	9.52	113.3	7.84	159	151	0.0063	79	0.07	22.35	812.9	1.00	60.00	11.0	7.3
48	9.51	116.0	8.00	152	145	0.0066	76	0.07	22.64	815.1				
49	9.52	112.2	7.75	156	149	0.0064	78	0.07	22.59	814.8				
50	9.55	115.6	7.97	158	151	0.0063	79	0.07	22.62	814.5	0.86	62.18	10.0	16.3

**CUADRO 5.7 SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO (ÉPOCA DE LLUVIAS)**

Estación	pH	OD (%)	OD (mg/l)	C.E. (μS/cm)	C.E. (μS/cm A)	Resistividad (MΩ•cm)	TSD (mg/l)	Salinidad (PSU)	Temp (°C)	Presión (mbar)	PDS (m)	Índice de Estado Trófico (IET)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/l)
1														
2	9.06	94.9	6.60	167	159	0.0060	83	0.08	22.41	828.60	1.94	50.44	4.5	0
3	9.09	101.8	7.08	163	154	0.0061	81	0.08	22.26	828.60	2.03	49.79	5.0	0
4	9.10	94.9	6.60	165	155	0.0061	82	0.08	22.03	828.80	1.57	53.49	5.0	24
5	9.08	91.4	6.36	161	153	0.0062	80	0.08	22.42	828.80	1.97	50.22	4.5	1
6	9.12	86.2	6.00	161	153	0.0062	81	0.08	22.35	828.10	1.94	50.44	4.5	7
7	9.12	108.7	7.56	161	153	0.0062	80	0.08	22.27	827.70	1.86	51.05	5.5	1
8	8.46	94.9	6.60						17.34	827.40	1.72	52.18	5.5	3
9	9.15	88.0	6.12	161	153	0.0062	80	0.08	22.44	827.30	1.88	50.89	4.5	1
10	9.12	89.7	6.24	162	155	0.0062	81	0.08	22.62	827.10	1.69	52.43	5.5	1
11	9.11	96.6	6.72	160	152	0.0063	80	0.07	22.49	826.60	1.77	51.76	4.5	19
12	9.14	188.0	13.08	152	145	0.0066	76	0.07	22.32	826.10	1.69	52.43	5.0	14
13	9.12	103.5	7.20	159	151	0.0063	80	0.07	22.40	825.30	1.74	52.01	5.0	15
14	9.14	101.8	7.08	160	152	0.0062	80	0.07	22.42	824.20	1.78	51.68	5.0	12
15	9.10	112.1	7.80	164	156	0.0061	82	0.08	22.39	816.60	1.71	52.26	5.0	27
16	9.13	124.2	8.64	162	154	0.0062	81	0.08	22.34	815.20	1.96	50.29	5.0	15
17	9.09	103.5	7.20	157	149	0.0064	78	0.07	22.30	814.40	1.82	51.36	5.0	9
18	9.15	139.7	9.72	158	150	0.0063	79	0.07	22.43	813.70	1.83	51.28	5.0	9
19	9.14	112.1	7.80	160	152	0.0063	80	0.07	22.38	812.80	1.80	51.52	5.5	8
20	9.15	117.3	8.16	161	153	0.0062	80	0.08	22.55	812.50	1.69	52.43	5.5	19
21	9.13	120.7	8.40	164	156	0.0061	82	0.08	22.44	811.90	1.83	51.28	5.0	16
22	9.15	127.6	8.88	162	154	0.0062	81	0.08	22.34	811.40	1.91	50.66	4.5	11
23	9.11	119.0	8.28	165	157	0.0061	82	0.08	22.37	811.10	1.79	51.60	4.5	17
24	9.14	113.8	7.92	165	156	0.0061	82	0.08	22.26	810.80	1.58	53.40	5.5	18

25	9.13	120.7	8.40	165	156	0.0061	82	0.08	22.12	811.00	1.70	52.34	5.5	13
26	9.10	120.7	8.40	163	154	0.0061	81	0.08	22.21	810.80	1.88	50.89	5.0	19
27	9.11	119.0	8.28	162	154	0.0062	81	0.08	22.22	810.80	1.81	51.44	5.0	21
28	9.11	125.9	8.76	164	157	0.0061	82	0.08	22.58	810.80	1.88	50.89	5.5	21
29	9.11	129.3	9.00	159	151	0.0063	80	0.07	22.38	810.90	1.48	54.34	5.0	14
30	9.12	132.8	9.24	165	157	0.0061	83	0.08	22.28	811.00	1.73	52.09	4.5	13
31	9.10	129.3	9.00	160	151	0.0063	80	0.07	22.21	811.20	1.96	50.29	5.0	38
32	9.13	134.5	9.36	162	154	0.0062	81	0.08	22.29	811.20	1.80	51.52	5.0	10
33	9.17	144.9	10.08	164	157	0.0061	82	0.08	22.57	811.20	1.56	53.58	4.5	12
34	9.08	144.9	10.08	165	157	0.0061	82	0.08	22.50	811.40	1.83	51.28	5.0	11
35	9.15	141.42	9.84	160	153	0.0062	80	0.07	22.56	811.50	1.59	53.31	4.5	14
36	9.08	137.97	9.60	166	158	0.0060	83	0.08	22.57	812.10	1.67	52.60	5.0	13
37	9.13	141.42	9.84	165	157	0.0061	82	0.08	22.62	812.20	1.61	53.13	5.5	13
38	9.15	139.70	9.72	160	153	0.0062	80	0.08	22.58	812.50	1.58	53.40	5.5	8
39	9.18	150.04	10.44	164	157	0.0061	82	0.08	22.67	812.70	1.38	55.35	5.5	13
40	9.16	146.59	10.20	164	157	0.0061	82	0.08	22.63	813.20	1.38	55.35	5.0	31
41	9.17	146.59	10.20	163	155	0.0061	81	0.08	22.51	812.40	1.43	54.84	5.0	17
42	9.15	150.04	10.44	163	156	0.0061	82	0.08	22.52	812.50	1.49	54.25	4.5	24
43	M	U	E	S	T	R	A	NO	T	O	M	A	D	A
44	9.14	148.32	10.32	164	156	0.0061	82	0.08	22.38	813.10	1.61	53.13	5.5	23
45	9.11	148.3	10.32	162	153	0.0062	81	0.08	22.21	813.00	1.65	52.78	5.0	17
46	M	U	E	S	T	R	A	NO	T	O	M	A	D	A
47	9.13	155.2	10.80	164	155	0.0061	82	0.08	22.22	813.00	1.43	54.84	5.0	15
48	M	U	E	S	T	R	A	NO	T	O	M	A	D	A
49	9.14	158.7	11.04	163	155	0.0061	81	0.08	22.51	812.70	1.49	54.25	5.0	16
50	9.10	155.2	10.80	163	154	0.0061	81	0.08	22.30	812.70	1.60	53.22	5.0	14

**CUADRO 5.8 TERCERA CAMPAÑA DE MUESTREO (ÉPOCA DE ESTIAJE)**

Estación	pH	OD (%)	OD (mg/l)	C.E. (μS/cm)	C.E. (μS/cm A)	Resistividad (MΩ•cm)	TSD (mg/l)	Salinidad (PSU)	Temp (°C)	Presión (mbar)	PDS (m)	Índice de Estado Trófico (IET)	Turbiedad (NTU)	SST (mg/l)
1	9.06	125.9	9.10	155	143	0.0065	77	0.07	21.03	827.1	1.78	51.68	2.4	20
2	9.14	122.1	8.77	166	154	0.0060	83	0.08	21.28	826.0	1.71	52.26	3.2	31
3	9.18	116.8	8.42	164	152	0.0061	82	0.08	21.07	825.7	1.95	50.37	2.9	33
4	9.19	118.9	8.61	164	151	0.0061	82	0.08	20.79	824.8	1.96	50.29	3.5	8
5	9.21	118.0	8.50	166	154	0.0060	83	0.08	21.06	824.5	2.13	49.09	2.8	5
6	9.21	118.1	8.57	162	149	0.0062	81	0.08	20.64	823.9	1.89	50.82	2.6	2
7	9.19	114.0	8.24	167	154	0.0060	84	0.08	20.82	823.7	2.00	50.00	3.1	11
8	9.19	114.5	8.29	166	153	0.0060	83	0.08	20.71	823.5	1.89	50.82	2.8	8
9	9.21	118.3	8.58	168	154	0.0060	84	0.08	20.60	823.2	2.04	49.71	3.7	12
10	9.16	116.8	8.47	167	153	0.0060	83	0.08	20.61	823.1	1.93	50.51	3.1	13
11	9.15	118.5	8.61	167	153	0.0060	84	0.08	20.47	822.8	1.95	50.37	3.4	11
12	9.21	119.3	8.62	166	152	0.0060	83	0.08	20.74	822.5	2.10	49.30	2.5	5
13	9.17	119.4	8.58	167	154	0.0060	83	0.08	21.02	822.3	2.27	48.17	2.6	7
14	9.37	119.5	8.62	167	153	0.0060	83	0.08	20.82	822.4	2.28	48.11	2.7	10
15	9.22	119.7	8.66	165	152	0.0060	83	0.08	20.64	822.2	2.06	49.57	3.1	3
16	9.21	119.4	8.67	169	155	0.0059	85	0.08	20.51	822.1	2.14	49.02	2.5	18
17	9.20	115.5	8.40	168	154	0.0059	84	0.08	20.41	822.0	2.18	48.76	2.7	4
18	9.21	117.9	8.54	169	155	0.0059	84	0.08	20.58	821.8	1.82	51.36	2.7	19
19	9.21	116.7	8.41	172	159	0.0058	86	0.08	20.83	821.9	2.30	47.98	2.7	10
20	9.22	116.8	8.39	171	158	0.0059	85	0.08	21.05	821.9	2.37	47.55	2.9	7
21	9.18	113.6	8.20	169	155	0.0059	84	0.08	20.78	821.9	2.14	49.02	3.0	19
22	9.17	114.9	8.30	169	155	0.0059	84	0.08	20.74	821.8	2.17	48.82	3.1	3
23	9.20	117.3	8.50	165	151	0.0061	82	0.08	20.57	821.7	2.30	47.98	2.7	2
24	9.20	113.4	8.18	166	153	0.0060	83	0.08	20.82	821.8	2.10	49.30	3.0	0

25	9.16	112.9	8.16	168	154	0.0060	84	0.08	20.67	821.8	2.00	50.00	3.8	4
26	9.18	112.2	8.09	165	152	0.0061	82	0.08	20.83	822.0	1.88	50.89	2.6	10
27	9.17	113.1	8.15	166	153	0.0060	83	0.08	20.85	822.1	1.94	50.44	3.0	7
28	9.19	113.3	8.13	169	156	0.0059	84	0.08	21.13	822.4	1.87	50.97	2.9	9
29	9.20	112.5	8.06	166	154	0.0060	83	0.08	21.22	822.5	1.83	51.28	2.7	12
30	9.18	113.4	8.14	167	154	0.0060	83	0.08	21.04	822.3	1.92	50.59	3.0	5
31	9.19	114.8	8.28	167	154	0.0060	84	0.08	20.83	822.2	1.84	51.20	3.0	1
32	9.20	115.2	8.28	167	154	0.0060	84	0.08	21.03	822.4	2.08	49.43	3.5	6
33	9.19	117.8	8.45	170	157	0.0059	85	0.08	21.16	823.1	1.74	52.01	3.6	8
34	9.17	118.2	8.39	168	157	0.0060	84	0.08	21.70	823.3	1.68	52.52	3.9	7
35	9.19	117.9	8.43	167	156	0.0060	84	0.08	21.34	823.4	1.53	53.86	4.2	4
36	9.16	113.7	8.07	171	160	0.0059	85	0.08	21.67	823.4	1.60	53.22	3.8	17
37	9.19	116.6	8.29	172	161	0.0058	86	0.08	21.66	823.2	1.44	54.74	3.6	10
38	9.20	117.3	8.38	171	159	0.0058	86	0.08	21.33	822.5	1.44	54.74	3.5	6
39	9.21	118.8	8.36	171	160	0.0058	86	0.08	21.64	815.5	1.62	53.04	3.7	11
40	9.22	118.6	8.35	169	158	0.0059	85	0.08	21.54	814.5	1.51	54.05	3.5	27
41	9.21	117.2	8.35	164	151	0.0061	82	0.08	20.87	813.4	1.79	51.60	3.2	7
42	9.22	116.1	8.23	166	154	0.0060	83	0.08	21.11	813.2	1.81	51.44	2.9	6
43	9.21	115.7	8.21	165	152	0.0061	82	0.08	21.06	812.7	2.09	49.36	2.6	8
44	9.23	114.4	8.11	168	155	0.0060	84	0.08	21.03	812.4	1.78	51.68	2.8	8
45	9.23	116.6	8.31	167	154	0.0060	83	0.08	20.81	812.1	1.78	51.68	3.9	9
46	9.26	117.3	8.35	169	156	0.0059	85	0.08	20.80	811.8	1.79	51.60	2.4	12
47	9.21	116.4	8.25	168	156	0.0059	84	0.08	21.04	811.5	1.84	51.20	2.7	7
48	9.21	115.6	8.12	166	155	0.0060	83	0.08	21.51	811.9	1.78	51.68	4.7	1
49	9.24	116.9	8.24	166	154	0.0060	83	0.08	21.33	811.7	1.72	52.18	2.7	14
50	9.23	118.2	8.39	169	156	0.0059	84	0.08	20.96	811.4	1.71	52.26	2.7	2

## PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA MEDIDOS EN SÓLO 6 SITIOS DE MUESTREO

CUADRO 5.9 PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO (ÉPOCA DE ESTIAJE)

Estación	Coordenadas (UTM)		DBO (mg/l)	Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Fosfatos (mg/l)	CT (UFC)	CF (UFC)	ICA
3	381042.43	2120893.43	32.0	0.06	0.40	0.18	Incontables	Incontables	59
6	379887.33	2120252.30	50.0	0.01	0.70	0.11	Incontables	Incontables	51
25	378585.91	2123113.76	30.0	0.01	0.40	0.09	Incontables	Incontables	56
30	376842.71	2123620.36	28.0	0.06	0.50	0.10	Incontables	Incontables	57
40	380050.65	2125563.50	34.0	0.00	0.60	0.09	Incontables	Incontables	55
43	380175.73	2125043.13	36.0	0.01	0.60	0.11	Incontables	Incontables	55

CUADRO 5.10 SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO (ÉPOCA DE LLUVIAS)

Estación	Coordenadas (UTM)		DBO (mg/l)	Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Fosfatos (mg/l)	CT (UFC)	CF (UFC)	ICA
3	380889.68	2120762.23	1.0	0.05	2.20	0.18	Incontables	Incontables	70
10	377996.71	2120599.87	7.0	0.01	3.00	0.12	Incontables	Incontables	56
25	376565.39	2124507.61	1.5	0.00	3.10	0.79	Incontables	Incontables	71
37	380116.66	2125387.83	2.0	0.00	3.00	0.14	Incontables	Incontables	71
40	379915.66	2124128.71	3.0	0.02	2.80	0.11	Incontables	Incontables	68
44	378793.48	2123143.13	10.0	0.02	3.20	0.14	Incontables	Incontables	61

**CUADRO 5.11 TERCERA CAMPAÑA DE MUESTREO (ÉPOCA DE ESTIAJE)**

Estación	Coordenadas (UTM)		DBO (mg/l)	Nitrógeno Amoniacal (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Fosfatos (mg/l)	CT (UFC)	CF (UFC)	ICA
3	380902.38	2120918.93	4.0	0.10	2.70	0.14	Incontables	Incontables	62
10	378014.16	2120587.46	4.0	0.05	2.40	0.15	Incontables	Incontables	63
25	376577.07	2124507.53	4.0	0.09	2.00	0.17	Incontables	Incontables	62
37	380113.70	2125381.70	11.0	0.06	2.00	0.16	Incontables	Incontables	58
40	379909.65	2124104.16	4.0	0.01	2.40	0.18	Incontables	Incontables	62
44	378784.84	2123161.63	12.0	0.08	2.50	0.16	Incontables	Incontables	57

## CALIFICACIÓN DEL ICA PARA TODOS LOS SITIOS DE MUESTREO

CUADRO 5.12 PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO (ÉPOCA DE ESTIAJE)

Estación	ICA	EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO SEGÚN EL CRITERIO GENERAL	Estación	ICA	EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO SEGÚN EL CRITERIO GENERAL
1	80	ACEPTABLE	26	82	ACEPTABLE
2	80	ACEPTABLE	27	78	ACEPTABLE
3	59	POCO CONTAMINADO	28	82	ACEPTABLE
4	79	ACEPTABLE	29	80	ACEPTABLE
5	77	ACEPTABLE	30	57	POCO CONTAMINADO
6	51	POCO CONTAMINADO	31	81	ACEPTABLE
7	73	ACEPTABLE	32	83	ACEPTABLE
8	83	ACEPTABLE	33	83	ACEPTABLE
9	82	ACEPTABLE	34	80	ACEPTABLE
10	82	ACEPTABLE	35	82	ACEPTABLE
11			36	81	ACEPTABLE
12	83	ACEPTABLE	37	82	ACEPTABLE
13	82	ACEPTABLE	38		
14	83	ACEPTABLE	39	80	ACEPTABLE
15	82	ACEPTABLE	40	55	POCO CONTAMINADO
16	81	ACEPTABLE	41		
17			42	79	ACEPTABLE
18	82	ACEPTABLE	43	55	POCO CONTAMINADO
19	82	ACEPTABLE	44		
20			45		
21	83	ACEPTABLE	46	83	ACEPTABLE
22	81	ACEPTABLE	47	82	ACEPTABLE
23	74	ACEPTABLE	48		
24	82	ACEPTABLE	49		
25	56	POCO CONTAMINADO	50	83	ACEPTABLE

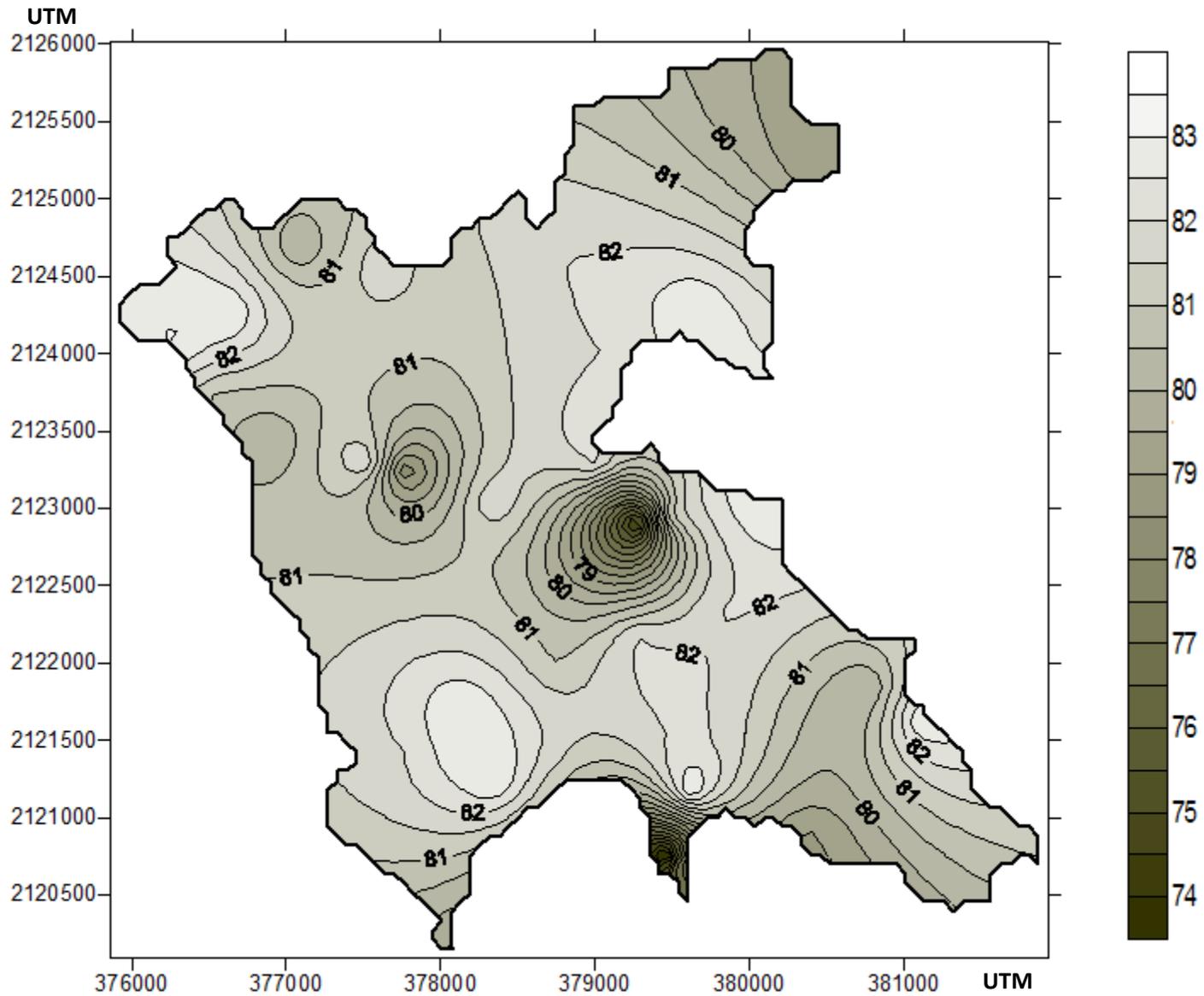


FIGURA 5.16 VALORES DEL ICA PARA LA PRIMERA CAMPAÑA DE MUESTREO EN EL VASO DE LA PRESA VALLE DE BRAVO

Fuente: Equipo de Trabajo PAPIIT.

**CUADRO 5.13 SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO (ÉPOCA DE LLUVIAS)**

Estación	ICA	EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO SEGÚN EL CRITERIO GENERAL	Estación	ICA	EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO SEGÚN EL CRITERIO GENERAL
<b>1</b>			<b>26</b>	85	NO CONTAMINADO
<b>2</b>	76	ACEPTABLE	<b>27</b>	85	NO CONTAMINADO
<b>3</b>	70	ACEPTABLE	<b>28</b>	87	NO CONTAMINADO
<b>4</b>	74	ACEPTABLE	<b>29</b>	90	NO CONTAMINADO
<b>5</b>	77	ACEPTABLE	<b>30</b>	91	NO CONTAMINADO
<b>6</b>	73	ACEPTABLE	<b>31</b>	87	NO CONTAMINADO
<b>7</b>	82	ACEPTABLE	<b>32</b>	92	NO CONTAMINADO
<b>8</b>			<b>33</b>	96	NO CONTAMINADO
<b>9</b>	74	ACEPTABLE	<b>34</b>	96	NO CONTAMINADO
<b>10</b>	56	POCO CONTAMINADO	<b>35</b>	95	NO CONTAMINADO
<b>11</b>	76	ACEPTABLE	<b>36</b>	94	NO CONTAMINADO
<b>12</b>	100	NO CONTAMINADO	<b>37</b>	71	ACEPTABLE
<b>13</b>	80	ACEPTABLE	<b>38</b>	94	NO CONTAMINADO
<b>14</b>	79	ACEPTABLE	<b>39</b>	98	NO CONTAMINADO
<b>15</b>	81	ACEPTABLE	<b>40</b>	68	POCO CONTAMINADO
<b>16</b>	88	NO CONTAMINADO	<b>41</b>	96	NO CONTAMINADO
<b>17</b>	80	ACEPTABLE	<b>42</b>	97	NO CONTAMINADO
<b>18</b>	94	NO CONTAMINADO	<b>43</b>		
<b>19</b>	83	ACEPTABLE	<b>44</b>	61	POCO CONTAMINADO
<b>20</b>	84	NO CONTAMINADO	<b>45</b>	97	NO CONTAMINADO
<b>21</b>	86	NO CONTAMINADO	<b>46</b>		
<b>22</b>	89	NO CONTAMINADO	<b>47</b>	100	NO CONTAMINADO
<b>23</b>	85	NO CONTAMINADO	<b>48</b>		
<b>24</b>	83	ACEPTABLE	<b>49</b>	100	NO CONTAMINADO
<b>25</b>	71	ACEPTABLE	<b>50</b>	100	NO CONTAMINADO

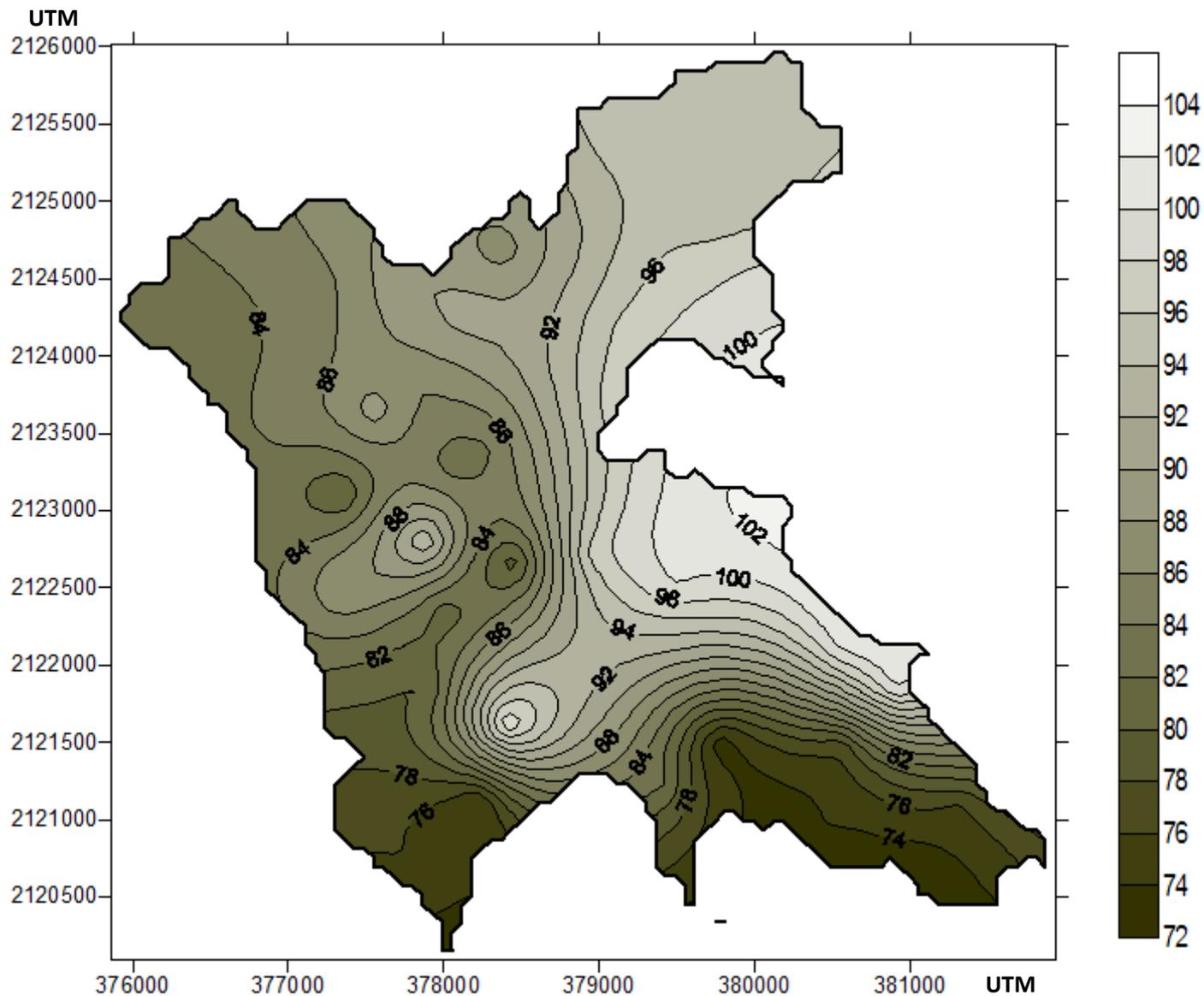


FIGURA 5.17 VALORES DEL ICA PARA LA SEGUNDA CAMPAÑA DE MUESTREO EN EL VASO DE LA PRESA VALLE DE BRAVO

Fuente: Equipo de Trabajo PAPIIT.

CUADRO 5.14

**TERCERA CAMPAÑA DE MUESTREO (ÉPOCA DE ESTIAJE)**

Estación	ICA	EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO SEGÚN EL CRITERIO GENERAL	Estación	ICA	EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO SEGÚN EL CRITERIO GENERAL
1	89	NO CONTAMINADO	26	84	NO CONTAMINADO
2	85	NO CONTAMINADO	27	84	NO CONTAMINADO
3	62	POCO CONTAMINADO	28	84	NO CONTAMINADO
4	86	NO CONTAMINADO	29	84	NO CONTAMINADO
5	86	NO CONTAMINADO	30	84	NO CONTAMINADO
6	86	NO CONTAMINADO	31	85	NO CONTAMINADO
7	84	NO CONTAMINADO	32	85	NO CONTAMINADO
8	85	NO CONTAMINADO	33	86	NO CONTAMINADO
9	86	NO CONTAMINADO	34	86	NO CONTAMINADO
10	63	POCO CONTAMINADO	35	86	NO CONTAMINADO
11	86	NO CONTAMINADO	36	83	ACEPTABLE
12	87	NO CONTAMINADO	37	58	POCO CONTAMINADO
13	87	NO CONTAMINADO	38	85	NO CONTAMINADO
14	86	NO CONTAMINADO	39	85	NO CONTAMINADO
15	87	NO CONTAMINADO	40	62	POCO CONTAMINADO
16	86	NO CONTAMINADO	41	85	NO CONTAMINADO
17	85	NO CONTAMINADO	42	85	NO CONTAMINADO
18	85	NO CONTAMINADO	43	85	NO CONTAMINADO
19	85	NO CONTAMINADO	44	57	POCO CONTAMINADO
20	85	NO CONTAMINADO	45	84	NO CONTAMINADO
21	83	ACEPTABLE	46	85	NO CONTAMINADO
22	85	NO CONTAMINADO	47	85	NO CONTAMINADO
23	86	NO CONTAMINADO	48	84	NO CONTAMINADO
24	84	NO CONTAMINADO	49	85	NO CONTAMINADO
25	62	POCO CONTAMINADO	50	85	NO CONTAMINADO

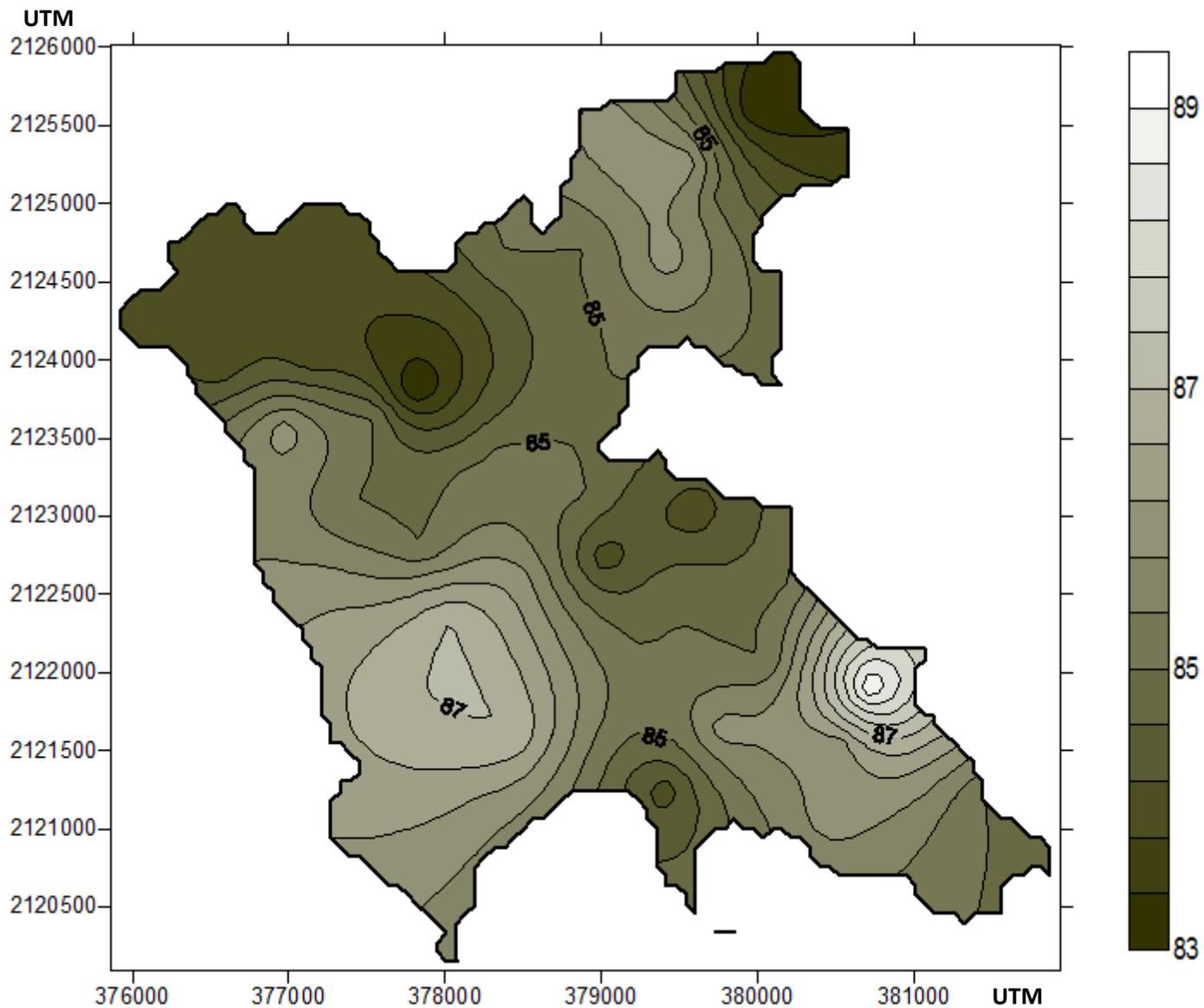


FIGURA 5.18 VALORES DEL ICA PARA LA TERCERA CAMPAÑA DE MUESTREO EN EL VASO DE LA PRESA VALLE DE BRAVO  
Fuente: Equipo de Trabajo PAPIIT.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

La percepción remota es una herramienta útil en todos los ámbitos del conocimiento, particularmente en el campo de la ingeniería civil. La cual poco a poco va tomando fuerza y es utilizada para varias investigaciones científicas alrededor del mundo. El proyecto PAPIIT IN107710 del cual forma parte el presente trabajo es un ejemplo de aplicación al estudio de la calidad del agua superficial.

En general, la percepción remota aporta una serie de ventajas al monitoreo ambiental, las cuales se enlistan a continuación:

1. Rapidez de adquisición de información de grandes superficies acuáticas, terrestres o atmosféricas.
2. Monitoreo permanente de la zona de estudio, lo cual permite generar una base de datos actualizada.
3. Facilidad de estudio en áreas inaccesibles o de difícil acceso.
4. Bajo costo, sobre todo cuando el área de estudio se incrementa.

La información de calidad del agua que puede obtenerse a partir del uso de la percepción remota, está limitado a aquellos parámetros que modifican la respuesta espectral del agua: turbiedad, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales y temperatura principalmente. Siendo posible establecer relaciones entre estos parámetros de calidad y la reflectancia, ya que la intensidad y color de la luz cambia en función del volumen de agua y sus contaminantes.

A pesar de que el uso de la percepción remota se limita a los parámetros anteriores, estos pueden ser usados como indicadores para detectar problemas de contaminación y ejercer acciones de prevención al respecto.

El uso de la percepción remota no sustituye el trabajo de campo, lo complementa ya que es necesario contar con un grupo de muestras tomadas en sitio para calibrar la relación entre las propiedades del agua y la información obtenida con las imágenes vía satélite. Aun así, puede permitir un monitoreo a bajo costo.

Para el análisis de calidad realizado en este proyecto, se decidió usar imágenes de la plataforma Landsat 7 debido a su resolución espectral, resolución temporal y la accesibilidad para adquirir las imágenes gratuitamente. Además, existen estudios de calidad del agua en otros países que han usado esta plataforma y obtenido buenos resultados.

El uso de esta herramienta puede implicar una inversión inicial significativa en las primeras etapas: búsqueda y adquisición de material bibliográfico, adquisición de hardware y software, la obtención de la imagen y la capacitación en el uso del software para el procesamiento de imágenes. Pero una vez establecida la tecnología para la investigación y entre mayor sea el área de estudio del que se le pueda sacar provecho a la imagen, el costo de la investigación disminuirá.

## RECOMENDACIONES

1. Para complementar el estudio de calidad de un determinado cuerpo de agua, se pueden obtener imágenes de años anteriores y hacer una estimación de la calidad del agua para evaluar su evolución a través del tiempo.
2. Elegir la plataforma que brinde la imagen con las características más adecuadas al estudio de percepción remota que se realizará. Se deben revisar las características de los sensores de cada plataforma y verificar la resolución espectral que tienen disponibles sus bandas.
3. Es importante mantenerse informado sobre las actualizaciones de los sensores y plataformas disponibles. Ya que en la actualidad la tecnología va innovándose de forma acelerada, y puede ser que las nuevas plataformas hagan más eficiente el proceso de recolección y más precisa la obtención de los datos a analizar.
4. Las imágenes capturadas por el satélite no deben diferir respecto al muestreo en más de 24 horas, se deben verificar las fechas de paso de la plataforma que se utilizará.
5. El muestreo debe realizarse en épocas del año donde los niveles de nubosidad sean bajos ya que la generación de la imagen se puede ver afectada haciendo imposible su análisis.
6. Mientras más sitios de muestreo se consideren en el análisis, será más fácil correlacionar los datos estadísticamente y se tendrá un margen de error relativamente bajo.

## BIBLIOGRAFÍA

### LIBROS

1. Seco Hernández, Ricardo.  
*"Teledetección Aeroespacial"*  
Editorial Félix Varela, La Habana. 2002.
2. Chuvieco Salinero, Emilio.  
*"Fundamentos de Teledetección Espacial"*  
Ediciones Rialp S.A., Madrid. 1990.

### TESIS

3. Vázquez González, Alba Beatriz.  
*"Evaluación de la Calidad del Agua Mediante Percepción Remota"*  
División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM. 2000.
4. Sepúlveda Hirose, Rodrigo Takashi.  
*"Diseño de Modelos de Calidad del Agua mediante el uso de la Percepción Remota"*  
Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM. 2011.

### MANUALES

5. Vázquez González, Alba Beatriz.  
*"Manual de Prácticas de Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental"*  
Programa de Apoyo a Proyectos Institucionales para el Mejoramiento de la Enseñanza.  
2006.

## RECURSOS ELECTRÓNICOS

### Textos electrónicos

6. Jordi Vivancos, Albert Llastarri, Mònica Grau, Daniel Vivancos. 2005.  
*“La Tierra a Vista de Satélite, Introducción a la Teledetección”*  
Instituto de Tecnologías Educativas, España.  
<http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/> (Octubre 2011)
  
7. Pérez G., Uriel. 2005.  
*“La Percepción Remota”*  
Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Departamento de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad de Tolima, Colombia.  
[http://desarrollo.ut.edu.co/tolima/hermesoft/portal/home\\_1/rec/arc\\_5995.pdf](http://desarrollo.ut.edu.co/tolima/hermesoft/portal/home_1/rec/arc_5995.pdf)  
(Agosto 2011)
  
8. Dr. Nicholas M. Short, Sr. 2010.  
*“The Remote Sensing Tutorial”*  
<http://rst.gsfc.nasa.gov/> (Noviembre 2011)  
<http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Front/tofc.html> (Noviembre 2011)
  
9. Martínez Muñoz Julio, Díaz Ponce Alejandro. 2005.  
*“Fundamentos de Teledetección Espacial”*  
<http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20Espacial.PDF> (Agosto 2011)
  
10. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO. 1992.  
*“Guide to Satellite Remote Sensing of the Marine Environment”*  
[http://www.jodc.go.jp/info/ioc\\_doc/Manual/092618eo.pdf](http://www.jodc.go.jp/info/ioc_doc/Manual/092618eo.pdf) (Agosto 2011)
  
11. Spot Image. 2010.  
*“Los satélites Spot en números”*  
[http://www.astrium-geo.com/files/pmedia/public/r1992\\_9\\_lossatelitesspotennumeros\\_esp\\_sept2010.pdf](http://www.astrium-geo.com/files/pmedia/public/r1992_9_lossatelitesspotennumeros_esp_sept2010.pdf)  
(Agosto 2011)
  
12. Canada Center for Remote Sensing. 2011.  
*“Fundamentals of Remote Sensing”*  
[http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/files/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals\\_e.pdf](http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/files/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf) (Marzo 2012)

13. National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2011.  
*"The Landsat 7 Compositor"*  
<http://landsat.gsfc.nasa.gov/education/compositor/> (Agosto 2011)
  
14. Eduardo Iturrate. 1998.  
*"Curso Básico De Teledetección Con Envi"*  
<http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/INDEX.HTM> (Diciembre 2011)
  
15. Francisco Alonso Sarría. 2008.  
*"Técnicas de Teledetección aplicadas a la Gestión de los Recursos Hídricos"*.  
 Facultad de Biología, Universidad de Murcia.  
<http://ocw.um.es/ciencias/herramientas-de-teledeteccion-aplicadas-a-la/material-de-clase> (Septiembre 2011)
  
16. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2005.  
*"Descripción del medio social y económico de la Cuenca Valle de Bravo, Estado de México"*  
<http://www.cuencaamanalcovalle.org/doctosn/03%20Medio%20Socioeconomico%20%20Plan%20Retor%20V%20Bravo-2.pdf> (Enero 2012)
  
17. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2005.  
*"Plan para la Gestión Integral del Agua y Recursos asociados de la Cuenca Valle de Bravo, Estado de México"*  
<http://www.cuencaamanalcovalle.org/doctosn/01%20Descrip%20Medio%20Natural%20V B.pdf> (Marzo 2012)
  
18. Centro de Información y Comunicación Ambiental de Norte América, A. C.  
*"Saber más... Percepción Remota"*  
<http://www.ciceana.org.mx/recursos/Percepcion%20remota.pdf> (Agosto 2011)
  
19. *"Ficha técnica del Medidor Multiparamétrico para calidad del agua HANNA HI 9828"*  
<http://www.hannainst.es/catalogo/index.php?pg=9&Familia=300&Familia2=11&CodProducto=727> (Enero 2012)
  
20. Manual de Instrucciones del Turbidímetro de laboratorio, Modelo 2100N  
<http://www.advancelaboratorios.com/UserFiles/Documentos/manual%20turbidimetro%202100%20N.pdf> (Enero 2012)
  
21. Información de Producto: Analítica de Laboratorio ESPECTROFOTÓMETRO DR 2800 ECO  
<http://www.hualix.com/pdf/HACH/Instrumentos%20de%20Laboratorio/Espectrofotometros/Espectrofotometro%20DR%202800%20eco.pdf> (Enero 2012)

### Artículos electrónicos

22. Revista Crosslink, Aerospace Corporation. 2004.  
*"Remote Sensing. Volume 5, Number 2"*  
<http://www.aero.org/publications/crosslink/summer2004/index.html> (Agosto 2011)
23. European Space Agency (ESA). 2009.  
*"2005 – 2008 Report, The Tiger Initiative"*  
<http://www.tiger.esa.int> (Agosto 2011)
24. Manuel E. Mendoza, Gerardo Bocco, Erna López Granados y Miguel Bravo. 2007.  
*"Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía Núm. 64, UNAM."*  
<http://www.ejournal.unam.mx/rig/RIG064/RIG000006403.pdf> (Octubre 2011)

### Páginas electrónicas

25. ESA (Agencia Espacial Europea), Eduspace. 2010.  
[www.esa.int/esaMI/Eduspace\\_EN](http://www.esa.int/esaMI/Eduspace_EN) (Agosto 2011)
26. Servicio Geológico Mexicano. 2011.  
[http://www.sgm.gob.mx/index.php?option=com\\_content&task=view&id=113&Itemid=116](http://www.sgm.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=113&Itemid=116) (Agosto 2011)
27. Servicio Meteorológico Nacional. 2011.  
<http://smn.cna.gob.mx> (Septiembre 2011)
28. National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2010.  
[www.nasa.gov](http://www.nasa.gov) (Agosto 2011)
29. Departamento de Investigación, Biblioteca de la Universidad de Cornell. 2003.  
*"Tutorial de Digitalización de Imágenes"*  
<http://www.library.cornell.edu/preservation/tutorial-spanish/intro/intro-01.html>  
 (Septiembre 2011)
30. ESA Earthnet Online. 2011.  
<https://earth.esa.int/web/guest/earth-topics> (Octubre 2011)

31. U.S. Environmental Protection Agency (EPA)  
<http://www.epa.gov/eerd/RemoteSensing.htm>
  
32. University of Minnesota Lake Browser. 2011.  
<http://water.umn.edu/lakebrows.html> (Octubre 2011)
  
33. University of Minnesota Lake Browser. 2008.  
<http://lakes.gis.umn.edu/> (Octubre 2011)
  
34. Minnesota's Lakes and Land. 2011.  
<http://lakesandland.umn.edu/> (Octubre 2011)
  
35. Regional Water Clarity. 2005.  
[http://resac.gis.umn.edu/water/regional\\_water\\_clarity/regional\\_water\\_clarity.htm](http://resac.gis.umn.edu/water/regional_water_clarity/regional_water_clarity.htm)  
(Octubre 2011)
  
36. Portal Ciudadano del Gobierno de Estado de México. 2011.  
<http://portal2.edomex.gob.mx/edomex/inicio/index.htm> (Diciembre 2011)
  
37. Universidad Veracruzana. 2011.  
*"Las manzanas de Newton. Noticiero de la ciencia"*  
<http://www.uv.mx/newton/Anteriores/86/paginas/accion.htm> (Diciembre 2011)
  
38. Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. 2002.  
[http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/04\\_Agua/4.6\\_Calidad/index.shtml](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/informe_2000/04_Agua/4.6_Calidad/index.shtml) (Enero 2012)
  
39. Cuenca Valle de Bravo Amanalco. 2008.  
<http://cuencaamanalcovalle.org/index.php?obj=secciones&IdMostrar=140>  
(Diciembre 2011)