



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

### ESTIMACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DEL LAGO DE CHAPALA, MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA

#### T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

#### P R E S E N T A

ALEJANDRA SELENE MEMBRILLO ABAD

#### JURADO EXAMINADOR

- 1) DRA. ROSA MARÍA PROL LEDESMA. INSTITUTO DE GEOFÍSICA. UNAM. DIRECTOR DE TESIS
- 2) DR. JAVIER ALCOCER DURAND. FES IZTACALA. UNAM. PRESIDENTE
- 3) DR. ENRIQUE CABRAL CANO. INSTITUTO DE GEOFÍSICA. UNAM. VOCAL
- 4) DR. OSCAR ARNOLDO ESCOLERO FUENTES. INSTITUTO DE GEOLOGÍA. UNAM. SUPLENTE
- 5) DR. SERGIO CERDEIRA ESTRADA. PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA. CONABIO. SUPLENTE



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# **AGRADECIMIENTO**

Este trabajo forma parte del proyecto PAPIIT-UNAM IN113811

## DEDICATORIA

A MIS TUTORES, Dra. Rosa Ma. Prol Ledesma, Dr. Marco Antonio Torres Vera a quienes agradezco su paciencia y dirección al presente trabajo. Gracias por compartirme sus conocimientos.

A MIS SINODALES, por los comentarios y el tiempo invertido en este trabajo, mismos que enriquecieron el presente trabajo. Gracias por el apoyo.

A MI MADRE, Ma. Gloria Abad Melchor, que me diste la oportunidad de vivir y el apoyo de madre toda mi vida, gracias porque eres mucho más que mi propia vida. A ti mamá, te dedico la conclusión de este trabajo ya que sin ti no lo habría conseguido.

A MI PADRE, Agustín Membrillo Mendoza, que me diste tu tiempo durante toda mi vida, además de tu apoyo y tu fuerza para seguir adelante a pesar de los frecuentes tropiezos de mi vida.

A MIS HERMANOS, que me han apoyado, cuidado y protegido cuando más los he necesitado.

A MIS ABUELOS, Doña Paz que aunque me saca canas verdes es una de las personas más sabias en el mundo, y a Don Agustín (El Peque) a quien envidio su fortaleza física y su paciencia. Gracias a mis viejos que me han dado la oportunidad de compartir con ellos otra época de la vida.

A LOS AMORES DE MI VIDA, Naty, Renée y Regina, quienes comparten ya este amor con el milagro de mi vida.

A MIS AMIGAS, Priscila, Yaneli, Alejandra, Leticia, Ma. De Jesús, Anita, gracias por compartir su tiempo conmigo.

A MI FAMILIA, Tia Mar, Mau, Nancy, Tío Lorenzo, Oscar, Magda, Tia Lupe, Tío Manolo, Carlos Alberto "Beto" gracias por compartir conmigo una parte importante de tu vida, te tengo en mi corazón y a mis más de 500 parientes.

A CADA PERSONA QUE FORMA PARTE DE MI VIDA: Graciela Solache, Araceli Chaman, Laura Rodríguez por su apoyo personal y por su importante labor administrativa. A la Sra. Rebe, Joel, Sr. Aurelio, quienes de alguna manera cuidaron mi seguridad durante mis largas horas de trabajo. A Jorgito, Dra. Ruth, Dr. Tomás, Roberto, Haydecita y todos mis compañeros de trabajo.

Espero poder tener el privilegio de agradecerles ésta y muchas veces más el apoyo y el cariño que me han brindado.

# ÍNDICE

RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN .....	12
1. PERCEPCIÓN REMOTA EN EL MONITOREO DE AGUAS CONTINENTALES.....	15
<b>Propiedades ópticas del agua</b> .....	16
Radiancia en la superficie del agua.....	16
<b>Propiedades ópticas inherentes del agua</b> .....	18
<b>Propiedades del agua pura</b> .....	19
<b>Proceso de absorción</b> .....	20
<b>Monitoreo de la superficie de cuerpos de agua</b> .....	21
<b>Monitoreo de materiales suspendidos (Turbidez)</b> .....	22
<b>Sedimentos Suspendidos</b> .....	23
<b>Clorofila <i>a</i></b> .....	24
2. ESTADO TRÓFICO DE CUERPOS DE AGUA CONTINENTALES.....	27
<b>Estado Trófico</b> .....	27
<b>Indicadores para medir eutrofización</b> .....	28
<b>Métodos de determinación de estado trófico</b> .....	28
<b>Evaluación del IET con base en indicadores de estado trófico</b> .....	31
<b>Evaluación a partir de contenido de clorofila <i>a</i></b> .....	31
<b>Evaluación a partir de valores de medida del Disco de Secchi</b> .....	31
<b>Uso de la Percepción Remota como herramienta de monitoreo en cuerpos de agua superficiales.</b> .....	32
3. ZONA DE ESTUDIO .....	34
<b>Generalidades</b> .....	34
<b>Cuenca Lerma-Chapala</b> .....	34
<b>Clima</b> .....	35
<b>Balance hidrológico</b> .....	36
<b>Geología</b> .....	37
<b>Sedimentos en el Lago de Chapala</b> .....	38
<b>Aspectos Sociales</b> .....	38
<b>Uso de suelo y Cobertura vegetal</b> .....	39

Uso del agua.....	40
Contaminación en la cuenca Lerma Chapala.....	40
Contaminación en el Lago de Chapala .....	43
4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	46
<b>Procesamiento de imágenes.....</b>	46
<b>Sensores.....</b>	46
<b>Pre-procesamiento de imágenes.....</b>	49
<b>Corrección atmosférica.....</b>	49
<b>Procesamiento de imágenes.....</b>	50
<b>Cociente de bandas.....</b>	50
<b>Composición a color.....</b>	51
<b>Análisis de Componentes Principales.....</b>	51
<b>Realce espacial.....</b>	52
<b>Realce de bordes en el dominio espacial .....</b>	52
<b>Realce de lineamientos.....</b>	53
<b>Planeación del muestreo .....</b>	53
<b>Análisis de regresión .....</b>	55
<b>Extracción de información para aplicar el método de regresión.....</b>	56
<b>Cobertura de suelo en la subcuenca del Bajo-Lerma .....</b>	56
<b>Procesamiento de imágenes para generar el mapa de coberturas.....</b>	56
5. RESULTADOS.....	58
<b>Análisis de la variación espacio temporal de la distribución de vegetación acuática y sedimento en suspensión con respecto a los escurrimientos debido a la temporada de lluvia en el Lago de Chapala.....</b>	58
<b>Procesamiento de imágenes para determinación del IET .....</b>	61
<b>Parámetros obtenidos en campo.....</b>	62
<b>Extracción de información para aplicar el método de regresión.....</b>	64
<b>Correlación de valores de concentración de clorofila <math>_a</math> obtenidos en el laboratorio y valores digitales del cociente de bandas (SPOT B3/B1).....</b>	64
<b>Correlación de valores de turbidez-Disco de Secchi y valores digitales del cociente de bandas (SPOT B3/B4).....</b>	67
<b>Aplicación de modelos de regresión a la información espectral .....</b>	69
<b>Turbidez-profundidad de disco de Secchi .....</b>	70
<b>Evaluación del Estado trófico a partir de valores de IET .....</b>	72

<b>Análisis espacial de la contribución de contaminantes debido a los usos de suelo en la subcuenca del Bajo-Lerma a través de percepción remota.....</b>	<b>72</b>
<b>Procesamiento de imágenes para generar el mapa de coberturas.....</b>	<b>74</b>
6. DISCUSIÓN .....	79
CONCLUSIONES .....	82
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	83
ANEXO.....	91

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Componentes de la radiancia registrada por un sensor remoto en un cuerpo de agua (Tomado de Bukata <i>et al.</i> , 1995).....	17
Figura 1.2 La absorción de la luz en el agua pura es dominante en las regiones < 400 nm y > 580 nm Después de 740 nm y hasta los 2500 nm., la luz se absorbe casi en la totalidad y la dispersión es depreciable razón por la cual se ve obscura en la región del infrarrojo. La dispersión en la región del 400-500 nm es importante debido a que por ello el agua se ve en color azul (Modificado de Jensen, 2000). ....	20
Figura 1.3 Espectro de absorción de la clorofila_ <i>a</i> y clorofila_ <i>b</i> .....	22
Figura 1.4 Disco de Secchi utilizado para determinar la visibilidad en el lago de Chapala .....	25
Figura 1.5 a) Firmas espectrales de agua limpia y agua con varias concentraciones de sedimentos arcillosos suspendidos desde 0 mg/l hasta 1000 mg/l. b) Firmas espectrales de agua limpia y agua con varios concentraciones de sedimentos limosos suspendidos desde 0 mg/l hasta 1000 mg/l (Modificado de Jensen 2000).....	25
Figura 1.6 a) Respuesta espectral de agua limpia y agua con algas productoras de clorofila_ <i>a</i> . b) Respuesta espectral de agua con presencia de clorofila_ <i>a</i> y diferentes concentraciones de sedimento suspendido en un rango de 0-500 mg/L (modificado de Jensen, 2000). ....	26
Figura 3.1 Batimetría Lago de Chapala (Tomada de Filonov <i>et al.</i> , 2001). ....	34
Figura 3.2. Localización de la zona de estudio .....	35
Figura 3.3 Mapa de coberturas de la cuenca Lerma-Chapala (Tomado de Fregoso, A. y Esquivel, N. 2006). ....	42
Figura 5.1 Cociente TM4/TM3 donde en tonos brillantes se representan los píxeles que tienen una contribución alta de clorofila_ <i>a</i> en el área que ocupa el lago de Chapala .....	60
Figura 5.2 En tonos brillantes se representan los píxeles que tienen una contribución alta de sedimentos suspendidos en el cuerpo de agua .....	60
Figura 5.3 Composición falso color RGB-TM 432. En tonos de rojo se visualiza vegetación, en verde y cian las concentraciones altas de sedimentos en suspensión. ....	61
Figura 5.4 Mapas mensuales de la distribución de materiales (clorofila_ <i>a</i> , sedimentos, agua y agua turbia) en el Lago de Chapala en el año 1993. En color verde aparece la contribución de	



clorofila_ <i>a</i> , en amarillo sedimentos en suspensión cuál de los dos tipos de sedimentos, en azul-grisáceo la cobertura de agua turbia y en azul oscuro el agua espectralmente limpia .	64
Figura 5.5 Estaciones de muestreo en el lago de Chapala .....	64
Figura 5.6 Gráfico de la curva de regresión ajustada para valores de logaritmo natural de concentración de clorofila_ <i>a</i> y valores de procesamiento de imágenes (cociente SPOT B3/B1).....	66
Figura 5.7 Gráfico de residuos para comprobar linealidad.....	67
Figura 5.8 Gráfico de la curva de regresión ajustada para valores de profundidad de DS y valores de procesamiento de imágenes.....	68
Figura 5.9 Gráfico de residuos para comprobar linealidad.....	68
Figura 5.10 Mapa de valores de ln (clorofila_ <i>a</i> ) estimado del cociente SPOT B3/B1.....	69
Figura 5.11 Mapa de distribución de concentraciones de clorofila_ <i>a</i> $\mu gL$ . .....	70
Figura 5.12 Mapa de distribución del Índice de Estado Trófico calculado utilizando la información del logaritmo natural de las concentraciones de clorofila_ <i>a</i> .....	70
Figura 5.13 Mapa de valores de LnDSm estimado del cociente B3/B4.....	71
Figura 5.14 Mapa de distribución de profundidad de DS.....	71
Figura 5.15 Mapa de IET en el Lago de Chapala utilizando el mapa de profundidad de disco de Secchi. ....	72
Figura 5.16 Denominación del estado trófico (Duan, 2008; Janus & Vollenweider, 1981); a) para valores de concentración de clorofila_ <i>a</i> , b) para valores de profundidad de Disco de Secchi. ....	73
Figura 5.17 Subcuenca del Bajo Lerma.....	75
Figura 5.18 Composición a color (ETM) 432, muestra vegetación acuática (rojo) y sedimento suspendido (cian y tonos azules) en el Lago para: a) la temporada de secas (Mayo, 2002); y la temporada inmediata después de lluvias (Noviembre, 2002) .....	75
Figura 5.19 Composición a color para identificar fuentes de contaminación (zonas urbanas, agricultura y suelo desnudo o áreas de cultivo sin sembrar) a) composición RGB-(TM)742 (zonas urbanas tonos rosas, agricultura verde limón, suelo desnudo o áreas de cultivo sin sembrar blancos, mixto marrón y vegetación propia de la zona verde oliva y verde fuerte); b) composición RGB-(TM)457 (zonas urbanas azul, agricultura tonos	

naranja, suelo desnudo o áreas de cultivo sin sembrar blanco, mixta verde-cian y vegetación propia de la zona marrón y amarillo claro). 76

Figura 5.20 Firmas espectrales de materiales: a) dentro del lago: 1- agua limpia, 2- vegetación acuática, 3- sedimento suspendido, b) Coberturas alrededor del lago: 1- agricultura, 2- zona urbana, 3-suelo desnudo, 4- agua turbia, 5- agua limpia, 6- agricultura 2, 7-mixta (suelo desnudo y vegetación escasa).....	77
Figura 5.21 Áreas con vegetación acuática y sedimento suspendido dentro del lago para: a) temporada de secas (Mayo, 2002); b) temporada inmediata después de lluvias (Noviembre 2002).....	77
Figura 5.22 Mapa de coberturas de la subcuenca del Bajo Lerma. ....	78

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Indicadores de estado trófico (modificado de Brezonik y Shannon, 1971)	28
Tabla 2.2 Evaluación del IET basado en el contenido de clorofila <i>a</i> (Modificado de Duan <i>et al.</i> 2008)	31
Tabla 2.3 Evaluación del IET basado en la profundidad del disco de Secchi (Modificado de Vollenweider y Kerekes, 1980)	32
Tabla 3.1 Balance hídrico de la cuenca Lerma-Chapala	37
Tabla 3.2 Coberturas identificadas en la cuenca del Bajo Lerma (Cotler <i>et al.</i> , 2006)	41
Tabla 3.3 Fuentes puntuales y no puntuales de contaminación	42
Tabla 3.4 Principales agroquímicos utilizados en la cuenca Lerma-Chapala. Modificado de Cotler <i>et al.</i> , (2006)	45
Tabla 4.1 Características de la plataforma Landsat 5	47
Tabla 4.2 Información espectral del sensor TM	47
Tabla 4.3 Características de la plataforma Landsat 7 y sensor ETM+	48
Tabla 4.4 Información espectral del sensor ETM+	48
Tabla 4.5 Características de la plataforma SPOT 5:	48
Tabla 4.6 Información espectral del sensor HRG	49
Tabla 4.7 Rasgos característicos de vegetación acuática, sedimentos arcillosos y óxidos, ubicadas en las bandas espectrales de los sensores TM y ETM+ (*Bandas con los rasgos espectrales más característicos del material)	57
Tabla 5.1 Principales características espectrales de 3 materiales ubicadas en las bandas espectrales de los sensores TM y ETM+ (*Bandas con los rasgos espectrales más característicos del material)	59
Tabla 5.2 Resumen de áreas de zonas agrícolas, precipitación promedio mensual y áreas cubiertas con clorofila <i>a</i> en la subcuenca del bajo Lerma.	62
Tabla 5.3 Parámetros medidos en el muestreo y en laboratorio para las 33 muestras de agua. (-sin dato)	65
Tabla 5.4 Área correspondiente a cada estado trófico de acuerdo a la evaluación propuesta por Duan (2008) a partir de la concentración de clorofila <i>a</i> y Vollenweider y Kerekes (1981) a partir de la profundidad de DS.....	74

## RESUMEN

El lago de Chapala es el cuerpo de agua somero más grande de México y ha sufrido por décadas la aceleración del proceso de eutrofización debido a la influencia de los asentamientos humanos en las riberas del lago y en la Cuenca Hidrológica Lerma Chapala. Esta cuenca es una de las más importantes para el desarrollo social y económico del país, además de estar influenciada por las dos ciudades más pobladas de México. El lago es el principal abastecedor de agua potable para Guadalajara. Su principal tributario es el Río Lerma, el cual recorre la cuenca Lerma-Chapala donde la principal actividad económica es la agricultura. Los métodos tradicionales de agricultura han provocado degradación de los suelos y se caracterizan por un uso excesivo de fertilizantes, la erosión del suelo, el empleo ineficiente del riego y, adicionalmente, las lluvias producen un intenso acarreo de sedimentos y nutrientes hacia el Lerma que finalmente desemboca en el Lago de Chapala. Desde la primera mitad del siglo XX, el resultado de estas fuertes contribuciones de sedimentos y nutrientes dieron por resultado la eutrofización de este importante cuerpo de agua. En 2006 las autoridades estatales y federales determinaron aplicar herbicidas para remover la vegetación acuática que creció descontroladamente por varias décadas. En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de los modelos de Índice de Estado trófico (IET) propuestos por Carlson en 1977, estos modelos están basados en la turbidez de la columna de agua y la concentración de clorofila<sub>a</sub>. Para la determinación de los parámetros utilizados en estos modelos se utilizan las herramientas de Percepción Remota (PR), combinadas con observaciones *in situ* y análisis de laboratorio así como análisis de regresión de los datos obtenidos para correlacionar los resultados de ambas metodologías. El uso de la PR se basa en las modificaciones que sufren las propiedades ópticas del agua debido al aumento en la concentración de nutrientes y de la productividad. Los datos para los modelos de Carlson se obtuvieron del procesamiento de imágenes multiespectrales capturadas el mismo día del trabajo de campo. Los resultados obtenidos muestran que el modelo basado en la concentración de clorofila<sub>a</sub> genera valores bajos de IET, mientras que el modelo basado en la profundidad de disco de Secchi (Turbidez) proporciona valores altos de IET que reflejan la alta turbidez del agua en el lago.

# ABSTRACT

The Chapala Lake is the largest fresh water resource in Mexico and it provides more than 50% of the water consumed by the second largest city in Mexico, Guadalajara. Agriculture represents the most important economic activity in the basin and, as a consequence, soils are degraded and require larger amounts of fertilizers. A large proportion of the nutrient-rich fertilizers used in the agricultural areas within the basin are transported by the Lerma River, which is the main tributary to the Chapala Lake. As a result, eutrophication of the lake has been a problem for many years and aquatic vegetation has been the main manifestation of this increase in nutrients and suspended sediments; therefore, the governmental institutions response has been to remove the vegetation using herbicides. Here, I present the results obtained by application of Carlson's model (1977) to the Chapala Lake for estimated the Trophic State Index (TSI) as an indicator of water quality, this model is based on data of Secchi disc depth, chlorophyll-*a* or total phosphorus, while the last two models utilize multivariate analysis of several parameters that include: nutrient concentration, primary productivity and the disturbance on the optic properties of water caused by eutrophication, which are commonly expressed as turbidity increase (inverse of Secchi disc depth). The input data for the models were obtained by processing multispectral satellite images and correlating the results with field data that were collected in the same date that images were acquired. Obtained results show that the chlorophyll-based model yields low TSI values while the turbidity models generate high TSI values, it suggest that non algal particles dominate light attenuation.

# INTRODUCCIÓN

El lago de Chapala es la fuente de agua potable principal para la ciudad de Guadalajara, la segunda ciudad más poblada en México. El lago se localiza en la parte central de México y tiene una longitud de 77 km con una orientación E W (De Anda *et al.*, 1998); la poca profundidad del lago (4.5 m de acuerdo a Lind y Dávalos-Lind., 1991) provoca turbidez debido a la resuspensión de arcilla fina (Lind y Dávalos-Lind, 2001), ya que los vientos de hasta 8-10 m s<sup>-1</sup> en la región generan mezcla en la columna de agua (Filonov *et al.*, 2001).

El lago ha sufrido un deterioro en la calidad de sus aguas en las últimas décadas ya que es el receptor de la cuenca hidrográfica Lerma-Chapala. Esta cuenca hospeda al 10% de la población total del país debido a la intensa actividad económica representada por: agricultura, turismo, acuicultura e industria. Estas actividades producen una gran cantidad de desechos ricos en fósforo y nitrógeno, principales nutrientes en un sistema acuático, que son depositados en aguas superficiales (ríos y lagos) sin previo o escaso tratamiento (De León-Mojarro *et al.* 2001). La agricultura es la principal actividad económica en los alrededores del lago de Chapala, lo que ha ocasionado la degradación de los suelos y el requerimiento de un uso intenso de fertilizantes cuyos residuos son transportados por el drenaje superficial hacia el lago, ya sea por arrastre o infiltración. En general, todas las actividades humanas generan desechos que, en muchos casos, no son tratados adecuadamente antes de su disposición en cuerpos de agua, lo que produce un aumento en el crecimiento de la productividad y vegetación acuática (Scheffer, 2001).

El estado trófico es una de las clasificaciones que permiten determinar el nivel de productividad en el que se encuentra un lago y que indica las condiciones del estado del agua para proporcionar servicios ambientales, turísticos, económicos y en particular el suministro de agua al ser humano. De acuerdo a Ryding y Rast (1989), para que un cuerpo de agua superficial sea útil para suministro de agua debe de estar clasificado en un estado oligotrófico. Una forma de definir el estado trófico de un cuerpo de agua es a través del Índice de Estado Trófico (IET), que se basa en los efectos de la eutrofización que se evidencian por un cambio en las propiedades ópticas del agua (decremento de la visibilidad) y un aumento en la productividad del cuerpo de agua (Wezernak *et al.*, 1976).

El monitoreo de aguas continentales con base en datos de imágenes digitales se inició con el lanzamiento de las primeras plataformas satelitales, cuyo objetivo inicial fue el estudio de los cambios en la Tierra debido a fenómenos naturales y a prácticas humanas. El interés principal en este tipo de estudios fue reconocer el estado de los cuerpos de agua y su relación con los usos de suelo de sus alrededores ya que la Percepción Remota (PR) proporciona como resultado final información como mapas que inciden directamente en temas ambientales, regionales y aplicaciones de salud relacionados con la calidad y disponibilidad del agua (Wezernak *et al.*, 1976; Lathrop, 1992)

Una de las principales ventajas de la PR es que proporciona información de grandes áreas de manera simultánea, a diferencia de los muestreos *in situ*, e identifica a través de procesos de realce espectral materiales como clorofila-*a* y sedimentos en suspensión que son utilizados para estimar la concentración de clorofila-*a* y la turbidez del agua. Como resultado, ambos parámetros pueden estimarse de manera confiable a través del procesamiento de imágenes multispectrales (Alle y Johnson, 1999; Dekker y Peters, 1993; Harrington *et al.*, 1992).

La PR y los sistemas de información geográfica proporcionan resultados cualitativos y cuantitativos de variaciones espacio-temporales de los parámetros indicadores del estado trófico del agua. El estudio y monitoreo de estos parámetros pueden ser utilizados con el objetivo de conservar las reservas de agua potable o bien pueden formar parte de estrategias de monitoreo en cuerpos de agua superficiales (Li y Li, 2004)

El conocimiento de las variaciones espacio-temporales de la productividad puede ser medida en función de la concentración de clorofila-*a*, lo cual puede realizarse a través de monitoreos que permitan definir los cambios en el estado trófico y el estado de las reservas de agua superficiales. En México una de las estrategias que se han propuesto para lograr la preservación de la cantidad y calidad del agua es el monitoreo de cuerpos de agua superficiales (IMTA, 2009). La técnica aplicada es muestreo *in situ* para reunir información sobre parámetros físicos, químicos y biológicos que definen la calidad del agua. Estos parámetros incluyen: turbidez, temperatura, pH y concentraciones de nitrógeno, fósforo, oxígeno disuelto y clorofila-*a*; estos parámetros son los que se utilizan para definir el estado trófico de los cuerpos de agua superficiales.

El objetivo de este trabajo es estimar el Índice de Estado Trófico (IET) del lago de Chapala utilizando técnicas de PR (cocientes de bandas, composición a color, análisis de componentes principales) para identificar parámetros como turbidez y concentración de clorofila-*a* que son indicadores del estado trófico en el que se encuentra un cuerpo de agua. Aplicación de un análisis de regresión lineal para estimar concentración de clorofila-*a* y turbidez relacionando valores espectrales y valores de concentración de clorofila-*a* y profundidad de disco de Secchi (DS) medidos en laboratorio e *in situ*. Finalmente mostrar la utilidad de la metodología en el monitoreo de cuerpos de agua.

La hipótesis de trabajo es la siguiente: debido a la aplicación de defoliantes en el lago de Chapala el IET estimado a partir de la concentración de clorofila-*a* tendrá valores más bajos que los valores de IET estimados a partir de la turbidez obtenida a través del DS. Los parámetros de turbidez y concentración de clorofila-*a* medidos *in situ* estarán relacionados de acuerdo a Lind *et al.*, 1992 quienes muestran que existe una relación entre estos parámetros.

Las metas de estudio se enuncian a continuación:

Estimación del IET del lago de Chapala a partir de parámetros indicadores de estado trófico como: concentración de clorofila-*a* y profundidad de DS.

Identificación de clorofila  $_a$  y turbidez a través de su respuesta espectral aplicando técnicas de percepción remota.

Encontrar la ecuación que explique mejor el comportamiento de los valores de concentración de clorofila  $_a$  y profundidad de DS medidos *in situ* y los valores de reflectancia obtenidos mediante PR



# 1. PERCEPCIÓN REMOTA EN EL MONITOREO DE AGUAS CONTINENTALES.

Uno de los principales intereses del ser humano en la actualidad es regular la explotación, uso, aprovechamiento y la preservación de la calidad y cantidad del agua. Este interés es el motivo principal para científicos ambientalistas que han buscado mejorar o hacer más eficientes las técnicas de monitoreo de calidad de agua. La mayoría de estas técnicas requieren de una red densa de observaciones *in situ* o bien de estudios muy frecuentes en ríos y lagos que proporcionen registros de magnitud y velocidad de almacenamiento; sin embargo, estos estudios difícilmente generan información regional con una referencia espacial sobre composición, profundidad, temperatura superficial, área, cobertura y precipitación de agua. A partir de los 70's con el inicio de la era de satélites de monitoreo de la Tierra, la PR ha sido utilizada con éxito para programas o estudios de monitoreo de la calidad del agua a través de parámetros relacionados con las propiedades ópticas del agua (Ritchie *et al.*, 1976, Wezernak, *et al.*, 1976; Carpenter y Carpenter, 1983; Scarpace, *et al.*, 1979). La PR puede estimar valores espaciales de estos parámetros hidrológicos, ya que la técnica es capaz de proveer información sinóptica con alta densidad de datos en grandes áreas (Dekker y Peters, 1993; Baban, 1993; Tyler *et al.*, 2006; Duan, 2008; Igamberdiev *et al.*, 2010; Usali y Hasmadi, 2010).

Es importante enfatizar la diferencia entre los datos obtenidos con mediciones *in situ* y lo que se miden con dispositivos de PR; los datos de parámetros hidrológicos se generan a partir de la correlación que existe entre las medidas *in situ* y las medidas obtenidas por PR (i.e., calibración de modelos). Las medidas obtenidas mediante técnicas de PR proporcionan numerosos datos en comparación con las primeras, lo que produce una mayor cobertura en áreas grandes. La generación de información hidrológica con técnicas de PR requiere de cuidado y conocimiento de la naturaleza de los datos para tomarlo en cuenta en la interpretación así como en las funciones utilizadas para el procesamiento de los datos. La necesidad de una cobertura amplia se deriva de la exigencia de información hidrológica asociada con la alta demanda de agua por el aumento en la población, por lo que la PR se ha utilizado como una herramienta auxiliar que ha sido útil para incrementar la base de datos de manera rentable y oportuna.

El uso de la Percepción Remota en estudios hidrológicos se divide en tres categorías:

- 1ª categoría: Observación cualitativa. Observación visual o interpretación a partir de fotografías convencionales (aéreas tomadas con aeronaves o satélites) en donde se puede, por ejemplo, ubicar puntos de muestreo.

- 2ª Categoría: Definir formas y dimensiones geométricas y obtener información como: patrones, localización geográfica y distribución de los recursos. Identificar categorías con base en la clasificación multispectral o variación en texturas. Análisis cuantitativos de cuencas y canales, localización geográfica de fracturas, fallas, lineamientos, etc.
- 3ª Categoría: Estimación directa de parámetros hidrológicos a través del cálculo de la correlación entre los datos de PR y las medidas *in situ* correspondientes. Por ejemplo, humedad de suelo, profundidad de agua, contenido de sedimentos y clorofila\_a en un cuerpo de agua (Colwell *et al.* 1983).

En los años 60s y principios de los 70s la mayor parte de las publicaciones sobre PR mostraban el uso de esta herramienta para la observación cualitativa de cuerpos de agua. Con el mejoramiento de los sistemas de PR hubo un progreso y la PR se utilizó para la 3ª categoría (Colwell, 1983; Jensen, 2000; Ustin, 2004).

La PR hidrológica está definida como el estudio de los recursos acuáticos superficiales de la Tierra a través del uso de la radiación electromagnética que es emitida o reflejada de la superficie en rangos de longitud de onda desde 0.3  $\mu\text{m}$  hasta 3 m. Es indispensable que los hidrólogos comprendan las características de la cobertura de la Tierra y el efecto de los elementos en la trayectoria de la energía electromagnética para evaluar los datos de PR (Colwell, 1983). Algunas características físicas de lagos y ríos pueden ser medidas cuantitativamente (concentración de sedimentos  $\left[\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right]$ ), nivel de la superficie del agua, temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ], clasificación de coberturas (humedales, clases de vegetación, etc.) y evaluaciones cualitativas con PR como análisis geohidrológicos que es uno de los usos más complejos de aplicación de la PR en dónde se derivan variables útiles para el modelado hidrológico como estimación de precipitación y evapotranspiración (Stisen *at al.*, 2008, Immerzeel, *et al.*, 2008). Para aplicar las herramientas de PR se deben comprender las interacciones energía-materia que influyen en los datos de percepción remota para realizar investigaciones de cuerpos de agua que se llevan a cabo desde el inicio de las primeras plataformas satelitales (Colwell, *et al.*, 1983, Schmugge *et al.* 2002, Govender *et al.*, 2007).

## Propiedades ópticas del agua

Radiancia en la superficie del agua

Radiancia en una dirección específica en un punto en un campo de radiación es definido como el flujo radiante por unidad de ángulo sólido por unidad de área en ángulo recto a la dirección de propagación del fotón (Bukata, *et al.*, 1995). La radiancia total registrada por los sensores a bordo de los satélites está en función de la energía electromagnética detectada a partir de las cuatro fuentes identificadas en la figura 1.1

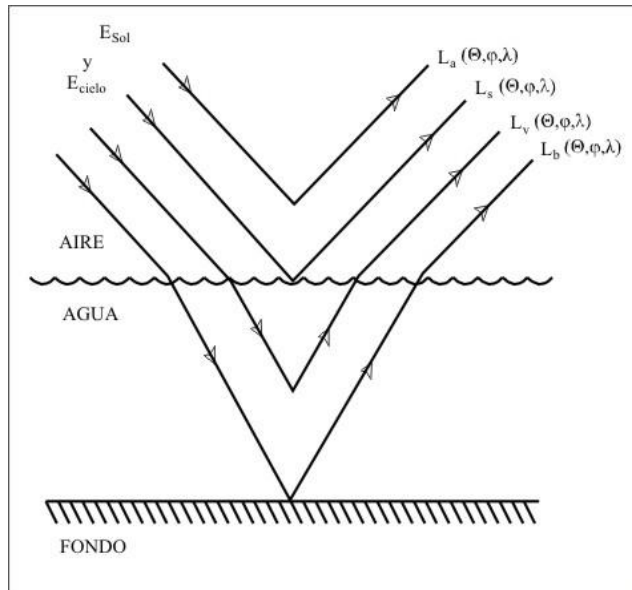


Figura 1.1 Componentes de la radiancia registrada por un sensor remoto en un cuerpo de agua (Tomado de Bukata *et al.*, 1995)

$$L_t = L_a + L_s + L_v + L_b \quad \text{ec. 1.1}$$

donde:

$L_a$  es la porción de la radiancia registrada por el instrumento de percepción remota que resulta de la radiación descendente solar  $E_{sun}$  y del cielo  $E_{sky}$  que no llega a la superficie del agua. Este es el ruido y puede ser considerada parte de la trayectoria de radiancia.

$L_s$  es la radiación descendente solar y la del cielo que llega a la interfase aire-agua, también llamada capa límite; penetra unos milímetros y es reflejada de la superficie de agua. Esta energía reflejada contiene información espectral invaluable sobre las características de la superficie del cuerpo de agua. Si el ángulo del cenit solar y el ángulo de visión del sensor son casi idénticos se puede obtener una reflexión especular pura de la superficie del cuerpo de agua lo que proporciona poca información espectral

$L_v$  es la radiación descendente solar y del cielo que penetra la interfase aire-agua, interactúa con el agua y los componentes orgánicos e inorgánicos que existen en la columna de agua sin llegar al fondo, también es llamada radiancia volumétrica de la columna de agua. Esta radiancia proporciona información importante sobre las características de la columna del agua.

$L_b$  es la porción de la radiancia registrada resultante de la radiación descendente solar y del cielo que penetra la interfase aire-agua llegando al fondo del cuerpo de agua o los materiales presentes en la columna de agua. Esta radiancia regresa hacia la columna de agua y luego sale del cuerpo de agua. La radiancia del fondo del cuerpo de agua hace muy difícil caracterizar apropiadamente las características de la columna de agua. Fundamentalmente es difícil separar  $L_v$  y  $L_b$  (modificado de Bukata, *et al.*, 1995).

El objetivo de la percepción remota acuática es extraer la radiancia de interés a partir de todos los componentes de radiación que registra el sensor. Si se quiere identificar a los componentes orgánicos e inorgánicos en la columna de agua como sedimentos suspendidos o clorofila  $a$ , el mayor interés se enfocará en aislar la radiancia volumétrica de la columna de agua calculada como:

$$L_v = L_t - (L_p + L_s + L_b)$$

Esto usualmente involucra correcciones radiométricas cuidadosas de datos satelitales con la finalidad de remover la atenuación y dispersión atmosférica ( $L_p$ ), el destello superficial (“sunlint”) y otras reflexiones superficiales ( $L_s$ ), así como la reflectancia de fondo de agua ( $L_b$ ) (Bukata *et al.*, 1995, Jensen, 2000).

### **Propiedades ópticas inherentes del agua**

Dentro del agua la luz se atenúa (absorción y/o dispersión). Las propiedades de dispersión y absorción de un medio acuático para la luz en cualquier longitud de onda se especifican en términos del coeficiente de absorción, de dispersión y de la función del volumen de dispersión (i.e., define volumen de dispersión), que en conjunto forman las propiedades ópticas inherentes, debido a que sus magnitudes dependen solo de las sustancias comprendidas en el medio acuático y no de la estructura geométrica de los campos de luz.

En la interacción de un haz de luz con una capa delgada de agua, una parte de la luz incidente es absorbida por la capa de agua, otra es dispersada causando que se separe de su trayectoria original. El coeficiente de absorción ( $a$ ) es la fracción del flujo de luz que es absorbida dividida por el espesor de la capa, mientras que la fracción del flujo incidente que es dispersada, dividida por el espesor de la capa de agua es el coeficiente de dispersión ( $b$ ). La absorbancia (A) y la dispersión (B) son las cantidades que relacionan el flujo radiante incidente y el flujo radiante absorbido y dispersado por el sistema respectivamente. La suma de la absorbancia y la dispersión es denominada atenuación (C) (Kirk, 2011).

## Propiedades del agua pura

El agua pura está libre de efectos ópticos derivados de materia orgánica e inorgánica disuelta y particulada. Es una sustancia compuesta mayormente de una mezcla de átomos de hidrógeno y oxígeno que generan moléculas de agua de masa molecular diferente, dependiendo de los isótopos de hidrógeno y oxígeno que la componen. Los coeficientes de absorción, dispersión y atenuación indican que la absorbancia y la dispersión dependen únicamente de las moléculas del agua

En la longitud de onda mayor a 580 nm la dispersión debida a las moléculas de agua llega a ser insignificante cuando se comprara con la absorción como se muestra en la figura 1.2. La atenuación de la luz en longitudes mayores a 580 nm es una consecuencia de la absorción molecular y  $c(\lambda) \sim a(\lambda)$ , donde  $c$  es el coeficiente de atenuación. Para valores de longitud de onda en el rango de 400-520 nm, la dispersión por moléculas de agua es dominante; por lo tanto, en la región del azul del espectro  $c(\lambda)$  es principalmente controlada por  $b(\lambda)$ . El agua pura absorbe fuertemente en la región del rojo del espectro visible; sin embargo, presenta una absorción más fuerte en el infrarrojo en  $\lambda > 700$  nm. La absorción en la región ultravioleta está determinada por las transiciones electrónicas ocurridas en las moléculas de agua.

Debido al papel dominante de la dispersión de las moléculas de agua en las longitudes de onda pequeñas del visible y al papel dominante de absorción molecular en longitudes grandes del visible, el agua limpia (la cual es considerada como un fluido incoloro) muestra un color azul. Este color azul es aparente en aguas oceánicas así como en aguas prístinas continentales y costeras que son pobres en nutrientes y no están expuestas a descargas dominadas por materia orgánica e inorgánica proveniente de los continentes.

De acuerdo a la teoría de dispersión de Rayleigh, la dependencia espectral de la dispersión molecular sigue una relación de  $\lambda^{-4.08}$ . La dispersión direccional en las longitudes de onda del visible por moléculas de agua (descrita por las funciones de dispersión de volumen) ha sido modelada por Morel y dada como:

$$\beta_w(\theta) = \beta_w(90^\circ)(1 + 0.835)\cos^2\theta \quad \text{ec. 1.2}$$

donde:

$\beta_w(\theta)$  Función de dispersión de volumen de la longitud de onda y el ángulo de dispersión  $\theta$

$\beta_w(90^\circ)$  es la función de dispersión de volumen en la longitud de onda y ángulo de dispersión de  $90^\circ$ .

De la ecuación 1.2  $\beta_w(180^\circ) = \beta_w(0^\circ)$ . Esto significa que en un medio de agua pura la dispersión en la dirección de regreso es numéricamente igual a la dispersión en la dirección directa (Bukata *et al.*, 1995).

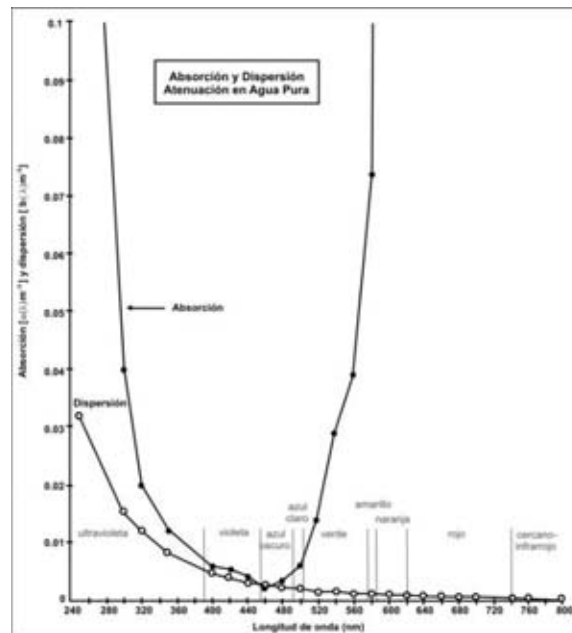


Figura 1.2 La absorción de la luz en el agua pura es dominante en las regiones  $< 400$  nm y  $> 580$  nm Después de 740 nm y hasta los 2500 nm., la luz se absorbe casi en la totalidad y la dispersión es depreciable razón por la cual se ve obscura en la región del infrarrojo. La dispersión en la región del 400-500 nm es importante debido a que por ello el agua se ve en color azul (Modificado de Jensen, 2000).

## Proceso de absorción

La energía de una molécula puede ser rotacional, vibracional y electrónica. Un incremento grande de energía en una molécula produce cambios vibracionales e incrementos de energía pequeños producen cambios rotacionales en la molécula. Si un fotón es capturado o absorbido por una molécula de agua, entonces la energía de la molécula de agua aumenta en la magnitud de la energía del propio fotón.

Si el fotón está en la región  $< 20\mu m$  la absorción puede causar una transición de un nivel vibracional a otro, si el fotón está en regiones de mayor longitud de onda, entonces la energía es baja.

Los fotones en la región del visible o en la parte fotosintética del espectro tienen suficiente energía para llevar a cabo transiciones de un estado fundamental de la molécula a otro nivel de excitación.

Con una molécula compleja como la clorofila *a* o cualquier otro pigmento fotosintético es normal que se lleve a cabo más de una transición de energía. La clorofila *a* actúa como un fotorreceptor y catalizador para la conversión de la luz solar en energía (Schanda, 1986) y presenta dos bandas de absorción, en la región del azul y en el rojo como se muestra en la figura 1.3. Cuando una molécula de clorofila *a* absorbe un fotón se llevan a cabo rápidamente transmisiones en los niveles rotacionales y transicionales. Esta energía es usada para la fotosíntesis por lo que la producción primaria es normalmente expresada con unidades de la irradiancia  $\text{Wm}^{-2}$ , o puede ser reemitida del sistema de fotosíntesis como un fotón de luz que es conocido como fluorescencia. En las células de los organismos acuáticos fotosintéticos sólo una porción de aproximadamente 1% de la luz absorbida se pierde a través de fluorescencia. El tiempo de vida de la fluorescencia es de  $10^{-8}$  a  $10^{-4}$  segundos (Harris, 2001), por lo que en general la energía termina como calor o como energía química en forma de biomasa producida fotosintéticamente.

### **Monitoreo de la superficie de cuerpos de agua**

De acuerdo a la fig. 1.2 la mejor región del espectro electromagnético para discriminar la superficie acuática de la tierra es la región del infrarrojo cercano y la región del infrarrojo medio entre las longitudes de onda de 740-2500 nm. En la región del infrarrojo cercano y medio los cuerpos de agua se observan negros u oscuros debido a la absorción de la radiación incidente, especialmente cuando el agua es profunda y limpia con ausencia de materia y sedimentos suspendidos; mientras que la superficie de la Tierra, que presenta vegetación y suelo desnudo, refleja cantidades altas de energía en el infrarrojo cercano y medio. Esta es la razón por la cual la superficie de la Tierra aparece brillante en las bandas del infrarrojo cercano y medio de las imágenes multiespectrales. Sin embargo, cuando la columna de agua contiene materia orgánica y componentes inorgánicos se debe tener cuidado ya que estos materiales pueden causar reflexión en el infrarrojo cercano y dispersión volumétrica bajo la superficie del agua y con ello aumentar la cantidad del flujo de energía radiante en el infrarrojo cercano en el cuerpo de agua. Los sedimentos suspendidos en un cuerpo de agua causan importante dispersión y reflexión de la radiación electromagnética y provocan una mayor brillantez del agua, similar a las características de reflectancia del suelo (Jensen, 2000).

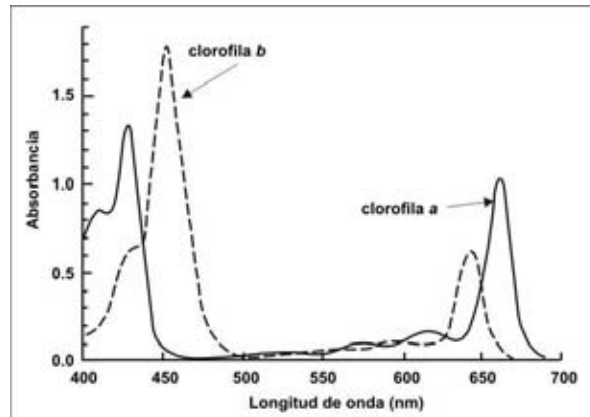


Figura 1.3 Espectro de absorción de la clorofila\_a y clorofila\_b

### Monitoreo de materiales suspendidos (Turbidez)

Los cuerpos de agua natural contienen una variedad de componentes orgánicos (fitoplancton, zooplancton, materia vegetal, etc.) e inorgánicos (sedimentos suspendidos, carbonatos finamente particulados). Una de las principales limitaciones de la PR es cuando las aguas naturales contienen una mezcla de estos materiales y se requiere extraer información cuantitativa de estos componentes.

Cuando se estudia la radiancia volumétrica de la subsuperficie  $L_v$ , la cual es la radiancia del flujo descendente del sol que penetra la interfase aire-agua, interactúa con el agua y los componentes orgánicos e inorgánicos y sale de la columna de agua hacia el sensor sin tocar el fondo. La radiancia volumétrica de la subsuperficie que se refleja de la columna de agua hacia el sensor  $L_v$  es función de la concentración del agua pura, materiales suspendidos (MS), clorofila\_a materia orgánica disuelta (MOD) y la cantidad total de absorción y atenuación de dispersión que se lleva a cabo en la columna de agua debido a cada uno de los componentes  $c(\lambda)$ , es decir:

$$L_v = f[agua_{c(\lambda)}, MS_{c(\lambda)}, Clor a_{c(\lambda)}, MOD_{c(\lambda)}] \quad \text{ec. 1.3}$$

Esta función muestra el efecto que cada componente tiene en las características espectrales de reflectancia en la columna de agua.



## Sedimentos Suspendidos

Partículas minerales como sílice, aluminio y óxidos de hierro se encuentran como materia suspendida en la mayoría de los cuerpos de agua. La presencia de estas partículas suspendidas es consecuencia de la descarga de los ríos, la erosión de las tierras de cultivo en zonas altas, la erosión del terreno montañoso, la erosión de las orillas causada por el oleaje o tránsito de barcos y erupciones volcánicas (ceniza). Estas partículas son de diferente composición, forma y tamaño, que van del rango desde arcillas finas (3-4  $\mu m$ ), limo (5-40  $\mu m$ ), arena de grano fino (41-130  $\mu m$ ) hasta arena de grano grueso (131-250  $\mu m$ ).

El monitoreo del tipo, cantidad y distribución espacial de sedimentos suspendidos en los cuerpos de agua es importante en estudios hidrológicos, por ejemplo, la contribución de altas cargas de sedimento a los cuerpos de agua superficiales resultan en el azolve de estos cuerpos de agua.

Los sedimentos también afectan la calidad de agua y consecuentemente los costos de potabilización, porque son portadores y agentes de almacenamiento de pesticidas, fósforo adsorbido, nitrógeno y compuestos orgánicos. Los sedimentos suspendidos obstruyen la transmisión de la radiación solar y reducen la fotosíntesis en la vegetación acuática sumergida y plancton cercano al fondo. La vegetación y el fitoplancton juegan un papel importante en la cadena alimenticia de los ecosistemas acuáticos.

La percepción remota se ha utilizado para monitorear las concentraciones de sedimentos suspendidos en cuerpos de agua. Estos estudios requieren de medidas *in situ* de las concentraciones de sedimentos suspendidos para relacionarlas cuantitativamente con los datos de PR. Estos estudios deben realizarse en días con poco viento ya que la rugosidad producida por el viento influye en la reflexión especular, la cual es perjudicial para los datos de percepción remota (Han y Rundquist, 1998).

La reflectancia espectral de los sedimentos suspendidos en la superficie del agua es una función tanto de cantidades como de las características del material (tamaño de partícula, absorción). El espesor de la capa superficial que es sensible a los sensores depende de los materiales contenidos en la columna de agua, en algunos lugares como el mar Caribe sensores como HRV XS de SPOT tienen una visibilidad de hasta 36 m y en Egipto con ETM de Landsat que mapeo hasta 20 m de profundidad, ambos sensores útiles para el mapeo de arrecifes de coral, (Jensen, 2000, Vandestraete y Goossenes, 2003). La concentración de sedimentos suspendidos se mide *in situ* usando DS o un detector nefelométrico de turbidez o indirectamente usando DS que es un disco de metal de 20 cm de diámetro blanco y negro que está atado a una línea marcada ver figura 1.4. La lectura se toma en la parte que da la sombra del barco, las medidas se registran a la profundidad en que el disco desaparece de la vista y cuando nuevamente aparece al regreso (Environmental Protection Agency, EPA). La concentración de sedimentos suspendidos en un cuerpo de agua determina la turbidez del agua que puede ser medida de manera indirecta por la profundidad de

DS, en el presente estudio se determinaron sedimentos suspendidos mediante su respuesta espectral en imágenes satelitales, por lo tanto la respuesta espectral se relacionó inversamente con la profundidad de DS (turbidez).

En la figura 1.5 se muestran las firmas espectrales del agua clara y agua con diferentes concentraciones de sedimentos de arcilla y suelo limosos. La reflectancia espectral del agua clara disminuye continuamente después de los 580 nm debido a la absorción de la radiación en la columna de agua. Cuando la concentración de sedimentos suspendidos aumenta la reflectancia en la columna de agua, lo hace en todas las longitudes de onda, tanto para sedimentos limosos como arcilla. El suelo arcilloso tiene más materia orgánica y un color oscuro que presenta un 10% menos de reflectancia en todas las longitudes de onda que el suelo limoso de color claro. La reflectancia aumenta en la región de 580-690 nm y en la región del infrarrojo cercano a medida que más partículas de minerales están suspendidas en los cuerpos de agua; por lo tanto, el pico de reflectancia cambia hacia longitudes de onda en la región del visible cuando más sedimentos suspendidos se agregan y un cuerpo de agua con sedimento suspendido puede parecer brillante en las imágenes. Tras un estudio de correlación de datos de PR y la concentración de sedimentos suspendidos los resultados son:

- El rango visible de 580-690 nm puede proporcionar información del tipo de sedimentos en cuanto a su composición, Bhargavata y Mariam (1990) y Han y Rundquist (1994) identifican esta región del espectro un aumento en la reflectancia cuando hay presencia de suelo arcilloso suspendido en aguas superficiales
- El rango de longitudes de onda de 714-880 nm es útil para determinar la cantidad de sedimentos suspendidos en el cuerpo de agua, en el caso en que las partículas minerales son los componentes predominantes, esto es confiable en estudios donde se ha determinado que los sedimentos suspendidos son minerales terrígenos (Jensen, 2000)

Estas correlaciones deben realizarse específicamente para cada área de interés debido a las variaciones en las características del agua, suelo y afloramientos geológicos del sitio.

### **Clorofila\_a**

La clorofila\_a es el principal pigmento fotosintético de todos los organismos fotosintéticos y está presente en todas algas y cianobacterias. La clorofila\_a introduce cambios al agua limpia en sus características de reflectancia espectral, por ejemplo en su color. Los diferentes tipos de fitoplancton tienen diferentes concentraciones de clorofila\_a y aparecen con diferentes colores en los sensores remotos; por lo tanto, registrar el color en un cuerpo de agua permite estimar la cantidad (Ritchie *et al.*, 2003; Tyler *et al.*, 2006; Gitelson 2011) y tipo general del fitoplancton (Sathyendranathl *et al.* 2004; Alvain *et al.*, 2005; Navarro *et al.*, 2014) e indicar la salud del cuerpo de agua (i.e., define salud del cuerpo acuático). Al comparar imágenes de diferentes fechas se obtienen resultados de cambios ocurridos en el tiempo (Bukata *et al.*, 1995; Jensen, 2000).



Figura 1.4 Disco de Secchi utilizado para determinar la visibilidad en el lago de Chapala

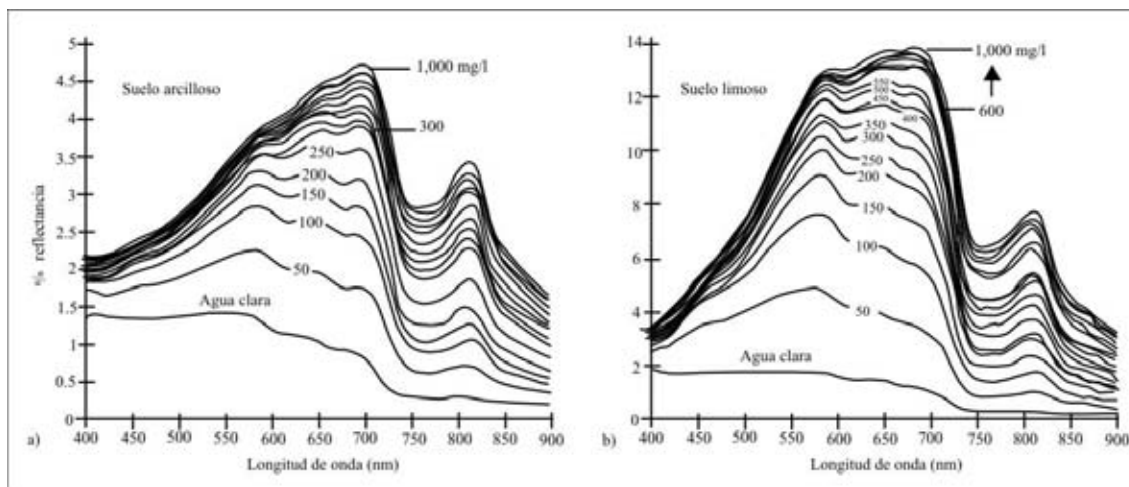


Figura 1.5 a) Firmas espectrales de agua limpia y agua con varias concentraciones de sedimentos arcillosos suspendidos desde 0 mg/l hasta 1000 mg/l. b) Firmas espectrales de agua limpia y agua con varias concentraciones de sedimentos limosos suspendidos desde 0 mg/l hasta 1000 mg/l (Modificado de Jensen 2000).

La figura 1.6 a representa las características espectrales del agua clara y agua con presencia de algas productoras de clorofila\_a. El agua clara refleja aproximadamente el 2% de la radiación incidente entre 400 y 500 nm y la reflectancia decrece gradualmente a menos de 1% en longitudes de onda más allá de 710 nm. En agua con carga de fitoplancton principalmente contiene clorofila\_a y presenta 4 características espectrales de absorción y dispersión debidas a la clorofila\_a

- Absorción en la región del azul entre 400 y 500 nm.
- Absorción en la región del rojo en aproximadamente 675 nm Gitelson(1992).

- Mínima reflectancia alrededor de los 550 nm.(pico del verde) Gitelson(1992).
- Pico de reflectancia alrededor de 690-700 nm causado por interacción de la dispersión de células de algas y un efecto mínimo combinado de pigmento y absorción de agua

En la figura 1.6 b se observa que cuando existe presencia de sedimento suspendido y clorofila *a* en un cuerpo de agua al mismo tiempo, el pico de reflectancia en el visible cambia de 547 nm (verde claro) con 0 mg/L hasta 596 nm (naranja) con 500 mg/l de sedimento suspendido (Jensen, 2000).

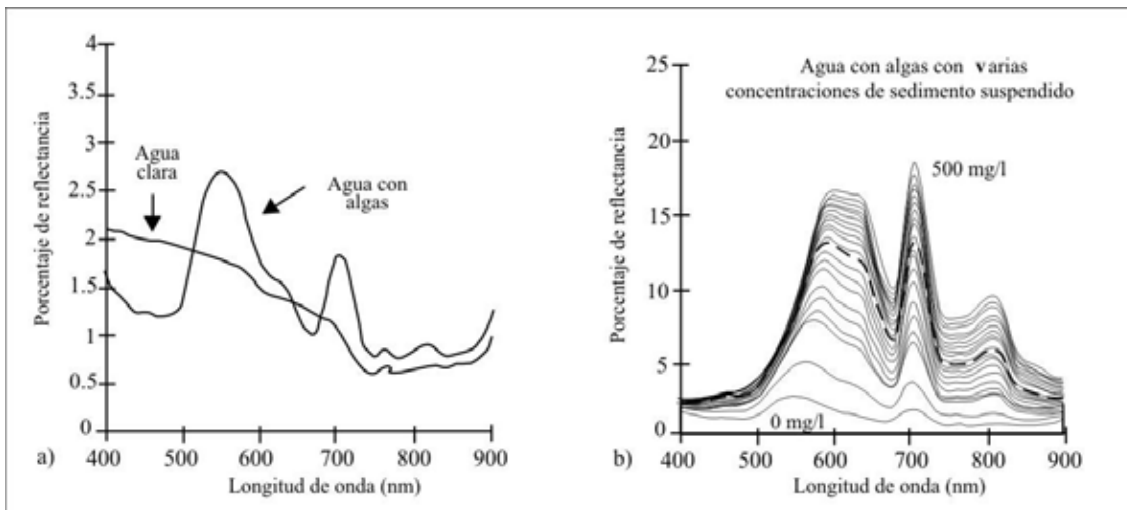


Figura 1.6 a) Respuesta espectral de agua limpia y agua con algas productoras de clorofila *a*. b) Respuesta espectral de agua con presencia de clorofila *a* y diferentes concentraciones de sedimento suspendido en un rango de 0-500 mg/L (modificado de Jensen, 2000).

## 2. ESTADO TRÓFICO DE CUERPOS DE AGUA CONTINENTALES

### Estado Trófico

El estado trófico de un lago o reservorio indica las condiciones de productividad del ecosistema y/o el grado de enriquecimiento a partir de sustancias nutritivas, generalmente nitrógeno y fósforo (Dodds, 2002, Naumann, 1930). En 1907, Weber utiliza términos que expresan los cambios en las condiciones de nutrientes para la vegetación de turberas en Alemania: Eutrofia (rico en nutrientes) y oligotrofia (pobre en nutrientes). Dos décadas más tarde, Naumann (1930) utilizó estos mismos términos para describir tipos de agua como manantiales, turberas, lagos o arroyos de acuerdo a la concentración de fósforo y nitrógeno combinado y calcio presente (Hutchinson, 1973).

La eutrofización es un proceso natural de los lagos. Algunos lagos reciben materiales de su cuenca de drenaje la cual procede de la precipitación o a escorrentía, de la irrigación de áreas de agricultura, zonas urbanas, industriales, etc. La acumulación de estos materiales a lo largo del tiempo produce cambios en la química del agua, en las comunidades biológicas y en la profundidad del cuerpo de agua hasta convertirse en un pantano (colmatado por sedimentos), este proceso se lleva a cabo de forma natural en largos periodos de tiempo. Sin embargo, el proceso de eutrofización en cuencas donde existen asentamientos humanos se acelera y se lleva a cabo en un periodo corto (Ryding y Rast, 1989)

Algunos de los efectos de enriquecimiento en nutrientes son: florecimientos de algas y cianobacterias (Smith, 2003; O' Neil et. al., 2012), aumento en materia orgánica y sólidos contenidos en el agua, aumento de la turbidez y del oxígeno, lo que produce mal olor y sabor en el agua. En lugares tropicales se intensifican los efectos perjudiciales en la salud humana por enfermedades parasitarias que se agravan en ambientes eutróficos (Ryding y Rast, 1989).

Fruh *et al.*, (1966) indican que la eutrofización puede medirse determinando los cambios en las especies y número de organismos presentes en un cuerpo de agua; otra forma de medir la eutrofización es medir los efectos de las comunidades biológicas (productividad primaria, plantas acuáticas, florecimientos de organismos, etc.), en ciertas propiedades físico-químicas del agua (morfología, oxígeno disuelto en el hipolimnion, turbidez, sólidos disueltos, etc.). En general, un aumento en el enriquecimiento en nutrientes en un cuerpo de agua es seguido de un aumento en la productividad biológica que acelera la extinción –por colmatación- del cuerpo de agua.

## Indicadores para medir eutrofización

Para una descripción adecuada del estado trófico de un cuerpo de agua se requiere la consideración de varias características físicas, químicas y biológicas, de acuerdo a Brezonik y Shannon (1971) el estado trófico de un lago se evidencia por varios síntomas denominados indicadores de estado trófico que se presentan en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Indicadores de estado trófico (modificado de Brezonik y Shannon, 1971)

Físicos	Químicos	Biológicos
Turbidez de Disco de Secchi	Concentración de nutrientes	Presencia de plantas acuáticas enraizadas
Morfología	Clorofila_ <i>a</i>	Riqueza específica
	Sólidos disueltos	Plancton
	Oxígeno disuelto	

Estos indicadores son lo que hasta el momento del estudio de Brezonik y Shannon (1971) y Fruh, (1966), habían sido utilizados para determinar el estado trófico de un cuerpo de agua, sin embargo los tres indicadores más utilizados para determinar el estado trófico de un cuerpo de agua son: turbidez de DS, nutrientes ( fósforo o nitrógeno) y concentración de clorofila\_ *a* (Carlson, 1977, Stednick y Hall, 2003; Fuller y Minnerick, 2007;USEPA, 2007; Duan, 2008 Håkanson y Bryhn, 2011; Jarosiewicz et al, 2011, Barki, y Singa, 2014)

## Métodos de determinación de estado trófico

El estado trófico tiene un origen multifactorial. La United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2007) sugiere considerar diversos indicadores tróficos para hacer una determinación correcta del estado trófico del cuerpo de agua en estudio. La mayoría de los trabajos sobre determinación de estado trófico mediante PR mencionan que los mejores indicadores son la concentración de clorofila\_ *a*, los sólidos suspendidos y turbidez cuando estos parámetros están estrechamente relacionados (Carlson, 1977, 1980). Estos indicadores son parámetros básicos para determinar el estado trófico (Wezernak, *et al.*, 1976). La mayoría de los modelos que determinan el estado trófico mediante PR (p.ej., Duan *et al.* 2008; Ritchie *et al.*, 2003; Kloiber *et al.*, 2002;

Thiemann y Kaufman, 2000; Baban, 1996; Harrington *et al.* 1992; Witzig y Whitehurst, 1982) están basados o modificados a partir del Índice de Estado Trófico (IET) propuesto por Carlson (1977). Este índice numérico del estado trófico tiene la finalidad de facilitar su descripción para un cuerpo de agua y evitar el uso de los términos tradicionales que en algunos casos podían ser ambiguos por la adición de denominaciones intermedias entre los estados de: oligotrofia, mesotrofia y eutrofia. El estudio determina que el concepto de estado trófico es multidimensional ya que involucra carga y concentración de nutrientes, productividad, cantidad y calidad de la biota y morfometría del cuerpo de agua. (Carlson, 1977) El estado trófico debe ser determinado examinando más de un parámetro; sin embargo, no es necesario medir todos los parámetros tróficos posibles si se consideran estudios previos de interrelación entre ellos, en donde se indica que varios criterios de estado trófico pueden ser relacionados con una serie de ecuaciones. La medida de cualquier criterio o indicador trófico puede ser usada para determinar el estado trófico por medio de las interrelaciones establecidas en estudios previos (Carlson, 1977).

Carlson (1977) considera como descriptor clave del IET la biomasa algal, debido a que es de interés público y produce impactos visuales negativos en zonas lacustres. Carlson (1977) utiliza como base para el TSI la biomasa de algas pero elige los valores de TSI (Profundidad de DS) con la finalidad de que estos valores sean fácilmente entendidos por el público general ya que es más sencillo identificar medidas de turbidez mediante la información de profundidad de DS que concentración de Chl-*a* y relacionarlas con los valores de TSI calculados. La profundidad de DS se considera una medida “tecnológicamente cruda” sin embargo varios estudios han demostrado que es un de bajo costo y efectiva (Gitelson, 1993; Bachman et al 2002; Kloiber, 2002; Li y Li, 2004; Christensen et al, 2004; Fuller y Minnerick, 2007; USEPA, 2007, Duan et al., 2008; Usali e Ismail, 2010). En la actualidad sigue siendo utilizada en programas de monitoreo de lagos en Estados Unidos (Holdsworth, 2012; USEPA, 2009, shorelandmanagement.org). Es importante resaltar que mientras los indicadores de estado trófico utilizados estén relacionados no siempre la turbidez está relacionada directamente con la concentración de algas del cuerpo de agua (Carlson 1980; Simpson, 1991)

Carlson (1977) indica que la relación entre las algas (biomasa) y turbidez obtenida mediante profundidad de SD está expresada por la ecuación para la extinción de la luz en el agua

$$I_z = I_0 e^{-(k_w + k_b)z} \quad \text{ec. 2.1}$$

Donde:

$I_z$  Intensidad de la luz a la profundidad en la que el DS desaparece

$I_0$  Intensidad de la luz en la superficie del agua.

$K_w$  Coeficiente de atenuación de la luz por agua y sustancias disueltas

$K_b$  Coeficiente de atenuación de la luz por material particulado.

$z$  Profundidad a la cual el DS ya no es visible.

En donde  $I_z$  es el 10% de  $I_0$  y  $K_b$  es proporcional a la concentración del material particulado que depende del tamaño, absorción de la luz y dispersión de las propiedades de las partículas.

Carlson propone un IET para lagos en el cual la escala va de 0 a 100, en donde cada división principal (10, 20, 30, ..., 100) representa una duplicación de la biomasa algal. En el caso de la transformación de los valores del DS en logaritmo base 2. El valor 0 del IET corresponde por lo tanto al valor más grande de profundidad reportado hasta el momento del estudio de Carlson (41.6m), para fines prácticos el valor de 64 m de profundidad del DS corresponde a 6 en logaritmo base 2 por lo tanto la ecuación final (ecuación 2.2) para el IET es:

$$IET(DS[m]) = 10 \left( 6 - \frac{\ln DS}{\ln 2} \right) \quad \text{ec. 2.2}$$

Teóricamente el IET a partir de la profundidad del DS es indefinido, pero el límite práctico se encuentra entre 100 y 110 (valores correspondientes de 6.4 y 3.2m de DS)

Debido a que la relación logarítmica entre el IET y: profundidad del DS, concentración de clorofila  $_a$  y fósforo total mostraron un buen ajuste, Carlson propuso las siguientes ecuaciones (ec. 2.3 y 2.4):

$$IET \left( Chl_a \left[ \frac{mg}{L} \right] \right) = 10 \left( 6 - \frac{2.04 - 0.68 \cdot \ln Chl_a}{\ln 2} \right) \quad \text{ec. 2.3}$$

$$IET(TP) = 10 \left( 6 - \frac{\ln \left( \frac{48}{TP} \right)}{\ln 2} \right) \quad \text{ec. 2.4}$$

El IET permite describir cambios sensibles en el estado trófico de un cuerpo de agua, es una herramienta valiosa para el manejo del cuerpo de agua así como para la estandarización de la determinación del estado trófico de los cuerpos de agua (Carlson, 1977).



## Evaluación del IET con base en indicadores de estado trófico

### Evaluación a partir de contenido de clorofila *a*

A partir de un trabajo previo de Shu (1993), Duan *et al.*, (2008) hace una equivalencia entre los estándares de evaluación para cada indicador y los parámetros usados en la evaluación de eutrofización que se muestran en la tabla 2.2

### Evaluación a partir de valores de medida del Disco de Secchi

Vollenweider y Kerekes (1980) proponen una equivalencia entre el estado trófico y valores de profundidad del DS que se muestra en la tabla 2.3

Tabla2.2 Evaluación del IET basado en el contenido de clorofila *a* (Modificado de Duan *et al.* 2008)

Contenido clorofila <i>a</i> ( $\mu\text{g/L}$ )	ESTADO TRÓFICO	Índice Estado Trófico
$\leq 1.0$	Oligotrófico	$\leq 20$
$\leq 2.0$	Bajo-mesotrófico	$\leq 30$
$\leq 4.0$	Mesotrófico	$\leq 40$
$\leq 10.0$	Alto-mesotrófico	$\leq 50$
$\leq 65.0$	Eutrófico	$\leq 70$
$\leq 160.0$	Hiper-eutrófico	$\leq 80$
$\leq 1000.0$	Extremadamente Hiper- eutrófico	$\leq 100$

Tabla 2.3 Evaluación del IET basado en la profundidad del disco de Secchi (Modificado de Vollenweider y Kerekes, 1980)

Rango de Profundidad de Disco de Secchi (m)	ESTADO TRÓFICO	Índice Estado Trófico
28-5.9	Oligotrófico	$\leq 20$
	Bajo-mesotrófico	$\leq 30$
5.9 -1.5	Mesotrófico	$\leq 40$
	Alto-mesotrófico	$\leq 50$
1.5 – 0.8	Eutrófico	$\leq 70$
0.8-0.4	Hiper-eutrófico	$\leq 80$
< 0.4	Extremadamente Hiper- eutrófico	$\leq 100$

**Uso de la Percepción Remota como herramienta de monitoreo en cuerpos de agua superficiales.**

Las ventajas de las imágenes satelitales en estudios de calidad de agua son (Dekker y Peters, 1993):

- Visión sinóptica del área de estudio
- Cobertura repetitiva de grandes áreas, en términos económicos esta repetición reduce los costos por imagen y superficie
- Disponibilidad para personalizar los sistemas de procesamiento de imágenes digitales.
- Posibilidad de recopilación de información para la determinación del comportamiento y estado de calidad de agua.
- De acuerdo a la resolución del sensor de adquisición de datos digitales, se pueden estimar parámetros de calidad de agua e investigar con mayor detalle la interacción agua-luz-sustancia. Con esta información es posible determinar modelos de calidad de agua con base en información espectral.

- Archivo de imágenes digitales con la continuidad que el sistema satelital lo permita (Dekker y Peters, 1993)
- Obtención de información cuantitativa exacta a partir de datos derivados de percepción remota y la recolección de mediciones directas en el campo (Brivio et al., 2001)

La integración de datos de Percepción Remota en un Sistema de Información Geográfica proporcionan una valiosa herramienta para el monitoreo y evaluación

### 3. ZONA DE ESTUDIO

#### Generalidades

El lago de Chapala está localizado entre los estados de Michoacán y Jalisco; se encuentra en la parte oeste de la Faja Volcánica Transmexicana ( $102^{\circ}42'30''$ - $103^{\circ}25'30''$  W y  $20^{\circ}6'36''$ - $20^{\circ}18'00''$  N). Se encuentra a 1,520 msnm y tiene una longitud de 77 km y ancho de 22 km; su superficie es de aproximadamente 1,100 km<sup>2</sup> (Lind *et al.*, 1997). Presenta una orientación E-W y ocupa dos terceras partes de la depresión topográfica formada por un graben producido por la actividad tectónica regional, en esta depresión se han depositados sedimentos lacustres y pluviales intercalados con unidades volcánicas (Rosas-Elguera y Urrutia Fucugauchi, 1998). Es un cuerpo de agua de poca profundidad y que en promedio tiene profundidades que van de los 3 a los 14 m de profundidad de acuerdo al Centro Estatal de Aguas del Estado de Jalisco (2013) y de acuerdo a Lind y Dávalos-Lind (1991) de 4.5 m en promedio. La batimetría del lago se presenta en la figura 3.1 que fue realizada en 1982 por el organismo rector en ese tiempo de los recursos hídricos: la hoy extinta Secretaría de Aguas y Recursos Hidráulicos (SARH, 1982).

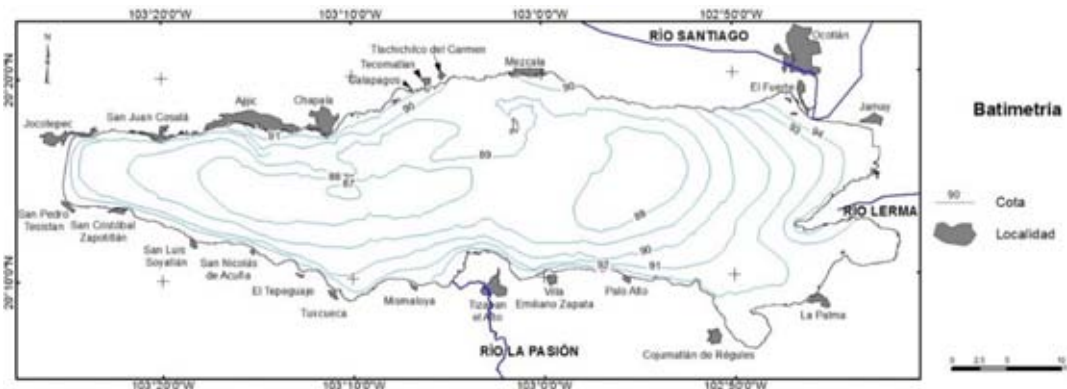


Figura 3.1 Batimetría Lago de Chapala (Tomada de Filonov *et al.*, 2001).

#### Cuenca Lerma-Chapala

El lago de Chapala forma parte de la cuenca Lerma-Chapala (Figura 3.2), cubre parte del territorio mexicano en la parte centro occidente del país. Tiene una superficie de 51,887 km<sup>2</sup> en donde se encuentran cuencas cerradas como la de Pátzcuaro y Cuitzeo. La cuenca ocupa parte de los estados de Guanajuato, Jalisco, Estado de México, Michoacán y Querétaro (Diario Oficial de la Federación, 2006).



Figura 3.2. Localización de la zona de estudio

Su principal cauce es el río Lerma que nace en las laderas del Nevado de Toluca a 4,690 m snm, tiene una longitud de 700 km aproximadamente y desemboca en el Lago de Chapala a 1,600 m snm. Los cauces secundarios son los ríos Gavia, Jaltepec, La Laja, Silao, Guanajuato, Turbio, Angulo y Duero, así como El Zula y La Pasión que desembocan directamente sobre el lago de Chapala. Los principales cuerpos de agua en esta cuenca son los lagos de Chapala, Cuitzeo, Pátzcuaro y Yuriria (Cotler *et al*, 2006).

La cuenca Lerma-Chapala se subdivide en 19 subcuencas que se agrupan en 3 subzonas: Alto, Medio y Bajo Lerma en donde se encuentra el Lago de Chapala (IMTA, 2009). En la cuenca Lerma-Chapala hasta el 2010 se asentaban aproximadamente 12 millones de personas y considerando el área de influencia de la cuenca (Zonas metropolitanas de Guadalajara y Distrito Federal con 10 millones de personas) entonces, se puede decir que de esta cuenca depende la quinta parte de la población nacional (Instituto Nacional de Estadística Geografía. INEGI, 2010).

## Clima

El lago de Chapala tiene un clima templado subhúmedo, la zona presenta alta disponibilidad de humedad por la influencia del cuerpo de agua (Cotler *et al.*, 2006).

La precipitación promedio en la cuenca es de alrededor de 735 mm por año y varía de 300 mm en años de sequía a 1,200 mm en años húmedos (Filonov *et al.*, 2001). Mientras que el rango de evaporación de superficie es de alrededor de 1,400 a 1,600 mm por año que representan casi el doble del promedio de precipitaciones (Aparicio, 2001). Durante la época de lluvia la turbidez del lago de Chapala disminuye debido al aumento en la profundidad y disminución en la re-suspensión de sedimentos (Membrillo-Abad, 2010, Lind et al 1992).

La variabilidad de las precipitaciones anuales causa importantes fluctuaciones temporales en el nivel del agua, área y volumen del lago (Aparicio, 2001). Los procesos dinámicos de viento y brisa se llevan a cabo como resultado de la diferencia de temperaturas entre la superficie del agua y la tierra circundante con poca cobertura de vegetación, que durante el día se mantiene muy caliente mientras que por las noches es fría, lo que causa la circulación de la brisa. La velocidad del viento llega a ser de 8-10 m/s y tiende a aumentar la evaporación de la superficie (Filonov *et al.*, 2001). La salida natural del lago es el Río Santiago pero sólo está presente cuando el almacenamiento llega a su máxima capacidad; actualmente la salida principal es por el acueducto que abastece de agua potable a la ciudad de Guadalajara (Aparicio, 2001; Sandoval, 1994).

### **Balance hidrológico**

En la cuenca Lerma-Chapala se tienen 2 estudios sobre balance hídrico en los últimos 20 años (balance hídrico reportado en Fernex et al., 2001; Pladeyra, 2003), ambos estudios presentan un déficit de 500 y 4232 Mm<sup>3</sup>. El resumen se presenta en la Tabla 3.1. De acuerdo al Diario Oficial de la federación (2006) la cuenca del lago de Chapala es deficitaria, los niveles más bajos reportados en el almacenamiento del lago fueron en 1955 y 2002 cuando el lago estuvo muy cerca de desaparecer. El consumo de agua superficial excede los escurrimientos excepto en años húmedos o mayor precipitación (Wester et al., 2008).

El Diario Oficial de la Federación (2006) reporta un balance de aguas subterráneas de la cuenca Lerma-Chapala con una recarga de 2749 Mm<sup>3</sup> una descarga natural de 377 Mm<sup>3</sup> y un volumen de extracción de 3391 Mm<sup>3</sup>, lo que indica que en la cuenca se tiene un déficit de agua subterránea de 1019 Mm<sup>3</sup>.

En el caso del Lago de Chapala, Aparicio (2002), reporta que las entradas de agua al Lago de Chapala son: Río Lerma 273Mm<sup>3</sup>, proveniente de la cuenca 178Mm<sup>3</sup> y escurrimientos superficiales 711 Mm<sup>3</sup>, mientras que las salidas son: Evaporación 1394 Mm<sup>3</sup>, Río Santiago y Bombeo 272 Mm<sup>3</sup>, lo que indica que existe un déficit del recurso de 504 Mm<sup>3</sup>.

Tabla 3.1 Balance hídrico de la cuenca Lerma-Chapala

Concepto	Reporte en Fernex et al., 2001 [Mm <sup>3</sup> ]	Pladeyra, 2003 Secas [Mm <sup>3</sup> ]	Pladeyra, 2003 Lluvias [Mm <sup>3</sup> ]
<b>Entradas</b>			
Evapotranspiración	2800 a 3100	2547	3646
Escurrimiento superficial		479	12780
Infiltración		856	a 21103
<b>Salidas</b>			
Consumo de agua		8114	
Río Santiago	2500 a 3600		
Bombeo			
Evaporación			
Balance hídrico =Entradas-Salidas	300 a -500	-4232	29415

## Geología

La cuenca Lerma Chapala Pacífico se encuentra en el Faja Volcánica Transmexicana (FVT). Las depresiones localizadas dentro de la FVT son grábenes o lagos tectónicos (Zarate-Del Valle et al., 2001).

La geología de la cuenca comprende eventos volcano-sedimentarios, sedimentarios e ígneos que van del Jurásico al Reciente. Las rocas más antiguas pertenecen a la Sierra de Guanajuato, son depósitos sedimentarios, volcano-sedimentarios continentales y marinos del Jurásico, cubiertos por rocas sedimentarias continentales y marinas del Cretácico. Las rocas ígneas intrusivas y extrusivas del Paleoceno y las rocas ígneas extrusivas del Neógeno

representan eventos volcánicos intensos y extendidos dentro de la cuenca. Las rocas con mayor expresión superficial corresponden a la Faja Volcánica Transmexicana de edad Pleistoceno en la región centro sur. En el Jurásico, estructuralmente se presenta una deformación dúctil y en el Cretácico una fase dúctil-frágil de donde se tienen rocas foliadas, plegadas y fracturadas. En el Paleógeno se tiene el emplazamiento y desarrollo de rocas ígneas extrusivas de la Sierra Madre Oriental, así como fallas normales con orientación N-S debido a una deformación distensiva. En el Neógeno se originan fallas normales con orientación E-W y se presenta otra fase distensiva de orientación NE-SW, este proceso promueve el desarrollo de domos, conos, mesas y estructuras volcánicas en Michoacán y Guanajuato y que además forman parte del FVT (Cotler, *et al.*, 2006).

### **Sedimentos en el Lago de Chapala**

Los sedimentos en el lago de Chapala tienen un espesor de 300-900 m (Zarate-Del Valle *et al.*, 2001) y están compuestos principalmente de conglomerado, arenisca, limonita y capas de piroclastos. En la parte este del lago se tiene un área extensa nombrada la Ciénega que fue considerada un pantano hasta 1905 cuando se construyó el dique que separa al lago de la Ciénega y encauza al río Lerma hacia el lago (Sandoval, 1994).

Dentro del lago de Chapala se encuentran dos islas: Los Alacranes y Mezcala cuya composición es de basalto vesicular, Los Alacranes presenta actividad hidrotermal ligada a una falla rellena de calcita y cuarzo. Al noroeste del lago se encuentra el centro volcánico La Primavera y al suroeste se encuentra el volcán Colima. La cuenca del Lago de Chapala está caracterizada por actividad hidrotermal como: manantiales termales, afloramientos de alteración hidrotermal y depósitos de “sinter”. Otra característica es la manifestación de hidrocarburos como en los manantiales “Los Gorgos” (Los Górgoros nombre popular) que son pequeñas isletas de asfalto negro cuya fuente determinaron Zarate-Del Valle *et al.*, (2001) que se localiza a más de 2,348 m de profundidad. Un aspecto importante para conocer algunos de los procesos que se llevan a cabo en el Lago es la tasa de sedimentación, puesto que este parámetro se comporta de manera distinta dentro del cuerpo de agua. En la cercanía de la desembocadura del río Lerma se presentan tasas de sedimentación mayores a 5 mm/año, en la parte central se tiene valores de hasta 3.0 mm/año y en el extremo oeste son menores de 2.0 mm/año (Zarate-Del Valle *et al.*, 2001).

### **Aspectos Sociales**

La cuenca Lerma-Chapala ocupa el 3% del territorio nacional su población asciende a 12 millones de habitantes equivalente al 10% de la población del país (INEGI, 2010). Las ciudades dentro de la ésta cuenca con mayor



crecimiento poblacional como León, Toluca, Querétaro, Morelia, Irapuato y Celaya han crecido industrial y económicamente en los últimos años, lo que ha provocado la migración de la población hacia esas ciudades (IMTA, 2009). La cuenca no solo alberga y abastece de bienes y servicios a las zonas a las que pertenece sino que además está influenciada por las dos ciudades más pobladas del país: la Ciudad de México y Guadalajara. La distribución y concentración de la población está directamente relacionada con las zonas con accesibilidad a fuentes de trabajo y servicios (Cotler et al., 2006).

El lago de Chapala representa un atractivo turístico para comunidades internacionales, principalmente provenientes de Canadá, Estados Unidos y algunos países de Europa (Sunil et al., 2007). Esta concentración de la población, de la actividad económica e industrial requiere del uso del recurso hídrico, lo cual ha provocado problemas no solo sociales, económicos sino además ambientales, debido a la creciente demanda de agua (Cotler et al., 2006).

### **Uso de suelo y Cobertura vegetal**

Debido al crecimiento y desarrollo económico de la cuenca, las actividades agrícolas son las que ocupan la mayor superficie de la cuenca. Los asentamientos humanos, deforestación, agricultura y pastizales inducidos son los usos de suelo que han aumentado en el periodo de 1976-2000. El aumento de las zonas agrícolas en los alrededores de los cuerpos de agua en la cuenca ha provocado el deterioro principalmente de los lagos de Cuitzeo y Chapala por la contaminación de descargas urbanas, desechos industriales y productos utilizados en la agricultura (INE, 2003; IMTA, 2009). Los cambios en los usos de suelo pueden modificar el funcionamiento de los diferentes ecosistemas que son los mismos que proveen al ser humano de bienes y servicios, estos cambios en general resultan en impactos negativos al ecosistema y al ser humano (IMTA, 2009).

La cuenca Lerma Chapala alberga una de las zonas industriales y agrícolas más importantes del país. El 50% del área de la cuenca la ocupa la zona de cultivos (riego, humedad y temporal). Los bosques ocupan solo un 13% del área total de la cuenca y sólo se restringen a zonas de alta montaña debido a la acción humana. El pastizal ocupa un 12% de la zona y la vegetación hidrófila ocupa el 0.31% del área total de la cuenca. El matorral ocupa poco menos del 2%, principalmente al norte de la cuenca en zonas áridas. La cobertura de cuerpos de agua la conforman lagos y presas como el Lago de Chapala, Cuitzeo, Pátzcuaro, presa Solis, Ignacio Allende, etcétera (Cotler, et al., 2006).

La deforestación y la actividad agrícola son las principales causas de degradación, la que se puede dar de las siguientes formas (INE, 2003):

- Erosión hídrica superficial – se presenta cuando son arrastrados los componentes de la parte superficial del suelo mediante escurrimientos debidos a precipitaciones o tormentas.
- Pérdida de fertilidad – debido a la intensa actividad agrícola que provoca la compactación del suelo a poca profundidad a causa del paso de maquinaria pesada, lo que impide la incorporación del abono orgánico que provoca la disminución de nutrientes en el suelo
- Contaminación provocada por tiraderos de basura, residuos industriales, etc. y salinización de suelos

La pérdida de fertilidad de los suelos es el principal proceso de degradación que se da en las zonas de cultivos y afecta al 66.9% de esta zona (INE, 2003).

### **Uso del agua**

La cuenca Lerma-Chapala presenta una gran variedad de ecosistemas, mismos que proporcionan una amplia variedad de bienes y servicios al ser humano. En la cuenca se llevan a cabo numerosas actividades económicas que han atraído y formado grandes zonas poblacionales formando así ciudades y localidades que requieren satisfacer necesidades tales como: vivienda, alimento, servicios y educación. Los principales servicios que de manera indirecta o directa proporciona la cuenca son alimento y suministro de agua.

Las coberturas que caracterizan a la cuenca Lerma Chapala, se describen en la tabla 3.2 y figura 3.3.

El aprovechamiento de los recursos que estas coberturas proveen a la población que habita en la cuenca, está en función de los usos y costumbres de los administradores y/o propietarios del recurso (INE, 2003).

### **Contaminación en la cuenca Lerma Chapala**

Las actividades humanas como la agricultura, ganadería, acuicultura, entre otras actividades generan contaminación y por consecuencia un impacto negativo al ecosistema del cual obtiene sus recursos. Esta contaminación proviene de fuentes puntuales: que causan degradación de la calidad del agua en una escala local y las fuentes no puntuales o difusas que son aquellas que se distribuyen en una zona o de manera lineal y afectan grandes áreas (Tabla 3.3). . Los contaminantes se pueden clasificar de acuerdo a las actividades que los producen: industriales, agrícolas, pecuarias, etcétera, y por el ambiente donde se producen: rural y urbano. No obstante el

impacto de estos contaminantes está determinado por las características del ambiente por ejemplo: geología, suelo, pendiente, variabilidad de la precipitación, cobertura, vegetación, etc.

Tabla 3.2 Coberturas identificadas en la cuenca del Bajo Lerma (Cotler *et al.*,2006)

COBERTURA	TIPO DE VEGETACIÓN Y USO DE SUELO
Cultivos	Agricultura (riego y humedad)
	Agricultura (Temporal)
Bosques	Coníferas
	Latifoliadas
	Mesófilo de montaña
Selva	Perennifolia subperennifolia
Matorral	Mezquital
	Matorral xerófilo
Pastizal	Pastizal
Vegetación hidrófila	Vegetación hidrófila
Otro tipo de vegetación	Otro tipo de vegetación
Otras coberturas	Asentamiento humano
	Cuerpo de agua

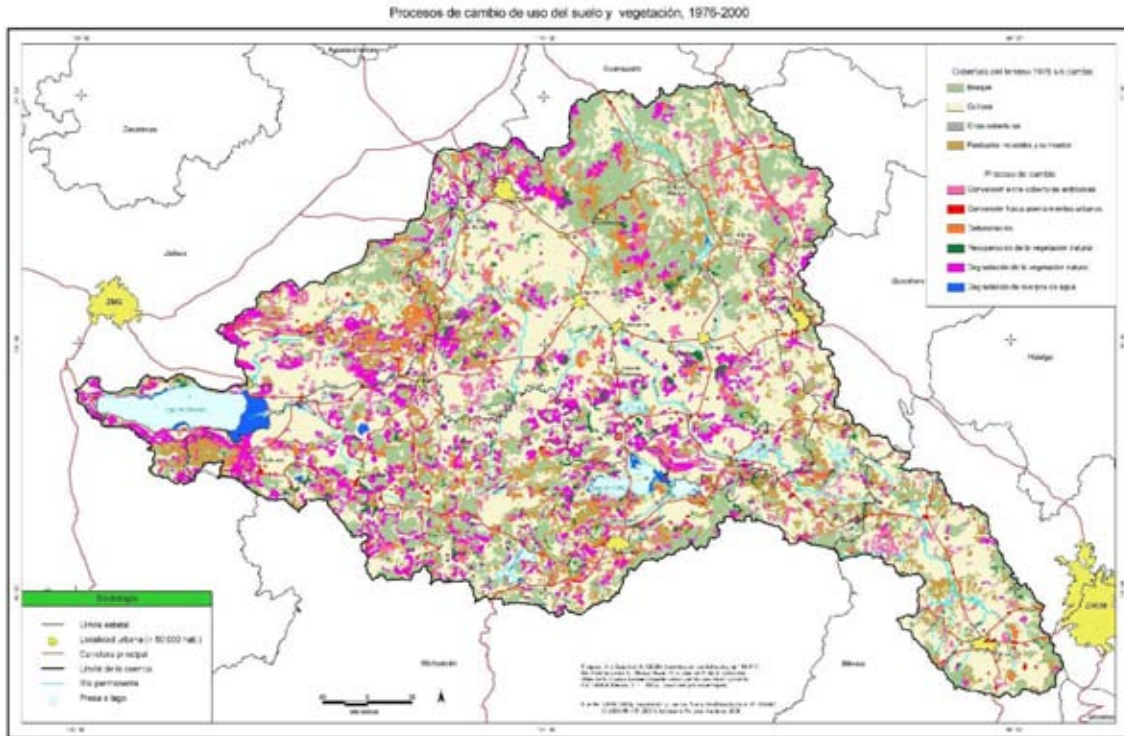


Figura 3.3 Mapa de coberturas de la cuenca Lerma-Chapala (Tomado de Fregoso, A. y Esquivel, N. 2006).

Tabla 3.3 Fuentes puntuales y no puntuales de contaminación

FUENTES PUNTUALES	FUENTES NO-PUNTUALES O DIFUSAS
Depósitos de combustibles industriales	Ductos de transporte de combustible
Confinamiento de residuos sólidos	Filtraciones de aguas residuales de zonas Agrícolas
Descarga agua residuales urbanas y rurales	Desechos de actividades pecuarias y acuícolas
Puntuales	

En los cuerpos de agua una de las principales fuentes de contaminación es el desagüe directo a sus aguas de desechos de actividades urbanas, acuícolas, agrícolas y rurales (ganadería) (Cotler et al., 2006). Los cambios más importantes en cuerpos de agua superficiales se deben a:

- Aumento en las concentraciones de nutrientes en particular de fósforo y nitrógeno, este aumento provoca la aceleración del proceso de eutrofización
- Presencia de pesticidas generalmente arrastrados de las zonas agrícolas a través de los tributarios.
- Aumento en la concentración de sedimentos suspendidos que aumenta la turbidez del agua.
- Reducción del oxígeno disuelto.

### **Contaminación en el Lago de Chapala**

A continuación se describen algunos de los aportes de contaminantes en relación a los usos de suelo que se presentan en la cuenca:

Las afectaciones de un pesticida dependen de la facilidad con la que se mueve y de la vida media que tiene. Los pesticidas se presentan en los cuerpos de agua y tributarios ya que se lixivian con el riego y con las precipitaciones y en zona con suelos arenosos y con actividad agrícola intensiva. Los fertilizantes que se utilizan en la agricultura también provocan cambios importantes en el lago. En la cuenca Lerma Chapala se aplican fertilizantes en una superficie equivalente al 45- 80% de la cobertura total de cultivos mientras que los pesticidas se aplican en un 65% del área total. Otras actividades que contribuyen a la acumulación de contaminantes en la cuenca son la acuicultura y ganadería (Cotler, 2010). En la acuicultura y la agricultura es común el uso de fertilizantes y fitorreguladores para el manejo o nutrición de cultivos.

Los pesticidas pueden ser clasificados por su estructura química en organoclorados, organofosforado, organomercuriales, carbámicos, ditocarbámicos, triazínicos, fenoxiacéticos, bipirilídicos, ftalimidicos, sulfonamidas, bencimidazole, piretroides, derivados del dinitrofenol y derivados de la urea. En general todas las formas químicas son tóxicas, pueden provocar alteraciones a los seres vivos, son persistentes al ambiente y esto aumenta la posibilidad de movilidad e interacción con otros organismos vivos antes de degradarse. Los agroquímicos identificados en la cuenca Lerma-Chapala se enlistan en la tabla 3.4

El principal problema con los pesticidas es que algunos se mantienen disueltos en la columna de agua afectando a los microorganismos que viven en el lago, los fungicidas no son solubles y disminuyen la biodiversidad, otro tipo de pesticida se volatilizan y pasan a la atmósfera, otros más se combinan con otros elementos como el nitrógeno y esto inhibe su degradación. Los agroquímicos tienen un grado de toxicidad de moderado a alto, lo que los hace peligrosos para el ecosistema y para el ser humano, la composición tanto de pesticidas como de fertilizantes se

basa en fósforo y nitrógeno, nutrientes que son arrastrados a los cuerpos de agua provocando la acumulación de estos elementos (Cotler, et al. 2006).

En el caso de las descargas de aguas residuales, se tiene la entrada de nutrientes de zonas urbanas o rurales en donde se encuentran presentes los detergentes que están compuestos por tensoactivos que disminuyen la tensión superficial del agua para mojar y disminuyen la fuerza de adhesión de partículas de grasa o polvo además de que funcionan como emulsionador, éstos compuestos son hidrofílicos de tipo aniónico, catiónico y no iónicos. En altas concentraciones los detergentes son tóxicos para organismos acuáticos ( $> 60\text{mg/l}$ ) ya que no se degradan con facilidad debido a su estructura química, algunos otros son bactericidas lo que ocasiona modificaciones a las comunidades fitoplanctónicas e inhiben la solubilidad del oxígeno en el medio provocando la mortandad de comunidades acuáticas; algunos detergentes contienen polifosfatos que resultan ser nutrientes y promueven el crecimiento de vegetación acuática (Jímenez, 2005).

Los desechos producidos por la ganadería y por el ser humano en escurrimiento directos a las aguas superficiales proporcionan del 0.5 hasta el 13% de la carga total de nutrientes a estos cuerpos de agua.

Las fuentes principales que aportan nutrientes a los cuerpos de agua o flujos de agua son agricultura, desechos urbanos, escurrimientos pluviales. La agricultura y ganadería son una fuente difusa de entrada de nutrientes, que se da por:

- El tipo de cultivo (siembra y cosecha)
- Manejo del riego
- Aplicación de fertilizantes
- Manejo de los desechos de granjas.

Para reducir de manera directa la entrada de nutrientes a los flujos de agua (ríos) se requiere de un tratamiento mecánico biológico previo a través de la aplicación de métodos de precipitación química de las aguas residuales urbanas.

Tabla 3.4 Principales agroquímicos utilizados en la cuenca Lerma-Chapala. Modificado de Cotler *et al.*, (2006)

<b>Agroquímicos</b>	<b>Nombre</b>	<b>Toxicidad</b>	<b>Usos Generales</b>
Insecticidas	Flash, Parathion metálico,	Altamente tóxico	Acelga
Fumigante	Bromuro de metilo		Brócoli
Herbicidas	Gramoxil, Hierbamina, Hesterón,	Altamente tóxico	Cacahuete
Fungicidas			Calabaza
Fertilizantes	Ácido fosfórico, Amoniac, Nitrato de amonio, Nitrato de calcio, Potasio	Ligeramente tóxicos	Cebolla
			Espinaca
			Tomate
			Trigo

## 4. MATERIAL Y MÉTODOS.

### Procesamiento de imágenes.

Se utilizaron imágenes de la plataforma Landsat 5 TM de enero de 2011 (la fecha fue seleccionada dentro de una amplia búsqueda de archivo debido a que se requiere de dos imágenes para cubrir el área de interés) y ETM+ para determinar coberturas (agua, vegetación acuática, sedimento suspendido, agricultura, zona urbana, suelo desnudo, agua turbia, agua limpia, mixta, suelo desnudo y vegetación escasa), en la subcuenca del Bajo Lerma así como las variaciones temporales en el lago de Chapala. También se utilizaron imágenes SPOT HRG para obtener valores de brillo y correlacionarse con parámetros físico-químicos con la finalidad de calcular el Índice del Estado Trófico del lago.

El análisis de las variaciones espacio temporales de las concentraciones de vegetación acuática (lirio acuático y tule) expresadas como concentración de clorofila *a*, así como el aporte cualitativo de nutrientes debido a los escurrimientos relacionados con la temporada de lluvia se realizó con imágenes multiespectrales (correspondientes una a cada mes del año excepto julio por nubosidad) de la plataforma Landsat 5 del año 1993. Se analizó septiembre 1992 (TM) debido a la nula disponibilidad de imágenes libres de nubosidad, con la finalidad de analizar la distribución de los materiales (agua, sedimentos y vegetación acuática) en la temporada de lluvias. El uso de información de diferentes años está sustentada en que son años de precipitaciones “normales” de acuerdo a la información media anual consultada de las estaciones meteorológicas de CONAGUA (2014)

### Sensores

Las características del sensor Landsat 5 se muestran en la tabla 4.1. Para analizar la fuente de los materiales que se encuentran distribuidos en el Lago de Chapala como vegetación acuática que florece por el aporte de nutrientes originados principalmente por fertilizantes, zonas urbanas, etc. y sedimentos, provenientes de suelos desnudos, zonas agrícolas y urbanas se utilizaron imágenes de la plataforma Landsat 7 sensor ETM de los meses mayo y noviembre de 2002 (Membrillo, 2010)



Tabla 4.1 Características de la plataforma Landsat 5

Altitud	705 km		
Inclinación	98.2°		
Orbita	Sincronía con el sol		
Ciclo de repetición	16 días		
Satélite	Landsat 5 (1984/03/01 –2013/01/01)		
Path	29	Row	46
Fechas de toma de imágenes Año 1993	Ene10, Feb11, Mar15, Abr16, May18, Jun03, Ago06, Oct25, Nov26, Dic12		
Fecha toma de imagen Año 1992	Sep04		

La información espectral del sensor TM se presenta en la tabla 4.2

Tabla 4.2 Información espectral del sensor TM

MODO	NÚMERO DE BANDA	BANDA ESPECTRAL [ $\mu\text{m}$ ]	RESOLUCIÓN [m]
Multiespectral	B1	0.45 – 0.52	30
	B2	0.52 – 0.60	30
	B3	0.63 – 0.69	30
	B4	0.76 – 0.90	30
	B5	1.55 – 1.75	30
	B7	2.08 – 2.35	30

Las características de la plataforma Landsat 7 y sensor ETM+ se presentan en la tabla 4.3, mientras que la información espectral del sensor ETM+ se presenta en la tabla 4.4

Se utilizaron imágenes SPOT HRG del 25 de abril de 2012 para obtener valores de brillo y correlacionarse con parámetros como clorofila *a* y profundidad de DS con la finalidad de calcular el Índice del Estado Trófico del Lago. Las imágenes SOPT fueron proporcionadas por ERMEX debido a la necesidad de programar las fechas de muestreo para hacer coincidir la toma de muestra con la toma de las imágenes.

La información multiespectral procesada pertenece a la plataforma satelital SPOT\_5 (Satélite Para la Observación de la Tierra), sus características se presentan en la tabla 4.5

Tabla 4.3 Características de la plataforma Landsat 7 y sensor ETM+

Altitud	705 km		
Inclinación	98.2°		
Orbita	Polar sincrónica con el sol		
Ciclo de repetición	16 días		
Satélite	Landsat 7 (1999/04/15 – SLC apagado 2003/05/31)		
Sensor	ETM+		
Path	28 y 29	Row	46
Fecha toma imagen	Ene12 y Ene21, 2011		

Tabla 4.4 Información espectral del sensor ETM+

MODO	NÚMERO DE BANDA	BANDA ESPECTRAL [ $\mu\text{m}$ ]	RESOLUCIÓN [m]
Multiespectral	B1	0.45 – 0.52	30
	B2	0.52 – 0.60	30
	B3	0.63 – 0.69	30
	B4	0.76 – 0.90	30
	B5	1.55 – 1.75	30
	B7	2.08 – 2.35	30
	B8	0.52 – 0.9	15

Tabla 4.5 Características de la plataforma SPOT 5:

Altitud	822 km
Inclinación	98.7°
Orbita	Polar sincrónica con el sol
Periodo de Órbita	101 minutos
Ancho de barrido	60*60; 80 km
Ciclo de repetición	26 días
Satélite	SPOT 5 (2002/05/04 - actual)
Fecha toma imagen	Abril 25,2012

La información espectral del sensor HRG se presenta en la tabla 4.6

Tabla4.6 Información espectral del sensor HRG

MODO	NÚMERO DE BANDA	BANDA ESPECTRAL [ $\mu\text{m}$ ]	RESOLUCIÓN [m]
Multiespectral	B1	0.50 – 0.59	10
	B2	0.61 – 0.68	10
	B3	0.79 – 0.89	10
	B4	1.58 – 1.75	10
Monoespectral	PAN	0.51 – 0.73	2.5

### Pre-procesamiento de imágenes

En el pre-procesamiento se llevó a cabo la restauración de las imágenes por distorsión, degradación y ruido introducido durante el proceso de adquisición de las imágenes. La restauración de las imágenes produce imágenes corregidas cercanas a las características de la energía radiante de la escena original. Para corregir los datos de percepción remota se deben determinar errores externos e internos de los sensores que adquieren los datos. Los errores internos son creados por el mismo sensor mientras que los externos son debidos a las perturbaciones de la atmósfera, además de las características de la escena que son variables en la naturaleza (Jensen, 1996). La atmósfera afecta a la imagen por fenómenos de dispersión, absorción y refracción de la luz, el más dominante es la dispersión. Existen dos tipos de corrección atmosférica: la relativa y la absoluta, la primera no requiere más información que la contenida en la propia imagen por ejemplo: el método de sustracción del pixel oscuro, pero en la absoluta hay que conocer los parámetros que afectan la dispersión: concentración de aerosoles, temperatura, humedad, presión, etc.

### Corrección atmosférica

Se realizó una corrección atmosférica a través del método de ajuste de histograma que consiste en sustraer el mínimo valor de brillo (Chavez, 1988). Este método se basa en que en la región del visible existe una fuerte influencia de la atmósfera, lo cual es evidente en un análisis estadístico univariado, ya que los valores mínimos de brillantez generalmente son altos. Este método supone que al menos unos cuantos píxeles corresponden a sombras

debidas a la topografía o a las nubes y por lo tanto tienen reflectancia 0% pero debido a la dispersión atmosférica estos píxeles no son completamente oscuros, por lo que debe ser sustraído de todos los valores de brillo para cada banda el mínimo valores de brillo

## **Procesamiento de imágenes**

Para mejorar la visualización y obtener información de las imágenes existen algoritmos de mejoramiento que permiten identificar características sutiles de los materiales al realzar las características espectrales de éstos. Estas técnicas se clasifican como operaciones locales o puntuales. Las puntuales modifican los valores de brillo de cada píxel en una imagen mientras que las operaciones locales modifican los valores de brillo de cada píxel basado en los valores de brillo vecinos. Cualquiera de las dos técnicas se puede aplicar para una o para varias bandas de las imágenes multiespectrales. Lillesand (2008) clasifica las técnicas de mejoramiento en:

- Realce de contraste (útil para visualización)
- Realce de características espaciales (para detectar bordes y lineamientos)
- Realce espectral (identificación de materiales de interés)

En el procesamiento de imágenes se realiza realce espectral con la finalidad de extraer información a partir de firmas espectrales y necesidades del usuario. Existen diferentes métodos de realce espectral:

### **Cociente de bandas.**

En datos de imágenes satelitales, el cociente de bandas mejora los cambios en los gradientes de las curvas de reflectancia espectral de diferentes materiales, ya que estos cambios se acentúan al realizar el cociente. La relación o cociente entre dos números típicamente proporciona un número real. Antes de ser desplegada una relación de imagen o cociente de imagen, puede ser escalada para aumentar el rango dinámico y convertir los valores de brillantez resultantes del proceso a números enteros. La corrección atmosférica debe ser realizada antes de efectuar el cociente de las bandas.

La división entre cero no está definida y puede prevenirse asignando un número digital de 1 a los píxeles cuyo valor de brillo sea cero después de realizar la corrección atmosférica. La expresión matemática de la función de cocientes de bandas está dada por la siguiente expresión (ecuación 4.1).

$$BV_{i,j,r} = \frac{BV_{i,j,k}}{BV_{i,j,l}} \quad \dots \text{ ec 4.1}$$

Donde:

$BV_{i,j,r}$  es el valor del cociente de las bandas  $k/l$  para el píxel en la fila  $i$ , columna  $j$

$BV_{i,j,k}$  es el valor de brillo en la misma posición de píxel en la banda  $k$

$BV_{i,j,l}$  es el valor de brillo en la misma posición de píxel en la banda  $l$  (Jensen, 1996)

### **Composición a color**

Es una técnica que permite visualizar la respuesta de un material en rangos de longitud que el ojo humano no percibe así como resaltar la respuesta espectral de los diferentes materiales de estudio (en este caso: vegetación, sedimentos y respuesta espectral del agua más limpia sobre el área de estudio). En ésta técnica se despliegan tres bandas espectrales en los tres diferentes cañones del sistema RGB. Cuando la longitud de onda de las bandas espectrales no coincide con el color de despliegue se dice que la composición es un falso color (Jensen, 1996).

Para el lago de Chapala se utiliza en ambas fechas (mayo y noviembre de 2002) una composición 431 que realiza la respuesta espectral de pigmentos de clorofila\_ $a$  (ETM, B4) y sedimentos en general (ETM B3).

### **Análisis de Componentes Principales**

Los objetivos de análisis por componentes principales son:

- Generar nuevas variables que puedan expresar la información contenida en el conjunto original de datos.
- Reducir la dimensionalidad del problema que se está estudiando.
- Eliminar, cuando sea posible, algunas de las variables (bandas) originales, cuando aportan poca información.

Las nuevas variables (bandas) generadas se denominan componentes principales y poseen algunas características estadísticas deseables, tales como independencia (cuando se asume multinormalidad).

El análisis por componentes principales se aplica cuando se dispone de un conjunto de datos multivariados y cuando se desea conocer la relación entre los elementos de una población y se infiere que en dicha relación influye de manera desconocida un conjunto de parámetros o propiedades de los elementos.

Las componentes principales tienen las siguientes características que son útiles para la interpretación de los datos de Percepción Remota:

- Los componentes principales no están correlacionados y si se puede suponer multinormalidad en los datos originales, además son independientes.
- Cada componente principal sintetiza la máxima variabilidad residual contenida en los datos (Pla, 1986).

### **Realce espacial**

Una característica de las imágenes de percepción remota es un parámetro llamado frecuencia espacial que se define como el número de cambios en los valores de brillo por distancia unitaria en cualquier parte de la imagen. Si hay pocos cambios en los valores de brillo en un área dada se dice que es un área de baja frecuencia. Por el contrario si los valores de brillo cambian abruptamente en una pequeña área se dice que es un área de alta frecuencia.

La frecuencia espacial en percepción remota puede ser realzada usando dos diferentes enfoques:

- Técnica del Análisis de Fourier.
- Filtrado de convolución espacial.

Los filtros espaciales enfatizan o disminuyen las diferencias entre los datos de brillantez de píxeles vecinos en una imagen, con base en las diferentes frecuencias espaciales referidas a las variaciones tonales de la imagen (Lillesand *et al.*, 2008). Este método se aplicó en este trabajo a través del filtrado de convolución espacial que requiere el uso de máscaras o Kernels.

### **Realce de bordes en el dominio espacial**

Una de las aplicaciones más importantes de la percepción remota es la localización de límites de un objeto en estudio y los rasgos lineales, por ello los bordes de un objeto, que son aquellos que le dan forma, pueden ser

delineados usando la técnica de realce de bordes y además se pueden definir los rasgos que tienen un carácter lineal.

### Realce de lineamientos

Uno de los métodos útiles para la extracción de lineamientos es la técnica de máscaras (kernels) direccionales, es decir de la diferenciación discreta bidimensional, donde el nombre de la máscara sugiere la dirección de máxima pendiente. Las máscaras se definen a continuación (Jensen, 1996):

$$\begin{array}{rcc}
 & 1 & 1 & 1 \\
 \text{Norte} = & 1 & -2 & 1 \\
 & -1 & -1 & -1
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{rcc}
 & -1 & -1 & -1 \\
 \text{Sur} = & 1 & -2 & 1 \\
 & 1 & 1 & 1
 \end{array}$$

$$\begin{array}{rcc}
 & -1 & 1 & 1 \\
 \text{Este} = & -1 & -2 & 1 \\
 & -1 & 1 & 1
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{rcc}
 & 1 & 1 & -1 \\
 \text{Oeste} = & 1 & -2 & -1 \\
 & 1 & 1 & -1
 \end{array}$$

$$\begin{array}{rcc}
 & 1 & 1 & 1 \\
 \text{Noreste} = & -1 & -2 & 1 \\
 & -1 & -1 & 1
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{rcc}
 & -1 & -1 & 1 \\
 \text{Sureste} = & -1 & -2 & 1 \\
 & 1 & 1 & 1
 \end{array}$$

### Planeación del muestreo

Con base en el estudio de los cambios estacionales en la respuesta espectral del lago de Chapala en 2002 (Membrillo, 2010) en donde se identificaron materiales como: sedimentos suspendidos (arcillas y óxidos), agua libre de turbidez y vegetación acuática y/o ribereña (lirio y tule), se planeó un muestreo de tipo aleatorio estratificado representativo para asegurar que todas las clases identificadas en el mapa de distribución de materiales en la superficie del lago fueran muestreadas.

A partir del mapa previamente descrito se aplicó el módulo SAMPLE del programa IDRISI para obtener un densidad de 50 puntos aleatoriamente distribuidos en las diferentes clases del mapa; para lograr un muestreo

eficiente en costo y tiempo se aplicaron los siguientes criterios para seleccionar 30 puntos de muestreo distribuidos a lo largo de la ribera y dentro del cuerpo de agua

Los criterios de exclusión utilizados para determinar los puntos a muestrear fueron los siguientes:

- Distancia mínima entre punto y punto de 5 km
- Profundidades del lago menores de un metro únicamente para los puntos localizados dentro del cuerpo de agua, la zona de la ribera no está excluida.

Los criterios de inclusión para seleccionar los puntos de muestreo se enlistan a continuación:

- Puntos localizados en zonas de anomalías de fósforo total, analizadas en Membrillo (2010)
- Puntos cercanos a localidades con poblaciones mayores a 1,800 habitantes (Chapala, Ajijic, Jamay, etc)
- Desembocadura del río Lerma

La profundidad de muestreo se determinó utilizando los valores medidos de profundidad de DS ya que es la información que el sensor podrá obtener de la columna de agua. En aquellos lugares donde la profundidad del DS no rebasó los 30 cm (altura de la botella de muestreadora tipo Niskin de tipo vertical) se muestreó la parte más superficial de la columna de agua, en tanto que para aquellas zonas donde el valor de profundidad de DS fue superior a los 30 cm la muestra se tomó a esa profundidad (sólo una medida fue superior a los 30 cm). La relación entre la lectura del DS ( $Z_d$ ) y la zona fótica ( $Z_{eu}$ ) (1% del PAR superficial) es de alrededor de 2.5 a 3.0 ( $Z_{eu} = 2.5 \text{ ó } 3 Z_d$ )

### **Muestreo en campo**

Se realizó un muestreo en el Lago de Chapala del 23 al 25 de abril de 2012 para relacionar reflectancia con parámetros como turbidez y clorofila<sub>a</sub>, el muestreo se realizó dentro de los 4 días de adquisición de la imagen que de acuerdo a Li y Li (2004) es el tiempo adecuado para obtener modelos estadísticos significativos. Se muestrearon 33 puntos localizados dentro y en las orillas del lago. Como procedimiento estándar de muestreo de agua se midió temperatura, pH, conductividad [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] con multiparámetros OAKTON, además se tomaron muestras para clorofila<sub>a</sub> que fueron preservadas en frío y oscuridad para su análisis en laboratorio (método de Stricklan y Parson, 1972). En la estación C17 y C19 no fue posible tomar la profundidad de DS porque el oleaje impidió tomar la lectura.



## Análisis de regresión

El análisis de regresión es una herramienta estadística que permite evaluar la relación de una o más variables independientes  $X_1, X_2, \dots, X_k$  con una sola variable dependiente continua  $Y$ . Frecuentemente es usado cuando las variables independientes no pueden ser controladas como cuando se colectan en un muestreo o en otro estudio observacional. El análisis de regresión se puede aplicar cuando se quiere:

- Caracterizar la relación entre la variable dependiente e independiente para determinar la extensión, dirección y fuerza de asociación
- Buscar una fórmula cuantitativa o ecuación que describa la variable dependiente  $Y$  como una función de la variable independiente  $X$

La forma más sencilla del problema general de regresión trata con una variable dependiente  $Y$  y una variable independiente  $X$ . El problema estadístico es encontrar el modelo matemático apropiado (recta, parábola, logaritmo, etc.) que tenga el mejor ajuste de los datos lo más cercano a la relación verdadera entre  $X$  y  $Y$  (Kleinbaum, 2008).

Dada una muestra de  $n$  individuos, se observa para cada valor de  $X$  un valor de  $Y$ . Por lo tanto se tiene  $n$  pares de observaciones que pueden ser denotados por  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ . Estos puntos pueden presentarse en una gráfica llamada diagrama de dispersión (Kleinbaum, 2008).

El coeficiente de correlación proporciona una medida de asociación entre las variables de estudio, el coeficiente de correlación entre las variables de clorofila  $a$  y el número digital correspondiente a las bandas de las imágenes multiespectrales es pequeño (Kleinbaum, 2008). El método más usado para demostrar la relación entre las medidas espectrales mediante sensores y parámetros de calidad de agua colectados en campo es el análisis de regresión. La clave en el análisis de regresión es seleccionar el método de regresión apropiado y variables independientes que den como resultado un alto valor de  $R^2$  (coeficiente de correlación cuadrado) (Wang, *et al.*, 2006).

En este estudio se aplicó el método de mínimos cuadrados para realizar el análisis de regresión propuesto como uno de los métodos analíticos para estimar el mejor ajuste de línea recta de acuerdo a Kleinbaum (2008). Se probaron las hipótesis de modelos aditivos y multiplicativos encontrándose que en el presente estudio se confirma que los modelos aditivos lineales son los modelos que mejor explican la relación entre medidas espectrales y parámetros de calidad de agua de acuerdo a estudios previos de cuerpos de agua (Duan *et al.*, 2008; Igamberdiev *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2006). El modelo propuesto para este estudio es el siguiente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x$$

### **Extracción de información para aplicar el método de regresión.**

Los 33 valores medidos *in situ*, ubicados con un dispositivo GPS Garmin se introdujeron en un archivo en formato shape para obtener una máscara en formato raster y realizar la extracción de la información de valores digitales resultantes del procesamiento de imágenes. La extracción se realizó con los programas *Statistica* e *IDRISI*.

### **Cobertura de suelo en la subcuenca del Bajo-Lerma**

Para generar un mapa de coberturas se construyó un mosaico con dos imágenes multiespectrales de la plataforma Landsat 5 TM (path 28-row 46 and path 29-row 46) capturadas en enero de 2011. Este mosaico cubrió el área de la subcuenca del Bajo Lerma.

Para analizar el comportamiento del arrastre de los sedimentos en temporada de lluvias y secas en función de la distribución de los usos de suelo en la subcuenca del Bajo Lerma se utilizaron imágenes de los meses de Mayo (inicio de la temporada de lluvias) y Noviembre (finalización de la temporada de lluvias) de 2002. Todas las imágenes fueron adquiridas a través del servidor GLOVIS del United States Geological Survey, estas imágenes cuentan con una corrección geométrica; adicionalmente se verificó la información con mapas hidrológicos vectoriales (INEGI, 2001).

Para definir la subcuenca del Bajo Lerma, así como sus patrones de drenaje, se utilizó el modelo digital de elevaciones (MDE) proporcionado por la NASA and METI (The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan) nombrado ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model) y obtenido de la página de Japan Space Systems (<http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/index.html>). Se utilizó el módulo WATERSHED del programa IDRISI Taiga para definir el área de la cuenca. Para fines de análisis se consideró un buffer de 1 km, a partir de los patrones de drenaje, en donde podrían albergarse unas 100 hectáreas de zonas de cultivo, zonas urbanas y/o zonas de suelo desnudo o degradado, el cual tiene mayor posibilidad de ser arrastrado por escurrimientos o precipitaciones; es importante señalar que los sedimentos con altas cargas de nutrientes son los más contaminantes para los cuerpos de agua.

### **Procesamiento de imágenes para generar el mapa de coberturas**

Las imágenes procesadas para generar el mapa de coberturas fueron corregidas atmosféricamente aplicando el método de corrección por regresión lineal del píxel oscuro basado en la relación entre el infrarrojo ( $2.2\mu\text{m}$ ) y la región del visible ( $0.4\text{-}0.69\mu\text{m}$ ) (Kaufman et al., 1997). El realce espectral consistió de diferentes técnicas de realce

como cociente de bandas, composición en falso color y análisis de componentes principales. Para definir los bordes del cuerpo de agua se realizó un realce espacial.

Se realizó un análisis de los rasgos característicos de las firmas espectrales de los materiales encontrados en trabajos previos en el lago de Chapala (Membrillo, 2010) y se ubicaron estos rasgos en los rangos ocupados por las bandas del sensor ETM+, ver Tabla 4.7

Tabla 4.7 Rasgos característicos de vegetación acuática, sedimentos arcillosos y óxidos, ubicadas en las bandas espectrales de los sensores TM y ETM+ (\*Bandas con los rasgos espectrales más característicos del material)

MATERIAL	BANDA CON RASGO DE ALTA REFLECTANCIA	BANDA CON RASGO DE ALTA ABSORBANCIA
Vegetación acuática	B4*	B3*
Clorofila_a	B2*	B3*, B7
Sedimentos (principalmente óxidos)	B3*	B1*
Sedimentos arcillosos	B3, B5*	B7*

Después del análisis espectral, la composición a color RGB-(ETM) 432 (vegetación acuática y sedimentos) y los cocientes de bandas ETM4/ETM3 (vegetación), ETM3/ETM1 (sedimentos-predominantemente de óxidos) y ETM3/ETM7 (sedimentos arcillosos) fueron los que proporcionaron mejores resultados para la identificación de materiales en la superficie del cuerpo de agua.

Para identificar las diferentes coberturas se utilizaron las composiciones RGB-(ETM) 742 y RGB-(ETM) 457 en donde se identificaron zonas de agricultura y urbanas (fuentes de contaminación).

Se llevó a cabo una clasificación supervisada para obtener un mapa de coberturas y con este realizar un análisis de la relación entre las coberturas que predominan a lo largo de los drenajes principales y secundarios de la subcuenca y la distribución de sedimentos y vegetación acuática dentro del lago. Se aplicó el clasificador de Máxima Probabilidad para obtener el mapa de coberturas.

## 5. RESULTADOS

### **Análisis de la variación espacio temporal de la distribución de vegetación acuática y sedimento en suspensión con respecto a los escurrimientos debido a la temporada de lluvia en el Lago de Chapala.**

Procesamiento de imágenes del sensor TM (mayo y noviembre, 2002) para la determinación de las variaciones estacionales.

Se calcularon las concentraciones de clorofila  $_a$  que incluye vegetación acuática (lirio y tule), así mismo se realizó el análisis de las fuentes de aporte de nutrientes debido a los escurrimientos relacionados con la temporada de lluvia con base en el procesamiento de las imágenes multiespectrales y se determinaron las variaciones estacionales utilizando series temporales de éstas. Las imágenes se corrigieron por el método de regresión lineal de píxel negro y sustracción del mínimo valor de brillo además de contar con una corrección del terreno.

Se realizó realce espectral para identificar materiales en la superficie del lago con base en el análisis de firmas espectrales de materiales que se esperaba encontrar en el lago tales como sedimentos suspendidos, agua turbia, agua limpia y vegetación acuática (tule y lirio).

Las técnicas de realce aplicadas fueron las siguientes:

Cocientes de banda.

Debido a que las características ópticas del cuerpo de agua están dominadas por la presencia de vegetación acuática, sedimento suspendido y agua con baja turbidez se analizaron las firmas espectrales de estos materiales cuyos rasgos principales se presentan en la tabla 4.7.

Para vegetación acuática la banda de absorción debida a la clorofila  $_a$  se tiene en la banda 3 (TM y ETM+) mientras que el rasgo de alta reflectancia se tiene en la banda 4 donde se presenta la meseta del infrarrojo cercano de la firma espectral de la vegetación. Con base en este análisis se propuso el cociente  $TM4/TM3$  en donde se presenta el mayor contraste en la respuesta espectral de clorofila  $_a$ .

Para el caso de sedimento suspendido se propuso el cociente  $TM3/TM1$  para sedimentos rojos y para incluir sedimentos arcillosos con alta reflectancia en banda  $TM5$  y alta absorbancia en banda  $TM7$  se propuso el cociente  $TM5/TM7$ .

Tabla 5.1 Principales características espectrales de 3 materiales ubicadas en las bandas espectrales de los sensores TM y ETM+ (\*Bandas con los rasgos espectrales más característicos del material)

MATERIAL	↑ REFLECTANCIA	↓ REFLECTANCIA
Clorofila_a Vegetación acuática (lirio y tule)	B4* B2	B3*, B7
Sedimentos suspendidos rojos (óxidos de fierro)	B3*, B5,B7	B1*, B2
Sedimentos suspendidos (tipo arcilloso)	B5*	B7*

### Composición a color

Para definir la distribución de materiales sobre el cuerpo de agua, se tomó en cuenta que las bandas espectrales con rasgos característicos de alta reflectancia son: B4 (TM y ETM+) (vegetación acuática) y B3 (TM y ETM+) (sedimento suspendido), por lo que se propuso una composición en falso color en el sistema RGB-(TM y ETM+) 432.

Se realizó un análisis cualitativo a lo largo de 11 meses (año de estudio 1992) de la relación entre las zonas urbanas, escurrimientos y distribución de materiales en el lago de Chapala con imágenes multiespectrales.

Para identificar la vegetación acuática en el lago se realizó el cociente  $TM\ 4 / TM\ 3$ . La figura 5.1, muestra en colores blancos los píxeles donde predomina la vegetación acuática, los cuales se localizan principalmente en la parte este del cuerpo de agua.

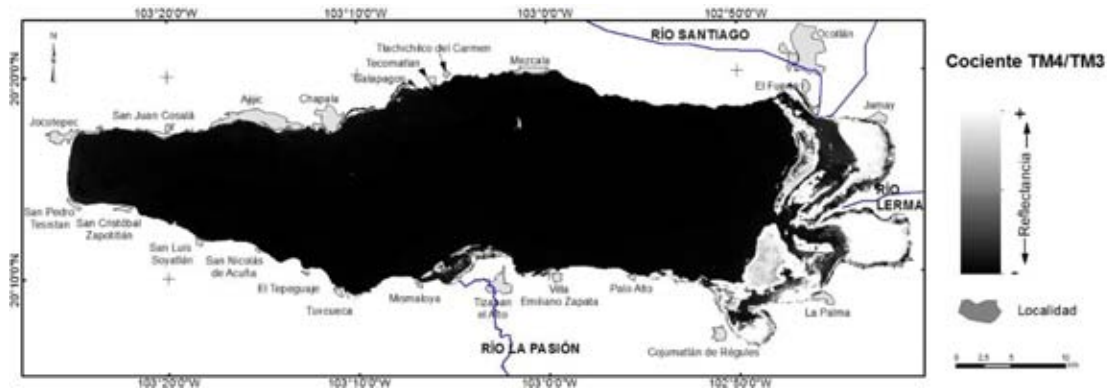


Figura 5.1 Cociente TM4/TM3 donde en tonos brillantes se representan los píxeles que tienen una contribución alta de clorofila<sub>a</sub> en el área que ocupa el lago de Chapala

El cociente TM3/TM1 se propuso para identificar sedimentos suspendidos en los que predominan los óxidos de hierro, en la figura 5.2 se muestran en colores blancos los píxeles donde predomina la contribución de sedimento suspendido (óxidos de hierro), los cuales se localizan preferentemente en la parte centro sur del lago.

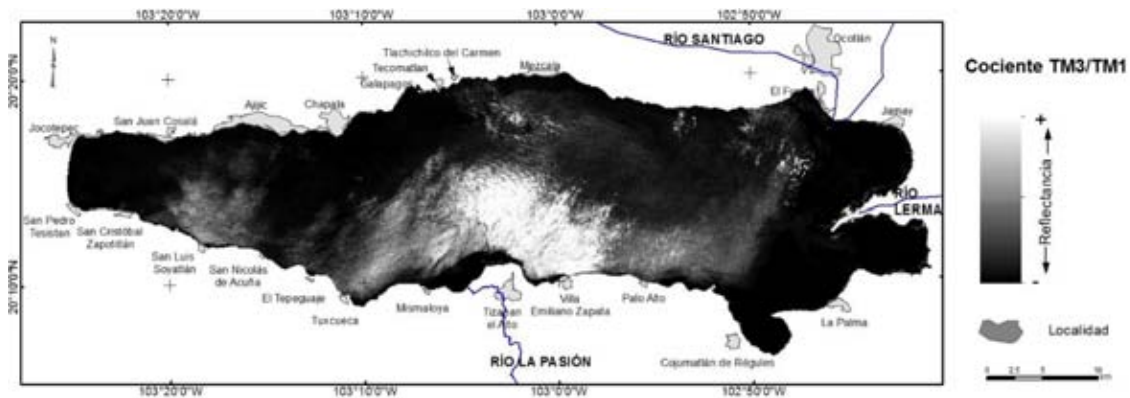


Figura 5.2 En tonos brillantes se representan los píxeles que tienen una contribución alta de sedimentos suspendidos en el cuerpo de agua

La composición RGB-TM432 muestra en la figura 5.3 en tonos rojos la vegetación acuática y en tonos verde y cian los píxeles con concentraciones altas de sedimentos suspendidos.

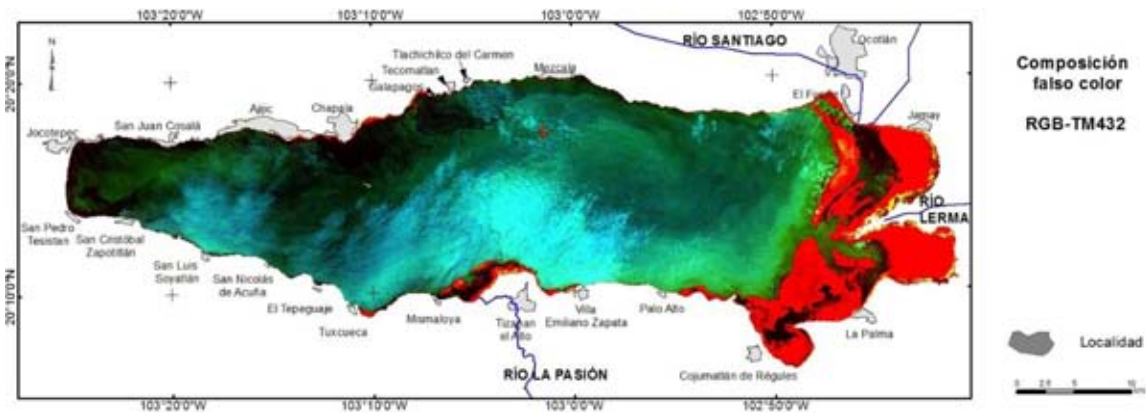


Figura 5.3 Composición falso color RGB-TM 432. En tonos de rojo se visualiza vegetación, en verde y cian las concentraciones altas de sedimentos en suspensión.

En la figura 5.4 se muestran los resultados de la serie de tiempo para el lago de Chapala, esta serie incluye un ciclo completo de lluvias y secas. En las imágenes se observan las distribuciones de los materiales identificados en el lago: la vegetación acuática (lirio y tule) se concentra espacialmente en la parte este del cuerpo de agua con concentraciones variables a lo largo del año en la parte norte y oeste. Los sedimentos suspendidos se pueden observar principalmente en la época de lluvia en las entradas de los Ríos Lerma y La pasión, respectivamente en la parte Este y en la ribera sur del lago (río intermitente).

Con información de las estaciones meteorológicas normales del Servicio Meteorológico Nacional se realizó la tabla 5.2, que muestra un resumen del área cubierta por vegetación acuática en cada mes del año de este estudio y la precipitación promedio mensual de la cuenca en 1993. (Ver Anexo)

### Procesamiento de imágenes para determinación del IET

Se realizó un mosaico con cuatro imágenes de la plataforma SPOT (579/309, 579/310, 580/309, 580/310) con la finalidad de cubrir el área que ocupa el lago de Chapala. Las imágenes fueron colectadas y proporcionadas por la Estación de Recepción México de la Constelación SPOT, el 25 de abril de 2012.

Se realizó una georreferencia con 42 puntos de control imagen a imagen teniendo como referencia la imagen Landsat 5 sensor TM del día 12 abril de 2012 path 29 row 46 y una corrección atmosférica aplicando la técnica de sustracción del píxel oscuro propuesta por Chávez (1988).

Tabla 5.2 Resumen de áreas de zonas agrícolas, precipitación promedio mensual y áreas cubiertas con clorofila  $a$  en la subcuenca del bajo Lerma.

MES	PRECIPITACIÓN [mm]	COBERTURA DE clorofila $a$ [m <sup>2</sup> ]	ÁREA AGRICULTURA
enero	0,0	99	127
febrero	0,0	157	80
marzo	0,0	111	230
abril	0,2	145	388
mayo	0,1	138	62
junio	6,0	139	104
agosto	5,6	122	--
septiembre	4,9	113	--
octubre	1,3	98	--
noviembre	0,2	102	207
diciembre	0,0	104	101

### Parámetros obtenidos en campo

El trabajo de campo se realizó en el periodo comprendido entre el 22 y el 25 de abril de 2012. Los parámetros medidos en este trabajo fueron: pH, sólidos disueltos totales, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y turbidez (medida a través del DS). Para obtener la concentración de clorofila  $a$  se recolectaron muestras de 500 ml que fueron filtradas con membranas de poro 0.45  $\mu$ m; las muestras filtradas se conservaron en baja temperatura y en la oscuridad, se procesaron en las siguientes 48 horas a partir de la primera toma de muestra. Las concentraciones de clorofila  $a$  se determinaron aplicando el método espectrofotométrico desarrollado por Stricklan and Parson (1972). La tabla 5.3 muestra un resumen de la información obtenida con el muestreo.



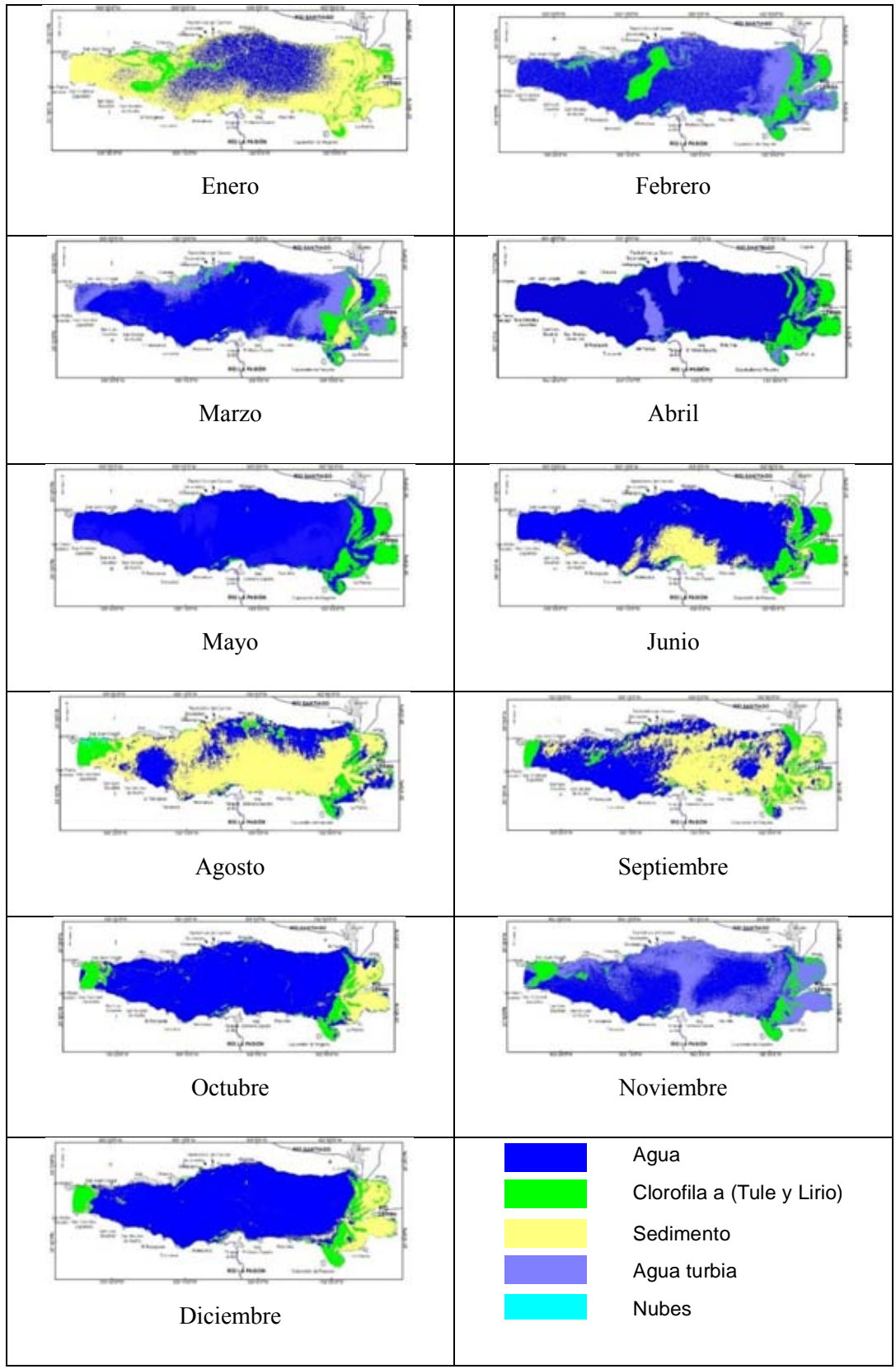


Figura 5.4 Mapas mensuales de la distribución de materiales (clorofila\_a, sedimentos, agua y agua turbia) en el Lago de Chapala en el año 1993. En color verde aparece la contribución de clorofila\_a, en amarillo sedimentos en suspensión cuál de los dos tipos de sedimentos, en azul-grisáceo la cobertura de agua turbia y en azul oscuro el agua espectralmente limpia

**Extracción de información para aplicar el método de regresión.**

Los 33 valores medidos *in situ* de profundidad de DS y de concentración de clorofila\_a se localizaron geográficamente (Figura 5.5) para obtener una máscara en formato raster y realizar la extracción de la información de valores digitales resultantes del procesamiento de imágenes. La extracción se realizó con el apoyo de los programas *Statistica e IDRISI*.

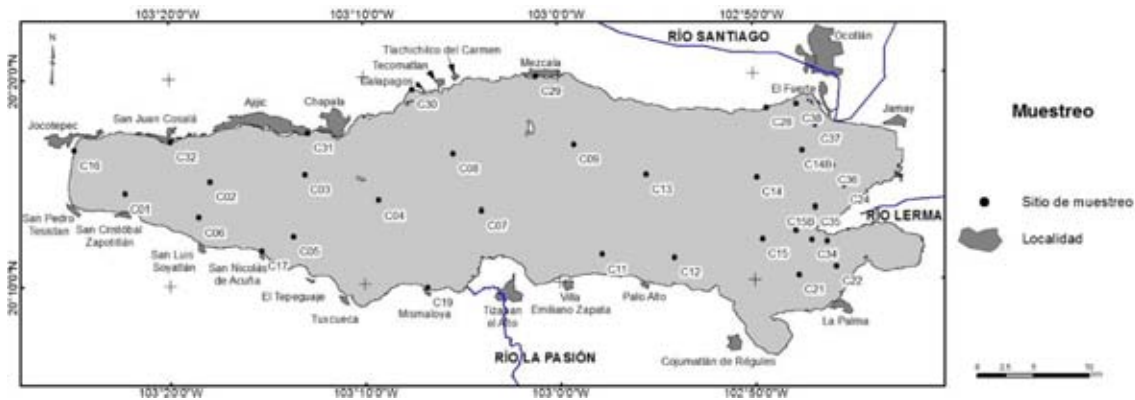


Figura 5.5 Estaciones de muestreo en el lago de Chapala

**Correlación de valores de concentración de clorofila\_a obtenidos en el laboratorio y valores digitales del cociente de bandas (SPOT B3/B1)**

Se aplicó el método de regresión a la transformación logarítmica de los valores de concentración de clorofila a obtenidos en laboratorio y los valores digitales resultantes del procesamiento de imágenes. A continuación se enlistan los valores de concentración de clorofila\_a y valores digitales del cociente de las bandas SPOT B3/B1 que proporcionan información espectral de la clorofila\_a (Ver anexo A2).

Tabla 5.3 Parámetros medidos en el muestreo y en laboratorio para las 33 muestras de agua. (-sin dato)

Estación de muestreo	X	Y	Profundidad de Disco de Secchi (m)	pH (UpH)	T(°C)	Conductividad (μS/cm)	Sedimentos Disueltos Totales (ppm)	Contenido de Clorofila_α (μg/L)
C01	-103.371	20.241	0.26	8.85	24.5	1012	507	12.2
C02	-103.298	20.250	0.43	8.51	23.8	1005	501	9.0
C03	-103.217	20.255	0.65	8.74	25.5	995	496	8.7
C04	-103.154	20.234	0.58	8.44	22.9	1000	499	8.0
C05	-103.227	20.206	0.46	8.91	24.6	993	497	8.6
C06	-103.308	20.222	0.43	8.81	24	996	499	8.0
C07	-103.066	20.225	0.20	8.55	24.3	790	396	7.3
C08	-103.090	20.271	0.20	8.69	27.9	629	315	5.2
C09	-102.987	20.278	0.30	8.38	25.7	705	356	6.5
C11	-102.963	20.189	0.20	8.6	28.1	629	316	11.9
C12	-102.901	20.186	0.20	8.771	24.5	1094	536	10.4
C13	-102.925	20.253	0.45	8.756	22.7	1023	501	8.0
C14	-102.830	20.249	0.35	8.808	24.2	1072	525	7.9
C14B	-102.791	20.271	0.28	8.907	24.6	1115	546	9.6
C15	-102.826	20.200	0.20	8.801	24.8	1104	541	6.6
C15B	-102.797	20.206	0.21	8.816	24.8	1154	565	10.1
C16	-103.414	20.277	0.08	8.73	21.9	1008	504	33.2
C17	-103.254	20.195	-	8.72	27.3	991	496	10.6
C19	-103.113	20.164	-	8.77	26.5	697	348	17.1
C21	-102.795	20.170	0.20	8.834	24.1	1115	546	11.2
C22	-102.763	20.177	0.18	8.859	24.3	1136	556	7.5
C24	-102.756	20.242	0.20	8.852	23.3	1084	531	10.7
C28	-102.821	20.306	0.12	8.74	24.6	1089	533	13.8
C29	-103.019	20.333	0.23	8.702	26.1	1088	533	5.9
C30	-103.125	20.323	0.18	8.69	32.7	1284	629	6.3
C31	-103.214	20.289	0.00	8.791	28.9	1176	576	14.1
C32	-103.332	20.282	0.12	8.47	20.4	1163	581	7.4
C33	-102.771	20.197	0.18	8.855	25.5	1247	611	8.7
C34	-102.784	20.199	0.11	8.864	24	1128	552	16.6
C35	-102.781	20.225	0.21	8.837	24.5	1096	537	25.1
C36	-102.766	20.258	0.21	8.912	22.8	1087	533	27.8
C37	-102.780	20.291	0.34	8.863	23.3	1053	516	4.1
C38	-102.796	20.308	0.20	8.875	23.3	1047	513	8.5

Del análisis de regresión se obtuvieron la ordenada al origen o intercepto ( $\beta_0=1.549$ ) y la pendiente ( $\beta= 1.496$ ) con un coeficiente de correlación de 0.5. La relación entre las variables (Logaritmo natural del contenido de clorofila\_a y valor de brillantez en el cociente SPOT B3 y B1) queda como se muestra en la ecuación 5.1):

$$\ln(Chl_a [\mu g/L]_{lab}) = 1.496 * \ln\left(\frac{B3}{B1}\right) + 1.549[\mu g/L] \quad \text{ec.5.1}$$

La curva que mejor ajusta a los datos se observa en la figura 5.6

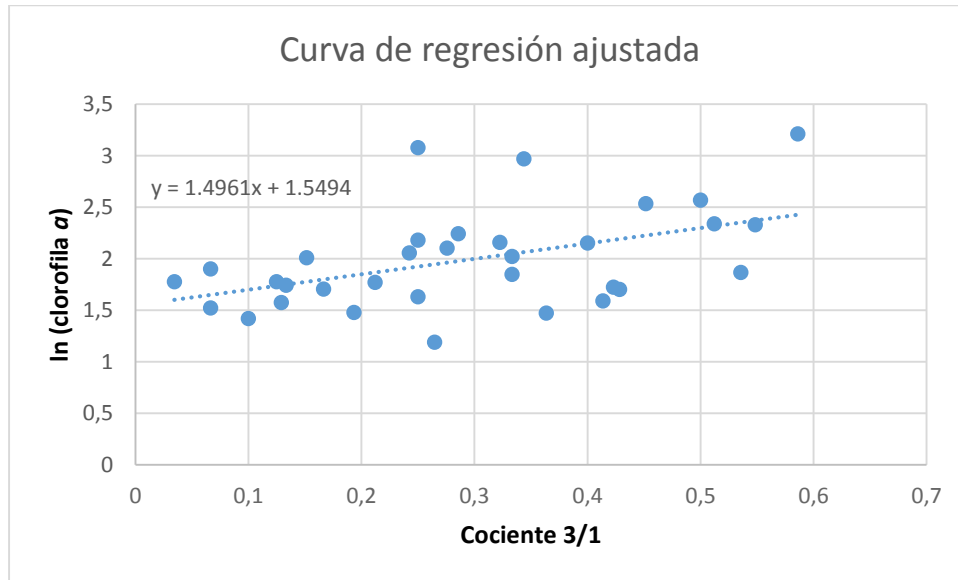


Figura 5.6 Gráfico de la curva de regresión ajustada para valores de logaritmo natural de concentración de clorofila\_a y valores de procesamiento de imágenes (cociente SPOT B3/B1)

De la aplicación del método de regresión se tiene que el análisis de residuos (figura 5.7) presenta un comportamiento caótico sin tendencias sistemáticas y una buena distribución alrededor del valor cero. Lo que verifica linealidad, homocedasticidad e independencia de las variables propuestas del modelo.

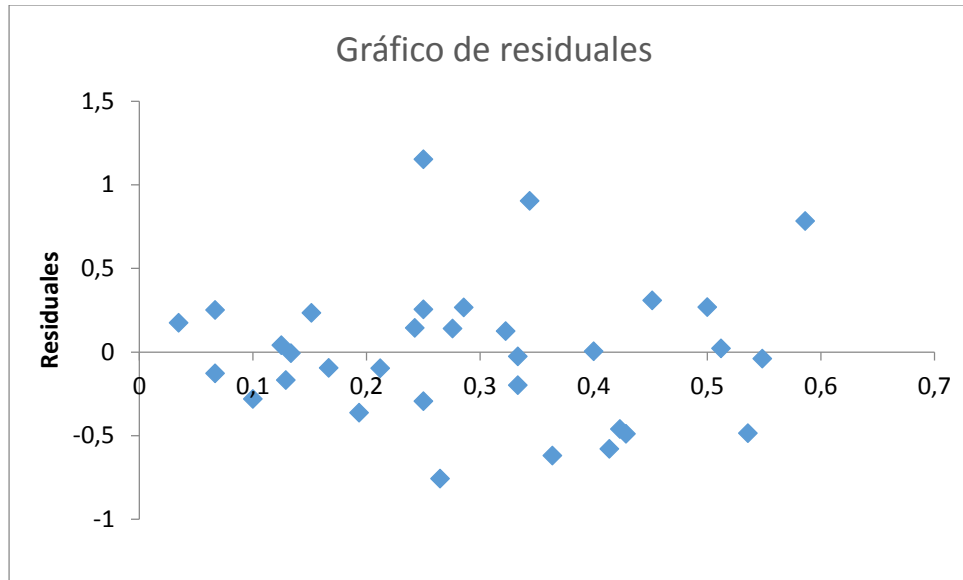


Figura 5.7 Gráfico de residuos para comprobar linealidad

### Correlación de valores de turbidez-Disco de Secchi y valores digitales del cociente de bandas (SPOT B3/B4)

Se aplicó el método de regresión a la transformación logarítmica de los valores de turbidez/profundidad de DS obtenidos *in situ* y los valores digitales resultantes del procesamiento de imágenes. A continuación se enlistan los valores de turbidez/profundidad de DS y valores digitales del cociente de las bandas SPOT B3/B4 que proporcionan información acerca de la turbidez que esta inversamente relacionada con la concentración de sedimentos suspendidos (Jensen, 2000; Ritchie et al., 2003) (Ver anexo A3).

Del análisis de regresión se obtuvieron la ordenada al origen o intercepto ( $\beta_0=-1.076$ )y la pendiente ( $\beta= -0.414$ ) con un coeficiente de correlación de 0.39. La relación entre las variables (contenido de clorofila *a* y valor de brillantez en el cociente B3/B4) queda como se muestra en la ecuación 5.2):

$$\ln(DS[m]) = -0.414 * \frac{B3}{B4} - 1.076[m] \quad \text{Ec. 5.2}$$

La curva de regresión ajustada se observa en la figura 5.8

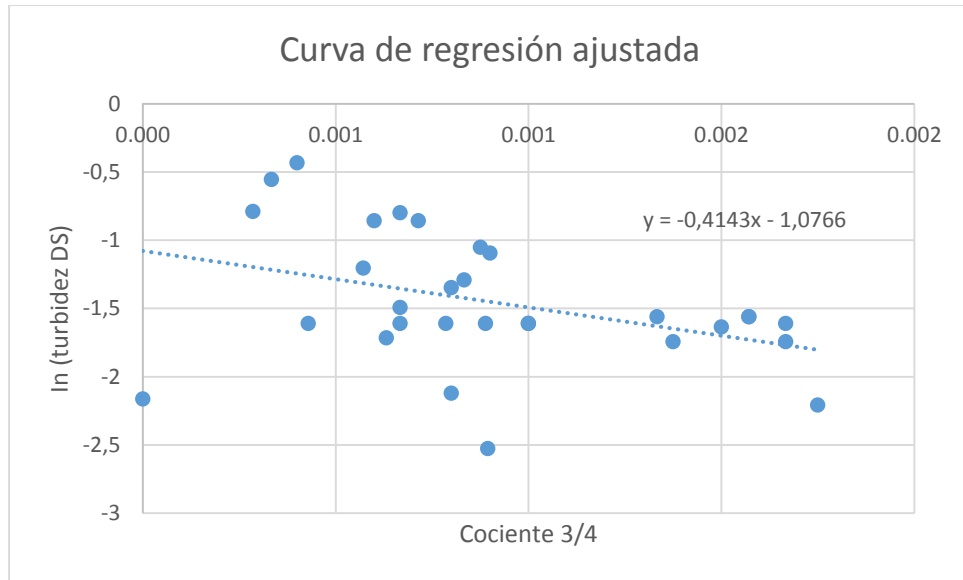


Figura 5.8 Gráfico de la curva de regresión ajustada para valores de profundidad de DS y valores de procesamiento de imágenes

De la aplicación del método de regresión se tiene que el análisis de residuos (figura 5.9) presenta un comportamiento caótico sin tendencias sistemáticas y una buena distribución alrededor del valor cero. Lo que verifica linealidad, homocedasticidad e independencia de las variables propuestas del modelo.

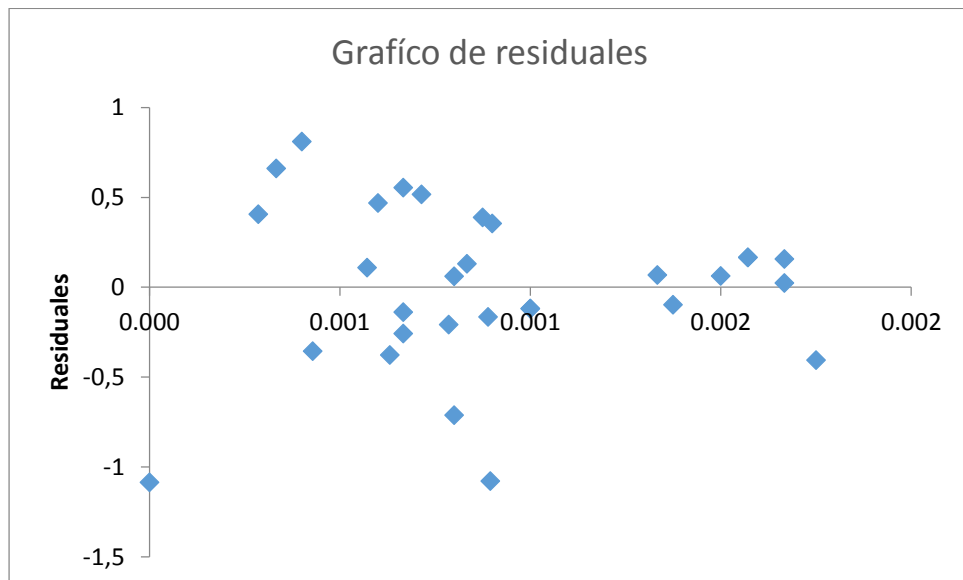


Figura 5.9 Gráfico de residuos para comprobar linealidad

## Aplicación de modelos de regresión a la información espectral

Las concentraciones de Clorofila  $_a$ , medidas en el laboratorio fueron relacionadas con valores de reflectancia para determinar las constantes de la ecuación logarítmica 5.3 a través del método de regresión lineal con la información del muestreo y procesamiento de imágenes de 2012

$$\ln(\text{Chl}_a [\mu\text{g}/\text{L}]_{\text{lab}}) = 1.496 * \ln\left(\frac{B3}{B1}\right) + 1.549[\mu\text{g}/\text{L}] \dots (\text{Ec. 5.3})$$

Una vez que se determinaron las constantes de la ecuación logarítmica para concentraciones de Clorofila  $_a$ , esta ecuación fue aplicada al cociente B3/B1 para calcular el  $\ln(\text{clorofila}_a) [mg/L]$  de donde se obtuvo el mapa mostrado en la fig. 5.10. Se realizó a este mapa una transformación antilogarítmica para obtener valores de concentración de clorofila  $_a$  para todo el lago. El resultado se presenta en la figura 5.11

Los valores de  $\ln(\text{clorofila}_a) [mg/L]$ , se utilizaron como entrada en la ecuación de Carlson (1977). Los resultados se muestran en la figura 5.12: El rango de valores de IET se encuentra entre 47 –60, donde los valores más bajos se ubican en la parte centro-oeste del lago, mientras que en las orillas se tienen los valores más altos de IET y hacia dentro del cuerpo los valores de IET disminuyen

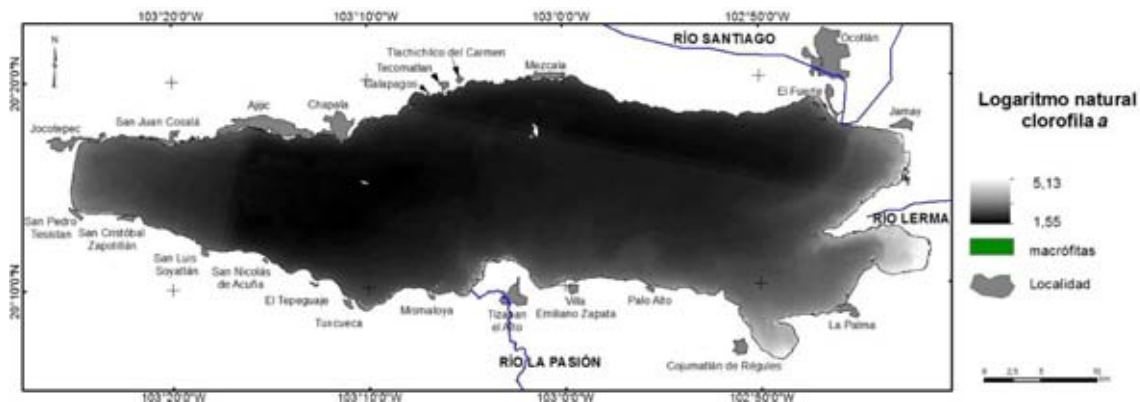


Figura 5.10 Mapa de valores de  $\ln(\text{clorofila}_a)$  estimado del cociente SPOT B3/B1.



Figura 5.11 Mapa de distribución de concentraciones de clorofila\_a [ $\mu\text{g/L}$ ].



Figura 5.12 Mapa de distribución del Índice de Estado Trófico calculado utilizando la información del logaritmo natural de las concentraciones de clorofila\_a

### Turbidez-profundidad de disco de Secchi

La identificación de sedimentos suspendidos se realizó aplicando cocientes de bandas donde el mejor resultado fue el cociente B3/B4

En forma similar al proceso realizado para identificar clorofila\_a, los valores de turbidez de agua medidos *in situ* a través de la profundidad del DS fueron correlacionados con los valores digitales para determinar la ecuación logarítmica  $\ln(\text{DS})$  por el método de regresión lineal. (Eq. 5.4)

$$\ln(\text{DS}[m]) = -0.414 * \frac{B3}{B4} - 1.076[m] \dots (\text{Eq. 5.4})$$



Esta ecuación fue usada para crear el mapa de concentración de sedimento suspendido en el lago de Chapala. De forma similar a los mapas obtenidos para El mapa de IET (figura 5.15) se produjo a través de la aplicación de la ecuación de Carlson. En la fig. 5.13 se muestra el mapa resultante de aplicar la ecuación 5.4 al cociente  $\frac{B3}{B4}$ , a partir del  $\ln(DS)$  se aplicó antilogaritmo para estimar las distribuciones de profundidades del DS[m] en lago de Chapala (Figura 5.14) que muestra profundidades de DS de hasta 21 cm en la parte centro-oeste del cuerpo de agua.

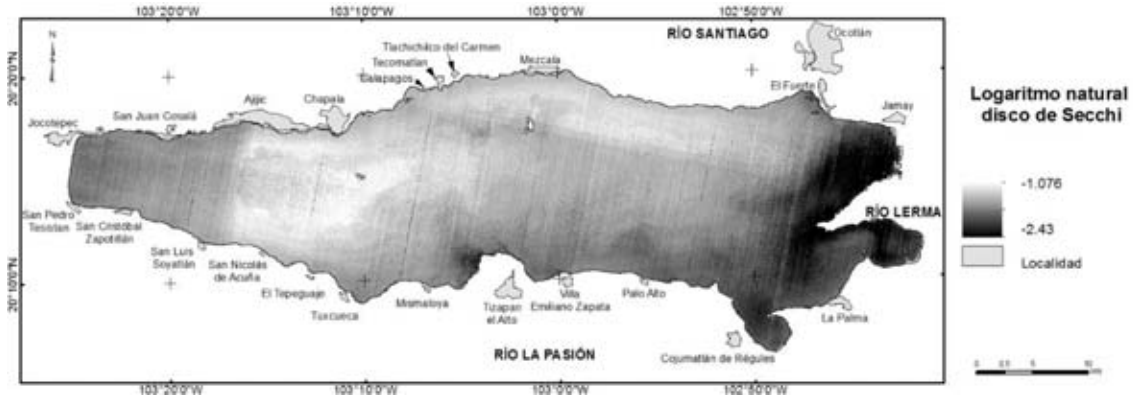


Figura 5.13 Mapa de valores de  $\ln(DS[m])$  estimado del cociente  $B3/B4$ .

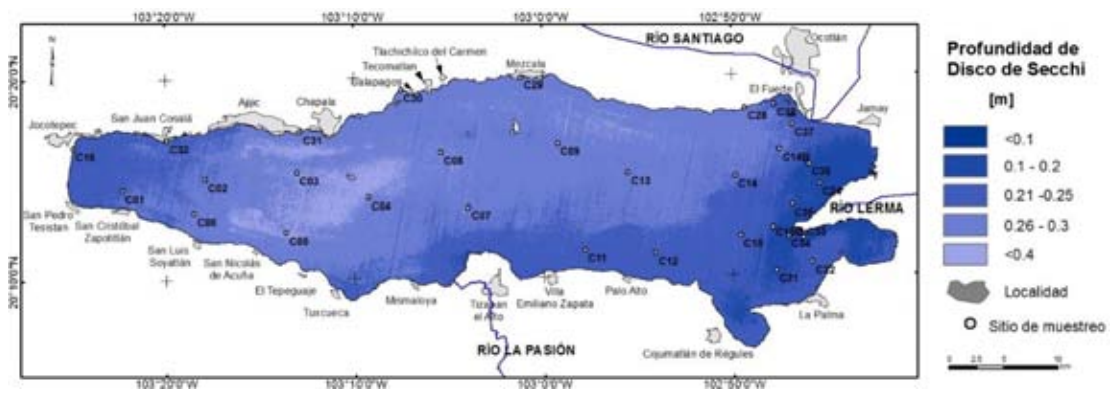


Figura 5.14 Mapa de distribución de profundidad de DS.

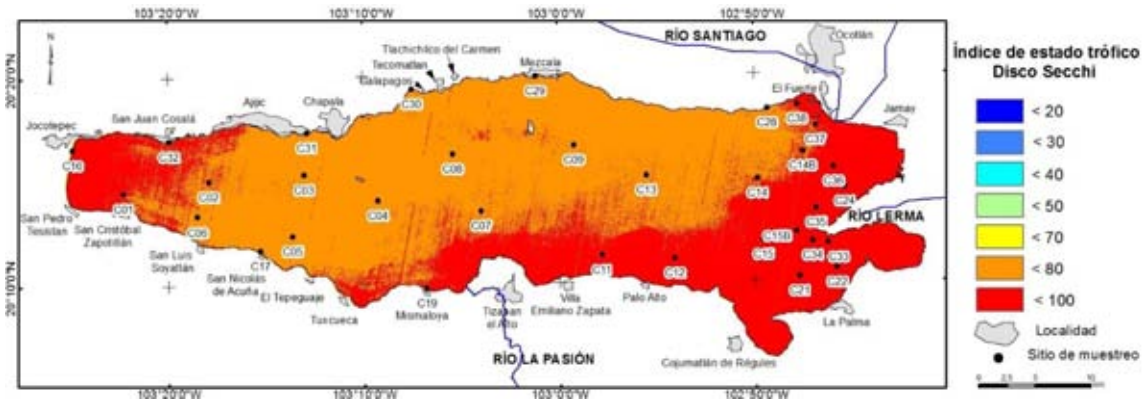


Figura 5.15 Mapa de IET en el Lago de Chapala utilizando el mapa de profundidad de disco de Secchi.

### Evaluación del Estado trófico a partir de valores de IET

Con base en el trabajo de Duan *et al.*, (2008) y de los resultados de IET a partir de valores de concentración de clorofila *a*, la equivalencia del estado trófico para el lago de Chapala muestra que se encuentra en un estado de alto-mesotrófico a eutrófico (Figura 5.16.a). En el caso de valores de IET basados en valores de profundidad de DS la equivalencia propuesta por Vollenweider y Kerekes (1981) indica que el estado trófico del lago de Chapala se encuentra de hiper-mesotrófico a extremadamente hiper-eutrófico (Figura 5.16.b). En la tabla 5.4 se enlistan las condiciones de estado trófico y el área que ocupan para el caso de valores de clorofila *a* y profundidad de DS en la fecha del presente estudio.

### Análisis espacial de la contribución de contaminantes debido a los usos de suelo en la subcuenca del Bajo-Lerma a través de percepción remota

Para generar un mapa de coberturas se construyó un mosaico con dos imágenes multispectrales de la plataforma Landsat 5 TM (path 28-row 46 and path 29-row 46) capturadas en enero de 2002. Este mosaico cubrió el área de la subcuenca del Bajo Lerma.

Para analizar el comportamiento del arrastre de los sedimentos en temporada de lluvias y secas en función de la distribución de los usos de suelo en la subcuenca del Bajo Lerma se utilizaron imágenes de los meses de Mayo (inicio de la temporada de lluvias) y Noviembre (finalización de la temporada de lluvias) de 2002. Todas las imágenes fueron adquiridas a través del servidor del United States Geological Survey, estas imágenes cuentan con

una corrección geométrica; adicionalmente se verificó la información con mapas hidrológicos vectoriales (INEGI, 2001).

Para definir la subcuenca del Bajo Lerma, así como sus patrones de drenaje, se utilizó el modelo digital de elevaciones (MDE) proporcionada por la NASA and METI (The Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan). Se utilizó el módulo WATERSHED del programa IDRISI Taiga para definir el área de la cuenca. Para fines de análisis se consideró un buffer de 1 km, a partir de los patrones de drenaje, en donde podrían albergarse unas 100 hectáreas de zonas de cultivo, zonas urbanas y/o zonas de suelo desnudo o degradado, el cual tiene mayor posibilidad de ser arrastrado por escurrimientos o precipitaciones; es importante señalar que los sedimentos con altas cargas de nutrientes son los más contaminantes para los cuerpos de agua.

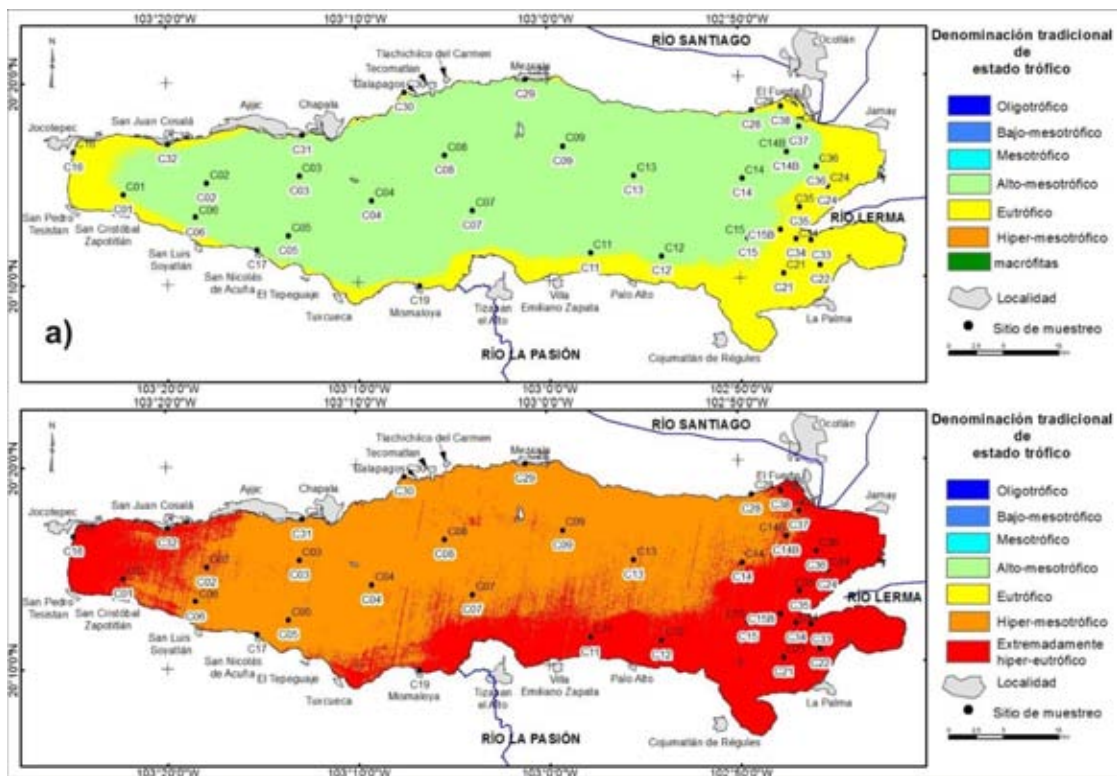


Figura 5.16 Denominación del estado trófico (Duan, 2008; Janus & Vollenweider, 1981); a) para valores de concentración de clorofila *a*, b) para valores de profundidad de Disco de Secchi.

Tabla 5.4 Área correspondiente a cada estado trófico de acuerdo a la evaluación propuesta por Duan (2008) a partir de la concentración de clorofila<sub>a</sub> y Vollenweider y Kereekes (1981) a partir de la profundidad de DS.

Estado Trófico	Área [km <sup>2</sup> ] <sub>clorofila<sub>a</sub></sub>	Área [km <sup>2</sup> ] <sub>Disco Secchi</sub>
Bajo-mesotrófico	0	0
Mesotrófico	0	0
Alto-mesotrófico	864	0
Eutrófico	193	0
Hiper-eutrófico	1	712
Extremadamente Hiper- eutrófico	0	346

### Procesamiento de imágenes para generar el mapa de coberturas

La subcuenca del Bajo Lerma que contiene al Lago de Chapala (figura 5.17) muestra el área de influencia de los contaminantes que son acarreados por escorrentía directa. Estos materiales por su alta carga de nutrientes son factores que promueven la aceleración del proceso de eutrofización que presenta el lago de Chapala.

La respuesta espectral del lago de Chapala está fuertemente influenciada por la alta concentración de sedimentos suspendidos que aumentan la reflectancia en la región del visible. La composición a color más útil para observar la presencia de vegetación acuática y sedimento suspendido en el lago, relacionados con las estaciones de lluvia y secas es RGB-(ETM) 432 (Figura 5.18), en esta composición en tonos rojos se observa la contribución de vegetación acuática, en cian y tonos azul se observa la contribución de sedimentos en suspensión, dentro del cuerpo de agua el negro es la contribución de agua espectralmente limpia.

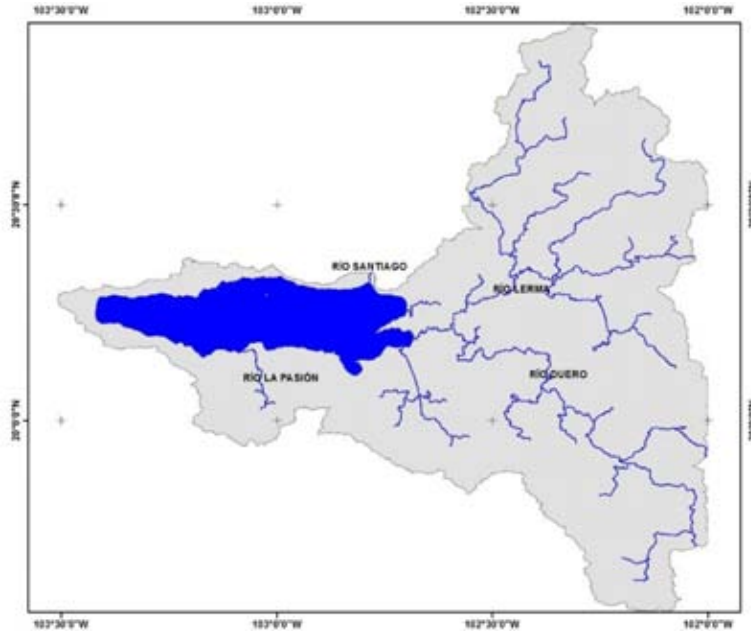


Figura 5.17 Subcuenca del Bajo Lerma

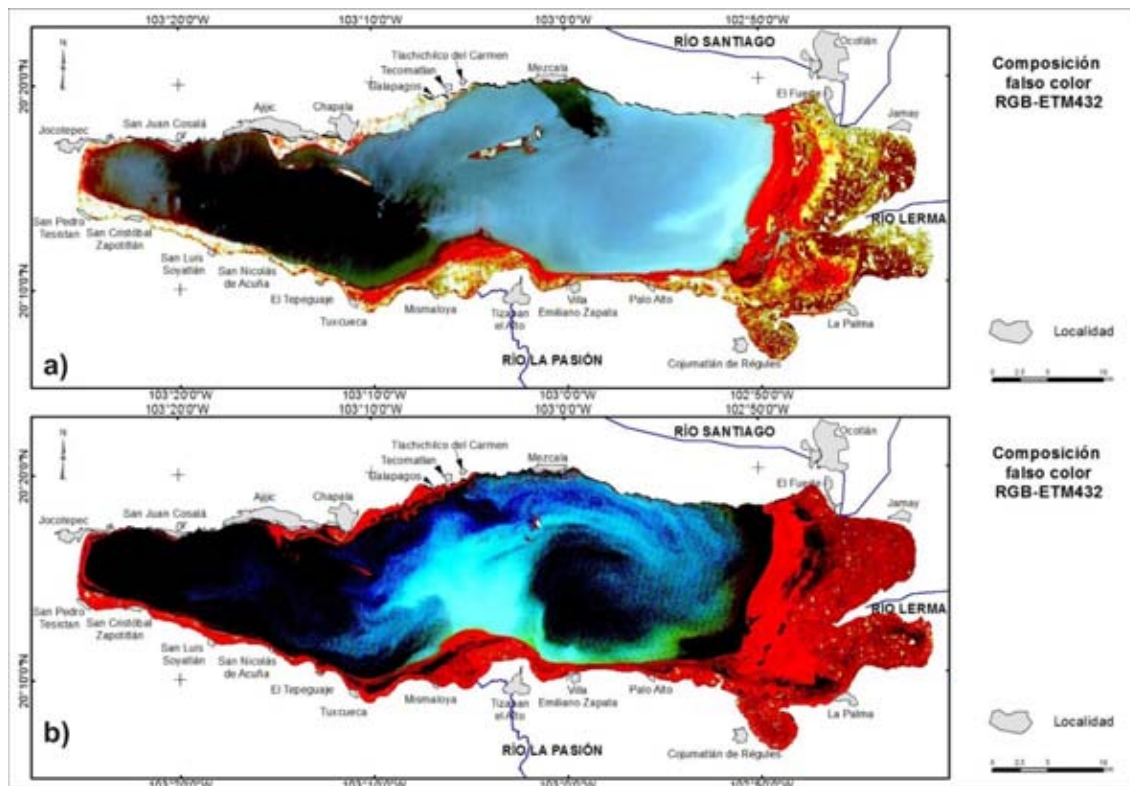


Figura 5.18 Composición a color (ETM) 432, muestra vegetación acuática (rojo) y sedimento suspendido (cian y tonos azules) en el Lago para: a) la temporada de secas (Mayo, 2002); y la temporada inmediata después de lluvias (Noviembre, 2002)



Para identificar fuentes potenciales de contaminación como áreas urbanas, agrícolas y coberturas de suelo desnudos que frecuentemente contribuyen con nutrientes y sedimentos por erosión a los cuerpos de agua, así como la aportación de importantes concentraciones tanto de sedimentos como de nutrientes por arrastre a través de los tributarios, se propusieron las composiciones RGB-(TM)742 en donde las zonas urbanas se observan en tonos rosas, la agricultura en verde limón, el suelo desnudo o áreas de cultivo sin sembrar en color blanco, la clase mixta (vegetación y suelo desnudo) se observa en marrón y vegetación propia de la zona verde oliva y verde fuerte) y en la composición RGB-(TM)457 (las zonas urbanas se observan en color azul, la agricultura en tonos naranja, el suelo desnudo o áreas de cultivo sin sembrar en color blanco, la clase mixta se observa en tonos verde-cian y la vegetación propia de la zona marrón y amarillo claro).(Figuras 5.19 a y b). La figura 5.20 muestra las firmas espectrales obtenidas para las diferentes coberturas identificadas en la subcuenca del Bajo Lerma. Se observa que la distribución de las diferentes coberturas a lo largo de la subcuenca y alrededor del lago tiene una estrecha relación con la localización de áreas con turbidez y con vegetación acuática en el lago de Chapala.

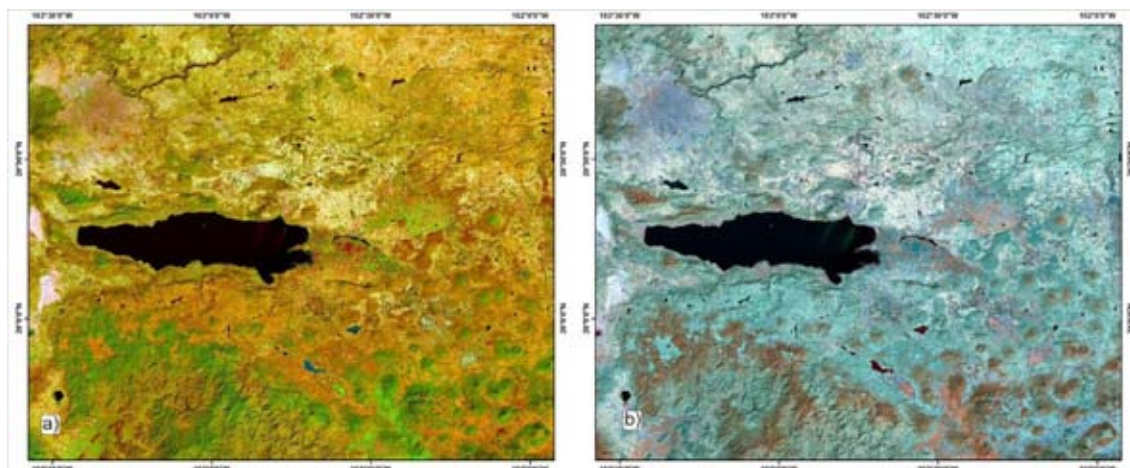


Figura 5.19 Composición a color para identificar fuentes de contaminación (zonas urbanas, agricultura y suelo desnudo o áreas de cultivo sin sembrar) a) composición RGB-(TM)742 (zonas urbanas tonos rosas, agricultura verde limón, suelo desnudo o áreas de cultivo sin sembrar blancos, mixto marrón y vegetación propia de la zona verde oliva y verde fuerte); b) composición RGB-(TM)457 (zonas urbanas azul, agricultura tonos naranja, suelo desnudo o áreas de cultivo sin sembrar blanco, mixta verde-cian y vegetación propia de la zona marrón y amarillo claro).

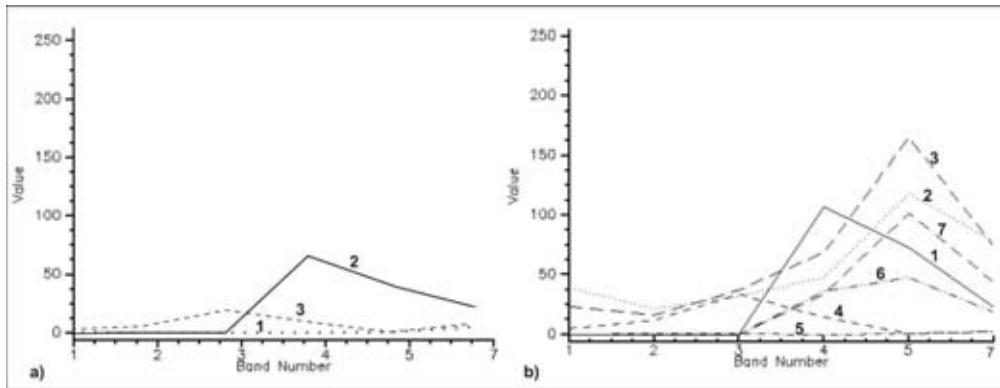


Figura 5.20 Firmas espectrales de materiales: a) dentro del lago: 1- agua limpia, 2- vegetación acuática, 3- sedimento suspendido, b) Coberturas alrededor del lago: 1- agricultura, 2- zona urbana, 3- suelo desnudo, 4- agua turbia, 5- agua limpia, 6- agricultura 2, 7- mixta (suelo desnudo y vegetación escasa).

Las firmas espectrales se utilizaron en el algoritmo para obtener el mapa de coberturas presentes en la cuenca que contiene al lago de Chapala. La distribución de vegetación acuática y sedimentos se muestra en la figura 5.21 para la época de lluvias (noviembre) y de secas (mayo) respectivamente.

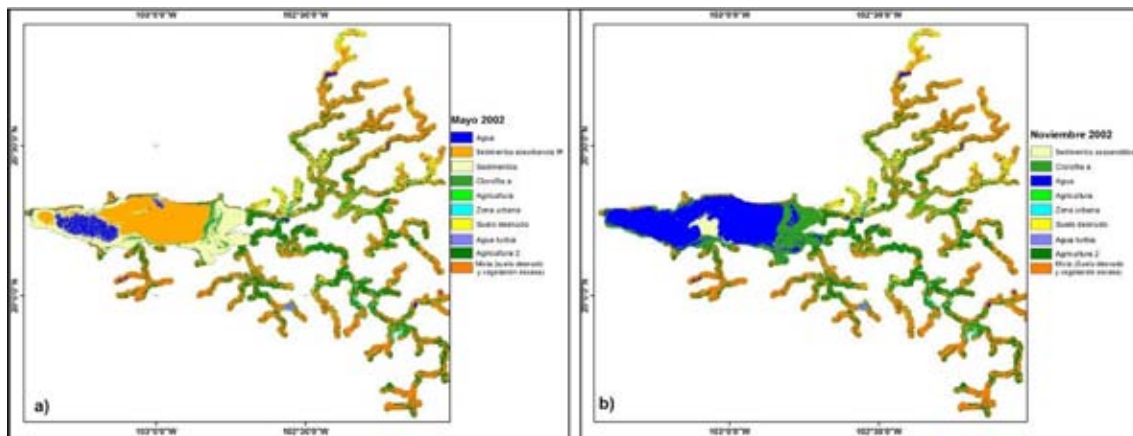


Figura 5.21 Áreas con vegetación acuática y sedimento suspendido dentro del lago para: a) temporada de secas (Mayo, 2002); b) temporada inmediata después de lluvias (Noviembre 2002).

El mapa de coberturas muestra las áreas que actúan como una fuente de los materiales identificados en el Lago de Chapala: áreas agrícolas –fertilizantes; suelos desnudos – sedimentos; zonas urbanas –materia orgánica y fosfatos. Estos materiales son transportados por escurrimiento directo al lago y al principal tributario del lago: el río Lerma (Figura 5.22).

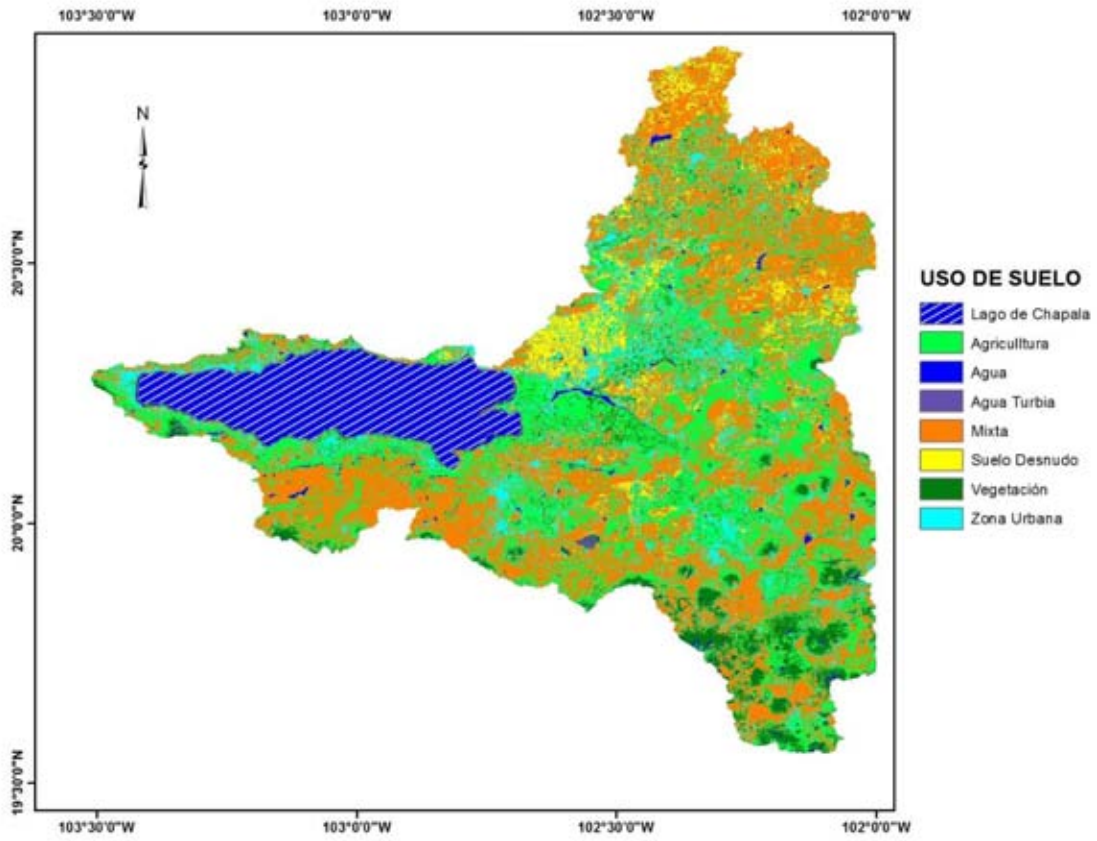


Figura 5.22 Mapa de coberturas de la subcuenca del Bajo Lerma.



## 6. DISCUSIÓN

El proceso de monitoreo de cuerpos de agua superficial tiene diferentes vertientes, una de las principales es el costo de enviar grupos de técnicos por períodos relativamente largos de tiempo a muestrear detalladamente los parámetros físico-químicos del agua; sin embargo, además del costo económico y logístico que implica el muestreo detallado de un lago de dimensiones similares a las del Lago de Chapala. Un muestreo en zonas de grandes dimensiones sugiere un período de tiempo ejecución grande por lo que las condiciones del cuerpo de agua podrían cambiar desde el inicio hasta el fin del muestreo. Por lo tanto, encontrar una técnica que pueda proporcionar información simultánea de toda la superficie es importante para mantener el control de la calidad del agua y para la identificación de las fuentes de contaminación. En este trabajo se demostró la utilidad de los datos contenidos en las imágenes multiespectrales para realizar series de tiempo que definan las variaciones en algunas variables de la calidad del agua y su correlación con las coberturas y usos de suelo en los alrededores del lago.

Este trabajo propone una forma económica de realizar un monitoreo y evaluación de los efectos de las actividades humanas en la calidad del agua, con la aplicación de modelos del índice de estado trófico en donde el mapa de Índice de Estado Trófico para todo el lago puede ser calculado de acuerdo a la obtención de las imágenes multiespectrales Landsat-TM, -ETM o SPOT. Además, el monitoreo continuo permite establecer la efectividad de los procesos de remediación aplicados para resolver los problemas de contaminación que afectan el cuerpo de agua. Por ejemplo, el área promedio que cubría la maleza acuática previa a la aplicación de herbicidas era de 98-157 km<sup>2</sup>, lo que representaba un 10 % del área total y está documentado que ocasionalmente impedía la navegación; ante este problema las autoridades responsables de la calidad de agua del Lago decidieron utilizar herbicidas para combatir la abundancia de maleza acuática y durante el último periodo de este estudio se comprobó que ésta había disminuido considerablemente a menos del 1%; sin embargo, hay que mencionar que no se realizaron estudios para cuantificar la afectación de la aplicación de herbicidas en el ecosistema

El análisis anual realizado en el lago a través de la serie de tiempo de imágenes multiespectrales indica que, debido a la constante entrada de nutrientes a partir de las diferentes fuentes de contaminación ya sea puntuales o no puntuales (Cotler *et al.*, 2006; IMTA, 2009), la cuenca a la cual pertenece el lago tiene diversas actividades que promueve el crecimiento de plantas vasculares como el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y tule (*Typha angustifolia*) cuya distribución y abundancia varía en los periodos de lluvias y secas. Durante la temporada de lluvias normalmente puede observarse que el lago presenta grandes áreas de agua limpia pero las desembocaduras del Lerma y del río La Pasión (ribera centro-sur), que es un afluente intermitente, muestran con claridad la aportación de sedimento en suspensión. Durante la temporada de secas el lago presenta más áreas con agua turbia o con aportación de sedimento únicamente en la parte Este que coincide con la entrada del río Lerma, debido a la

evaporación y al caudal bajo del Lerma, asociado al descenso o la ausencia de aportación de los tributarios intermitentes. Este fenómeno se observa en toda la temporada de secas, con excepción del mes de enero, cuando el Lago presenta grandes áreas con presencia de sedimento suspendido. De acuerdo a Lind y Dávalos-Lind, (2001) la alta tasa de evaporación provoca descensos en el nivel del agua además de la poca profundidad del lago debido a la época de estiaje junto con los fuertes vientos de la zona promueven la resuspensión del sedimento. La serie de tiempo permitió comprobar que existe una relación de la temporada de lluvias con las condiciones de menor turbidez del agua pero con la presencia localizada de sedimentos suspendidos que son arrastrados a través de los tributarios hacia el lago.

Con base en los resultados de este análisis se elaboró un Sistema de Información Geográfica (SIG) para analizar la relación entre las coberturas y usos de suelo que aportan altas concentraciones de nutrientes y sedimentos al lago de Chapala de acuerdo a Cotler *et al.*, (2006) e IMTA (2009), así como los efectos estacionales que se producen debido a los escurrimientos directos provocados por la temporada de lluvias. Los resultados indican que las actividades humanas que se realizan en zonas adyacentes a los tributarios primarios y secundarios así como en el cuerpo de agua tienen un fuerte impacto en el proceso de eutrofización del Lago, ya que aportan contaminantes de manera directa (Cotler *et al.*, 2006; IMTA, 2009).

El interés por la conservación de la calidad y cantidad de aguas superficiales ha promovido el mejoramiento de las técnicas de riego, cultivo y manejo de desechos de diversas actividades para disminuir el acarreo e infiltración de contaminantes. Así mismo, se hacen esfuerzos por monitorear el estado de los cuerpos de agua. Los mapas con los datos del estado trófico del lago se construyen con datos de las imágenes multiespectrales que proporcionan información para estimar las concentraciones de clorofila *a* y turbidez de la columna de agua a través de la medida de profundidad de DS. A partir de estos datos, el índice de estado trófico es calculado con base en las concentraciones de clorofila *a* (45.7– 80.8) y utilizando la escala establecida de Duan *et al.*, (2008), los valores calculados revelan que el Lago de Chapala se encuentra entre los estados de alto-mesotrófico a eutrófico principalmente. Por otra parte, el cálculo de IET basado en turbidez (profundidad de DS) está en el rango de 75.5 a 104 lo que indica que el estado va de hiper-eutrófico a extremadamente hiper-eutrófico. El cálculo de área afectada por eutrofización utilizando los valores de Clorofila *a* es de 193.0 km<sup>2</sup> (18.24 % del lago) mientras que el área que presenta alto-mesotrofia es de 864 km<sup>2</sup> (81.7% del lago). En el caso del cálculo hecho con valores de profundidad del DS, el área afectada por un estado hiper-eutrófico es de 712 km<sup>2</sup> (67.3% del lago) en tanto 346 km<sup>2</sup> está en estado extremadamente hiper-eutrófico (32.7% del lago)

Con base en los registros históricos (De Anda, 1998; Limón y Lind, 1990; Dávalos-Lind y Lind, 2001; Dávalos-Lind y Lind, 1991; Lind *et al.*, 1997; De Anda, 2001; Dávalos-Lind y Lind, 2001; Cotler *et al.*, 2006, IMTA 2009, CEA. Jalisco, 2014), los estudios donde se describe el estado trófico del lago de Chapala y la falta de regulación

para la calidad del agua que entra al lago, el estado trófico medido por clorofila<sub>a</sub> desde el año 1934 hasta 1990 es de mesotrófico hasta la década de los 80's y en los últimos estudios de 1990 se reporta un estado eutrófico de acuerdo a Duan *et al.*, (2008) con base en los valores reportados de concentración de clorofila<sub>a</sub> que van de 5.4 hasta 19.0  $\mu\text{g/L}$ . En el presente estudio se tiene una concentración promedio de clorofila<sub>a</sub> de 11.1  $\mu\text{g/L}$  lo que indica de acuerdo a Duan *et al.*, 2008 que el lago se encuentra en un estado eutrófico. En el resultado del procesamiento de imágenes el valor promedio de la concentración de clorofila<sub>a</sub> de 6.8  $\mu\text{g/L}$ , con lo cual la denominación tradicional de estado trófico es alto-mesotrófico principalmente. Estos resultados podrían estar afectados debido al uso de defoliantes en el lago (SEMARNAT, 2006), ya que de acuerdo a Saxton *et al.*, (2011), Vendrell *et al.*, (2009) y Austin *et al.*, (1991) el glifosato tiene efectos adversos y en algunos casos benéficos en la comunidad del fitoplancton., sin embargo no se han reportado estudios de monitoreo del ecosistema antes y después de la aplicación del herbicida.

En el caso de DS desde 1983 y hasta 1990 la denominación de estado trófico tradicional corresponde a un estado hiper-eutrófico que se ha mantenido con valores de turbidez (profundidad de DS) de entre 0.18 y hasta un máximo de 0.71 m. En el 2012 la profundidad promedio de DS medida fue de 0.26 m que corresponde de acuerdo a Vollenweider y Kerekes (1981) como un cuerpo de agua hiper-eutrófico. De acuerdo a los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes se tiene que la profundidad promedio estimada de DS es 0.25 m lo que indica que se mantiene una denominación de estado trófico de hiper-eutrófico.

Carlson (1977) estima que los valores de IET estimados a partir de fósforo total, concentración de clorofila<sub>a</sub> o turbidez de DS debería ser el mismo debido a que los tres parámetros deben estar estrechamente relacionados o en circunstancias en las cuales la clorofila<sub>a</sub> está relacionada con la turbidez y esta última a su vez se debe a presencia de algas y nutrientes, sin embargo Carlson (1983) encuentra que el IET proporciona información sobre el lago a través de ciertas relaciones entre los valores de IET (clorofila<sub>a</sub>) e IET(DS), los estudios de Carlson indican que cuando el IET(clorofila<sub>a</sub>) es similar al IET (DS) se puede argumentar que las algas dominan la atenuación de la luz sin embargo cuando los valores de IET (clorofila<sub>a</sub>) son menores que los valores de IET (DS) es una evidencia de que partículas diferentes dominan la atenuación de la luz (Carlson, 1983). En el presente estudio el IET estimado a partir de concentración de clorofila<sub>a</sub> es de 45.7– 80.8 mientras que el IET estimado a partir de turbidez (profundidad de DS) es de 75.5 a 104, de acuerdo a Carlson (1983) la información resultante de la comparación de valores de IET indican que la turbidez del lago de Chapala está dominada por el partículas distintas a fitoplancton que coincide con Lind y Dávalos-Lind (2001) que indican que la turbidez en el lago está dominada por partículas arcillosas.

## CONCLUSIONES

El método aplicado mostró que, en el caso del Lago de Chapala, el uso de imágenes satelitales es una herramienta útil para obtener mapas sinópticos de la distribución de la concentración de clorofila<sub>a</sub> y turbidez con un confianza del 95%

La localización de zonas con alta concentración de vegetación acuática (lirio y tule) demuestra que ésta está relacionada con el drenaje de zonas urbanas y agrícolas, lo cual sugiere que las actividades humanas son las principales aportadoras de nutrientes que propician el deterioro de la calidad del agua y del estado trófico del lago de Chapala, que en parte se utiliza para el suministro de agua potable para la segunda ciudad más poblada de México.

El análisis cualitativo de los efectos estacionales en el lago de Chapala mostró la relación entre las actividades realizadas dentro de la subcuenca del Bajo Lerma y los cambios en el cuerpo de agua en la época de lluvias y secas

El índice de estado trófico en el lago de Chapala calculado a partir de la concentración de clorofila<sub>a</sub> está en el rango de 45.7– 80.8 mientras que el IET calculado a partir de turbidez (profundidad de DS) se encuentra entre 75.5 y 104.

Con base en los valores obtenidos de IET y de acuerdo a Carlson (1981) la denominación de estado trófico que le corresponde al lago de Chapala va de alto-mesotrófico a eutrófico.

La diferencia entre los valores de IET (clorofila<sub>a</sub>) e IET (DS) indica que la turbidez del lago está influenciada por partículas diferentes a fitoplancton, lo cual coincide con los resultados obtenidos en estudios anteriores. En particular, se ha reportado que la turbidez está relacionada con la presencia de partículas arcillosas.

Los resultados obtenidos con imágenes satelitales multiespectrales confirman el estado trófico del cuerpo de agua, lo cual ya se había reportado desde 1983 con estudios que se habían basado en mediciones *in situ*.

# BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Alle, R. J. y Johnson J. E., (1999), Use of satellite imagery to estimate surface chlorophyll a and Secchi disc depth of Bull Shoals Reservoir, Arkansas, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 20(6), 1057-1072.
- Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y., & Bréon, F. M., (2005). Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(11), 1989-2004.
- Aparicio, J., (2001), Hydrology of the Lerma-Chapala Watershed. En: Hansen, A. M. y Van Afferden, M. (Eds.), *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and management*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 3-30, USA.
- Baban, S. M. J., (1993), Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U.K. , using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 14(7), 1247-1267
- Baban, S.M. J., (1996), Trophic Classification and Ecosystem Checking of Lakes Using Remotely Sensed Information, *Hydrological Sciences Journal des Sciences hydrologiques*, 41(6), 939-958
- Bachmann, R. W., Horsburgh, C. A., Hoyer, M. V., Mataraza, L. K., y Canfield Jr, D. E., (2002), Relations between trophic state indicators and plant biomass in Florida lakes, *Hydrobiologia*, 470(1-3), Pp. 219-234.
- Barki, D. N., y Singa, P., (2014). Assessment of Trophic State of Lakes in Terms of Carlson's Trophic State Index. *Assessment*, 3(7), Pp 6
- Bhargava, D.S y Mariam, D.W., (1990), Spectral reflectance relationship to turbidity generated by different clay material, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, 225-229.
- Brezonik, P. L. y Shannon, E.E., (1971), Florida Water Resources Research Center, Research Project Technical Completion Report. USA.
- Brivio, A., Giardino, C. y Zilioli, E., (2001), Validation of satellite data for quality assurance in lake monitoring applications, *The Science of the Total Environmental*, 268, 3-18
- Bukata, R.P, Jerome, J.H., Kondratyev, K. y., Pozdnyakov, D.V., (1995), *Remote Sensing of Inland and Coastal Water*. CRC Press. USA. Pp. 362.
- Carlson, E. R., (1977), A trophic state index for lakes. *Limnology and oceanography*. 22 (2), 361-369
- Carlson, E.R., (1980), Using Trophic State Indices to Examine the Dynamics of Eutrophication. In: *Proceedings of the International Symposium on Inland Waters and Lake Restoration*, Portland, September 8-12, 1980. EPA440/5-81-010, Pp. 218-221.
- Carlson, E.R., (1983), Discussion: "Using Differences Among Carlson's Trophic State Index Values in Regional Water Quality Assessment," by Richard A. Osgood. *Water Resources Bulletin*. 19(2), 307-308.

- Carpenter, D.J., y Carpenter, S.M., (1983), Modeling Inland Water Quality Using Landsat Data. *Remote Sensing of environment*, 13, 345-352.
- Centro Estatal de Aguas del Estado de Jalisco (CEA), 2013
- Christensen, Victoria G. and Ryan P. Maki, (2014), Trophic State in Voyageurs National Park Lakes before and after Implementation of a Revised Water-Level Management Plan, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 1-13
- Colwell, R. N.;Ulaby, F. T.;Simonett, D. S.;Estes, J. E.;Thorley, G. A., (1983), *Manual of Remote Sensing*. American Society of Photogrammetry. Vol. II. Interpretation and application. USA. Pp. 2440.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2014), Base de datos de estaciones climatológicas. Consultado el 02/12/2014
- [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=42&Itemid=75](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75)
- Comisión Nacional del agua (CONAGUA), (2013), Proyectos estratégicos. [www.conagua.gob.mx/english07/publications/StrategicProjects.pdf](http://www.conagua.gob.mx/english07/publications/StrategicProjects.pdf). Consultado junio 2013.
- Comisión Nacional del agua (CONAGUA), (2002), Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Ciénega de Chapala, Estado de Jalisco, Subdirección General Técnica, Gerencia de aguas subterráneas. Pp. 12
- Cotler, A. H., Mazari, H. M., De Anda S.J., (2006), Atlas de la Cuenca Lerma Chapala construyendo una visión conjunta., Instituto Nacional de Ecología (INE) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México, Pp. 196. [http://www2.inecc.gob.mx/emapas/lch\\_prousoveg.html](http://www2.inecc.gob.mx/emapas/lch_prousoveg.html) (consultado 22/12/2014)
- Cotler, A. H., (2010), Las Cuencas Hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización, Instituto Nacional de Ecología, Pp. 232
- Chavez, P.T., (1988), An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data, *Remote Sensing of Environment*, 24, 459-479.
- Dávalos-Lind, L. y Lind, O.T., (1991), Association of turbidity and organic carbón with bacterial abundance and cell size in a large, turbid, tropical lake. *Limnol. Oceanogr.* 36, 1200-1208.
- Dávalos-Lind, L. y Lind, O.T., (2001), Phytoplankton and Bacterioplankton Production and Trophic Relation in Lake Chapala in: *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and management*. Edited by Hansen, A. M. and Van Afferden, M. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 31-57, USA.
- de Anda, J. and Shear, H., (2001), Nutrients and eutrophication in Lake Chapala. In: *The Lerma-Chapala Watershed*, Edited by Hansen and van Afferden, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 183-198

- de Anda, J., Quinones-Cisneros, S. E., French, R. H. and Guzmán, M., (1998), Hydrologic Balance of Lake Chapala (Mexico). *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34,1319–1331.
- De León-Mojarro, (2001), Natural Resources Management in the Lerma-Chapala Basin, in: *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and management*. Edited by Hansen, A. M. & Van Afferden, M. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 59-92, USA.
- Dekker, A. G. y Peters, S.W.M., (1993), The use of thematic Mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands. *International Journal of Remote Sensing*. 14(5), 799-821.
- Diario Oficial de la Federación (DOF), (2006), Acuerdo por el que se da a conocer el estudio técnico de los recursos hídricos del área geográfica Lerma-Chapala. 24 de Julio de 2006
- Dodds, W.K., (2002), *Freshwater Ecology. Concepts and Environmental Applications*. Academic Press, USA.
- Duan, H., Zhang, Y., Zhang, B., Song, K., Wang, Z., Liu, D. y Li, F., (2008), Estimation of chlorophyll-a concentration and trophic states for inland lakes in Northeast China from Landsat TM data and field spectral measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (3), 767-786.
- Environmental Protection Agency, (2007),
- Fernex, F., Zárate-del Valle, P., Ramírez-Sánchez, H., Michaud, F., Parron, C., Dalmasso, J., y Guzman-Arroyo, M., (2001). Sedimentation rates in Lake Chapala (Western Mexico): possible active tectonic control. *Chemical Geology*, 177(3), 213-228.
- Filonov, A. E., Tereshchenko, I. E., & Monzón, C. O., (2001). Hydro-meteorology of Lake Chapala. En: Hansen, A. M. y Van Afferden, M. *The Lerma-Chapala Watershed . Evaluation and management*. Kluwer Academic/Plenum Publishers.2001. Pp151-182. US
- Fregoso, A. y Esquivel, N., (2006). Cambios de uso de suelo, pp.116-117. En: Cotler, A. H., Mazari, H. M., De Anda S.J., (2006), *Atlas de la Cuenca Lerma Chapala construyendo una visión conjunta.*, Instituto Nacional de Ecología (INE) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México, Pp. 196. [http://www2.inecc.gob.mx/emapas/lch\\_prousoveg.html](http://www2.inecc.gob.mx/emapas/lch_prousoveg.html) (consultado 22/12/2014)
- Fruh, E. G., Stewart, K.M., Lee, G.F. y Rohlich, G.A., (1966), Measurements of Eutrophication and trends, *Journal Water Pollution Control Federation*, 38(8), 1237-1258
- Fuller, L.M. y R.J. Minnerick—Predicting Water Quality by Relating Secchi-Disk Transparency and Chlorophyll a Measurements to Landsat Satellite Imagery for Michigan Inland Lakes, 2001–2006—U.S. Geological Survey Fact Sheet 2007-3022, Date Posted: September 12, 2007: [<http://pubs.water.usgs.gov/fs2007-3022/>]
- García, E., (1988), Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana), Talleres de Offset Larios, México.
- Gibson, P.J y Clare, H., (2000), *Introductory remote sensing: digital image processing and applications*. Routledge, UK.

- Gitelson, A. A., Gao, B. C., Li, R. R., Berdnikov, S., y Saprygin, V., (2011). Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean—the Azov Sea case study. *Environmental Research Letters*, 6(2), 1-6
- Gitelson, A., Garbuzov, G., Szilagyi, F., Mittenzwey, K-H., Karnieli, A. y Kaiser, A., (1993), Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality, *International Journal of Remote Sensing*, 14, 7, 1269 — 1295
- Gitelson, A., (1992). The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *International Journal of Remote Sensing*, 13(17), 3367-3373.
- Govender, M., Chetty, K., y Bulcock, H., (2007). A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies. *Water SA*, 33(2), 145-152
- Håkanson, L., y Bryhn, A. C., (2011). Controlling eutrophication in the Baltic Sea and the Kattegat. In *Eutrophication: causes, consequences and control*, Springer Netherlands, Pp 17-67
- Harper, D., (1992), *Eutrophication of freshwaters. Principles, problems and restoration*, Chapman & Hall, UK, Pp327
- Harrington, J. A., Schiebe, F. y Nix, J., (1992), Remote Sensing of Lake Chicot, Arkansas: Monitoring Suspended Sediments, Turbidity, and Secchi Depth with Landsat MSS Data. *Remote Sensing of environment*. 27, 15-27.
- Harris, D., (2001), *Análisis químico cuantitativo*, Reverte, Barcelona, Pp. 969.
- Han, L. y Rundquist, D. C., (1998), The impact of a wind-roughened water surface on remote measurements of turbidity. *International Journal of Remote Sensing*, 19(1), 195-201
- Han, L. y Rundquist, D.C., (1994), The response of both Surface reflectance and the underwater light field to various levels of suspended sediments: Preliminary results, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60, 1463-1471.
- Hutchinson, E., (1973), Eutrophication. The scientific background of a contemporary practical problem. *American Scientist*, 61(3), 269-279.
- Hutvhinson, E., (1968), *A treatise on Limnology, Volume I, Geogrphy, Physics and Chemistry*, Jhon Willy & Sons, Inc., pp 1015
- Igamberdiev, R., Lennartz, B., Grensdoerffer, G., Bill, R., y Schubert, H., (2010). Analysis of spectral signatures of small water bodies (kettle holes) in the agricultural young moraine landscape of north-eastern Germany. *International Journal of Remote Sensing*, 31(20), 5495-5511.
- Immerzel, W.W., Gaur, A. y Zwart, S.J., (2008) Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. *Agricultural water management*, 95, 11-24



- Ingman, S.R., Igman, V. y Martin, G., (2001) Sustainable Guadalajara, en: Sustainable Communities. Review. Ingman, S.R. Editor.USA
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), (2009), Estrategia general para el rescate ambiental y sustentabilidad de la cuenca Lerma-Chapala. Pp.250
- Instituto Nacional de Ecología (INE), (2003) Diagnóstico bio-físico y socio-económico de la cuenca Lerma-Chapala, Dirección de investigación de ordenamiento ecológico y conservación de ecosistemas. México. Pp. 285.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2010), Censo de Población y Vivienda. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2001) <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reconat/hidrologia/>
- Jarosiewicz, A., Ficek, D., y Zapadka, T., (2011), Eutrophication parameters and Carlson-type trophic state indices in selected Pomeranian lakes, *Limnological Review*, 11(1), 15-23
- Jensen, J.R., (2000), Remote Sensing of the Environment An Earth Resource Perspective. Prentice Hall. USA. Pp.544.
- Jensen, J.R., (1996), Introductory digital image Processing, A remote sensing perspective, Prentice Hall. Inc, USA. Pp 318.
- Jímenez Cisneros, Blanca E., (2005), La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Ed. Limusa. Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería UNAM, Pp. 926
- Kirk, J.T.O., (2011), Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge University Press. Pp 649
- Kleinbaum, David, (2008), Applied regression analysis and other multivariable methods, Thompson Brooks, Australia, Pp. 906
- Kloiber, S., Brezonik, P., Olmanson, L., (2002) A procedure for Regional Lake Water Clarity Assessment using Landsat Multispectral Data, *Remote Sensing of Environment*, 82, 38-47
- Lathrop, R. G., (1992). Landsat Thematic Mapper Monitoring of Turbid Inland Water Quality, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 58(4), 465-470.
- Li, R., and Li, J., (2004), Satellite remote sensing technology for lake water clarity monitoring: An overview. *Environmental Informatics Archives*, 2, 893-901
- Lillesand, T., y Kiefer, R. Ch., 2008, Remote Sensing and image interpretation, 6th ed., John Wiley & Song. Inc. USA.
- Limón, J. G. and Lind, O.T., (1990). The management of Lake Chapala, México. *Lake Reservoir Manage*, 6, 61-70

- Lind, O., y Dávalos-Lind, (2001), Hydrology of the Lerma-Chapala Watershed. En: The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and management. Edited by Hansen, A. M. y Van Afferden, M. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 139-149, USA
- Lind, O. T., Chrzanowski, T. H., y Dávalos-Lind, L., (1997). Clay turbidity and the relative production of bacterioplankton and phytoplankton. *Hydrobiologia*, 353(1-3), 1-18.
- Lind, O. T., Doyle, R., Vodopich, D. S., Trotter, B. G., Gualberto Limón, J., y Dávalos-Lind, L., (1992). Clay turbidity: regulation of phytoplankton production in a large, nutrient-rich tropical lake. *Limnology and Oceanography*, 37(3), 549-565.
- Lind, O. T. y Dávalos-Lind, L., (1991) Association of turbidity and organic carbon with bacterial abundance and cell size in a large, turbid, tropical lake, *Limnology and Oceanography*, 36 (6), 1200-1208
- Membrillo-Abad, A. S., Torres-Vera, M.A. y Prol-Ledesma, (2013), Trophic State Determination by Multispectral Satellite Images. Chapala Lake, Mexico, ASPRS 2013 en Annual Conference Proceedings. USA.
- Membrillo-Abad, A. S., (2010), Estudio del cambio estacional de la respuesta espectral en el Lago de Chapala, Jalisco. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Naumann, E., 1930, *Urban und Schwarzenberg*. Berlin, Pp.776.
- Navarro, G., Alvain, S., Vantrepotte, V., y Huertas, I. E., (2014). Identification of dominant phytoplankton functional types in the Mediterranean Sea based on a regionalized remote sensing approach. *Remote Sensing of Environment*, 152, 557-575.
- Pla L.E., (1986), Análisis multivariado: método de componentes principales. Monografía 27, Serie de Matemática. OEA, Washington, Pp. 94
- Ritchie, J. C., Zimba, P.V., Everitt, J.H., (2003), Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(6), 695-704
- Ritchie, J.C., Schiebe, F.R. y McHenry, J.R., (1976), Remote Sensing of Suspended Sediments in Surface Water. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 42, 1539-1545
- Robarts, R.D. y Carr, G.M., (2010), Bacteria, Bacterioplankton en: *Plankton of Inland Waters. A Derivative of Encyclopedia of Inland Waters*, Academic Press, China. Pp. 398
- Rosas- Elquera, J. y Urrutia-Fucugauchi, J., (1998). Tectonic Control of the Volcano-Sedimentary Sequence of the Chapala Graben, Western México. *International Geology Review*, 40(4), 350-362.
- Ryding S.O., Rast, W., (1989), *The Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs*. UNESCO, Paris., Pp 314.
- Sandoval, F.P., (1994), *Pasado y Futuro del Lago de Chapala*, Secretaria General Unidad editorial. Gobierno del Estado de Jalisco, México.
- Sathyendranath, S., Watts, L., Devred, E., Platt, T., Caverhill, C., y Maass, H., (2004). Discrimination of diatoms from other phytoplankton using ocean-colour data. *Marine ecology progress series*, 272, 59-68.

- Saxton, M. A., Morrow, E. A., Bourbonniere, R. A., & Wilhelm, S. W., (2011). Glyphosate influence on phytoplankton community structure in Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*, 37(4), 683-690.
- Secretaría de Aguas y Recursos Hidráulicos (SARH), 1982
- SEMARNAT-Pladeyra, Instituto Nacional de Estadística, (2003), Paisajes hidrológicos y balance hídrico de la cuenca Lerma Chapala. Pp. 135
- SEMARNAT, (2006), Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Regional para el Proyecto: Programa de Control Integral de Maleza Acuática en el Lago de Chapala. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. 168 Pp.
- Scarpace, F.L., Holmquist, K.W., Fisher, L.T., (1979) Landsat Analysis of Lake Quality. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 45(5), 623-633
- Schanda, E., (1986), *Physical fundamentals of Remote Sensing*, Springer Verlag, Berlin, Pp. 187.
- Scheffer, M., (2001), *Ecology of Shallow Lakes*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- Silva G. J., Rodríguez, C.R., Ochoa, E.S. y López, D. S., (2002), Lake Chapala and the Cienega aquifer: Chemical evidence of hydraulic communication. *Geofísica INternacional*, 41(1), 63-74
- Schmugge, T.J., Kustas, W. P., Ritchie, J.C., Jackson, T. J. y Rango, A., (2002) Remote sensing in hidrology. *Advance in Water Resource*, 25, 1367-1385
- Simpson, J.T., (1991) *Volunteer Lake Monitoring: A Methods Manual*. EPA440/4-91-002
- Stednick, J. D., y Hall, E. B., (2003). Applicability of trophic status indicators to Colorado plains reservoirs. *Colorado Water Resources Research Institute Completion Report*, (195), Pp 104
- Stisen, S., Jensen, K.H., Sandholt, I., Grimes, D.I.F., (2008) A Remote Sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin, *Journal Hydrology*, 354, 131-148
- Stricklan, J.D. y Parsons, T.R., (1972) *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. Fisheries Research Board of Canada Ottawa. Pp 310
- Sunil, T. S., Rojas, V. y Bradley, D. E., (2007). United States' international retirement migration: the reasons for retiring to the environs of Lake Chapala, Mexico. *Ageing and Society*, 27(04), Pp 489-510.
- The Minnesota Shoreland Management Resource Guide <http://shorelandmanagement.org/> Consultado 02/12/2014.
- Thiemann, S., y Kaufmann, H., (2000), Determination of Chlorophyll Content and Trophic State of Lakes Using Field Spectrometer and IRS-1C Satellite Data in the Mecklenburg Lake District, Germany, *Remote Sensing of Environment*, 73, 227-235
- Tyler, A. N., Svab, E., Preston, T., Présing, M., y Kovács, W. A., (2006), Remote Sensing of the Water Quality of Shallow Lakes: A mixture modeling approach to quantifying Phytoplankton in Water Characterized by high-suspended sediment., *International Journal of Remote Sensing*, 27(8), 1521-1537

- Usali, N. y Ismail, M.H., (2010), Use of Remote Sensing and GIS in Monitoring Water Quality. *Journal of Sustainable Development*, 3(3), 228-238
- Ustin, S., (2004), *Remote Sensing for Natural Resources Management and Environmental Monitoring: Manual of Remote Sensing*, John Wiley & Sons, Inc., USA
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), (2007), *Survey of the Nation's Lakes. Field Operations Manual*, EPA 841-B-07-004, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC
- Vanderstraete, Tony, R. Goosens, and Tharwat K. Ghabour, (2003), Remote sensing as a tool for bathymetric mapping of coral reefs in the Red Sea (Hurghada—Egypt), *Belgeo*, 3, 257-267
- Vendrell, E., de Barreda Ferraz, D. G., Sabater, C., y Carrasco, J. M., (2009). Effect of glyphosate on growth of four freshwater species of phytoplankton: A microplate bioassay. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 82(5), 538-542.
- Vollenweider, R. A. y Kerekes, J.J., (1981), *Background and Summary Results of the OECD Cooperative on Eutrophication en: Restoration of Lakes and Inland Waters*. United States Environmental Protection Agency, EPA 440/5-81-010, 25-36
- Wang, F. , Han, L. , Kung, H. -T. y Van Arsdale, R. B., (2006) 'Applications of Landsat-5 TM imagery in assessing and mapping water quality in Reelfoot Lake, Tennessee', *International Journal of Remote Sensing*, 27: 23, 5269 -5283
- Wester, P., Vargas-Velazquez, S., Mollard, E. y Silva-Ochoa, P., (2008). Negotiating surface water allocations to achieve a soft landing in the closed Lerma-Chapala Basin, Mexico. *Water Resources Development*, 24(2), 275-288.
- Wetzel, R.G., (2001), *Limnology. Lakes and River Ecosystems*, Academic Press. USA, Pp. 1006
- Wezernak, C., Tanis, F., y Bajza, C., (1976). Trophic state analysis of inland lakes. *Remote Sensing of Environment*, 5, 147-165.
- Witzig, A. S. y Whitehurst, C.A., (1982), Current Use and Technology of Landsat MSS Data for Lake Trophic Classification, *Water Resource Bulletin*, 17(6), 962-970
- Zarate-Del Valle, P.F., Michaud, F., Parrón, C., Solana-Espinoza, G., Israde-Alcántara, I., Ramírez-Sánchez, H.U. y Fernex, F., (2001), *Geology Sediments and Soils*, in: *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and management*. Edited by Hansen, A. M. y Van Afferden, M. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 31-57, USA.

# ANEXO

**A1.** Posiciones geográficas de las estaciones meteorológicas consideradas para el análisis de la precipitación promedio mensual de la cuenca en 1993

latitud	longitud	Estación SMN
19.9	-100.6917	16255
19.9203	-101.8583	16248
19.9133	-102.2039	16229
20.1286	-101.7489	16159
20.3375	-102.2831	16141
19.975	-102.1269	16137
19.9075	-100.3192	16111
19.9583	-102.6	16095
19.9606	-102.5844	16094
20.3008	-102.4386	16093
19.8164	-100.4156	16061
19.9211	-100.8622	16052
19.7725	-100.2883	16033
20.2578	-102.5894	16030
19.9561	-101.1381	16027
20.2072	-101.8617	16024
19.8972	-101.0381	16016
19.9167	-102.2125	16014
19.7961	-99.995	15245
19.8119	-100.0814	15128
19.4697	-99.5931	15119
19.7692	-100.1403	15070
20.2667	-103.425	14396
20.3356	-103.0175	14379
20.3289	-102.5425	14355
20.1583	-103.0433	14189
20.1536	-103.1844	14156
20.0942	-103.3764	14146
20.3811	-102.9278	14111
20.2836	-103.4294	14077
20.29	-102.7094	14075
20.4806	-102.2489	14070
20.3308	-102.7633	14047
20.29	-103.1892	14040
20.3061	-101.7808	11151
20.5056	-101.9319	11099
20.5056	-101.9319	11099

A2. Valores digitales del procesamiento de imágenes y de concentración de clorofila  $_a$  (valores logarítmicos)

Cociente 3/1	Ln clorofila $a$
0.36	1.47
0.41	1.59
0.33	1.85
0.51	2.34
0.26	1.19
0.55	2.33
0.43	1.70
0.13	1.57
0.59	3.21
0.10	1.42
0.15	2.01
0.25	3.08
0.07	1.52
0.13	1.78
0.17	1.70
0.21	1.77
0.32	2.16
0.29	2.24
0.03	1.78
0.13	1.74
0.34	2.97
0.19	1.48
0.33	2.02
0.07	1.90
0.25	1.63
0.45	2.53
0.54	1.87
0.28	2.10
0.25	2.18
0.24	2.06
0.42	1.72
0.40	2.15
0.50	2.57

A3. Valores digitales del cociente de bandas de la imagen y de turbidez- profundidad de disco de Secchi  
(Valores logarítmicos).

Cociente 34	Ln prof. DS
0.67	-1.49
0.63	-1.71
0.79	-1.61
0.00	-2.16
0.90	-1.09
0.80	-2.12
0.57	-1.20
0.89	-2.53
0.43	-1.61
0.83	-1.29
1.33	-1.56
0.40	-0.43
0.67	-0.80
0.71	-0.86
0.88	-1.05
1.67	-1.61
0.80	-1.35
0.33	-0.55
0.67	-1.61
1.57	-1.56
0.60	-0.86
1.57	-1.56
0.29	-0.79
1.00	-1.61
1.75	-2.21
1.67	-1.74
0.89	-1.61
1.00	-1.61
1.38	-1.74
1.50	-1.63