



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
SOBRE LOS RECURSOS NATURALES**

CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA DEL LAGO CRÁTER LA ALBERCA DE TEREMENDO, MICHOCÁN, MÉXICO

TESIS QUE PRESENTA:

BIÓL. FAVIOLA MEDRANO ZARCO

**PROGRAMA DE POSGRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN LIMNOLOGÍA Y ACUACULTURA**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. ARTURO CHACÓN TORRES**

Morelia, Michoacán. Mayo de 2011



CONTENIDO	Pag.
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo general	4
2.2 Objetivos específicos	4
III. ANTECEDENTES	5
3.1. Tectónica de placas	5
3.2. El Cinturón Volcánico Transmexicano	6
3.3. El vulcanismo en el territorio michoacano	8
3.4. Origen y formación de un lago volcánico	9
3.5. Dinámica geoquímica de los lagos volcánicos	10
3.6. Los lagos cráter del mundo	12
3.7. Los lagos cráter del Cinturón Volcánico Transmexicano	15
3.7.1. Los Axalapascos de la Cuenca Oriental	15
3.7.2. Las Hoyas de Valle de Santiago	17
3.7.3. Los lagos alpinos del Volcán Nevado de Toluca	19
3.7.4. Los lagos cráter de los Tuxtlas	19
3.7.5. La Isla Isabel	21
3.7.6. La Alberca Los Espinos	21
3.7.7. La Alberca de Tacámbaro	22
3.7.8. La Alberca de Teremendo	23
IV. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	23
4.1. Ubicación geográfica	23
4.2. Fisiografía	23
4.3. Geología	25
4.4. Suelos	25
4.5. Hidrología	25
4.6. Vegetación	25
4.7. Aspectos socioeconómicos, históricos y culturales	26

V. MATERIALES Y MÉTODOS	28
5.1. Clima	28
5.2. Morfometría lacustre	28
5.3. Balance hídrico	30
5.4. Óptica	31
5.5. Balance de Calor	33
5.6. Hidrodinámica	35
5.7. Frecuencia de muestreo de las variables fisicoquímicas del agua y sedimento	36
5.8. Registros de campo	38
5.9. Análisis de laboratorio	40
5.9.1. Agua	40
5.10. Sedimentos	46
VI. TRATAMIENTO DE RESULTADOS	47
VII. RESULTADOS	48
7.1 Clasificación del clima	48
7.2. Morfometría	50
7.3. Balance hídrico	57
7.4. Óptica	62
7.5. Balance de calor	65
7.6. Hidrodinámica	71
7.7. Caracterización fisicoquímica del agua	75
7.8. Sedimentos	92
VIII. DISCUSIÓN	93
IX. CONCLUSIONES	120
X. REFERENCIAS	122
ANEXOS	134

ÍNDICE DE FIGURAS	Pag.
Figura 1. Localización de los principales volcanes de México (Macías, 2005; Armienta <i>et al.</i> , 2008)	7
Figura 2. Principales sistemas de fallas con edades inferiores a los 10 Ma que afectan a la Eje Neovolcánico Transmexicano y sectores.	8
Figura 3. Localización geográfica del área de estudio	24
Figura 4. Ubicación de las estaciones de colecta	37
Figura 5. Curva de calibración para ortofosfatos. Coeficiente de correlación: 0.9998	43
Figura 6. Curva de calibración para fósforo total. Coeficiente de correlación: 0.9983	43
Figura 7. Curva de calibración para amonio. Coeficiente de correlación: 0.9994	44
Figura 8. Curva de calibración para nitritos. Coeficiente de correlación: 0.9999	44
Figura 9. Climograma (1982-2005) de la estación del Servicio Meteorológico Nacional N° 16254 de la población de Teremendo ubicada a 2350 msnm.	49
Figura 10. Mapa batimétrico del lago cráter La Alberca de Teremendo, con líneas de contorno de 1.0 m	52
Figura 11. Curva hipsográfica directa del lago cráter La Alberca de Teremendo en donde se identifica el volumen de agua por capas de profundidad	53
Figura 12. Curva hipsográfica porcentual del lago cráter La Alberca de Teremendo obtenida a partir del mapa batimétrico	53
Figura 13. Clasificación del sistema de forma de lagos (Håkanson, 1981	54
Figura 14. Transecto batimétrico en dirección norte a sur	55
Figura 15. Registro de la estación del Servicio Meteorológico Nacional N° 16254 de la población de Teremendo ubicada a 2,350 msnm durante el 2009	59
Figura 16. Variación de la lluvia y evaporación durante el año de 2009 en el lago cráter La Alberca de Teremendo	59
Figura 17. Fluctuación en el nivele superficial del agua durante el año de 2009 en el lago cráter La Alberca de Teremendo	60

Figura 18. Volumen de agua esperado y observado durante el periodo de muestreo	60
Figura 19. Balance de agua anual para el lago cráter La Alberca de Teremendo. Las cifras se expresan en metros cúbicos	61
Figura 20. Gradiente de extinción vertical de la luz solar y zona eufótica de los diferentes espectros cromáticos (el color de la curva indica el espectro cromático)	63
Figura 21. Perfil de la transmitancia de la luz en el lago cráter La Alberca de Teremendo	64
Figura 22. Distribución vertical de temperatura y oxígeno disuelto en el mes de mayo	67
Figura 23. Distribución vertical de temperatura y oxígeno disuelto en el mes de diciembre	67
Figura 24. Distribución vertical de la temperatura en °C en el lago cráter La Alberca de Teremendo	68
Figura 25. Distribución vertical de la densidad del agua	68
Figura 26. Contenido total anual de calor. El área superficial del lago es de 1.64+9 cm ²	69
Figura 27. Capacidad mensual de almacenamiento de calor durante el año 2009	70
Figura 28. Frecuencia de los vientos dominantes en el lago cráter La Alberca de Teremendo	72
Figura 29. Transectos de superficie observados en veletas de corriente en el lago cráter La Alberca de Teremendo	72
Figura 30. Correlación entre deriva superficial y la velocidad del viento ($r^2 = 0.93$)	73
Figura 31. Correlación entre factor de viento y velocidad del viento ($r^2 = 0.85$)	73
Figura 32. Dendograma de similitud entre las estaciones de muestreo en el lago cráter La Alberca de Teremendo	75
Figura 33. Variación temporal promedio del potencial de hidrogeno	77
Figura 34. Variación temporal promedio de la conductividad eléctrica	78
Figura 35. Valores promedio de sólidos totales del lago cráter La Alberca de Teremendo	79

Figura 36. Correlación de sólidos suspendidos totales y clorofila-a	80
Figura 37. Valores promedio de sólidos del lago cráter La Alberca de Teremendo	81
Figura 38. Distribución temporal del oxígeno disuelto en el lago cráter La Alberca de Teremendo.	82
Figura 39. Variación temporal promedio del potencial de hidrogeno	83
Figura 40. Variación temporal promedio de bióxido de carbono	84
Figura 41. Variación temporal promedio de la alcalinidad total	85
Figura 42. Variación temporal promedio de alcalinidad	86
Figura 43. Variación temporal promedio de dureza	87
Figura 44. Variación temporal promedio de fósforo total y ortofosfatos	88
Figura 45. Variación temporal promedio de amonio	89
Figura 46. Variación temporal promedio de nitritos	90
Figura 47. Variación temporal promedio de demanda química de oxígeno	91
Figura 48. Variación temporal promedio de clorofila-a	91
Figura 49. Productividad primaria por estratos	92
Figura 50. Productividad primaria a un metro de profundidad	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales lagos cráter del planeta	13
Tabla 2. Localización y descripción de la estaciones de colecta	36
Tabla 3. Valores promedio anual de temperatura y precipitación	48
Tabla 4. Descripción morfométrica del lago cráter La Alberca de Teremendo	56
Tabla 5. Balance anual de agua para el lago cráter La Alberca de Teremendo	61
Tabla 6. Coeficiente de atenuación vertical de la luz y zona eufótica en los diferentes espectros cromáticos en lago cráter La Alberca de Teremendo	63
Tabla 7. Temperaturas extremas y áreas registradas en la columna de agua	69
Tabla 8. Temperatura promedio y contenido total de calor	70
Tabla 9. Movimiento del agua y factor del viento en el lago cráter La Alberca de Teremendo	74
Tabla 10. Correlación de variables	76
Tabla 11. Atributos ópticos de diferentes lagos	100
Tabla 12. Comparación entre variables en diferentes lagos cráter de la república mexicana	116
Tabla 13. Características de lagos eutróficos y oligotróficos	119

RESUMEN

El lago La Alberca de Teremendo es un sistema lacustre de origen volcánico que representa un valioso recurso natural en la región oeste de México. En el presente estudio se realizó una campaña limnológica que incluyó análisis del clima, morfometría, balance hidrológico, óptica lacustre, balance térmico, hidrodinámica y calidad del agua. El muestreo fue mensual durante el año 2009. Se establecieron cinco estaciones de muestreo, tratando de incorporar las diferentes áreas de representación morfométrica del lago cráter. Los resultados de campo y laboratorio sugieren que el sistema es un lago poco profundo en comparación con la batimetría de los ecosistemas acuáticos michoacanos con valores morfométricos de un sistema geológicamente joven. El balance hidrológico está afectado por las diferencias entre la precipitación y la evaporación. El perfil de extinción vertical de la luz indica que la irradianza solar se extingue a los 2.0 m de profundidad lo que induce a la ausencia de fotosíntesis desde los 3.0 metros de profundidad. El lago registró una estratificación térmica la primavera y verano. La concentración de oxígeno disuelto no alcanzó niveles de sobresaturación, mientras que a partir de los 4.0 m de profundidad se manifiesta anóxico durante todo el año. Los valores de calidad del agua revelan que es un sistema con niveles de contaminación alóctona. Los indicadores de estado trófico sugieren que el lago es un sistema eutrófico. En consecuencia, es necesario un programa de control de la erosión en el interior del cráter así como un programa de conservación de la diversidad biológica local.

I. INTRODUCCIÓN

El agua dulce es uno de los recursos naturales de mayor escasez en el planeta. México se ubica en una franja latitudinal entre el trópico y subtrópico, se localiza entre dos grandes océanos, la accidentada topografía y la variabilidad climática favorecen el desarrollo de una amplia diversidad de cuerpos de agua, así como de una comunidad biológica diversificada y rica en especies nativas.

Lo anterior, genera también una distribución heterogénea en la hidrología del país, limitando la disponibilidad equitativa de este recurso. De acuerdo con la CNA (2001), México posee una superficie territorial de 2'000,000 km², en donde el 31.0% de su superficie es árida, el 36.0% es semiárida y únicamente una tercera parte es considerada como húmeda y subhúmeda (33.0%). Por otro lado, la densidad de población no corresponde con la disponibilidad de los recursos hidrológicos (Aguilar, 2003). Más de las tres cuartas partes de las fuentes de agua se encuentran alejadas de las comunidades con mayor densidad de población y actividades económicas. Lo anterior, genera un desequilibrio entre la capacidad de suministro y la demanda del agua, lo que en consecuencia conduce a la sobreexplotación de los sistemas acuáticos (García-Calderón y De la Lanza-Espino, 2002; Arreguín *et al.*, 2004; Cantú y Garduño, 2004).

La diferencia en la distribución espacial del agua no solamente es latitudinal sino también es temporal. El 90.0% del agua pluvial se descarga durante la temporada de lluvias (mayo a octubre), lo que representa un ambiente seco sujeto a la evaporación durante los seis meses restantes. Esta distribución heterogénea latitudinal, altitudinal y temporal presenta retos para el desarrollo de programas de manejo y uso adecuado del agua, así como para la preservación de su volumen y calidad (Aguilar, 2003).

En la República Mexicana se estima que existe un total de 14 mil sistemas acuáticos interiores o epicontinentales, de los cuales el mayor número se localiza en la zona centro occidente, que incluye los estados de Jalisco y Michoacán, siguiendo en importancia la región centro sur y la norte (Aguilar, 2003)

Destacan por su abundancia los embalses artificiales, que ocupan el 67.13% de los almacenamientos hidrológicos y que cubren una superficie estimada de 188.8 mil

hectáreas y que representan 14.74% de la superficie inundada de aguas epicontinentales (CNA, 1998).

Los lagos de México pueden ser de dos tipos: 1) los localizados en las cuencas áridas del norte de México, conocidos como lagos playa; 2) las pequeñas cuencas lacustres formadas por vulcanismo reciente, como los lagos que se localizan en el Eje Neovolcánico Transmexicano (García-Calderón y De la Lanza-Espino, 2002) .

En términos del flujo geoquímico, térmico y procesos biológicos, los lagos son sistemas dependientes de los ambientes terrestres y atmosféricos. El agua fluye hacia el lago desde la cuenca y es drenado, en el caso de cuencas exorreicas, a través de corrientes. Estos ecosistemas no pueden persistir sin un aporte de agua, materia y energía. Por lo tanto, los atributos fisicoquímicos y ecológicos de un sistema lacustre derivan principalmente del medio natural que les rodea, de los asentamientos humanos y de las actividades que se llevan a cabo dentro de una cuenca. Un lago se mantiene ambientalmente estable solamente si la cuenca mantiene sus funciones ecológicas vigentes.

Los sistemas lacustres mexicanos más importantes conocidos por su biodiversidad, alto número de endemismos y por el desarrollo socioeconómico regional incluyen al lago de Chapala en el estado de Jalisco, los lagos de Pátzcuaro, Zirahuén y Cuitzeo en Michoacán, los lagos-cráter de la cuenca oriental de Puebla y el lago de Catemaco en Veracruz. Miller (1986) y Espinosa *et al.* (1998) incluyen también a la Laguna de Chichancanab ubicada entre los estados de Quintana Roo y Yucatán y la laguna de la Media Luna en San Luis Potosí.

Los ecosistemas lacustres naturales en el estado de Michoacán, se pueden diferenciar de acuerdo a su origen tectónico y volcánico (Hutchinson, 1957), incluyendo la extensa depresión que ocupa el lago de Cuitzeo como un proceso de reacomodo tectónico (Chacón *et al.*, 2007); según Demant *et al.* (1992) el lago de Zacapu es producto de una fase tectónica distensiva de transarco desarrollada durante el Plioceno Superior al Pleistoceno. Las depresiones de Pátzcuaro y Zirahuén se encuentran estrechamente asociadas a obstrucciones volcánicas en un proceso de movimientos en las estructuras tectónicas (Israde, 1999).

Entre estos ecosistemas destacan una serie de lagos de origen volcánico (Israde, 1999), conocidos localmente como “albercas” con características muy particulares, formadas en depresiones y cráteres de volcanes ya extintos, incluyendo La Alberca de Los Espinos, La Alberca de Tacámbaro y La Alberca de Teremendo.

Estos cuerpos de agua se consideran como ecosistemas acuáticos de gran importancia ya que son áreas que se encuentran aisladas del entorno dominante en una región. Las características que le otorga el ambiente y origen de formación del vaso lacustre, convierte a estos ecosistemas acuáticos en ambientes únicos, diferenciados particularmente por la dinámica química de sus aguas que es diversa, ya que se pueden identificar desde los lagos cristalinos y diluidos hasta aquellos sistemas bastante turbios con una alta concentración de sales que en ocasiones superan la salinidad del mar.

El presente trabajo tiene como propósito fortalecer el proceso de generación de conocimientos que permitan garantizar la conservación y el aprovechamiento racional y equilibrado de los tres lagos cráter que existen en el estado de Michoacán. De manera específica el trabajo se desarrolló en el lago cráter La Alberca de Teremendo. En este sistema lacustre volcánico no se conocen los atributos morfológicos, geoquímicos, físicos y biológicos que tienen influencia sobre la estructura y relaciones funcionales que determinan los procesos ecológicos así como su productividad acuática.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar los componentes físicos y químicos que determinan la productividad acuática del lago cráter La Alberca de Teremendo.

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Realizar la descripción morfométrica del sistema

2.2.2. Determinar el balance hidrológico local

2.2.3. Evaluar el balance térmico

2.2.4. Describir los principales movimientos del agua

2.2.5. Evaluar los principales atributos ópticos del agua

2.2.6. Describir las principales variables fisicoquímicas del agua y sedimentos

2.2.6. Determinar la productividad primaria

III. ANTECEDENTES

3.1. Tectónica de placas

La teoría de la tectónica de placas litosféricas o nueva tectónica global, comprende los conceptos y fundamentos enfocados a describir los movimientos que modifican la corteza terrestre a través de intersecciones de placas litosféricas moderadamente rígidas (Llorente *et al.*, 2002; Lugo-Hubp, 2002; Schmincke, 2006).

La litosfera se divide en capas rígidas que se deslizan sobre la astenósfera plástica impulsadas por las corrientes de convección del manto de la tierra y por divergencias entre las densidades. Las placas litosféricas constituyen tanto la corteza continental como la oceánica y se encuentran limitadas por las dorsales meso oceánicas, fallas de transformación, fosas oceánicas y grandes fracturas de orden continental (Llorente *et al.*, 2002).

En el planeta existen grandes placas incluyendo la Africana, Sudamericana, Norteamericana, Eurasiática, Índica, Pacífica y Antártica. Estas placas litosféricas poseen dimensiones variadas. Las placas de Nazca, Caribe, Arábica, Rivera y Cocos sólo poseen tamaño subcontinental (Llorente *et al.*, 2002). La actividad que se presenta en los límites que existen entre las placas origina las zonas sísmicas y volcánicas del planeta.

Las placas de Cocos y Rivera ubicadas en el océano Pacífico se desplazan en dirección a Norteamérica compartiendo un margen divergente con la placa Pacífica. Entre los límites de Cocos y Rivera, existe una zona de extensión causada por un movimiento rotacional diferencial que genera cierta divergencia relativa. Esta zona de extensión se desarrolla hacia el interior del territorio mexicano formando el Cinturón Volcánico Transmexicano (Bandy *et al.*, 1995).

Los sectores occidental y central del Cinturón Volcánico Transmexicano se encuentran caracterizados por la ocurrencia de *grabens*, originados por fallas normales activas como resultado de una extensión intra-arco (Suter *et al.*, 1995).

3.2. El Cinturón Volcánico Transmexicano

El Cinturón Volcánico Transmexicano es el arco volcánico que se manifiesta sobre la margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos, a lo largo de la costa pacífica de la zona de Acapulco (Demant, 1978; Ferrari, 2000). Constituye unos de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región *Circum-Pacífica*. Sus rasgos característicos incluyen: a) la gran variabilidad del estilo volcánico y composición química a lo largo del arco; b) la presencia de un volcanismo alcalino de tipo intraplaca; c) la oblicuidad de su parte central y oriental con la trinchera; y d) la notable variación del ancho del arco (Ferrari, 2000; Ruiz-Martínez, 2003). Su porción terminal occidental se caracteriza por la presencia de dos fosas tectónicas: la de Tepic-Chapala, orientada NW-SE y la de Colima, orientada N-S (Demant, 1978).

El inicio de la actividad del Cinturón Volcánico Transmexicano se estima en el Mioceno Superior, en torno a los 12-11 millones de años (Ferrari *et al.*, 1999), con un vulcanismo extendido longitudinalmente que se emplazó en la frontera de separación entre los dos dominios tectónicamente diferenciados. El primero al norte del Cinturón Volcánico Transmexicano, sujeto al inicio de la divergencia entre las placas Pacífica y Norteamericana, como consecuencia de la subducción de los restos de la placa oceánica de Farallón bajo el continente y de la extensión del Golfo de California a medida que la placa Pacífica capturaba la península de Baja California. El segundo al sur del Cinturón Volcánico Transmexicano, caracterizado por la subducción oblicua de las placas de Cocos y de Rivera. Es posible que el campo de esfuerzos relacionado con este complejo límite de placas reactivó antiguas zonas de sutura, permitiendo la rápida ascensión de los magmas derivados del manto (Ferrari *et al.*, 2000).

La mayor concentración de volcanes en México se encuentra en el Cinturón Volcánico Transmexicano (Figura 1), donde se identifica una amplia variedad de formas volcánicas como campos de conos monogenéticos, estratovolcanes con elevaciones de hasta 4,000 m, volcanes en escudo, volcanes compuestos, calderas, lavas fisurales y domos. Al interior existen cadenas de estratovolcanes y volcanes compuestos, que tienen una alineación N-S y NE-SW en donde, aparentemente, ha ocurrido una migración de la actividad volcánica en los últimos dos millones de años hacia la porción frontal del arco volcánico (Macias, 2005).

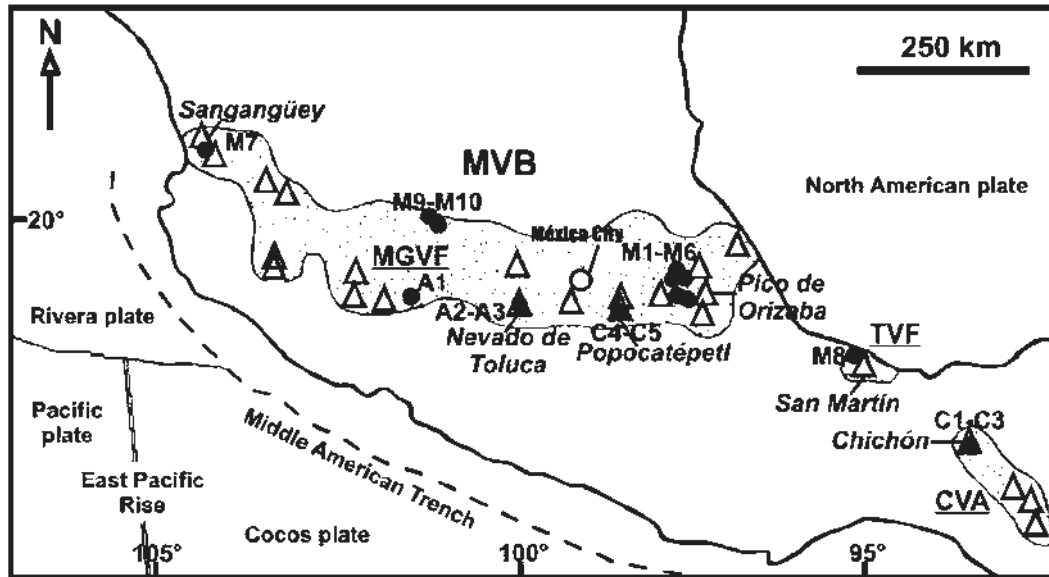


Figura 1. Localización de los principales volcanes de México (Macías, 2005; Armienta et al., 2008)

El Cinturón Volcánico Transmexicano se divide en tres sectores: occidental, central y oriental (Ferrari, 2000) (Figura 2), estos presentan diferencias en el tipo de vulcanismo así como en su composición química. En el sector occidental, limitado al este por la fractura o “rift” de Colima, el arco volcánico se superpone a la parte norte del bloque Jalisco (BJ) y al límite meridional de la Sierra Madre Occidental (SMO).

En el sector central, entre el “rift” de Colima y el sistema de fallas Taxco-Querétaro, se desarrolla el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, comprende de un total de 1,040 volcanes en un área de 40,000 km², ubicado en centro de Michoacán y sur de Guanajuato. Está formado por conos cineríticos, anillos de tobas, escudos volcánicos, estratovolcanes, domos de lava, “maars” y conos de lavas, de composición basáltica o basáltico-andesítica. Los estratovolcanes se encuentran completamente ausentes, a excepción del Pico del Tancitaro.

En el sector oriental, al oriente del sistema Taxco- Querétaro, la mayor parte del vulcanismo se encuentra emplazado en grandes estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición de andesítica a riolítica alineados a lo largo de estructuras corticales, mientras que los volcanes monogenéticos de composición basáltica representan sólo una pequeña fracción del volumen de magma emplazado.

El Cinturón Volcánico Transmexicano no se encuentra a una distancia constante de la trinchera de Acapulco. En el sector occidental el frente volcánico es paralelo a la trinchera, mientras que en el sector central y oriental tiende a alejarse de ella. Como resultado el frente volcánico tiene un ángulo de 15° con respecto a la trinchera. La tasa de emplazamiento volcánico y el área cubierta por el vulcanismo Plio-Cuaternario no son homogéneas en el Cinturón Volcánico Transmexicano. El arco volcánico Plio-Cuaternario tiene una amplitud variable entre un máximo de 200 km en la región del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato y un mínimo de 65 km en las regiones de Chapala y Morelia que corresponden también a las áreas con menor aporte magmático del arco (Cano, 2007).

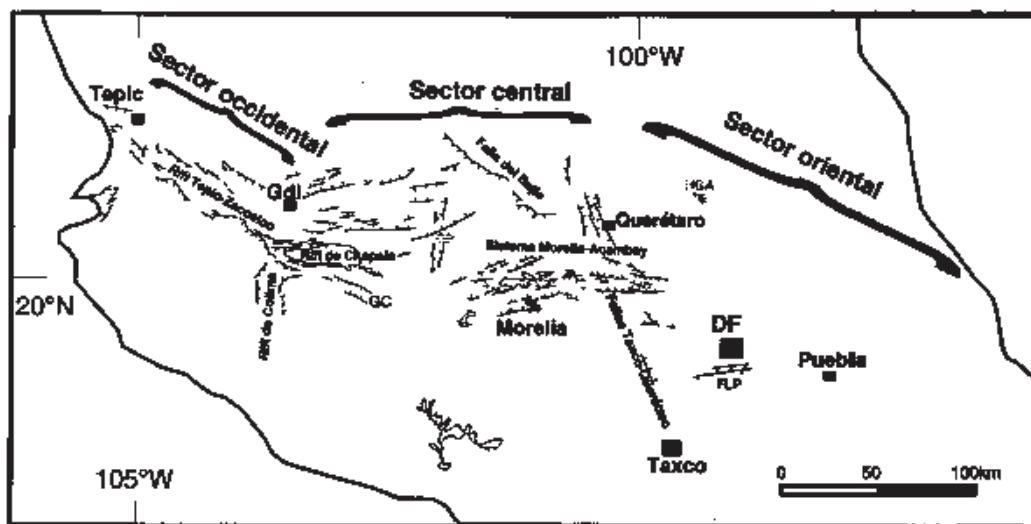


Figura 2. Principales sistemas de fallas con edades inferiores a los 10 Ma que afectan a la Eje Neovolcánico Transmexicano y sectores.

GC= Graben de Cotija; GP= Graben de Penjamillo; HGA= Semigraben de Aljibes; FLP= Falla la Pera. Nótese la ausencia de fallamiento en la parte oriental de la FVTM (En: Cano, 2007)

3.3. El vulcanismo en el territorio michoacano

El vulcanismo del Estado de Michoacán se encuentra dentro del Campo volcánico de Michoacán-Guanajuato en este campo volcánico se encuentran 901 conos (de ceniza o lava), 43 domos, 22 *maars*, 13 conos escudo con un cono en su cima y 61 conos de lava. Demant (1981), concluye que el vulcanismo del Estado de Michoacán puede ser dividido en dos regiones; la del vulcanismo monogenético del Corredor Tarasco y un vulcanismo de tipo más ácido en el sector del oriente del Estado (Garduño-Monroy, 1999).

Dentro del campo volcánico del Corredor Tarasco se ubican mas de mil conos volcánicos de edad reciente es el resultado de la actividad magmática que ha desarrollando la placa de Cocos. Su distribución depende de la geometría de la subducción, y principalmente de la geometría de las fracturas y fallas, en este caso en direcciones preferenciales NE-SW.

3.4. Origen y formación de un lago volcánico

Un volcán es una colina o montaña que se forma alrededor de una fisura en la superficie terrestre. Cuando un volcán se encuentra en un proceso geológico activo, expulsa diversos materiales magmáticos que transforman el relieve terrestre en poco tiempo. El magma es una masa de roca fundida de alta viscosidad que contiene diversos elementos químicos incluyendo gases y cenizas que se desprenden en forma violenta o pasiva (Lugo-Hubp, 2002).

El área de influencia de un volcán, cambia, se incrementa la altitud de las montañas, las depresiones del terreno son rellenadas, surgen planicies y mesetas, la hidrología se modifica, generando una heterogeneidad en el clima, geología, suelo, vegetación, fauna e hidrología superficial y subterránea. Los lagos son el resultado de procesos que actúan sobre las capas terrestres, contienen registros de la evolución de una cuenca y son trampas sedimentarias de depósitos autogénicos formados dentro del lago y alogénicos que provienen del exterior.

La presencia de lagos en áreas volcánicas es el resultado de la alteración en la geomorfología, así como del drenaje superficial y subterráneo que conduce con frecuencia hacia la acumulación de agua en las áreas más bajas, con o sin salida o efluente. Numerosos lagos cráter carecen de un efluente y solamente pierden agua a través de la evaporación o infiltración dentro del vaso lacustre.

Los lagos formados por la acción volcánica se localizan en áreas geográficas en sitios en donde los periodos geológicos pasados desarrollaron eventos de actividad tanto tectónica como volcánica (Hutchinson, 1957). Caracterizados por la morfometría del vaso lacustre y por interacciones geoquímicas entre el agua y los remanentes del origen magmático que tienen influencia en la composición física, química y biológica de estos ecosistemas acuáticos.

El origen de los lagos volcánicos es de tres tipos (Wetzel, 2001; Kalff, 2002; Lugo-Hupb, 2002):

- 1) **Los lagos cráter** inician su proceso de formación mediante la expulsión directa del material subyacente a través de un cono volcánico. Posterior al suceso catastrófico, se forma una caldera volcánica o un hundimiento circular en un cono de ceniza no modificado en la cima de un volcán sin actividad. Si estos espacios no son porosos podría ser inundado por el agua de lluvia o alimentado por acuíferos subterráneos después de la extinción de la actividad volcánica.
- 2) **Los lagos “maars”**, surgen por una explosión provocada por el contacto de la lava con el agua del suelo o de la pérdida de gases del magma. Son depresiones pequeñas, con un diámetro menor a 2.0 km, de forma circular y pueden ser profundos en relación a su pequeña área superficial.
- 3) **Las calderas**, son lagos volcánicos más grandes, se originan en depresiones formadas por el colapso de una cámara magmática que ha quedado vacía después de la expulsión violenta del magma. Las calderas son más grandes que los lagos “maars”, con un diámetro mínimo de 5.0 kilómetros.

3.5. Dinámica geoquímica de los lagos volcánicos

La mayoría de los lagos de origen volcánico reciben un ingreso de flujos ya sea volcánico o hidrotermal. En algunos casos, los lagos volcánicos pueden ser alterados por un nuevo suministro de magma y la acción de explosiones volcánicas que pueden ocurrir ya sea en el interior del lago o en el estrato rocoso inferior del vaso lacustre. Algunos lagos volcánicos son alimentados por los efluentes de manantiales de aguas termales superficiales o por ventanas internas de fumarolas.

Los lagos de origen volcánico tienden a variar en composición desde las aguas de lluvia normales hasta aquellos con una fuerte influencia volcánica como resultado de la alta permeabilidad en las secuencias de las rocas volcánicas jóvenes.

La temperatura también puede variar desde una temperatura ambiental hasta aquella cercana al punto de ebullición (Pasternack y Varekamp, 1997).

Los lagos volcánicos presentan características propias en su dinámica hidrológica y geoquímica que en ocasiones los hace diferentes a los lagos naturales.

Este enfoque ha generado algunos criterios cuantitativos de clasificación de lagos volcánicos incluyendo variables asociadas a la actividad volcánica como la energía calorífica, el régimen hidrodinámico y de mezclado así como la química del agua (Varekamp *et al.*, 2000).

De acuerdo al enfoque anterior, existen lagos volcánicos (Pasternack y Varekamp, 1997):

1. Ácidos y de alta temperatura, donde el ingreso de agua de origen volcánico o geotérmico es mayor que el agua de lluvia.
2. Con un mezclado completo, pueden alcanzar rápidamente un equilibrio de temperatura y balance de materia.
3. Salinos y ácidos, con flujos superficiales que impiden el mezclado de las aguas.
4. Ácidos sulfatados y bicarbonatados, reciben menos cantidad de energía y pueden mostrar flujos superficiales o permanecer totalmente estratificados.
5. Neutros y diluidos, no poseen ingresos volcánicos, por lo tanto, poseen características similares a los lagos naturales.

Para evaluar la amplia variedad de condiciones químicas entre los lagos volcánicos, Varekamp *et al.* (2000) realizaron con un total de 373 registros de análisis del agua, el cual fue compilado y analizado utilizando algunas aproximaciones estadísticas y geoquímicas.

De acuerdo con las conclusiones de estos autores las variaciones en la composición química del agua se encuentran influenciadas por el flujo de fluidos magmáticos volátiles o fluidos hidrotermales profundos.

La química de un fluido que ingresa a un lago volcánico puede ser regulada por gases, alta temperatura de origen volcánico o por un fluido de más baja temperatura que interactúa de manera extensiva con las rocas volcánicas.

La precipitación de minerales puede afectar la concentración de calcio y sílice. Un fluido de ingreso geotérmico menos concentrado proporciona los componentes mineralizados de algunos lagos más diluidos. Las variaciones temporales en las tasas de dilución y evaporación controlan las concentraciones absolutas de los constituyentes disueltos, pero no el radio de los elementos conservativos.

Las aguas de un lago volcánico y sus flujos hidrotermales de ingreso de profundidad, se clasifican como fluidos ácidos inmaduros ya que no se encuentran equilibrados con silicatos normales como las arcillas o las zeolitas.

Muchos de esos fluidos pueden estar equilibrados con minerales secundarios incluidos previamente durante la evolución histórica del sitio, pero fueron re acidificados mediante el mezclado con fluidos volcánicos recientes.

Un parámetro para caracterizar estos fluidos ácidos es el grado de neutralización. Esto conduce a la clasificación de las aguas de un lago volcánico como aquellos que son influenciados por gases o dominado por las rocas del sustrato.

3.6. Los lagos cráter del mundo

Se han reportado en la literatura algunas clases de lagos asociados con actividad volcánica, como son los lagos de Nemi y Averno en Italia; Pulvermaar en Alemania; Viti, Graenavatn y Geststvatn en Islandia; Tikitapu en Nueva Zelanda (Hutchinson, 1975a), algunos en América Central (Juday, 1915; Deevey, 1957 y Armitage, 1958), Butte en California y el lago Cráter en Oregon (Hutchinson, 1975 a). Los lagos cráter de origen volcánico, también, se encuentran ampliamente distribuidos en el *Gran Valle del Rift*, en el continente africano, principalmente en los países de Uganda (Beadle, 1966; Melack, 1978; Kizito *et al.*, 1993), Ethiopia (Prosser *et al.*, 1968), Tanzania (Hecky, 1971; Kilham, 1971), Kenya (Melack, 1979; MacIntyre y Melack, 1982), y Cameroon (Kling, 1988).

De los principales lagos cráter del planeta Indonesia posee 31 lagos cráter, seguido por las Islas Kurile con 16 y Japón con 14 (Tabla 1).

Tabla 1. Principales lagos cráter del planeta

Ubicación	Nombre del lago	Ubicación	Nombre del lago	Ubicación	Nombre del lago
Alaska (USA)	Lago Emmons	Indonesia	Lago Eron	Italia	Lago Albano
	Lago Surprise		Lago Sirung		Lago Vecchienna
	Lago Katmai		Lago Sempu		Lago Bolsena
	Lago Crater Peak		Lago Mahawu		Lago Vico
Alemania	West Eifel		Lago Klabat	Japón	Lago Yunuma
Camerún	Nyos		Lago Karengetang		Lago Oyunuma
Chile	Lago Lincabur		Lago Awu		Lago Mashu
	Lago Copahue		Lago Gamkonora		Lago Toyako
	Lago Nilahue		Lago Todoko-Ranu		Tiwu Ata Mbapu
China	Lago Tien-Chi		Lago Sorikmarapi		Tiwu Ata Polo
Colombia	Laguna Verde		Lago Tandikat		Lago Eron
Costa Rica	Rincón de La Vieja		Lago Kerinci		Lago Sirung
	Laguna Caliente		Lumutdaun Bukit		Lago Sempu
	Botos Cone		Lama Crater		Lago Mahawu
	Iraza		Baru Carter		Lago Klabat
Ecuador	Lago Quilotoa		SW Explosion Pit		Lago Karengetang
	Lago Cuicachi		Volgensang Crater		Lago Awu
El Salvador	Lago Santa Ana		Lago Tempo		Lago Gamkonora
	Lago Coatepeque		Lago Ranau	México	Los Axalapascos
Estados Unidos	Lago East	Islandia	Lago Grimsvotn		Las Hoyas
	Lago Paulina		Lago Askja		Los Tuxtla
	Lago Medicine	Islas Azores	Lago Blue		Isla Isabel
	Lago Crater		Lago Green		Nevado de Toluca
	Lago Mono		Lago Agua de Pau		Las Albercas
	Lago Yellowstone		Lago Furnas	Nicaragua	Lago Cosiguina
Filipinas	Lago Cabalian	Isla Heard	Lago Mawson Peak		Laguna Jiloa
	Lago Main Crater	Islas Kurile	Lago Ebeko		Laguna Apoyeque
	Lago Taal		Lago Kurile		Laguna de Masaya
	Lago Pinatubo		Lago Stubel		Lago Apoyo
Francia	Pavin		Lago Goloynin	Nueva Zelanda	Lago Rotokawa
Galápagos	Lago Fernandina		Lago Goryayhyee		Lago Fryin Pan
Great Comoro	Chahale Crater		Lago Zavaristky		Lago Rotomahana
Guatemala	Lago Atitlán		Lago Klyuchoe		Lago Taupú

CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA DEL LAGO CRÁTER LA ALBERCA DE TEREMENDO

	Lago Ixpaco		Lago Mutnosvsky		Lago Crater
Indonesia	Lago Patoha		Lago Gorely	Popua, Nueva Guinea	Lago Wisdom
	Lago Galunggung		Lago Pallas Peak		Lago Dakatua
	Lago Talagabodas		Lago Kutomintar		Lago Arghy
	Lago Sikidang		Lago Tao-Rusyr		Lago Sulfur
	Lago Kelut		Lago Karimsky		Lago Salt
	Lago Kawah Ijen		Maly Shemiachik		Lago Cráter
	Lago Batur		Lago Bannoe	San Vicente	Soufriere St. Vincent
	Lago Rinjani	Islas Kermadec	Lago Blue	Tonga	Lago Big
	Sano Wai		Lago Green		Lago Small
	Tiwu Nua Muri Koohi Fa		Lago Tui	Vanuato	Lago Fanteng
	Tiwu Ata Mbapu	Islas Marianas	Lago Anathan		Lago Letas
	Tiwu Ata Polo				Lago Vui

3.7. Los lagos cráter del Cinturón Volcánico Transmexicano

3.7.1. Los Axalapascos de la Cuenca Oriental

En la Cuenca Oriental se encuentran ubicados una serie de lagos conocidos con el nombre de Axalapascos o lagos “*maars*”. Esta área comprende los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz en las coordenadas 97° 09' y 98° 03' oeste y 18° 48' y 19° 43' norte. Conforman esta cuenca seis lagos cráter, incluyendo Aljojuca, Tecuitlapa, Atexcac, La Preciosa, Quechulac y Alchichica (Gasca, 1982; Arredondo-Figueroa, 2002), en conjunto cubren un área de 4.13 km². El clima de la región de los axalapascos es templado húmedo con una precipitación media anual de 656 mm (Ramírez-García y Novelo, 1984), en una altitud entre los 2,345 y los 2,510 metros sobre el nivel del mar.

Existen algunos estudios de los Axalapascos incluyendo el trabajo geológico de Ordóñez (1906) quien caracterizó el origen y constitución de los lagos cráter. De Buen (1945) y Álvarez (1950) describieron la ictiofauna y Arredondo *et al.* (1983) realizaron la batimetría y morfometría de los lagos “*maars*”.

Las características del agua de estos lagos evidencian el origen subterráneo, por su interrelación con las rocas y sedimentos subterráneos, el agua presenta diversos grados de salinidad y composición química (Gasca, 1981; Vilaclara *et al.*, 1993) que fluctúa de un lago a otro. Su profundidad varía de los 2.5 m en el lago Tecuitlapa hasta los 64.0 m en el lago Alchichica, con áreas superficiales desde los 260.0 m² a los 1,810.0 m² respectivamente (Arredondo-Figueroa, 2002).

El agua de los seis lagos cráter es de tipo alcalina, presenta una elevada concentración de cloro y magnesio en aguas moderadamente duras, los principales pares iónicos son: MgCO₃>NaCO₃>CaCO₃ con elevadas concentraciones de oxígeno disuelto (>72%) (Peralta *et al.*, 2002; Arredondo-Figueroa, 2002)

La fauna que se encuentra en los lagos está representada por peces y anfibios endémicos, incluyendo el pez *Poblana alchichica alchichica* (Atherinopsidae) y el Ajolote *Ambystoma taylorii* (Taylor, 1943). Álvarez (1950) reportó la presencia de tres familias, cuatro géneros y seis especies, dos de ellas introducidas.

De los seis Axalapascos el lago cráter Alchichica es el más grande con un diámetro de 1,733 m y el más profundo con valor máximo de 64.0 m, tiene forma circular y una pendiente abrupta en sus paredes (Arredondo *et al.*, 1883; Arredondo-Figueroa, 2002; Alcocer *et al.*, 2000a).

El patrón de mezclado del lago cráter Alchichica indicado por los perfiles de temperatura y oxígeno disuelto confirma su naturaleza monomítica cálida (Alcocer *et al.*, 2000a), de acuerdo al diagrama de clasificación de los tipos de lagos de Lewis (1983). La mezcla inicia a finales del mes de diciembre y permanece hasta principios del mes de marzo durante la estación fría y seca. El lago permanece estratificado a través del resto del año, durante la estación cálido-lluviosa (Alcocer *et al.*, 2000; Oliva *et al.*, 2001)

El área limnética del lago cráter Alchichica es salina (8.5 g/L) y básica (pH: 9.0), el cloruro de sodio es la sal que presenta las concentraciones más altas y los iones dominantes son $\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca}$ y $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{CO}_3 > \text{HCO}_3$ (Vilaclara *et al.* 1993). Las concentraciones de carbón orgánico particulado en el lago se encuentra entre < 0.1 y 4.0 mg/L. Valores similares a los encontrados en otros lagos de condición oligo-mesotrófica. Es probable que el origen principal de este compuesto sea del detrito de fuentes alóctonas y no del fitoplancton (Alcocer *et al.*, 2007a).

El periodo de lluvia de verano registrado en Alchichica tiene influencia en la reducción gradual de 1.0°C en temperatura y 0.5 g/L en la salinidad, disminución de 0.5 m en transparencia, incremento de SiO_4 y comportamiento irregular en el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (Alcocer y Filonov, 2007).

El bajo número de especies de la comunidad del zooplancton en Alchichica, es derivada a la composición iónica y condición de aguas hiposalinas en el lago (Lugo *et al.*, 1999). Escobar-Briones y Alcocer (2002), describieron en Alchichica una especie de crustáceo, *Caecidotea williamsi* (Crustacea: Isopoda: Asellidae).

Los ensamblajes del fitoplancton en el lago cráter Alchichica constituyen una mezcla de especies características de agua dulce y salina. Las especies más abundantes de agua dulce incluyen (*Monoraphidium minutum* y *Synechocystis aquatilis*, mientras que *Nodularia spumigena*, *Chaetoceros elmorei*, *Cyclotella. quillensis*, *C. choctawhatcheeana*

y *Oocystis. submarina*, son especies típicas de aguas salinas y alcalinas (Oliva *et al.*, 2001; Alcocer, *et al.*, 2008). Las cianobacterias *Nodularia spumigena* es la principal alga fijadora de nitrógeno en presencia de la luz dentro del lago cráter (Ramos *et al.*, 2008).

El lago cráter Atexcac ocupa la quinta posición en área superficial (0.29 km^2) y volumen ($6.15 \times 10^6 \text{ m}^3$) dentro de los axalapascos. La profundidad máxima es superior a los 39.0 m, con un registro progresivo de pérdida en el volumen y profundidad debido al deterioro que presenta la cuenca (Macek *et al.*, 2007).

Atexcac es considerado un lago de aguas atalasohalinas, los iones dominantes son $\text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Ca}$ y $\text{Cl} > \text{CO}_3 > \text{HCO}_3 > \text{SO}_4$. La temperatura del agua es templada ($14.6\text{-}22^\circ\text{C}$), el oxígeno disuelto presenta condiciones de anoxia en el fondo del lago hasta aguas bien oxigenadas en la superficie. El sistema se clasifica como monomítico cálido, con un periodo de estratificación y mezcla (Macek *et al.*, 2007). El lago es oligotrófico con base a las concentraciones de clorofila ($4.0 \text{ }\mu\text{g/L}$), favorecido por el florecimiento del fitoplancton, en particular por la cianobacteria *Nodularia spumigena* (Macek *et al.*, 2007).

Lugo *et al.* (1998), determinaron los ensamblajes de la comunidad de protozoarios en el litoral de los lagos cráter Alchichica y Atexcac, identificando 44 especies en Alchichica y 43 en Atexcac. Los resultados obtenidos indican que los lagos hiposalinos pueden contener un alto número de especies de protozoarios en la zona del litoral y son consumidos principalmente por bacterias y algas.

La Cuenca Oriental ilustra una tendencia de desecación que siguen los recursos acuáticos epicontinentales mexicanos. La deforestación, sobrepastoreo, sobreexplotación de los acuíferos y la salinización de suelos derivada de malas prácticas de riego, han inducido procesos de erosión severa y desertización generalizada en la cuenca (Alcocer *et al.*, 2005).

3.7.2. Las Hoyas de Valle de Santiago

El campo de lagos “*maars*” u “*hoyas*” de Valle de Santiago está localizado en el sector norte del campo volcánico Michoacán-Guanajuato en el Cinturón Volcánico Transmexicano (Uribe y Urrutia, 2005). Aunque existen alrededor de 30 cráteres en el área, solo cuatro sistemas permanecen con agua incluyendo Rincón de Parangueo, San

Nicolás de Parangueo, La Alberca y Cíntora, a una altura promedio de 1,710 msnm, en las coordenadas 101° 15' y 101° 12' oeste y 20° 25' y 20° 21' norte (Alcocer *et al.*, 2000b; Alcocer *et al.*, 2002; Ecolero y Alcocer, 2005).

La temperatura media anual de la región de las hoyas fluctúa entre 18.0 y 20.0°C y la precipitación media anual oscila, entre 600 y 800 mm. La forma de los lagos varía desde circular-elíptica (La Alberca y Cíntora), hasta ligeramente triangular (Rincón de Parangueo y San Nicolás de Parangueo). Existe poca información referente a los parámetros morfométricos causado por impactos en la extracción del agua del subsuelo (Alcocer *et al.* 2002; Ecolero y Alcocer, 2005).

La visibilidad del disco de Secchi indica condiciones permanentes de turbidez biogénica ocasionada por florecimientos de cianobacterias. La temperatura en la columna de agua de la Hoya Rincón de Parangueo indica temperaturas más cálidas a partir de los dos metros, condición que se encuentra asociada con la salinidad del sistema. El potencial de Hidrógeno es básico (9.8 unidades) y la composición química es dominada por carbonatos (Green, 1986; Alcocer *et al.*, 2002).

El contenido salino del agua fluctúa desde hiposalinas, como en La Alberca, hasta hipersalinas, como en Rincón de Parangueo (Alcocer *et al.*, 2002; Ecolero y Alcocer, 2005). Las sales de La Alberca en orden de dominancia son NaHCO_3 y $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$ (Orozco y Madinaveitia, 1941).

El fitoplancton en los lagos es dominado por la cianobacteria *Oscillatoria* sp., indicando un estado eutrófico. La comunidad del zooplancton en la Alberca está representada principalmente por el copépodo *Diaptomus alburquerquensis*, mientras que en Rincón de Parangueo domina el rotífero *Brachiomus inermis* (Alcocer *et al.*, 2002). En la hoya Cíntora se encuentran cladóceros y copépodos, las especies dominantes son *Moina weirzejskii* y *Mastigodiaptomus* cf. *Albuquerqueensis* (Galván y Labrada, 2007).

En la hoya La Alberca se encuentran cuatro especies de peces. Tres especies de las familias Goodeidae y Atherinopsidae son nativas, mientras que una especie de la familia Cichlidae es introducida (Alcocer *et al.*, 2002).

En la actualidad, los cuatro lagos cráter se observan con bajos niveles de agua e incluso secos. El abatimiento del manto freático alcanza hasta 2.5 m por año. No existe ningún programa de uso sustentable del recurso acuático (Alcocer et al., 2001). La vegetación natural de la cuenca ha sido prácticamente sustituida por la práctica agrícola, tanto de temporal como de irrigación.

La mayor parte del agua de estos lagos cráter proviene del manto freático. Sin embargo, los manantiales a que Orozco y Madinaveitia (1941) hacen referencia, se han desecado (Alcocer et al., 2000; Alcocer et al., 2002; Ecolero y Alcocer, 2005).

3.7.3. Los lagos alpinos del Volcán Nevado de Toluca

Los lagos cráter El Sol y La Luna se localizan en el cráter del volcán Nevado de Toluca, en las coordenadas 19°06'N y 99°45'W, a 4,200 metros sobre el nivel del mar. La profundidad máxima del El Sol es de 15.0 m, con un área superficial de 237,321 m². La profundidad máxima de la Luna es 10.0 m, con un área superficial de 31,083 m² (Alcocer et al., 2004).

El clima en el cráter es de tundra alta, la temperatura del aire oscila de 8.0 hasta 16.0°C. El Sol y La Luna se clasifican como sistemas polimícticos de alta transparencia. La concentración de oxígeno disuelto indicó niveles de saturación, el potencial de Hidrógeno es ácido, con baja conductividad eléctrica, el nutriente limitante es el fósforo (Alcocer et al., 2004).

Las condiciones hidroquímicas incluyendo pH, salinidad, alta transparencia y altas concentraciones de oxígeno disuelto, que se identifican en El Sol son similares a las encontradas en lagos alpinos. La diversidad florística dentro del lago es superior a la vegetación terrestre (Banderas-Tarabay et al., 1991; Banderas-Tarabay, 1997; Banderas-Tarabay y González, 2002).

3.7.4. Los lagos cráter de los Tuxtlas

La Sierra de los Tuxtlas es una Reserva de la Biósfera localizada al sur de Veracruz (18°20'N, 95°07' W y 18°43'N, 95°25'W), en donde se localizan los lagos cráter Majahual, Chalchoapan, Manantiales, Mogo y Verde, rodeando al volcán San Martín Tuxtla.

Estos ecosistemas acuáticos tienen la característica morfométrica de tipo “*maar*”. Majahual, Chalchoapan y Manantiales son los más profundos (53.0, 43.0 y 36.0 m respectivamente), mientras que Verde y Mogo son sistemas someros con 4.0 m de profundidad (Vázquez, 2007).

Los lagos cráter de Los Tuxtlas, que presentan mayor profundidad se clasifican como sistemas cálido monomíctico, registran una estratificación en el verano y un periodo de circulación en el invierno (Vázquez *et al.*, 2004). Los lagos someros se identifican como sistemas cálido polimíctico, la estratificación es únicamente de algunas horas principalmente en el medio día. La temperatura promedio de la columna del agua varía entre 25.5°C en Chalchoapan y 28.4°C en Verde. Las concentraciones de oxígeno disuelto son altas en la superficie, mientras que en el fondo se registran condiciones de anoxia en todos los lagos (Vázquez *et al.*, 2007).

Los análisis de las características químicas indicaron bajos valores en la conductividad eléctrica lo que sugiere la posibilidad de considerar a este lago como diluido. En todos los lagos, la alta concentración de sodio podría ser debido a la alta prevalencia de rocas alcalinas en Los Tuxtlas, En todos los lagos, el orden de importancia de los cationes fue: Na > Ca > Mg > K.

El análisis de estado trófico indica que estos sistemas acuáticos se ubican en las categorías de mesotrófico a eutrófico, con altas concentraciones de nitratos, fosfatos, amonio y clorofila-a (Vázquez *et al.*, 2004; Vázquez *et al.*, 2007).

El lago cráter Chalchoapan registra una comunidad fitoplanctónica dominada por algas azul-verdes, principalmente *Microcystis aeruginosa*; en Verde y Mogo se identifica una mayor diversidad en la composición de especies, incluyendo diatomeas, algas verdes y algas azul-verdes (Vázquez *et al.*, 2005).

Caballero *et al.* (2006) desarrollaron una secuencia sedimentaria para obtener registros paleolimnológicos en el lago cráter Verde, encontrando que las cenizas que marcan la base de los sedimentos corresponde a la erupción del volcán San Martín en el año de 1964, con la identificación de diatomeas sedimentarias por estratos sedimentarios.

3.7.5. La Isla Isabel

La isla Isabel es un Parque Nacional de origen volcánico ubicado en el extremo meridional del sistema de llanuras que forman la plataforma continental del océano Pacífico, a 32.0 km de las costas del estado de Nayarit (Ruiz, 1977) entre las coordenadas 21°52'N y 105°54'W (Alcocer *et al.*, 2007).

En la esquina sureste de la isla existe un lago cráter de forma casi circular con un diámetro de 270 m y una profundidad de 18.0 m. El lago es altamente productivo favorecido por las excretas de *Fragata magnificens* que anida en el bosque del margen del lago cráter (Alcocer *et al.*, 2007).

El sistema se clasifica como meromíctico, presenta una disminución gradual de la temperatura hasta el fondo. Asociado a la descomposición de la gran cantidad de materia orgánica que se deposita en el fondo del lago, la falta de circulación o mezcla completa impide que se oxigenen las capas profundas del lago; a medio metro de profundidad la concentración de oxígeno disuelto alcanza niveles de sobresaturación de 145%, disminuyendo drásticamente para volverse anóxico a partir de los 2.5 m de profundidad. El perfil de conductividad eléctrica indica altos valores (113.0 mS/cm), con la formación de tres haloclinas en la columna de agua, el potencial de Hidrógeno es de carácter básico (9.3) en la superficie oxigenada hasta ligeramente ácido en el fondo con descomposición bacteriana (Alcocer *et al.*, 1998; Alcocer *et al.*, 2007).

Las concentraciones de nutrientes son ampliamente elevadas, inducidas por la gran cantidad de excretas que aportan las aves al sistema. Todas las formas de nitrógeno presentan concentraciones más elevadas en el estrato anaerobio, resultando extraño que la concentración de nitratos (10.3 mg/L) sea mayor que la del amonio (5.2 mg/L) en la zona anaerobia. Las concentraciones de fósforo soluble reactivo también son elevadas en toda la columna de agua (Alcocer *et al.*, 1998; Alcocer *et al.*, 2007).

3.7.6. La Alberca de Los Espinos

Rendón *et al.* (2007), describieron el lago cráter denominado La Alberca de Los Espinos. El sistema acuático se localiza en el municipio de Villa Jiménez, Michoacán en las coordenadas de la proyección cartográfica Universal Transversal de Mercator (UTM)

1210039 E, 220373 N, a una altura de 2,020 metros sobre el nivel del mar, dentro del Eje Neovolcánico Transversal.

La Alberca Los Espinos presenta un área superficial de 8.83 hectáreas, posee una forma ligeramente convexa de tipo “micro”. La profundidad máxima del lago es de 31.5 m con pendientes abruptas. Los atributos ópticos indican la presencia de partículas inorgánicas que afectan los procesos de absorción y dispersión de la luz, compitiendo con las células fotosintéticas por la captación de la luz solar.

La temperatura promedio en la columna de agua es de 16.8°C, con una discontinuidad térmica acentuada a los 15.0 metros de profundidad. El potencial de Hidrógeno (8.3) indica que se trata de un sistema ligeramente alcalino, de baja salinidad (0.6 g/L). Las concentraciones de oxígeno disuelto en el agua superficial registran valores de saturación, disminuyendo a concentraciones de 0.1 mg/L a partir de los 22.0 metros de profundidad. Las bajas concentraciones de fosfato soluble (11.39 µg/L) sugieren que el fósforo total se encuentra disponible en formas diferentes al fosforo soluble. Los procesos de nitrificación en la comunidad bacteriana son eficientes con la utilización constante del nitrato por parte de la comunidad del fitoplancton.

3.7.7. La Alberca de Tacámbaro

El lago cráter La Alberca de Tacámbaro se encuentra situado en una región de transición fisiográfica y climática del estado de Michoacán. Su cercanía a la Escarpa Limítrofe del Sur y su clima de transición de los templados sub húmedos a climas cálidos y semiáridos ha favorecido la existencia de una amplia diversidad de especies biológicas de interés regional, como es el caso de las especies de peces *Poecilia sphenops* y *Poeciliopsis balsas*, la presencia de especies forestales del genero *Pinus*, *Quercus*, *Ceiba* sp, *Enterolobium cyclocarpum* y *Cordia eleagnoides*, así como una amplia distribución de fauna silvestre (Zubieta y Criollo, 2006).

La Alberca de Tacámbaro tiene un área superficial de 8.2 hectáreas y una profundidad máxima de 28.0 m, se clasifica como un sistema cálido monomítico, de baja salinidad y aguas superficiales bien oxigenadas con un fondo permanentemente anóxico (Medrano, 2007).

3.7.8. La Alberca de Teremendo

Con relación a los estudios asociados a la limnología del lago cráter La Alberca de Teremendo no existen hasta el momento registros que proporcionen alguna información básica sobre la estructura y las relaciones funcionales en este valioso ecosistema acuático. La mayor parte de la documentación disponible se refiere a la degradación de la tierra por prácticas productivas poco compatibles en la zona de estudio (Enfield y O'Hara, 1999).

IV. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Ubicación geográfica

El lago cráter Alberca de Teremendo se localiza al noroeste del municipio de Morelia en el estado de Michoacán (Figura 3), dentro de la región hidrológica No. 12 "Lerma-Santiago" (Correa *et al.*, 2003), limitada por las coordenadas 19°45' latitud norte y 101°25' longitud oeste, a una altitud nominal de 2,100 msnm.

4.2. Fisiografía

La región donde se localiza el lago cráter La Alberca de Teremendo pertenece a la vertiente sur de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano, el cual atraviesa el país casi en línea recta sobre el paralelo 19 de latitud norte a través de la gran falla Clarión. Esta provincia está integrada por grandes cadenas montañosas de origen tecto-volcánico con amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arenas y cenizas y otras formaciones de origen volcánico que se encuentran dispersas en extensas llanuras (Correa *et al.*, 2003 e INEGI, 1985a).

Específicamente el área de estudio se ubica en la subprovincia Neovolcánica Tarasca, caracterizada por un vulcanismo reciente del Plioceno-Cuaternario. La mayor parte de su extensión se clasifica fisiográficamente como sierra volcánica con llanuras, con una área estimada de 20,000 km² en donde se localizan más de 3,000 volcanes, los cuales en su mayoría son cineríticos que se caracterizan por la expulsión de ceniza en una sola fase eruptiva, son basálticos y se encuentran a una elevación promedio de 2,000 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 1985a).

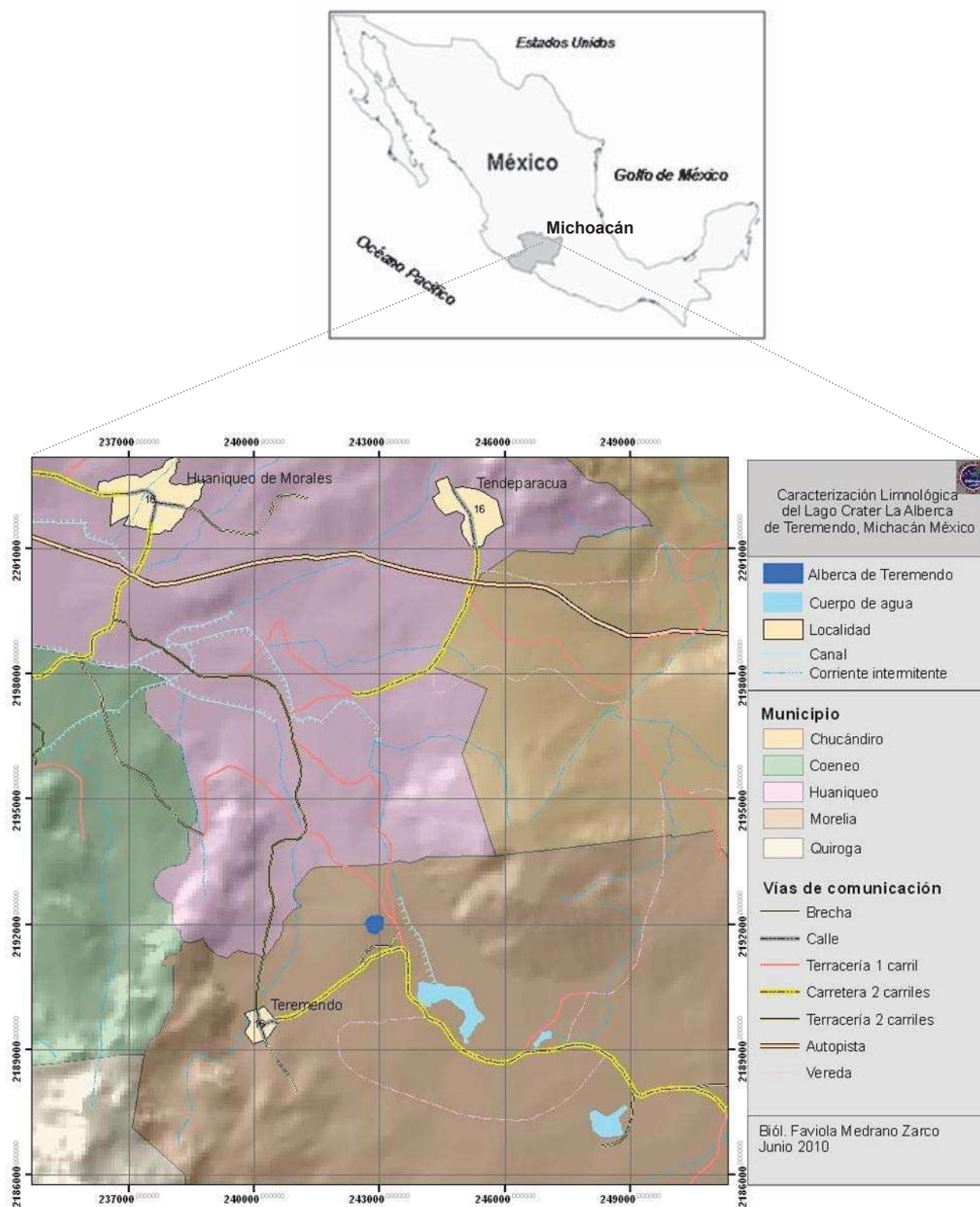


Figura 3. Localización geográfica del área de estudio

4.3. Geología

El lago cráter La Alberca de Teremendo presenta una litología de origen cuaternario. El tipo de roca corresponde a rocas basálticas y brecha volcánica basáltica, con un espesor de las capas masivo, la permeabilidad es alta y el fracturamiento moderado. En las partes bajas se encuentran depósitos de aluviones desarrollados por la acumulación de arcillas que son transportados por el agua desde las partes más altas (INEGI, 1982b).

4.4. Suelos

Los tipos de suelo para la zona de estudio es Litosol más Feozem Háplico de textura media y la fase física es lítica (INEGI, 1982c).

El suelo tipo litosol constituye la etapa primaria de formación del suelo, es muy delgado con un espesor menor de 10 cm, se encuentra sobre un estrato duro y continuo, predominando la materia orgánica. Se presentan en pendientes altas, lo cual impide su explotación económica.

El suelo denominado feozem háplico se caracteriza por tener una superficie oscura y suave, con abundante materia orgánica y nutriente que favorecen las actividades agropecuarias.

4.5. Hidrología

La Alberca de Teremendo es una pequeña cuenca cerrada localizada en el límite de las subcuencas Río Lerma Chapala (12C) y Lago de Pátzcuaro-Cuitzeo y Laguna de Yuriria (12E), pertenecientes a región hidrológica RH12 Lerma-Chapala-Santiago. No se localiza ninguna corriente superficial de importancia hacia el lago cráter (INEGI, 1999, ERIC III, 2005).

4.6. Vegetación

En el área de estudio se localiza una comunidad forestal densa a moderadamente densa de vegetación secundaria establecida a raíz de la destrucción del bosque tropical caducifolio. Entre los elementos dominantes se encuentran *Acacia pennatula* (tepalme), *A. farmeciana* (huizache) y *Opuntia* spp (nopal).

4.7. Aspectos socioeconómicos, históricos y culturales

La comunidad denominada La Alberca pertenece a la tenencia de Teremendo municipio de Morelia, en donde también se incluyen las comunidades de Aracurio, Tarehuicho, Tzintzamacato Grande, Tzintzamacato Chico, San Antonio Carupo, Coro Grande, Tiristarán, El Fresno, Asiento de Piedra, La Luz, San Pedro Chicácuaro, Zajo Grande, Zajo Chico y Jasso.

La palabra “*tere mendu*” o “*teremen*” significa en lenguaje P’urhépecha “tierra fértil” o donde hay hojas podridas. Los primeros habitantes fueron los P’urhépechas, quienes se establecieron al pie del “chspirjuato” (Cerro de la Lumbre).

En el año de 1200, los sobrinos del monarca Tariácuri, Hirepan, Tanganxuan e Hiquingare, conquistaron los pueblos de Teremendo, Huaniqueo y Tiristarán, para incorporarlos al imperio de Tariácuri.

En el “Cerro de la Lumbre”, se han encontrado algunos vestigios del pasado prehispánico, sin embargo, en la ladera del cerro “El Caracol”, existe una zona arqueológica donde se asume que se realizaban actividades de fundición de metales.

En el año de 1563 se fundó el actual del pueblo de Teremendo por Vasco de Quiroga, quien le asignó a la comunidad como industria la curtiduría de pieles. También, introdujo la imagen de “La Purísima Concepción” elaborada con pasta de caña.

En el año de 1787 se formaron las primeras 27 jurisdicciones de Michoacán, incluyendo Jasso y Teremendo, teniendo como cabecera a la intendencia de Valladolid (hoy Morelia).

El párroco de Teremendo, don José Guadalupe Salto Bermúdez es considerado como uno de los primeros líderes de la lucha por la independencia, conocido como “*El cura guerrillero de La Alberca*”. Participó en el ataque sobre la ciudad de Valladolid que emprendieron los insurgentes en junio de 1811. Durante los meses de abril y mayo de 1812, el párroco de Teremendo combatió para la causa de la independencia en el cráter de La Alberca. De la misma manera, La Alberca, fue el sitio donde el cura Salto Bermúdez se refugió en una cueva para evitar su captura por los soldados del Virrey.

Posteriormente, con el grado de coronel otorgado por el mariscal Luciano Navarrete, se reincorporó a la lucha armada para combatir en Zacapu, Puruándiro y Coeneo.

Finalmente, José Guadalupe Salto Bermúdez fue capturado en una cueva de La Alberca de Teremendo. Fue internado en la correccional de Valladolid, donde se le ejecutó el 9 de mayo de 1812 en el portal de Guadalupe, hoy portal Hidalgo. Hasta su muerte motivó a los indígenas para participar en la lucha.

Actualmente, La Alberca es la localidad número 26 del municipio de Morelia. La población total de La Alberca es de 341 personas, el 50.2% son hombres y el 49.8% son mujeres.

Posee un total de 87 viviendas de las cuales el 39.1 % tienen piso de tierra y el 17.2% están conformadas de una sola habitación. El 96.5% tiene acceso a la luz eléctrica, mientras que el 17.2% posee instalaciones sanitarias. La estructura económica permite que el 31% de las viviendas tengan una lavadora y el 77% una televisión y únicamente el 1.5 % de los habitantes de La Alberca tienen derecho a los servicios del Instituto Mexicano del Seguro Social (INEGI, 2005).

La principal actividad productiva es la agricultura de temporal donde se cultiva maíz, frijol, lenteja, trigo y calabazas. En el interior del cráter los principales cultivos son la hortaliza y el aguacate criollo. El lago cráter es utilizado como fuente de agua potable para la comunidad de La Alberca, además de ser una zona para la recreación campestre.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Clima

Para identificar el tipo de clima que predomina en la zona de estudio se realizó una investigación documental de los registros de precipitación y temperaturas almacenados durante los últimos 23 años en la estación de Teremendo, ubicada a 3.3 km del lago cráter La Alberca de Teremendo, a una elevación de 2,350.0 msnm en las coordenadas UTM Z14 0240389 m E y 2189405 m N del Servicio Meteorológico Nacional.

Con la información obtenida se determinó el tipo de clima de acuerdo con los criterios sugeridos por García (1988) para la clasificación del clima en el territorio nacional.

5.2. Morfometría lacustre

El reconocimiento morfométrico del área de estudio se llevó a cabo a partir del diseño de un programa de ecosondeo, el cual consistió en transectos, paralelos a la longitud máxima y en intersecciones en ángulo recto. Los instrumentos utilizados fueron un geoposicionador satelital “Garmin” modelo V Plus, una ecosonda graficadora en papel “Furuno” modelo 808 equipada con un transductor de 200 KHz y una ecosonda “Garmin” modelo GPSMap 235 equipada con sistema de GPS y un transductor de 200 KHz. Ambas ecosondas fueron calibradas con una sonda manual graduada en centímetros durante toda la campaña batimétrica. Los puntos de registro fueron obtenidos en unidades de la proyección Universal Transversal Mercator (UTM) a partir de la cuadrícula de referencia cartográfica WGS 84 equivalente a ITRF 92 y las profundidades en metros.

La construcción del mapa batimétrico, la determinación de 21 parámetros morfométricos y la precisión de la campaña batimétrica fueron evaluadas siguiendo los criterios propuestos por Håkanson (1981). Los puntos cartográficos en la proyección UTM se incorporaron a un programa digital para generar un mapa batimétrico en formato vectorial, el cual fue verificado mediante un ejercicio de enlace de isobatas en papel milimétrico.

Considerando que la confiabilidad de la información depende de la precisión del mapa batimétrico al cual a su vez depende de la intensidad y la calidad del estudio hidrográfico, se aplicó el modelo de optimización y valor de la información propuesto por Håkanson (1981) mediante la relación:

$$I = I' * I''$$

Donde:

I = Valor informativo del mapa batimétrico. Esta es una cifra entre 0.0 y 1.0, lo que significa que cuando se obtiene el valor de 1.0 la información contenida en el mapa batimétrico es completa y correcta.

I' = Área correctamente identificada en el mapa batimétrico. El valor de I' se encuentra en el intervalo de 0.0 a 1.0. Cuando el valor de I' = 1.0, entonces la totalidad de las líneas de contorno o isobatas se encuentran correctamente ubicadas y trazadas en el mapa. En este caso existe un área de error (E) que equivale a 0.0. El área de error (E) se define por:

$$I' = 1 - E$$

I'' = El número informativo el cual depende del número de líneas de contorno o isobatas (n) en el mapa batimétrico. El valor de I'' se encuentra en el intervalo de 0 a 1. Este valor describe el hecho de que un mapa con pocas líneas de contorno ofrece menos información acerca de la topografía del fondo en comparación con un mapa elaborado con mayor número de líneas de contorno o isobatas.

Para determinar los valores de I' e I'' se utilizaron las siguientes ecuación propuestas por Håkanson (1981):

$$I' = \frac{1}{a} \left[a - 0.14 * Lr * F^2 * \sqrt{\frac{1}{n+2}} * \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i} \right]$$

$$I'' = \frac{e^{0.4*n} - 1}{e^{0.4*n} + 0.02}$$

Donde:

a = área del lago en km²

Lr = medida de la intensidad de sondeo, es decir, la distancia en kilómetros entre transectos paralelos. Un valor de Lr menor a 1.0 km es adecuado para lagos pequeños.

F = es el valor de desarrollo de costa normalizado. Este es un parámetro adimensional que indica la irregularidad tanto de la línea de costa como del fondo del lago.

a_i = área total (área acumulada) en km², dentro de los límites de una línea de contorno o isobata.

n = número de líneas de contorno o isobatas en el mapa batimétrico.

e = Logaritmo de base natural $e = 2.718$

5.3. Balance hidrológico

Las posibles variaciones en el volumen de agua en el lago cráter La Alberca de Teremendo pueden ser asociados a efectos del clima mediante la estimación de un balance hidrológico local.

Se obtuvieron los registros meteorológicos de precipitación y evaporación durante el año 2009 de la estación de Teremendo, ubicada a 3.3 km del lago cráter La Alberca de Teremendo, en las coordenadas UTM Z14 0240389 E y 2189405 N dependiente del Servicio Meteorológico Nacional.

Los valores mensuales de evaporación y precipitación se incorporaron a una hoja climática y parámetros asociados en formato Excel con base en la metodología propuesta por la FAO (Ortiz, 1984).

Con los valores mensuales de precipitación y evaporación se calculó el volumen de precipitación y evaporación en el área superficial del lago cráter.

El registro de aporte de agua por manantiales se realizó mediante un flujómetro digital.

Durante el año 2009, se registraron mensualmente los niveles de variación superficial del agua mediante el establecimiento de un punto base de registro inicial ubicado en el muro que forma parte del sistema de bombeo de agua potable para la comunidad de La Alberca en las coordenadas UTM Z14 242810m E y 2191773m N. A partir de este punto base se registraron mensualmente los niveles de oscilación superficial y se calculó el volumen de pérdida y ganancia de agua del sistema.

A partir de la información obtenida se determinó el volumen observado y esperado del lago cráter La Alberca de Teremendo.

El modelo se basa en la ecuación de balance de masa incluyendo a) la tasa de infiltración que fluye hacia el lago, b) los valores iniciales del nivel del lago; c) la precipitación; d) la evaporación; y e) los escurrimientos superficiales. Estas variables afectan el nivel del lago mediante la relación:

$$\text{Nivel del lago} = \text{Nivel del agua inicial} + \Delta V \times (P + F) - (E)$$

Donde:

Nivel inicial = Altitud medida del espejo del lago sobre el nivel del mar (msnm).

P = Precipitación (m)

F = Infiltración

E = Evaporación (m)

La infiltración se determino asumiendo un porcentaje de infiltración del 8% sobre el área de captación (Ortiz, 1984).

5.4. Óptica

La determinación de los atributos ópticos del sistema lacustre se realizó mediante registros de la transmitancia e irradianza de la luz con los diferentes espectros cromáticos incluyendo el azul, verde, rojo y luz blanca.

Para los registros de radiación solar bajo el agua y radiación solar ambiental se empleó un irradiómetro marca “Kahlisico Underwater Irradiameter” No. 268WD305. Bajo el agua se registraron los espectros visibles de la luz blanca, roja, azul y verde.

Los valores de irradianza solar se obtuvieron inmediatamente debajo de la superficie del agua y a intervalos de un metro de profundidad hasta la atenuación completa de la luz.

Los valores de irradianza solar se obtuvieron inmediatamente debajo de la superficie del agua y a intervalos de un metro de profundidad hasta la atenuación completa de la luz.

Los registros de luz se realizaron mensualmente iniciando en diciembre del 2008 y finalizando en noviembre del 2009, bajo condiciones atmosféricas favorables, incluyendo

la hora del día en que se presentó la mayor incidencia solar, sin presencia de nubes y ausencia de oleaje.

Con la información de irradianza registrada en campo, se estimó el coeficiente de atenuación vertical de la luz solar (**Kd**) utilizando la relación obtenida por la ley Beer-Lambert propuesta por Kirk (1983).

$$\ln Ed(z) = -Kdz + \ln Ed(0)$$

Donde:

Ed(z), Ed(0) = Valores de irradianza solar descendente a una profundidad (z) expresada en metros y aquella medida inmediatamente debajo de la superficie del agua (0) respectivamente (mW/cm²)

Kd = Coeficiente de atenuación vertical obtenida por regresión lineal de $\ln Ed(z)$ con respecto a la profundidad (m)

La transmitancia de luz se registró empleando un transmisómetro digital marca “Kahlsico Digital in-situ Transmittance Meter” No. 269WA170 con 0.20 m de distancia entre la lámpara de luz y la fotocelda de recepción. Los registros se realizaron en la superficie del agua y a cada metro de profundidad hasta que el porcentaje de transmitancia fuera menor al 1.0 %

Con los registros de transmitancia obtenidos en campo, se estimó el coeficiente de atenuación horizontal de luz (**c**) de acuerdo a Jerlov (1976) utilizando la expresión:

$$c = - \frac{\ln (1 - C)}{r}$$

Donde:

c = coeficiente de atenuación de luz (m)

C = atenuación, $1 - C = T$ (transmitancia de luz la cual es proporcionada por el transmisómetro)

r = distancia entre la lámpara y la foto celda (m), calibrada a 0.2m

En forma simultánea a los registros obtenidos de los instrumentos de medición de luz, se realizaron lecturas del disco de Secchi (**Zsd**) para obtener la visibilidad del sistema acuático.

5.5. Balance de Calor

Se efectuaron muestreos mensuales durante el año de 2009, donde se realizaron perfiles verticales de oxígeno disuelto (mg/L) y de temperatura (°C) con intervalos de medición de un metro de profundidad de superficie a fondo en la parte más profunda del lago. La temperatura se registro mediante el empleo de un termómetro marca “Taylor”, calidad ASTM con una escala graduada de temperatura de -8.0 a 32.0°C, mientras que para estimar la concentración de oxígeno disuelto se empleó la técnica de Winkler modificada a la azida de sodio.

Los perfiles verticales de temperatura y oxígeno disuelto se graficaron en papel milimétrico para expresar con isopletras los valores uniformes (Wetzel y Likens, 2000).

La temperatura promedio del lago, incluyendo el volumen de cada estrato, se estimo de acuerdo a lo sugerido por Cole (1994).

Para estimar la densidad del agua en el mes con mayor diferencia vertical, se aplicó la ecuación de estado propuesta por Eckart (1958), donde se consideran como parámetros la temperatura y salinidad del agua.

$$\rho = \frac{(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3s)}{[(1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2) - (3.8 + 0.01T)s + 0.698(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3s)]}$$

Donde:

T = Temperatura (°C)

S = Salinidad (g/L)

La capacidad anual de almacenamiento de calor se realizó mediante la propuesta de Birge y Juday (1942), Birge, 1915 y Hutchinson, 1957 (en: Cole, 1994; Wetzel y Likens, 2000; Wetzel, 2001). El criterio integra la cantidad total de calor necesaria para elevar la

temperatura del agua, desde la mínima temperatura registrada durante el invierno hasta el valor máximo de verano, de acuerdo con la expresión:

$$A_z (t_{s,z} - t_{w,z})$$

Donde:

A_z = Área del estrato (cm^2) a una profundidad z

$t_{s,z}$ = Aporte de calor estival = Temperatura de verano ($^{\circ}\text{C}$) en la columna de agua a una profundidad z

$t_{w,z}$ = Aporte de calor invernal = Temperatura de invierno ($^{\circ}\text{C}$) en la columna de agua a una profundidad z

Para estimar la capacidad anual de almacenamiento de calor se graficó, en papel milimétrico, la profundidad (z) en el eje vertical, mientras que la relación del producto de $A_z (t_{s,z} - t_{w,z})$ en el eje horizontal. La integral fue determinada contando cuadros de la grafica. La suma obtenida se divide entre el área superficial del lago (A_0). Lo anterior derivado de que el calor que el lago adquiere o libera es regulado por procesos asociados a la superficie del sistema.

Debido a que la profundidad se registró en centímetros y la capacidad calorífica del agua en todas las temperaturas es determinada como 1 g cal cm^3 , la integral de la curva estará definida en calorías-gramo por cm^2 .

El contenido total de calor (almacenamiento) del agua en cualquier fecha de muestreo y a diferentes profundidades se determinó a partir de los criterios propuestos por Wetzel y Likens (2000):

$$\theta_w = \sum_{z_0}^{z_m} t_z A_z h_z$$

Donde:

θ_w = Contenido de calor del agua del lago en calorías

z_0 = Superficie del lago

z_m = Profundidad máxima del lago

t_z = Temperatura media en $^{\circ}\text{C}$ de una capa de agua de la unidad de espesor h_z (en cm), con el punto medio a una profundidad z

A_z = Área en la profundidad z en cm^2

El contenido de calor por lo general se expresa en unidad de área base: θ_w / A_0 , en cal/cm².

A_0 = Área superficial en cm²

Como el calor específico del agua es 1 cal/g-°C, y dado que un 1 cm³ de agua tiene una masa de alrededor de 1 g, fue conveniente utilizar un área constante de 1 cm² en los cálculos del contenido de calor para el agua. El espesor o profundidad (cm) por el área (cm²) da como resultado cm³, entonces se puede multiplicar directamente por la temperatura en °C para obtener contenido calórico¹.

5.6. Hidrodinámica

La hidrodinámica del sistema lacustre se obtuvo mediante el recorrido y medición de tres veletas de corriente, las cuales tuvieron una dimensión de 20.0 cm de ancho por 30.0 cm de alto a una profundidad de 0.5 y 2.0 metros.

Las veletas de corriente se depositaron en el centro del lago en donde se registró el tiempo y coordenada (UTM) de inicio, para ser observadas en desplazamiento en una embarcación a una distancia de 5.0 m para evitar movimientos del agua en el área circundante. El monitoreo se realizó en intervalos de tiempo de 30.0 min. La dirección y velocidad del viento se registraron por medio de una brújula de navegación marca "Suntu" y un anemómetro de campo "Dwyer".

Posteriormente, las posiciones geográficas de los diferentes recorridos de las veletas se trazaron en el mapa batimétrico, para estimar la dirección y distancia recorrida.

A partir de estos registros se determinó la velocidad, expresada como una magnitud física de carácter vectorial que expresa el desplazamiento de un objeto por unidad de tiempo:

¹ J = 1 g cal * 4.1862

1 g cal = 1 J * 0.2389

$$V = D / T$$

Donde:

V = Velocidad = Velocidad de corriente

D = Distancia = Distancia recorrida por la veleta

T = Tiempo = Tiempo empleado en el recorrido de la veleta

Finalmente, se elaboró un mapa general para representar los patrones de circulación del agua en el lago cráter (Chacón, 1993).

5.7. Frecuencia de muestreo de las variables fisicoquímicas del agua y sedimento

Se realizó un ciclo anual con intervalos de muestreos de un mes, iniciando en el mes de noviembre de 2008 y finalizando en diciembre de 2009. Se establecieron cinco estaciones de colecta, incorporando las diferentes áreas de representación morfométrica del lago cráter (Figura 4) (Tabla 2).

Tabla 2. Localización y descripción de la estaciones de colecta

ESTACIONES DE COLECTA	COORDENADAS (UTM)	PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN
E1	0241706 m E 2125814 m N	6	Estación cercana la bomba que suministra agua potable a la comunidad La Alberca
E2	0241507 m E 2125658 m N	11	Estación más profunda
E3	0241606 m E 2125953 m N	10	Estación litoral
E4	0241348 m E 2125748 m N	11	Estación ubicada en el centro del sistema lacustre
E5	0241520 m E 2125747 m N	6	Estación que se ubica en el embarcadero

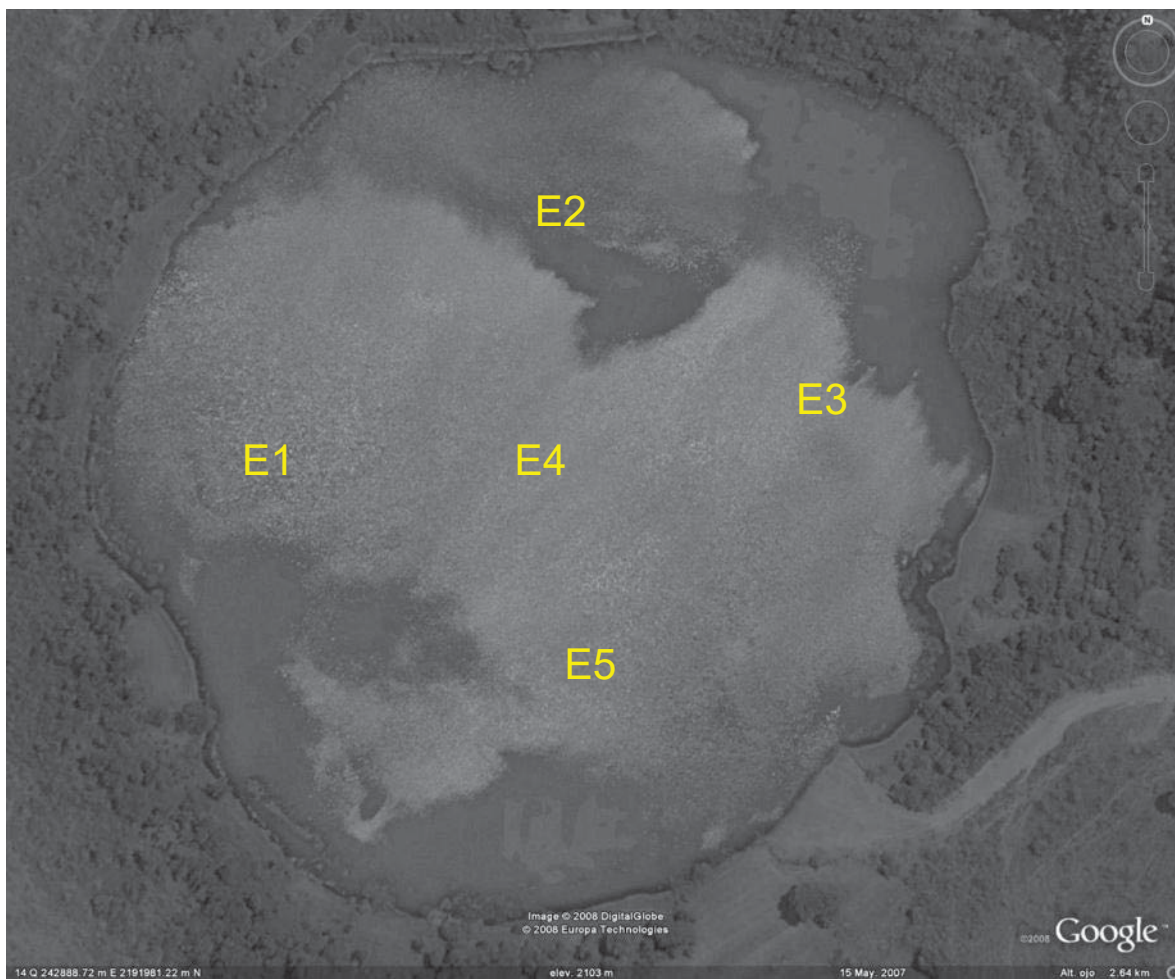


Figura 4. Ubicación de las estaciones de colecta

5.8. Registros de campo

En cada estación de muestreo se registraron las variables fisicoquímicas y se obtuvieron muestras de agua y sedimento. En las estaciones E2, E3 y E4, los muestreos se realizaron en la superficie, en la profundidad media (5.0 m) y en el fondo; mientras que en las estaciones E1 y E5, por la escasa profundidad que presentan, se obtuvieron registros en superficie y fondo únicamente.

En campo, las variables fisicoquímicas que fueron registradas incluyeron, temperatura de agua ($^{\circ}\text{C}$), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$), potencial de Hidrógeno y oxígeno disuelto (mg/L). En la estación de muestreo 2 (E2) se realizó el perfil vertical de oxígeno y temperatura.

La temperatura del agua se registró mediante la utilización de un termómetro marca “Taylor” calidad ASTM en un intervalo de temperatura de -8.0°C a 32.0°C .

Los registros de conductividad eléctrica y potencial de Hidrógeno se obtuvieron mediante el uso de un aparato de campo marca “Conductronic” modelo PC-18. Los registros de potencial de Hidrógeno fueron verificados en el campo con papel indicador graduado con una precisión de 0.5 de unidad.

La determinación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua se realizó con la técnica de Winkler modificada a la azida de sodio (Lind, 1985).

En la estimación de productividad primaria se aplicó la técnica de la botella clara-oscura (Lind, 1985) y posteriormente se estimó en unidades de gramos de carbono fijado por metro cúbico por día ($\text{g C}/\text{m}^3/\text{día}$), que consiste en obtener la concentración inicial y final de oxígeno disuelto del agua en dos medios, uno con iluminación solar (botella clara) y otro sin luz solar (botella oscura), estimados a través de la técnica de Winkler modificada a la azida de sodio. Las muestras de agua fueron obtenidas en la superficie con intervalos de un metro de profundidad hasta el límite de visibilidad medida con el disco de Secchi. La técnica inició por la mañana (9:00 horas) y finalizó después del medio día (14:00 horas).

Las diferencias en la concentración de oxígeno disuelto en el lago cráter se estimaron mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} R &= C_1 - C_2 \\ F &= C_3 - C_1 \\ FB &= (C_1 - C_2) + (C_3 - C_1) \end{aligned}$$

Donde:

C_1 = Concentración inicial de oxígeno disuelto (mg/L)

C_2 = Concentración de oxígeno disuelto de la botella oscura (mg/L)

C_3 = Concentración final en de oxígeno disuelto de la botella clara (mg/L)

R = Actividad respiratoria (mg/L/t)

F = Actividad fotosintética neta (mg/L/t)

FB = Actividad fotosintética bruta (mg/L/t)

Con la estimación en las diferencias de producción de oxígeno disuelto se realizó la conversión de gramos de oxígeno disuelto por metro cúbico por día producido o consumido a gramos de Carbono fijado por metro cúbico por día, asumiendo que un mol de oxígeno es liberado por cada mol de bióxido de carbono que es fijado para la elaboración de biomasa, de acuerdo a la ecuación convencional de la fotosíntesis.

El peso molecular de 44 para bióxido de carbono (CO_2) y de 32 para oxígeno (O_2) permite el uso del factor $44/32 = 1.375$ para convertir el oxígeno producido a partir de bióxido de carbono empleado. De manera similar, el carbono con un peso atómico de 12 comparado con el peso molecular del oxígeno de 32, permite el uso del factor $12/32 = 0.375$ para ser utilizado en las conversiones. Sin embargo, el cociente fotosintético (PQ) no siempre indica que es equivalente a la unidad. Si solamente hexosa fuera el único azúcar que se sintetizara a través de la fotosíntesis, entonces el ratio de O_2/CO_2 definitivamente sería equivalente a 1.0. Sin embargo, el cociente fotosintético tiende a variar, ya que además existen otras moléculas orgánicas que se sintetizan como los ácidos grasos y proteínas (Cole, 1994; Lind, 1985). Por lo tanto, si se asume que el cociente fotosintético es de 1.2 entonces 0.375 g de carbono fijado por metro cúbico es el equivalente de acuerdo con la relación (Cole, 1994; Lind, 1985):

$$1.0 \text{ g de } O_2 \times 0.375 \times 1/1.2 = 0.313 \text{ g de Carbono}$$

Finalmente, las muestras de agua y sedimento se obtuvieron con una botella tipo Van Dorn y una draga tipo Eckman respectivamente, para su análisis inmediato en laboratorio. Las muestras fueron almacenadas en botellas de plástico en condiciones de oscuridad y baja temperatura (4.0°C). Las botellas de plástico fueron sometidas, previamente, a un proceso de lavado utilizando jabón, ácido muriático al 90% y agua tri-distilada, además de etiquetarlas con datos de campo incluyendo estación de colecta, profundidad, lugar, fecha y nombre de la persona que colectó.

5.9. Análisis de laboratorio

5.9.1. Agua

En el laboratorio las muestras de agua se mantuvieron en refrigeración (4.0°C) y en oscuridad hasta su análisis (Lind, 1985). El material necesario para analizar las muestras de agua en laboratorio fue lavado con jabón libre de fósforo, ácido muriático al 90% y agua tri-distilada.

Para proceder al análisis de los parámetros físico-químicos, las muestras de agua se colocaron en condiciones de igualar la temperatura ambiente.

Los parámetros analizados incluyeron Color real del agua, turbidez (unidades Nefelométricas), sólidos suspendidos totales (mg/L), sólidos suspendidos volátiles (mg/L), sólidos totales (mg/L), sólidos totales volátiles (mg/L), sólidos sedimentables (mL/L), bióxido de carbono (mg/L), alcalinidad total (mg/L), carbonatos (mg/L) bicarbonatos (mg/L), dureza total (mg/L), dureza de calcio (mg/L), dureza de magnesio (mg/L), fósforo total (P-PO₄, µg/L), ortofosfatos (PO₄-P, µg/L), amonio (N-NH₄, mg/L), nitritos (N-NO₂, mg/L), nitratos (N-NO₃, mg/L), materia orgánica disuelta (mg/L), materia orgánica no degradable (mg/L), y concentración de clorofila-a (µg/L).

El color real del agua se estimó utilizando agua filtrada con un filtro de fibra de vidrio de 45.0 µm de apertura de malla. Se realizó la lectura de las muestras en un espectrofotómetro, en intervalos de 10 longitudes de onda para determinar los ejes X, Y y Z. Estas lecturas se compararon en el diagrama de cromaticidad para obtener el color real del agua (APHA, 1995).

La turbidez se estimó con el uso de un turbidímetro marca HACH modelo 2100P previamente calibrado con una suspensión de referencia de formalina en unidades nefelométricas (NTU) (Lind, 1985; APHA, 1995).

La concentración de sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos volátiles (SV) se estimó por la técnica gravimétrica (APHA, 1995).

Para los sólidos totales se colocó una muestra de agua de volumen conocido a evaporar en una cápsula de porcelana de peso conocido a una temperatura de 105°C, posteriormente la muestra se enfrió en un desecador para después conocer su peso en una balanza analítica.

En la determinación de sólidos suspendidos totales, las muestras de agua se filtraron al vacío a través de un filtro de fibra de vidrio de peso conocido con un tamaño de malla de 45.0 µm, los filtros con el residuo se secaron a 105.0 °C durante 1.0 hora para posteriormente conocer su peso en una balanza analítica.

Los filtros utilizados para la estimación de los sólidos suspendidos totales se colocaron en una mufla a 180.0 °C durante 30 minutos, posteriormente se obtuvo su peso en una balanza analítica, para determinar la concentración de sólidos disueltos totales

De la misma manera, los filtros empleados para la determinación de sólidos disueltos totales, también, se utilizaron para estimar la concentración de sólidos volátiles. Los filtros se colocaron en una mufla a una temperatura de 530.0°C por una hora.

La estimación la cantidad de materia suspendida o disuelta en el agua se realizó mediante el uso de la siguiente fórmula (APHA, 1995):

$$mgSólidos/L = \frac{(A - B) * 1000}{v}$$

Donde:

A = peso final con el residuo seco (mg)

B = peso inicial del filtro a peso constante (mg)

V = volumen de la muestra (mL)

Los sólidos sedimentables se determinan por la técnica de sedimentación del cono de Imhof (APHA, 1995).

El bióxido de carbono libre en el agua que indica la acidez, se estimó por la técnica volumétrica utilizando una solución titulante de carbonato de sodio (0.054 N) (Lind, 1985).

La alcalinidad total se determinó mediante la técnica volumétrica usando ácido sulfúrico (0.02 N) como solución titulante y verde de bromocresol como indicador. La concentración de carbonatos y bicarbonatos se obtuvo por la relación indirecta entre la alcalinidad total y la reacción al indicador fenoftaleína (Lind, 1985; APHA, 1995).

La dureza total y dureza de calcio se determinaron por la técnica volumétrica empleando la solución titulante de sal disódica del ácido etilendiamino tetra-acético (EDTA, 0.01 M) y los indicadores en polvo Eriocromo negro T y murexida, respectivamente. La dureza del magnesio se obtuvo por el cálculo indirecto de los miliequivalentes de la dureza total y la dureza de calcio (Lind, 1985).

Los parámetros de fósforo total, ortofosfatos, amonio, nitritos y color real del agua fueron analizados mediante técnicas espectrofotométricas con el empleo de un espectrofotómetro marca “Perkin-Elmer” modelo Lambda 10, integrado a un programa UvWinLab.

La concentración de ortofosfato (fósforo reactivo soluble en el agua) se determinó utilizando el reactivo de color compuesto por las soluciones de antimonil potasio tartrato, ácido sulfúrico, molibdato de amonio y ácido ascórbico. La curva de calibración para el espectrofotómetro se realizó empleando la solución estándar de fosfato de potasio dihidrógeno, en donde, 1.0 mL de solución base contiene 1.0 μg de fósforo (P-PO_4). Las concentraciones requeridas fueron de 4, 10, 30, 50, 100, 130, 260, 390, 520, 650, 780 y $\mu\text{g/L}$ (Figura 5), además se utilizó un blanco de agua tri-destilada, a una longitud de onda de 882 nm (Lind, 1985).

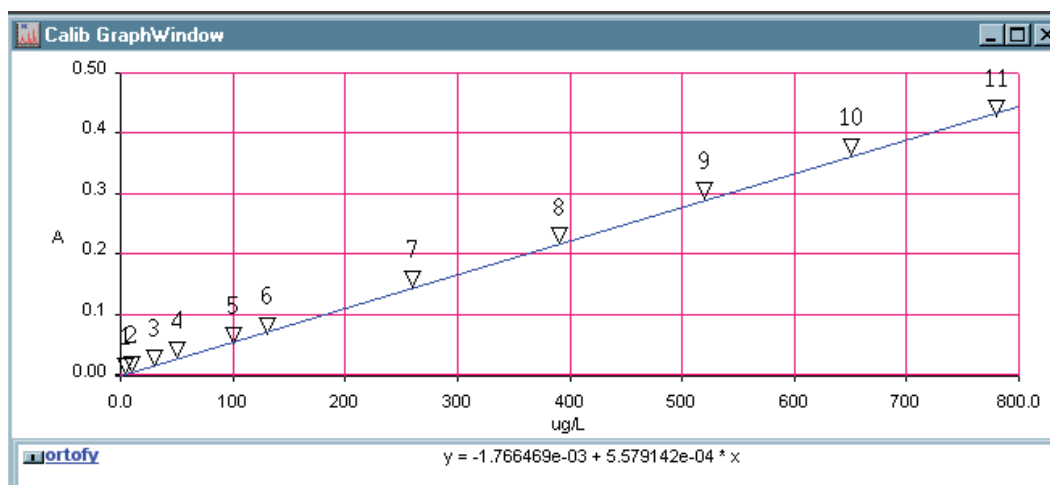


Figura 5. Curva de calibración para ortofosfatos. Coeficiente de correlación: 0.9998

El análisis para obtener la concentración de fósforo total se realizó mediante un proceso de digestión en una autoclave utilizando la solución de persulfato de potasio como digestor. Además de utilizarse el mismo procedimiento para el análisis de ortofosfatos (Lind, 1985). Las concentraciones requeridas para la curva de calibración fueron de 4, 10, 30, 50, 100, 130, 260, 390, 520, 650, 780 y $\mu\text{g/L}$ (Figura 6), además se utilizó un blanco de agua tri-distilada, a una longitud de onda de 882 nm (Lind, 1985).

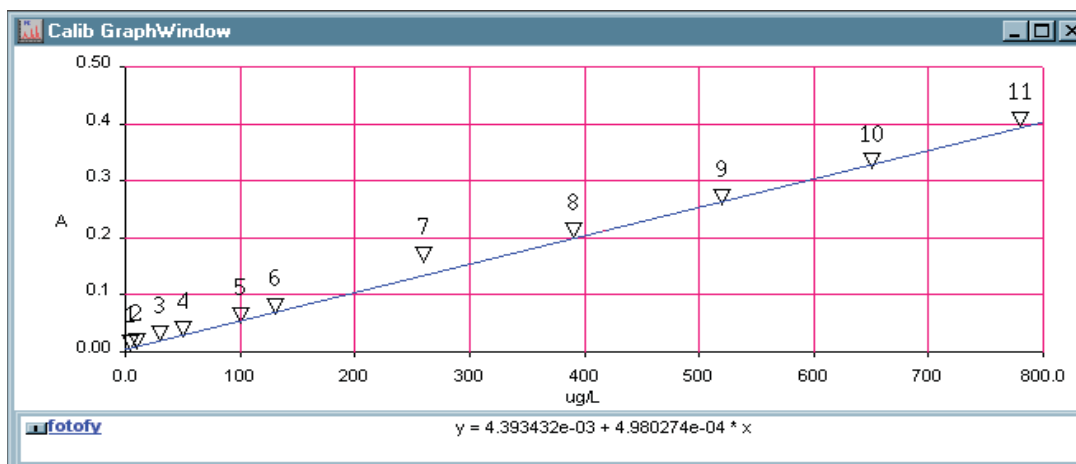


Figura 6. Curva de calibración para fósforo total. Coeficiente de correlación: 0.9983

La curva de calibración para el análisis de amonio se realizó empleando la solución de cloruro de amonio, en donde, 1.0 mL de solución base contiene 0.01 mg de amonio ($\text{NH}_4\text{-H}$). Las concentraciones requeridas fueron de 0,1, 2.5, 5 y 10 $\mu\text{g/L}$ y un blanco de agua tri-

destilada a una longitud de onda de 435 nm (Figura 7). La determinación de amonio se realizó utilizando el reactivo Nessler (APHA, 1995).

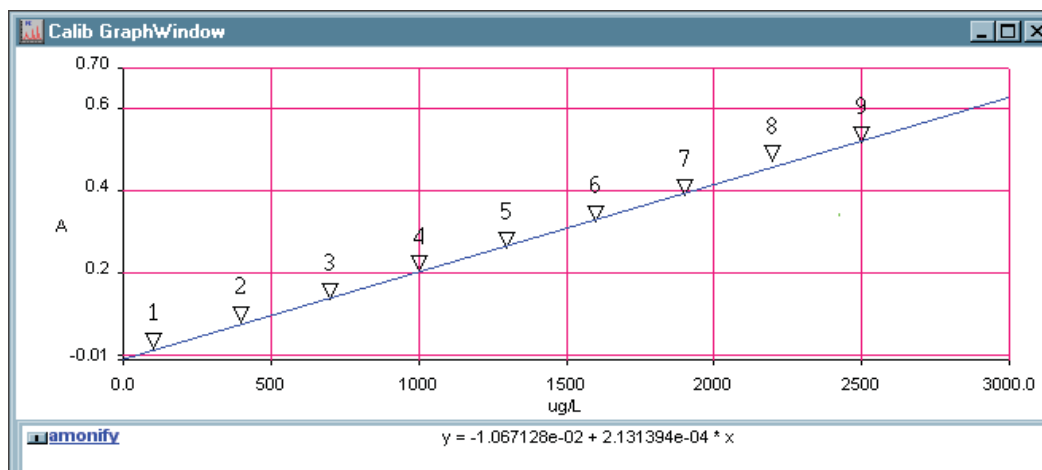


Figura 7. Curva de calibración para amonio. Coeficiente de correlación: 0.9994

La determinación de la concentración de nitritos se llevó a efecto mediante el empleo del reactivo de color formado por ácido fosfórico, sulfanilamida y N-(1-natil)-etilendiamina dihidrocloruro. La curva de calibración se elaboró mediante la solución de nitrito de sodio, en donde, 1.0 mL de la solución base corresponde a 0.500 µg de NO₂-N. Las concentraciones requeridas fueron de 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90 µg/L (Figura 8), además se utilizó un blanco de agua tri-destilada, a una longitud de onda de 483 nm (APHA, 1995).

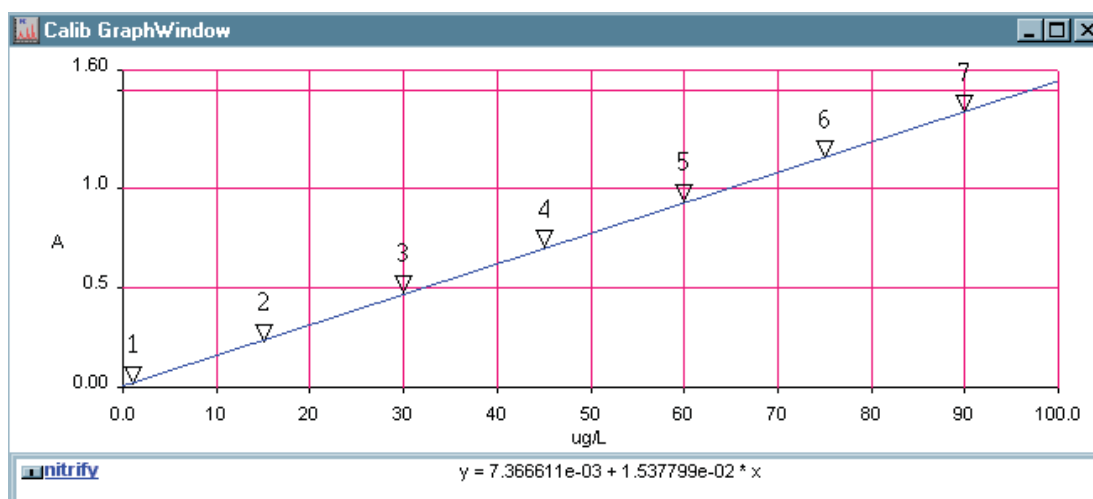


Figura 8. Curva de calibración para nitritos. Coeficiente de correlación: 0.9999

La concentración de nitratos se obtuvo con la técnica de la columna de reducción Cu-Ca (APHA, 1995), en donde una mezcla integrada por 25 mL de muestra mas 75 mL de la solución de NH₄Cl-EDTA pasa a través de la columna para posteriormente aplicarse la técnica para la determinación de nitritos anteriormente mencionada (APHA, 1995).

La concentración de materia orgánica biodegradada y degradada químicamente se determinó por medio de la técnica de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO). Para el análisis de DBO las muestras fueron diluidas en 16.6%, 33.3% y 50% con agua destilada, saturada de oxígeno y nutrientes, las muestras se incubaron a temperatura constante de 20°C por un periodo de cinco días. Las concentraciones de oxígeno inicial y final se estimaron mediante la técnica de Winkler modificada al azida de sodio. La demanda química de oxígeno (DQO) se analizó por la técnica del dicromato de potasio a reflujo abierto. Las muestras de agua se sometieron a calentamiento y reflujo en una solución de ácido sulfúrico con una cantidad en exceso conocida de dicromato de potasio por un periodo de dos horas. Después de la digestión, el remanente de dicromato de potasio que no fue reducido se tituló con sulfato ferroso amoniacal con solución de ferroin como indicador (APHA, 1995).

La determinación de la concentración de clorofila-a se realizó mediante la concentración de pigmentos fotosintéticos, amortiguado con carbonato de magnesio (Holm-Hansen y Riemman, 1978). Las lecturas de absorbancia a las longitudes de onda de 750 y 650 nm fueron obtenidas con un espectrofotómetro marca “Bauch & Lomb” modelo Spectronic 20.

Las concentraciones de clorofila-a se estimaron usando la ecuación sugerida por Jones 1979, (en Chacón, 1993):

$$Chl - a = Ve / Vs * f / e * A$$

Donde:

Chl-a = Concentración de clorofila-a (µg/L)

Ve = Volumen del extracto (mL).

Vs = Volumen de la muestra filtrada (mL).

F = Factor equivalente al recíproco del coeficiente de absorción específica de la clorofila-a multiplicado por 100. Para la clorofila-a en metanol absoluto Holm-Hansen y Riemman

(1978) reportan un coeficiente de absorción específica de 77.91/g-cm. Por lo tanto,
 $1/77.9 * 100 = 12.84$. Factor (f) = 12.84.

e = Longitud de la celda del espectrofotómetro (1.0 cm)

A = absorbancia corregida a 665 nm (absorbancia a 665 nm – absorbancia a 750 nm).

5.10. Sedimentos

Los sedimentos se obtuvieron mediante una draga tipo Eckman (Håkanson, 1983), con capacidad de 4.0 kg.

Los parámetros analizados en sedimentos incluyeron textura, contenido de humedad (%), materia orgánica (%), fósforo total ($\mu\text{g/L}$) y fósforo reactivo soluble ($\mu\text{g/L}$).

La textura de los sedimentos se determinó mediante la técnica de Bouyoucos (Gee y Or, 2002). Una muestra de 50 g se colocó en un matraz de 500mL para agregarle una solución de hexametafosfato de sodio, posteriormente se sometió a un proceso de agitación, después de esto se dejó en reposo para tomar registros durante una hora. Con los resultados obtenidos se determinó la clase textural utilizando el triángulo de texturas para obtener los porcentajes de arena, limo y arcilla contenidos en los sedimentos.

El factor de humedad se determinó siguiendo el criterio de Håkanson (1983) donde la humedad indica el contenido de sólidos del suelo que existen por cada gramo de suelo húmedo. Se colocó una muestra de sedimento de peso conocido a secar en una estufa a una temperatura de 105.0°C, por 24 horas, posteriormente la muestra se enfrió en un desecador para consecutivamente conocer su peso en una balanza analítica.

El sedimento utilizado para la estimación del contenido de humedad se colocó en una mufla a 520.0°C durante 1.0 hora y posteriormente se obtuvo su peso en una balanza analítica, de esta manera se determinó el contenido de materia orgánica (Wetzel, 2000).

Para determinar la concentración de fósforo total y fósforo reactivo soluble las muestras de sedimento se sometieron a un proceso de deshidratación, que consistió en colocar las muestras de sedimento húmedo en una estufa de secado a una temperatura de 50.0°C por espacio de dos días (Folk, 1969). Posteriormente, se realizó un proceso de extracción

mediante el empleo de ácido sulfúrico (0.002 N), las muestras se filtraron y se aplicó el mismo procedimiento empleado para las muestras de agua.

VI. TRATAMIENTO DE RESULTADOS

Los resultados de los análisis de campo y laboratorio fueron tabulados en una primera etapa tanto en modalidad espacial como en la temporal en una hoja de cálculo del programa Microsoft Excel. A partir de estas tablas se aplicó un tratamiento estadístico descriptivo que permitiera identificar los valores promedio, moda, desviación estándar y coeficiente de variación.

Posteriormente, se analizó la posible asociación entre variables dependientes e independientes incluyendo el análisis de correlación y el análisis de regresión para explicar algunos de los procesos del ecosistema.

El programa estadístico utilizado fue Minitab v. 16 (2010).

VII. RESULTADOS

7.1 Clasificación del clima

Los resultados para identificar el tipo de clima regional considerado el periodo de 1982-2005 se presentan en la Tabla 3, de forma mensual con los valores promedio de temperatura y precipitación pluvial. En la Figura 9 se presenta el climograma en donde se puede observar la variación de la de la precipitación, así como la marcha anual de la temperatura en la zona de estudio.

El tipo de clima que se identifica en la zona de Teremendo corresponde a la fórmula:

$$Cb (w_1) (w) (i') g$$

Lo anterior describe a un clima templado subhúmedo con régimen de lluvias de verano. La temperatura del aire manifiesta una variación desde los 13.9°C en el mes de enero, hasta 20.5°C en el mes de mayo. La temperatura media anual se encuentra entre los 18.0 y 22.0°C lo que representa un verano fresco y largo. La precipitación del mes más seco es marzo con 3.9 mm y la del mes más lluvioso es agosto con 216.5 mm, la precipitación anual es de 740.8 mm. El cociente de precipitación sobre la temperatura es de 43.8, sin presencia de canícula. La oscilación de la temperatura es con poca oscilación, es decir, entre 5.0 y 7.0°C y la marcha anual de la temperatura es de tipo ganges.

Tabla 3. Valores promedio anual de temperatura y precipitación

VAR.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
T (°C)	13.9	14.8	17.3	19.1	20.3	19.3	17.4	17.3	16.7	16.2	15.7	15.0	16.9
P (mm)	15.0	5.1	3.9	7.3	26.0	114.6	172.9	216.5	107.7	53.5	12.1	6.2	740.8

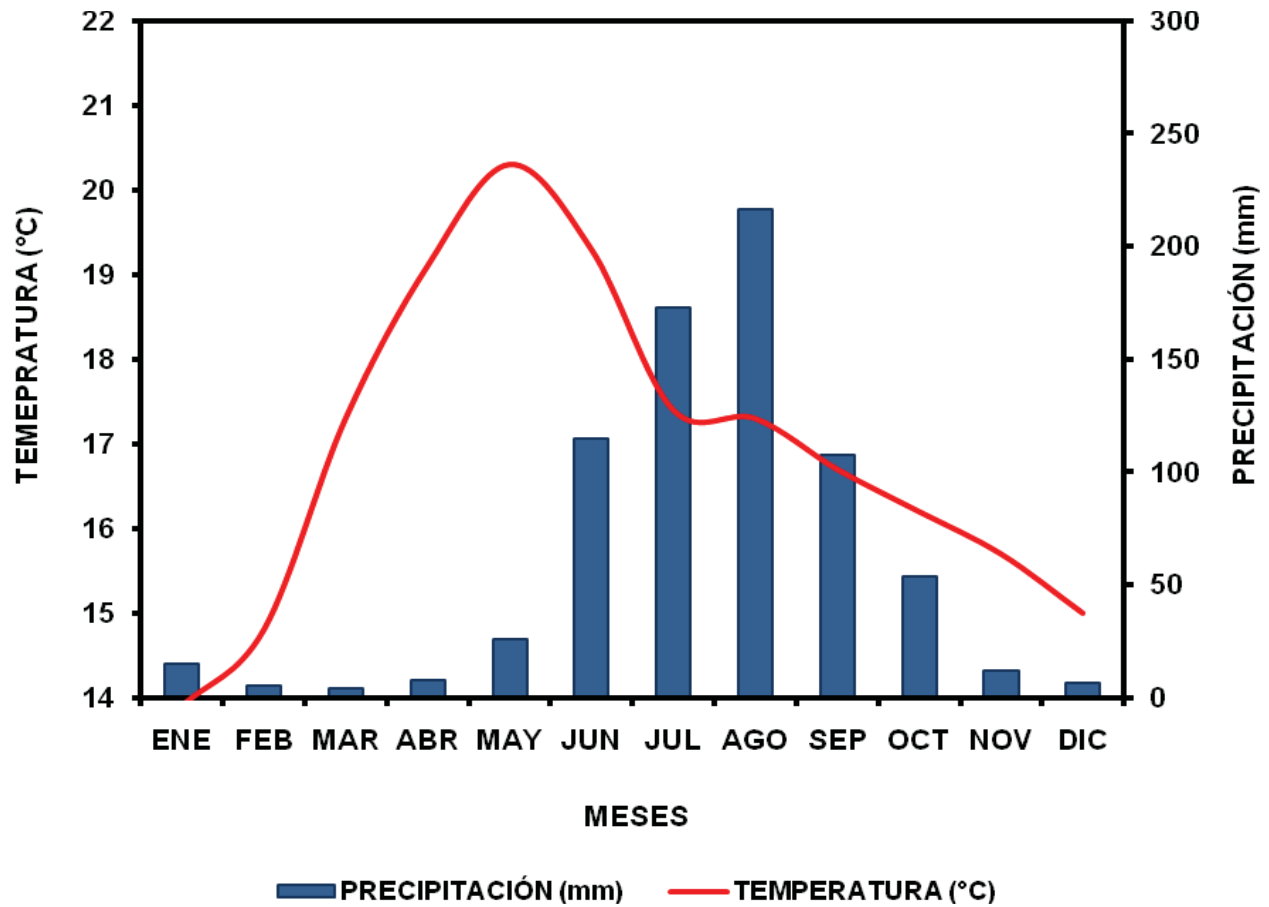


Figura 9. Climograma (1982-2005) de la estación del Servicio Meteorológico Nacional N° 16254 de la población de Teremendo ubicada a 2350 msnm.

7.2. Morfometría

Se realizaron 15 transectos con una longitud total de 4.36 km. La Figura 10 presenta el mapa batimétrico obtenido de la campaña de sondeo realizado en campo, a partir del mapa base elaborado en papel milimétrico a una escala 1:4,000. El intervalo de las isobatas o líneas de contorno es de 1.0 m.

El área correctamente identificada en el mapa batimétrico (I') corresponde a 0.99, el número informativo (I'') del cual depende del número de líneas de contorno o isobatas en el mapa batimétrico fue de 0.98. El valor informativo del reconocimiento morfométrico fue de 0.98.

Los resultados del estudio de morfometría lacustre del lago cráter La Alberca de Teremendo se presentan en la Tabla 4. Estos resultados indican que la forma del lago cráter es circular, la profundidad máxima registrada es de 11.0 m ubicada en el centro del lago cráter en las coordenadas UTM Z14 0242857m E y 2192004m N, mientras que la profundidad media estimada fue de 6.1 m. El área total estimada del vaso lacustre es de 0.1636 km² lo que es equivalente a 16.4 hectáreas de extensión total superficial con una longitud de costa de 1.56 km. El volumen total estimado aplicando la ecuación parabólica sugerida por Håkanson (1981) es de 1.0034 Mm³.

La geometría del eje mayor se encuentra orientada en dirección NE-SO con una longitud máxima de 0.47 km, mientras que la amplitud máxima fue de 0.45 km en orientación de N-S. El desarrollo de volumen estimado fue de 1.68, el desarrollo de costa fue de 1.08, mientras que la rugosidad del fondo lacustre fue de 1.53.

La curva hipsográfica directa fue empleada para la estimación de área acumulada en cada profundidad del lago cráter La Alberca de Teremendo, además se identifica el volumen por capa de agua en intervalos de 1.0 m de profundidad (Figura 11).

De la misma manera, mediante el empleo de la curva hipsográfica porcentual (Figura 12) fue posible estimar la profundidad al 25.0% o primer cuartil que fue de 7.6 m, la profundidad mediana o de segundo cuartil que fue de 6.5 m y la profundidad al 75.0% del área o del tercer cuartil de 4.0 m.

Como se observa en la curva hipsográfica relativa (Figura 13), el sistema presenta dos puntos de inflexión en la parte inferior de la curva, lo que sugiere de acuerdo a los criterios propuestos por Håkanson (1981) un lago es un sistema tipo "*Lineal micro*" (*Lmi*)

La Figura 14 ilustra el transecto batimétrico obtenido directamente de la ecosonda graficadora. El transecto fue de 432.0 m de longitud en dirección de norte a sur, partiendo de las coordenadas geográficas de la proyección UTM 0242900m E y 2192230m N, finalizando en las coordenadas 0242950m E y 2191800m N. En este diagrama es posible observar la irregularidad del fondo así como la pendiente del sistema. El perfil batimétrico presenta pendientes abruptas en los primeros seis metros de profundidad, mientras que entre los 7.0 y 11.0 m la pendiente disminuye, presentando un área plana o semejante a un plato. En un área pequeña de 321.0 m² se identifica la máxima profundidad.

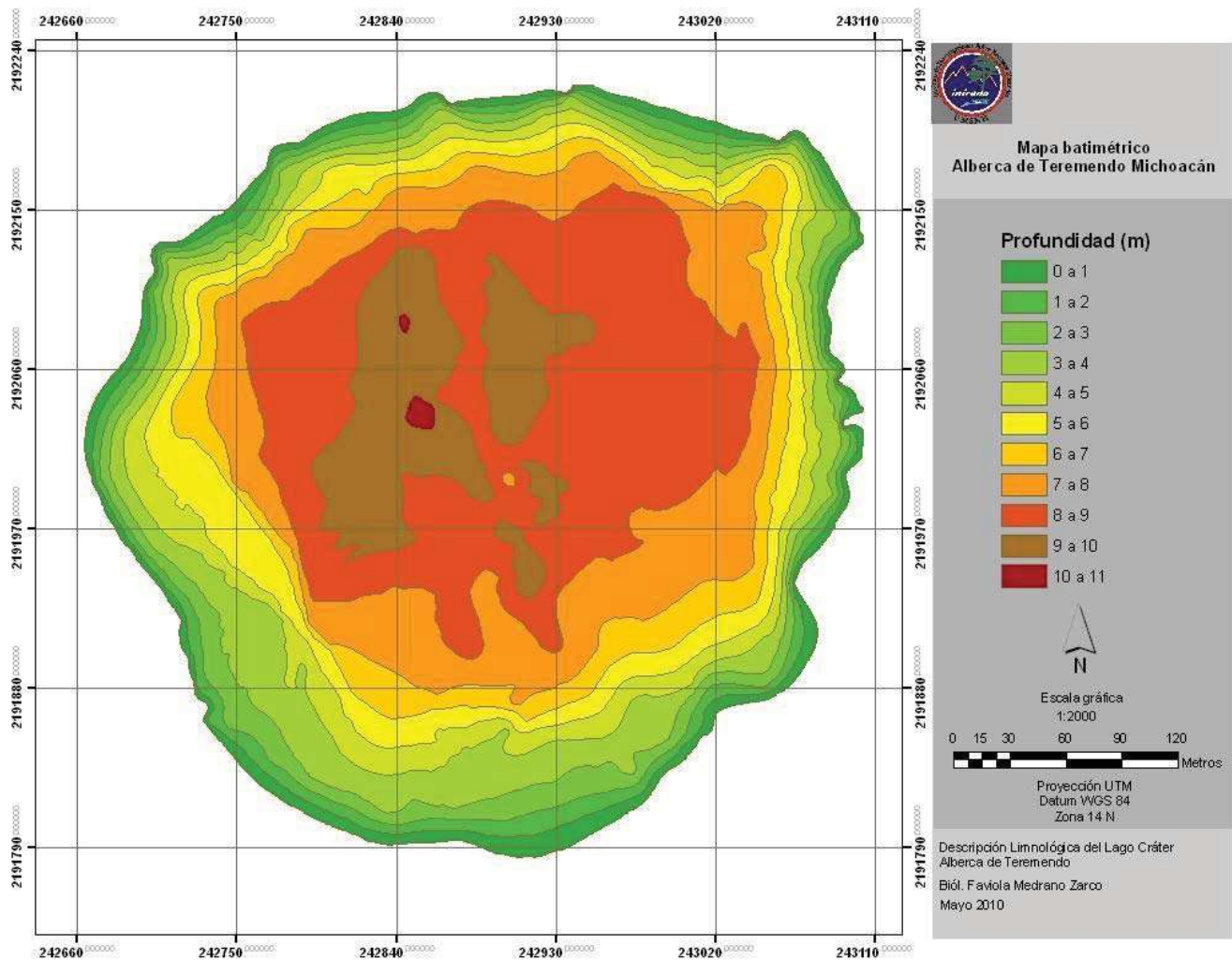


Figura 10. Mapa batimétrico del lago cráter La Alberca de Teremendo, con líneas de contorno de 1.0 m

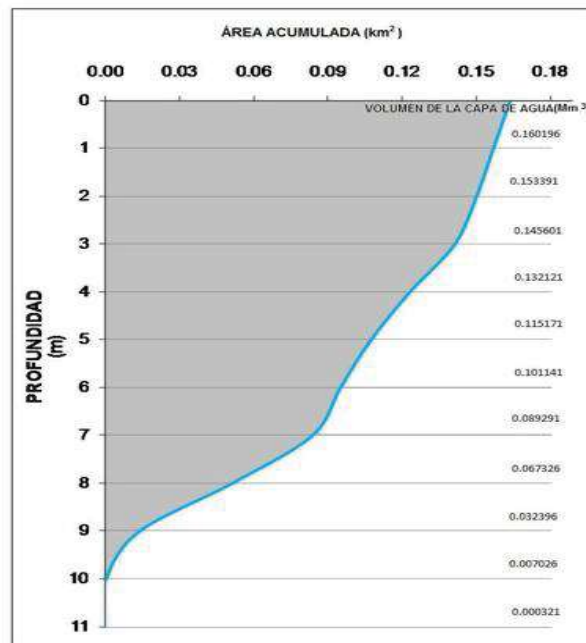


Figura 11. Curva hipsográfica directa, en donde se identifica el volumen de agua por capas de profundidad

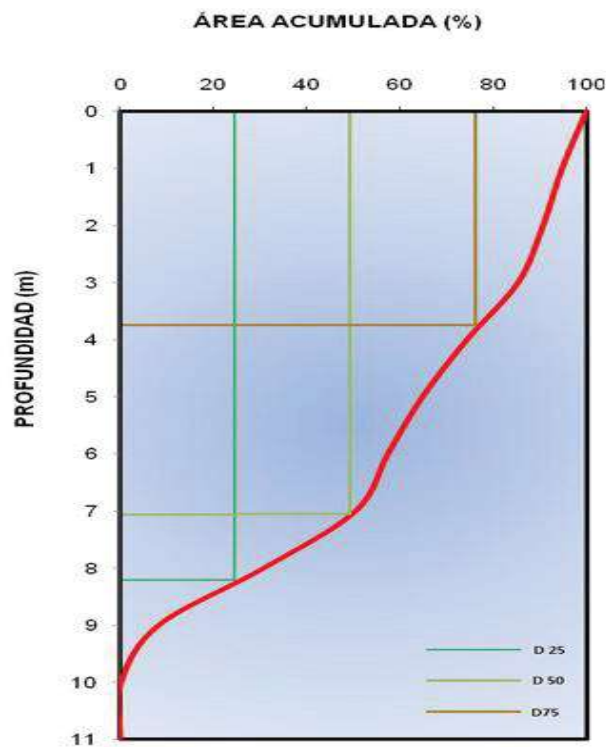


Figura 12. Curva hipsográfica porcentual del lago cráter La Alberca de Teremendo obtenida a partir del mapa batimétrico

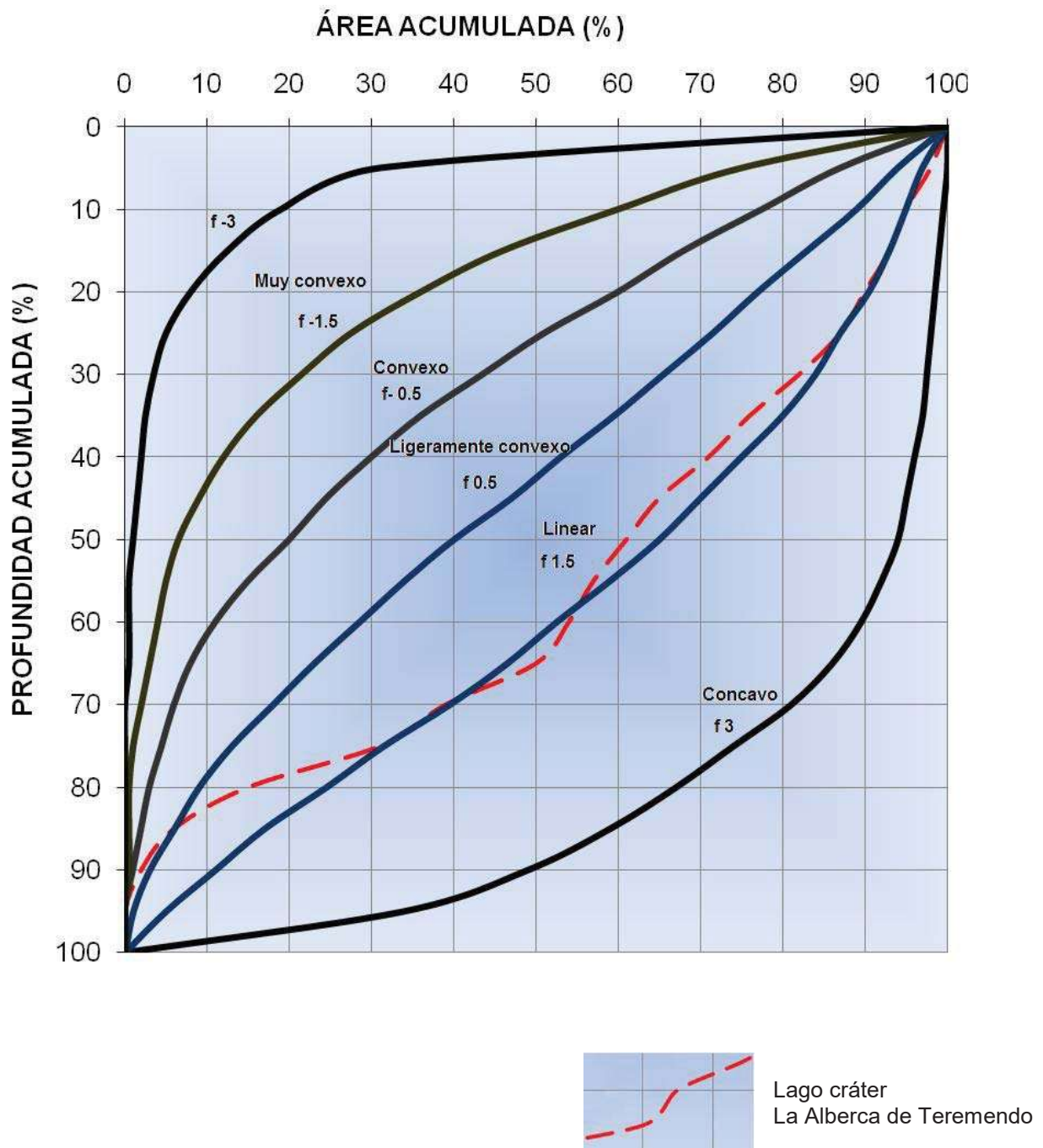


Figura 13. Clasificación del sistema de forma de lagos (Håkanson, 1981)

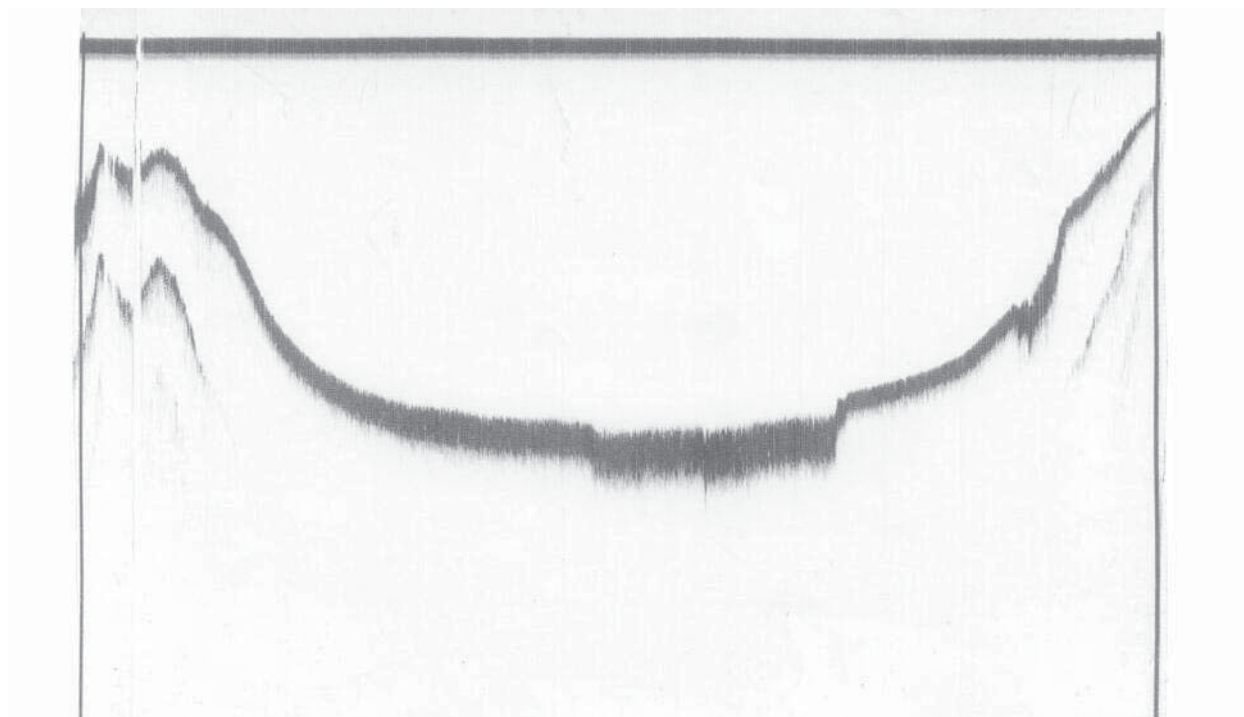


Figura 14. Transecto batimétrico en dirección norte a sur

Tabla 4. Descripción morfométrica del lago cráter La Alberca de Teremendo

Parámetro	Valor
Área total del lago (A), km ²	0.1636
Volumen (V), Mm ³	1.0034
Profundidad máxima (D _{máx}), m	11.0
Profundidad media (D), m	6.1
Profundidad mediana (D ₅₀), m	7.1
Profundidad al 1er cuartil (D ₂₅), m	8.3
Profundidad al 3er cuartil (D ₇₅), m	4.0
Profundidad relativa (Dr), %	2.5
Longitud máxima (L _{máx}), km	0.47
Longitud máxima efectiva (Le), km	0.45
Amplitud máxima (B _{máx}), km	0.45
Amplitud máxima efectiva (Be), km	0.45
Amplitud media (B), km	0.34
Longitud de las líneas de contorno (Li), km	24.14
Longitud de costa (Lo), km	1.56
Pendiente (α), %	10.00
Desarrollo de costa (F), adimensional	1.08
Rugosidad del fondo lacustre (R), adimensional	1.53
Rugosidad de forma (Rf) adimensional	27.99
Desarrollo de volumen (V _d), adimensional	1.68
Forma del lago	<i>Lma</i>

7.3. Balance hídrico

Las variaciones en la precipitación-evaporación total y de la temperatura promedio mensual correspondiente al año 2009 de la estación meteorológica Teremendo dependiente del Servicio Meteorológico Nacional se muestran en la Figura 15. El mes que registró la temperatura promedio más alta fue mayo con 14.8 °C, mientras que el mes con la temperatura promedio mínima fue diciembre con un valor de 8.0 °C. La precipitación del mes más seco fue febrero con 1.2 mm y la del mes más lluvioso fue septiembre con una precipitación total de 200.0 mm, la precipitación anual total fue de 650.2 mm.

La evaporación registró un total de 1,592.7 mm, en donde el valor máximo mensual fue en abril con un valor total de 229.9 y el mínimo se registró en el mes de agosto correspondiente a 87.8 mm de evaporación total.

En la Figura 16 se presentan las variaciones de la precipitación y la evaporación para el año de 2009, correspondiente al área superficial del lago cráter. Es posible observar el desequilibrio entre las tasas de precipitación y evaporación, así como sus efectos sobre el nivel del lago cráter. En los meses correspondientes a la estación seca se registró una amplia pérdida de agua por el proceso de evaporación con respecto a la mínima precipitación, acentuándose en el mes de abril. Mientras que en la temporada lluviosa se registró un incremento en la precipitación con una disminución en la evaporación donde únicamente en el mes de septiembre la precipitación supera a la evaporación.

Considerando el periodo anual correspondiente a 2009, el lago cráter La Alberca de Teremendo disminuyó su nivel superficial hasta 0.93 m al principio de la temporada lluviosa, mientras que entre el final de la temporada lluviosa y principio de la temporada seca se registraron los niveles máximos de agua en el lago cráter (Figura 17).

Por lo anterior, los niveles máximos de agua en el lago cráter se observaron al final de la temporada lluviosa en los meses de agosto y septiembre, mientras que el nivel mínimo se registró en el mes de julio, indicando que la precipitación se manifiesta sobre el lago cráter un breve tiempo después.

En la Figura 18 es posible observar que existe una amplia diferencia entre el volumen observado y el esperado. El volumen del sistema esperado registro un promedio de 0.1 Mm³, mientras que el volumen observado fue de 1.0 Mm³.

El balance de agua en el lago cráter La Alberca de Teremendo se representa en la Figura 19. Se estima que el sistema acuático recibe en su superficie 106,386.4 m³ por precipitación, aproximadamente 260,606 m³ se pierden por evaporación de la superficie del lago. Existe un aporte directo de agua a través de manantiales de un volumen total anual de 60,000.0 m³. La infiltración sobre el cráter estimada al 8% indica que 30,689.4 m³ son transferidos anualmente al lago a través del área de captación (Tabla 5). La relación anterior indica que existe una diferencia de 123,530.6 m³ de agua en el lago.

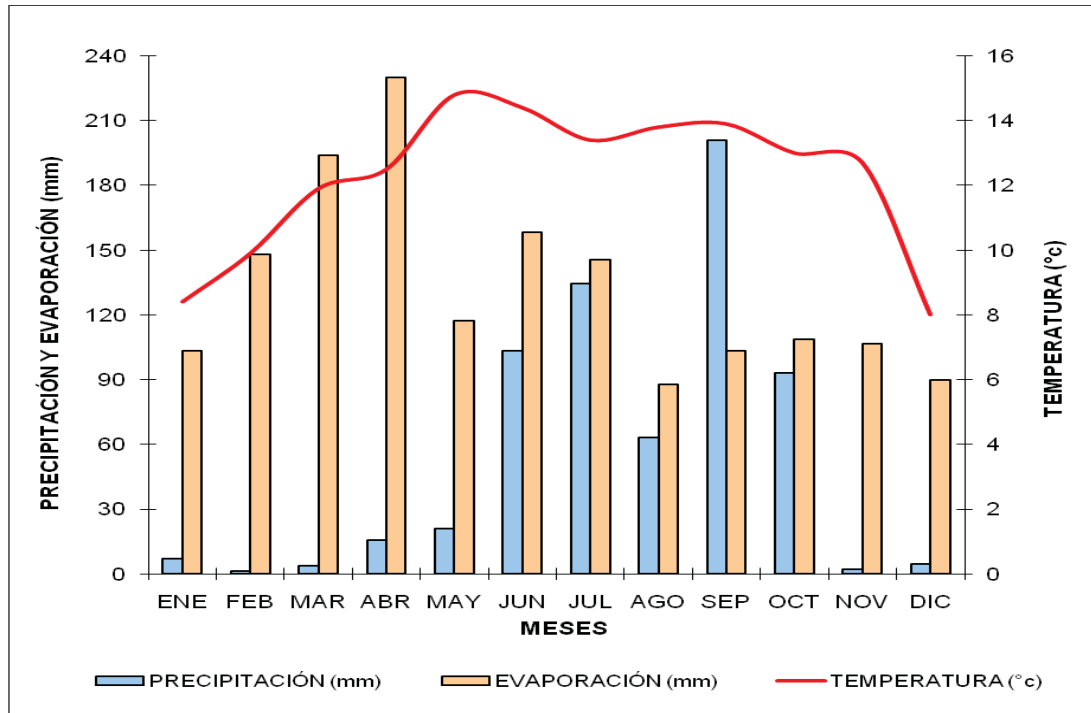


Figura 15. Registro de la estación del Servicio Meteorológico Nacional N° 16254 de la población de Teremendo ubicada a 2,350 msnm durante el 2009.

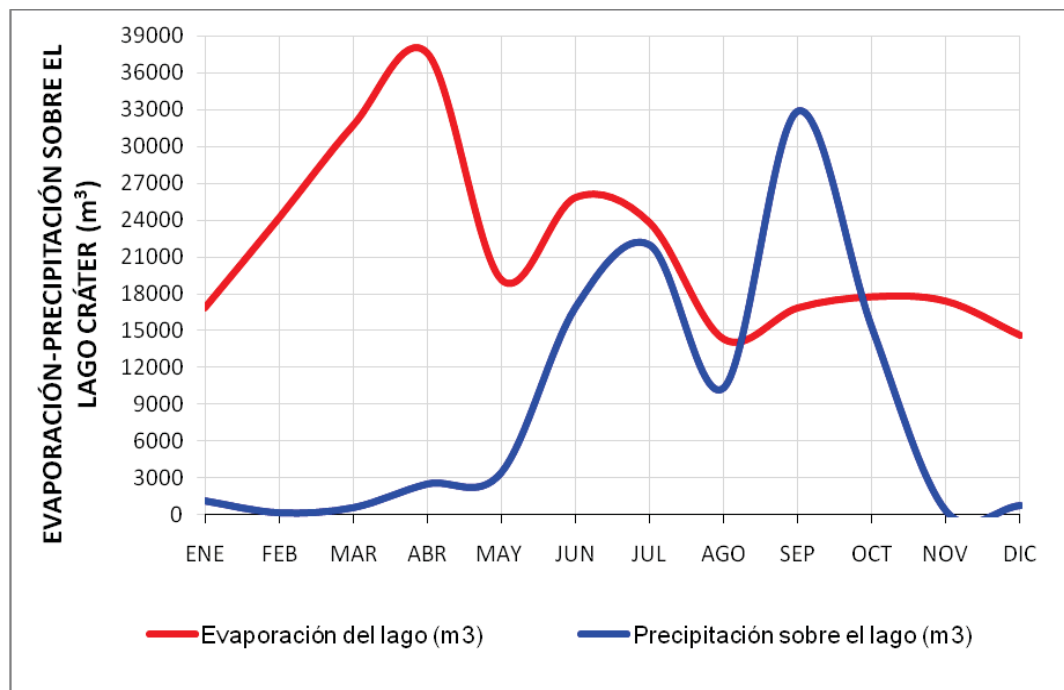


Figura 16. Variación de la lluvia y evaporación durante el año de 2009 en el lago cráter La Alberca de Teremendo

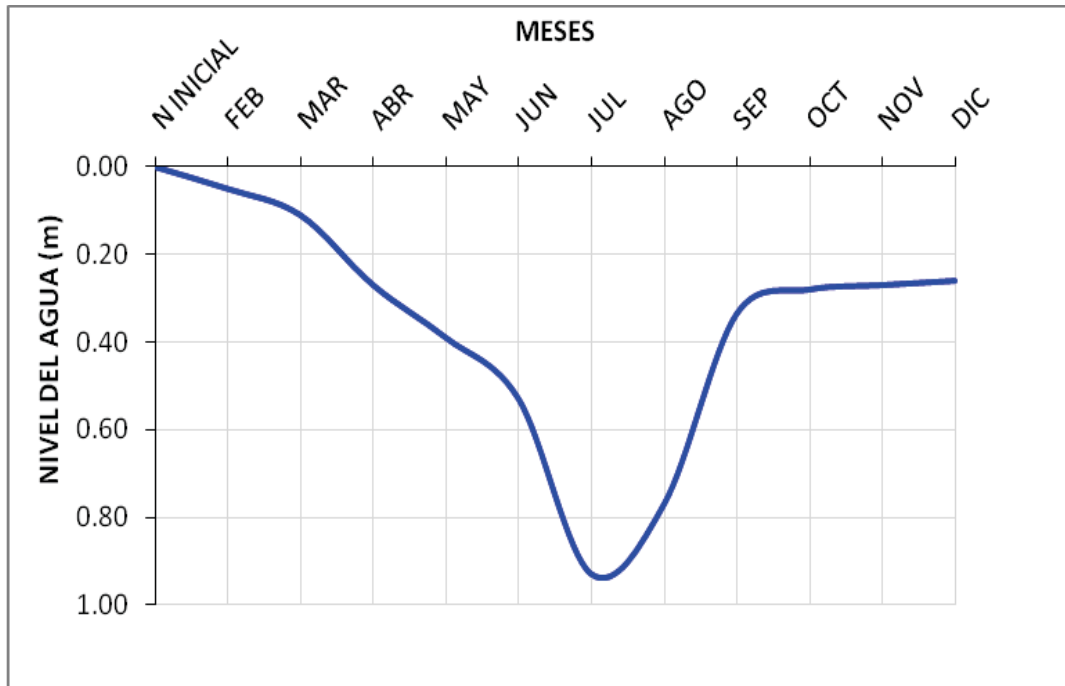


Figura 17. Fluctuación en el nivele superficial del agua durante el año de 2009 en el lago cráter La Alberca de Teremendo

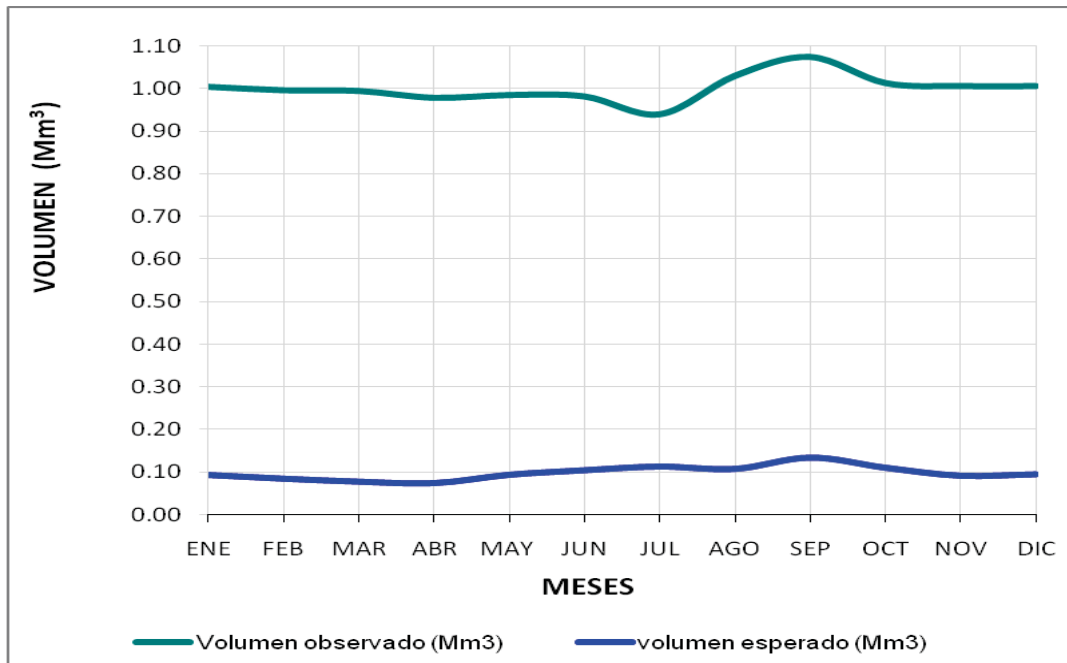


Figura 18. Volumen de agua esperado y observado durante el periodo de muestreo

Tabla 5. Balance anual de agua para el lago cráter La Alberca de Teremendo

Mes	Oscilación de nivel (m)	Volumen del lago (m ³)	Precipitación sobre el lago (m ³)	Aporte de manantiales (m ³)	Infiltración al 8 % sobre el cráter (m ³)	Evaporación del lago (m ³)
ENE	0.0	100,3981.0	1,161.7	5,000.0	335.1	16,915.1
FEB	0.1	995,800.0	196.3	5,000.0	56.6	24,215.9
MAR	0.1	994,163.7	605.4	5,000.0	174.6	31,742.5
ABR	0.3	977,801.6	2,536.1	5,000.0	731.6	37,621.4
MAY	0.4	984,346.5	3,468.8	5,000.0	1,000.6	19,197.7
JUN	0.5	981,074.1	1,690.2	5,000.0	4,875.8	25,881.6
JUL	0.9	938,532.6	21,974.3	5,000.0	6,339.0	23,829.8
AGO	0.8	1'030,160.4	10,357.2	5,000.0	2,987.8	1,4361.0
SEP	0.3	1'075,156.1	32,855.1	5,000.0	9,477.8	16,908.6
OCT	0.3	1'012,980.2	15,216.8	5,000.0	4,389.6	17,810.1
NOV	0.3	1'005,617.2	327.2	5,000.0	94.4	17,450.2
DIC	0.3	1'005,617.2	785.4	5,000.0	226.6	14,671.9
Total anual			106,386.4	60,000.0	30,689.4	260,605.7

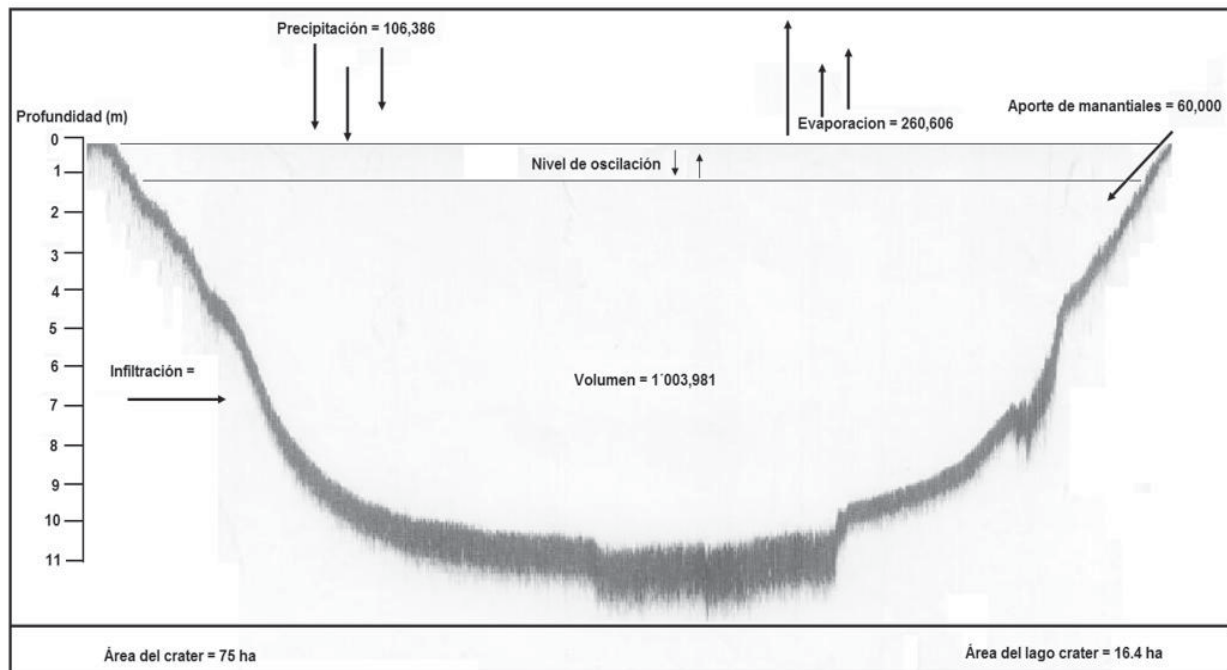


Figura 19. Balance de agua anual para el lago cráter La Alberca de Teremendo. Las cifras se expresan en metros cúbicos

7.4. Óptica

El análisis de las propiedades ópticas del lago cráter La Alberca de Teremendo incluyó la determinación del coeficiente de extinción vertical, determinación de la zona eufótica, así como el coeficiente de extinción horizontal de la luz.

Los valores de irradianza solar en sus diferentes espectros cromáticos de luz blanca, azul, verde y roja obtenidos en campo fueron utilizados para estimar el coeficiente de atenuación vertical de la luz solar (K_d), y la profundidad de la zona eufótica (Eu) estos dos parámetros se determinaron mediante la regresión lineal de la profundidad y el logaritmo natural de la irradianza ($mWatts/cm^2$).

La máxima profundidad a la que se registró la ausencia total de luz fue a los 3.0 m correspondiente a la luz blanca (Figura 20) con una extinción vertical (K_d) de 10.9 m. De la misma manera, diciembre fue el único mes en el que se registró una profundidad de la zona eufótica de 5.6 m de la luz blanca (Figura 20), en el resto de los meses muestreados se registró un intervalo entre 1.0 y 2.8 m.

La atenuación de la luz solar en sus diferentes espectros registraron bajas desviaciones estándar, con un valor de K_d correspondiente a 8.6 m, con una Eu de 1.2 m para el color azul; para el color verde se obtuvo un valor promedio de K_d de 8.8 y una Eu de 1.8 m; finalmente, para el color rojo se detectó un valor de K_d correspondiente a 9.1 m y una Eu de 1.9 m (Tabla 6).

La visibilidad medida con el disco de Secchi registró un promedio de 0.25 m. La visibilidad máxima se observó en el mes de enero con un valor de 0.30 m, mientras que el valor mínimo fue de 0.10 m registrado en el mes de abril.

Tabla 6. Coeficiente de atenuación vertical de la luz y zona eufótica en los diferentes espectros cromáticos en lago cráter La Alberca de Teremendo

VARIABLE	LUZ BLANCA		LUZ AZUL		LUZ VERDE		LUZ ROJA	
	<i>Kd</i>	<i>Eu</i>	<i>Kd</i>	<i>Eu</i>	<i>Kd</i>	<i>Eu</i>	<i>Kd</i>	<i>Eu</i>
MAX	11.40	5.60	9.29	1.70	9.33	2.20	9.60	2.60
MIN	10.50	1.00	7.72	0.70	7.87	1.00	8.46	0.80
$\bar{x}$	10.92	2.35	8.61	1.22	8.78	1.75	9.14	1.90
s	0.36	1.70	0.54	0.43	0.49	0.53	0.39	0.69

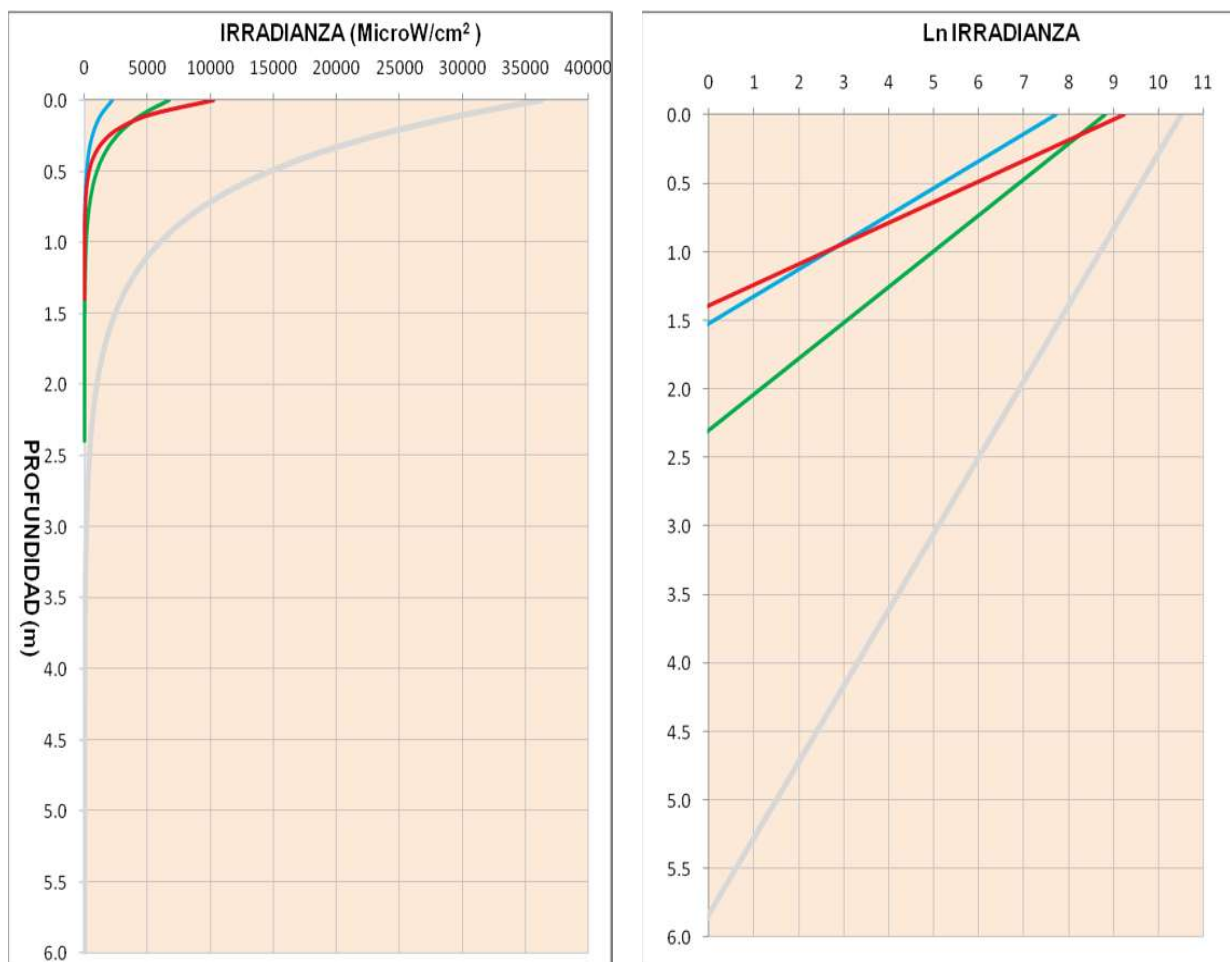


Figura 20. Gradiente de extinción vertical de la luz solar y zona eufótica de los diferentes espectros cromáticos (el color de la curva indica el espectro cromático)

El porcentaje de transmitancia registrado en campo fue de 2.0% en la superficie, 13.5% a los cuatro metros de profundidad y 27.0% de transmitancia en el fondo (Figura 21)

El coeficiente de atenuación horizontal de la luz fue de 20.7 m en la superficie del sistema. A partir de los 4.0 m de profundidad el coeficiente de extinción disminuye a 11.2 m y en el fondo se registró un valor de 7.7 m.

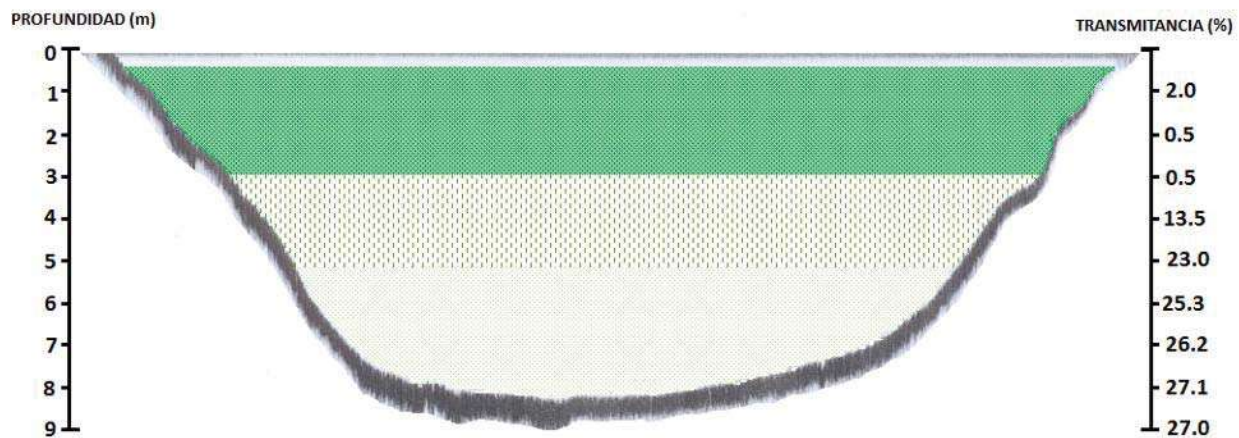


Figura 21. Perfil de la transmitancia de la luz en el lago cráter La Alberca de Teremendo

7.5. Balance de calor

Los registros de temperatura obtenidos durante el periodo de muestreo indican que la temperatura promedio anual registrada en el lago cráter La Alberca de Teremendo corresponde a 17.8°C, con una desviación estándar de 1.8°C. En la superficie del sistema presentó un promedio anual de 19.7°C, mientras que en el fondo se registró un promedio de 16.7°C. La diferencia entre la temperatura de superficie y la del fondo es de 3.0°C.

Las Figuras 22 y 23 representan el comportamiento de los perfiles de oxígeno disuelto (mg/L) y de temperatura (°C) durante la estación lluviosa y la seca, respectivamente. En el mes de diciembre se registró la mínima temperatura en la superficie con un valor de 15,7 °C a través de toda la columna de agua. El valor máximo de temperatura registrado fue de 22.5°C en la superficie durante el muestreo correspondiente al mes de julio. El valor mínimo registrado fue de 14.5°C en el fondo en el mes de enero. La diferencia entre los valores máximo y mínimo de temperatura fue de 8.0°C.

La temperatura ambiente y la temperatura del agua registraron una correlación directa, con una r^2 de 0.90. La Figura 24 presenta la distribución temporal de la temperatura a lo largo de la columna de agua. Como se puede observar en el termograma, en el mes de abril se identifica una disminución de progresiva de la temperatura a partir de los de 2.0 m de profundidad con un valor de 19.5°C, de la misma manera, en la profundidad de 3.0 m se registraron 18.5°C, mientras que a los 4.0 m de profundidad la temperatura fue de 17.3°C.

La estructura térmica del mes de abril continuó manifestándose hasta el mes de septiembre, con un realce en el mes de julio en donde se registró una temperatura de 21.7 °C a 1.0 m de profundidad, 20.7°C a 2.0 m, 19.9°C a 3.0 m y 18.8°C a 4.0 m de profundidad.

Lo anterior representa una diferencia igual o mayor a 1.0°C de disminución vertical por cada metro de profundidad.

Durante el resto de los meses muestreados se registraron temperaturas homogéneas en la distribución vertical de la columna de agua.

La densidad del agua registró un promedio de 0.9987 g/cm^3 . La Figura 25 muestra las variaciones en la densidad en los meses de mayo y diciembre, estos dos meses representan a la estación lluviosa y la seca, respectivamente. En el muestreo correspondiente al mes de diciembre se observa una densidad homogénea a través de la columna de agua con un valor de 0.9990 g/cm^3 . Mientras que en el mes de mayo se observan diferencias en la densidad del agua a través de la columna de agua; en la superficie se registró una densidad de 0.9980 g/cm^3 , la cual aumenta progresivamente y es hasta los 4.0 m de profundidad donde se registra la máxima densidad con un valor correspondiente a 0.9987 g/cm^3 . Este patrón de comportamiento de la densidad en la columna de agua se manifiesta en los meses correspondientes a la estación lluviosa.

La capacidad anual de almacenamiento de calor fue de $2,451.4 \text{ cal/cm}^2/\text{año}$ (Figura 26 y Tabla 7). El contenido total de calor promedio fue de $11,129.4 \text{ cal/cm}^2$. El valor máximo calculado fue de $12,200 \text{ cal/cm}^2$ en los meses de junio y septiembre, mientras que el contenido de calor mínimo se registró en el mes de enero con un valor de $9,341 \text{ cal/cm}^2$ (Figura 27 y Tabla 8). La diferencia entre el valor máximo y mínimo fue de $2,894 \text{ cal/cm}^2$.

Las temperaturas promedio más altas del volumen total de agua del lago cráter se registraron en la estación de verano, con un valor máximo de $20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ en el mes de septiembre, por su parte la temperatura promedio mínima fue de $15.2 \text{ }^\circ\text{C}$ registrada en el mes de enero.

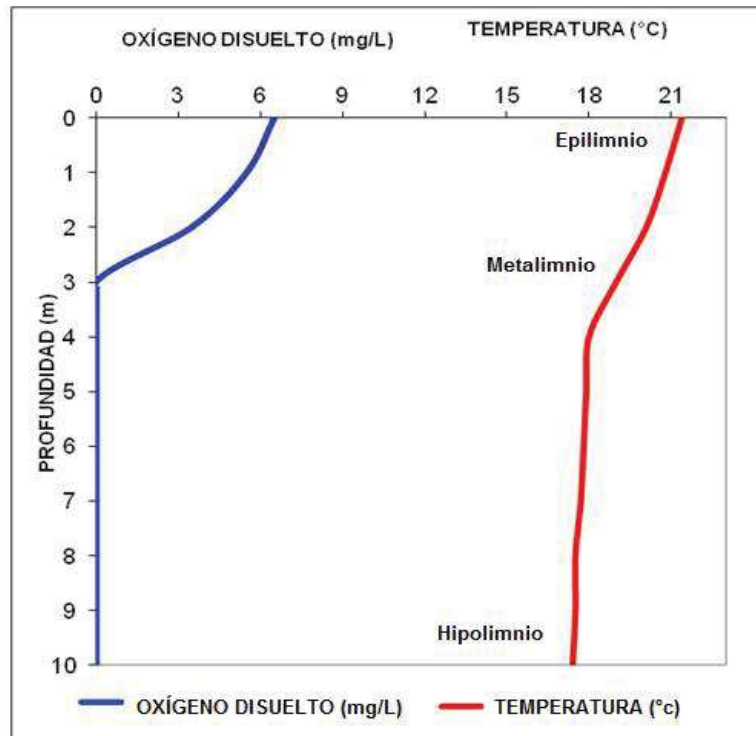


Figura 22. Distribución vertical de temperatura y oxígeno disuelto en el mes de mayo

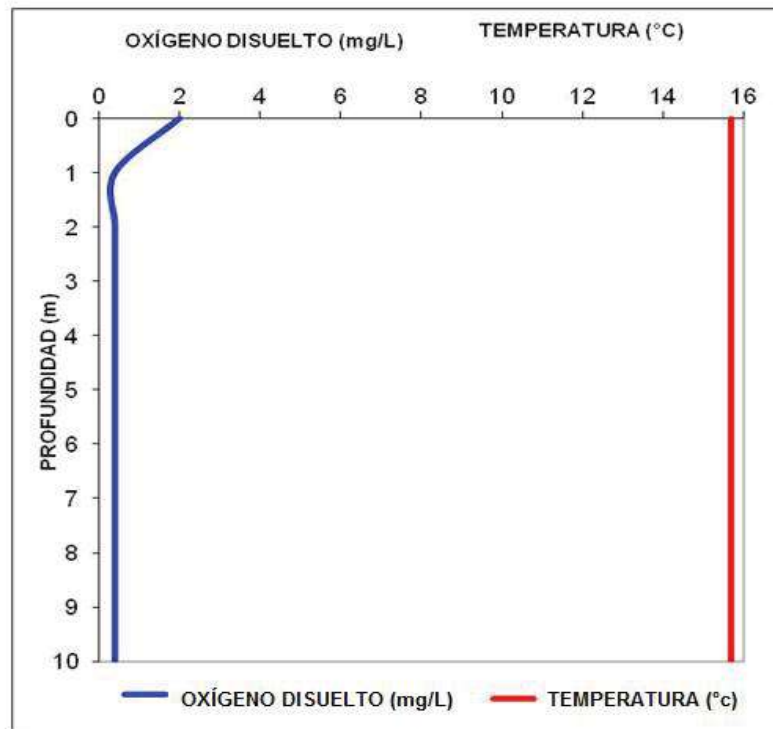


Figura 23. Distribución vertical de temperatura y oxígeno disuelto en el mes de diciembre

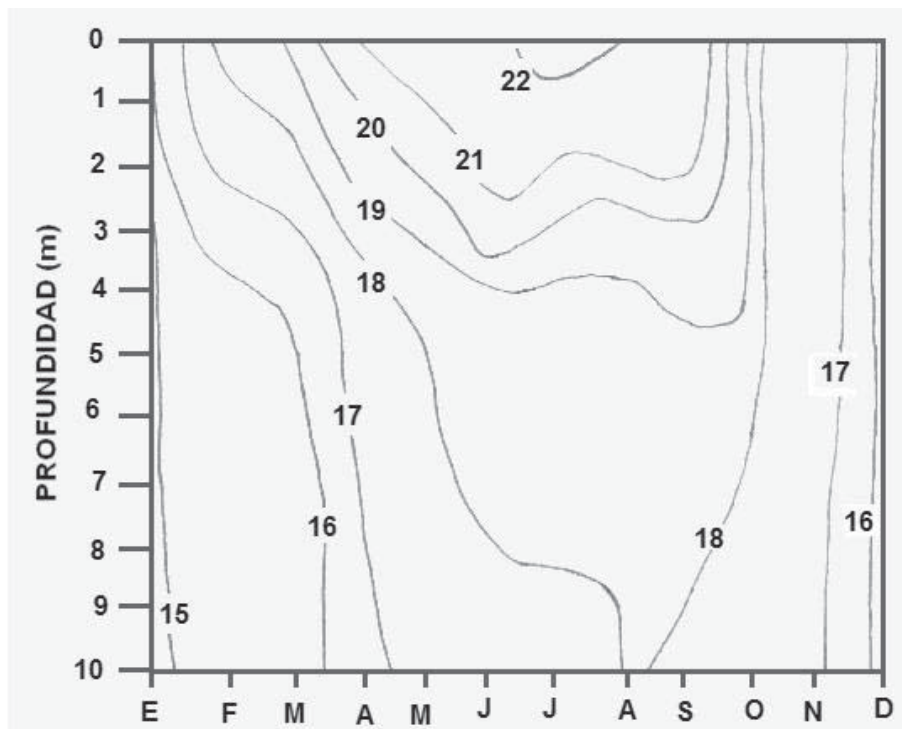


Figura 24. Distribución vertical de la temperatura en °C en el lago cráter La Alberca de Teremendo

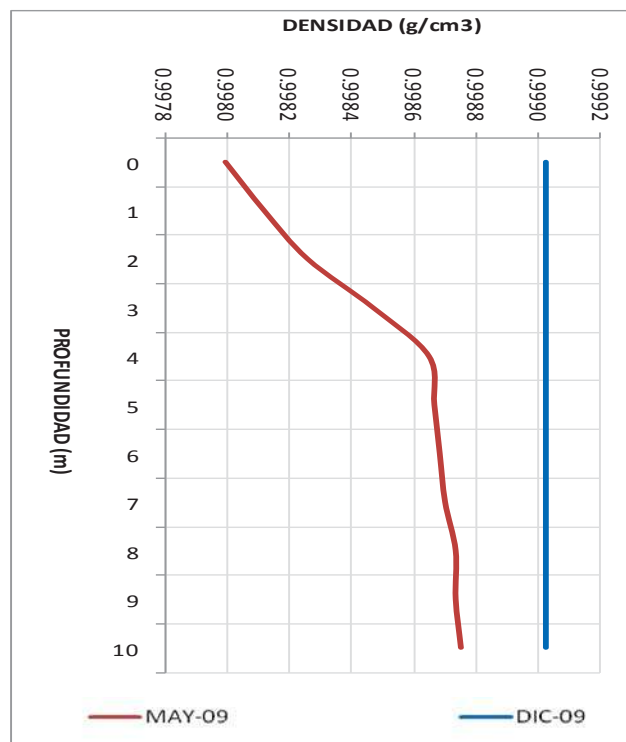


Figura 25. Distribución vertical de la densidad del agua

Tabla 7. Temperaturas extremas y áreas registradas en la columna de agua

Profundidad (m)	Dic-09	Jul-09	Área acumulada (cm ²)	A _z (t _{s,z} – t _{w,z})
	Temperatura (°C)			
0	15.7	22.5	1,636,210,000.0	11,126,228,000
1	15.7	21.7	1,567,710,000.0	9,406,260,000
2	15.7	20.7	1,500,110,000.0	7,500,550,000
3	15.7	19.9	1,411,910,000.0	5,930,022,000
4	15.7	18.8	1,230,510,000.0	3,814,581,000
5	15.7	18.1	1,072,910,000.0	2,574,984,000
6	15.7	18.1	949,910,000.0	2,279,784,000
7	15.7	18.1	835,910,000.0	2,006,184,000
8	15.7	17.8	510,610,000.0	1,072,281,000
9	15.7	17.6	137,310,000.0	260,889,000
10	15.7	17.5	3210,000.0	5,778,000

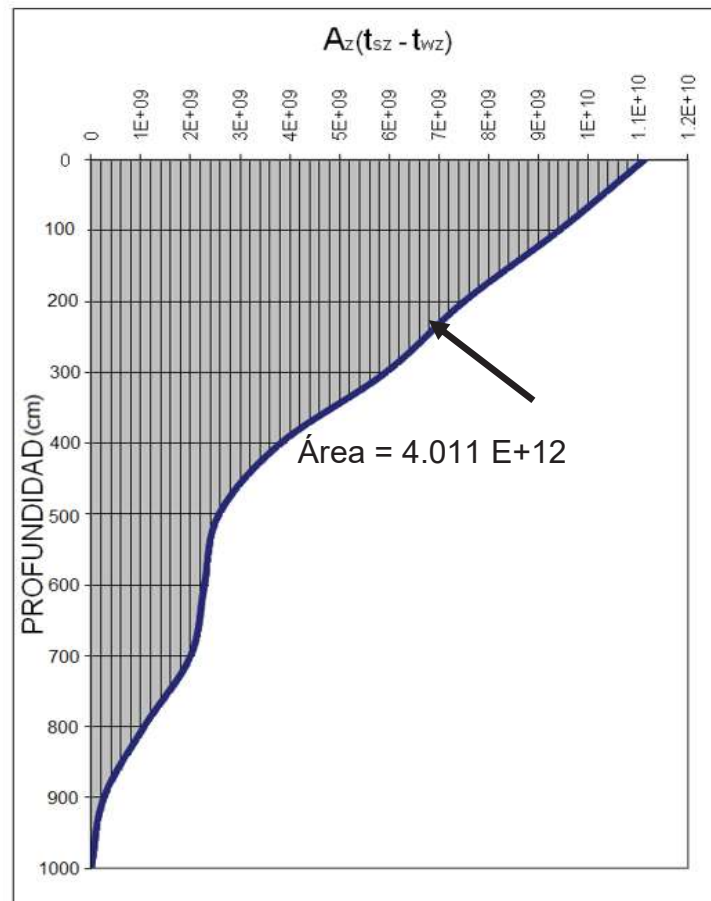


Figura 26. Contenido total anual de calor. El área superficial del lago es de 1.64×10^9 cm²

Tabla 8. Temperatura promedio y contenido total de calor

Meses	Temperatura promedio (°C)	Contenido total de calor (cal/cm ²)
Enero	15.2	9344.8
Febrero	16.8	10297.7
Marzo	16.7	10227.6
Abril	18.4	11264.4
Mayo	19.1	11697.6
Junio	19.9	12208.6
Julio	19.7	12089.8
Agosto	19.7	12063.3
Septiembre	20.0	12239.0
Octubre	18.9	11578.0
Noviembre	17.8	10911.5
Diciembre	15.7	9630.5
Promedio	18.1	11129.4

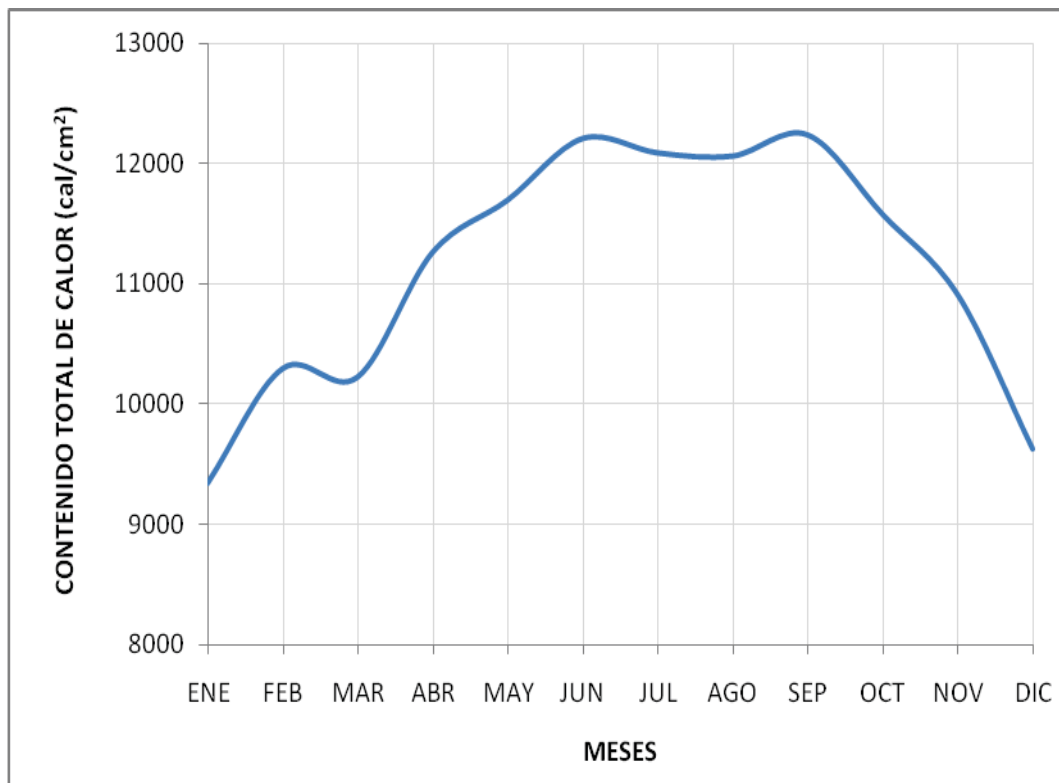


Figura 27. Capacidad mensual de almacenamiento de calor durante el año 2009

7.6. Hidrodinámica

En el lago cráter La Alberca de Teremendo la dirección de los vientos se detectó en tres rumbos siendo el noroeste (**NO**), noreste (**NE**) y sureste (**SE**). La frecuencia de los vientos del noroeste (**NO**) fue de 30.0%, del noreste (**NE**) fue de 50.0%, mientras que la de los vientos procedentes del sureste (**SE**) fue de 20.0% (Figura 28). El viento inició su actividad a partir de las 10:00 horas con ligeras ráfagas que registraron valores promedio de 7.0 km/h, incrementando su intensidad a lo largo de la mañana hasta alcanzar su máximo al medio día (12:00 h). El valor promedio estimado durante el medio día fue de 15.0 km/h. De la misma manera, se observó que los vientos incrementaron su intensidad en los meses correspondientes al otoño e invierno, principalmente en los días lluviosos.

De acuerdo con los registros de la estación meteorológica de Teremendo perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional, los vientos provienen del norte, noreste y este con una intensidad moderada. En la escala Internacional de Beaufort equivale a brisa moderada con una velocidad de 15.0 a 25.0 km/h.

Los movimientos de las veletas de corriente se observaron principalmente con dirección al noroeste y sureste a una velocidad promedio de 4.2 cm/s (Figura 29), mientras que la velocidad promedio del viento fue de 10.0 km/h. La dirección de las veletas de superficie y de 2.0 metros de profundidad fue similar. La velocidad promedio de las veletas de superficie fue de 5.3 cm/s, mientras que la veleta de 2.0 m de profundidad se desplazó con una velocidad promedio de 2.7 cm/s.

Al comparar la dirección y velocidad de la corriente con la del viento se estimó el coeficiente de correlación sugiriendo un grado de asociación equivalente a $r^2 = 0.93$ para la deriva superficial (Figura 30) y una $r^2 = 0.80$ para las corrientes de 2.0 metros de profundidad, lo que sugiere que los movimientos del agua en el lago cráter La Alberca de Teremendo se encuentran determinados principalmente por la acción de la fuerza del viento sobre la superficie del agua.

La información obtenida para corrientes de deriva superficial y de 2.0 metros de profundidad se presenta en la Tabla 9. El factor de viento, definido como el radio expresado en porcentaje de la velocidad de corriente de deriva superficial con respecto a la velocidad del viento, tuvo un promedio de 1.2 (%) (Figura 31).

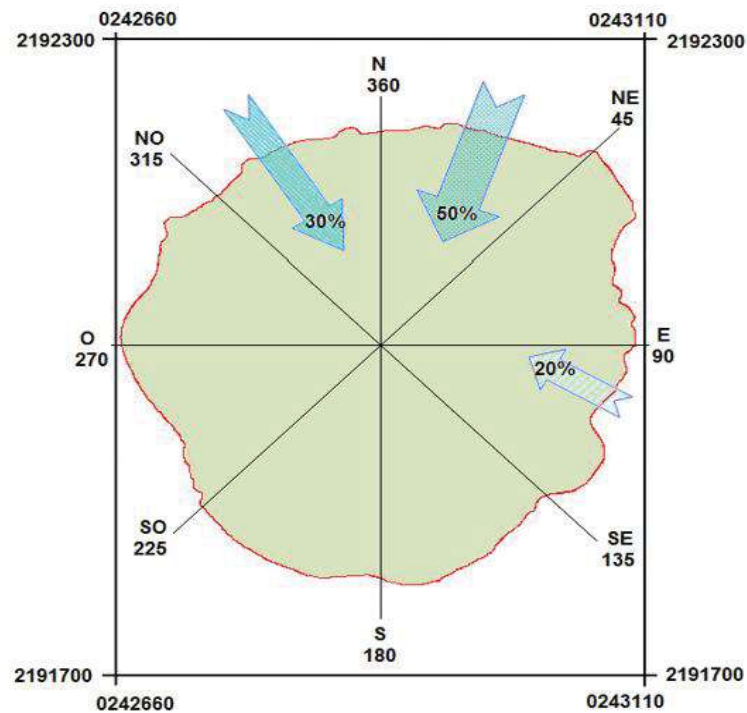


Figura 28. Frecuencia de los vientos dominantes en el lago cráter La Alberca de Teremendo

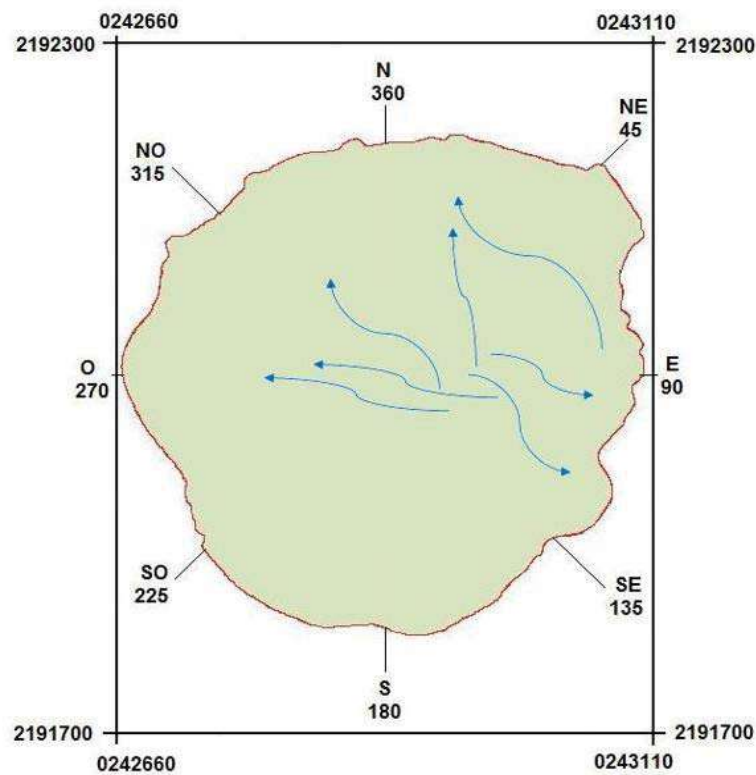


Figura 29. Transectos de superficie observados en veletas de corriente en el lago cráter La Alberca de Teremendo

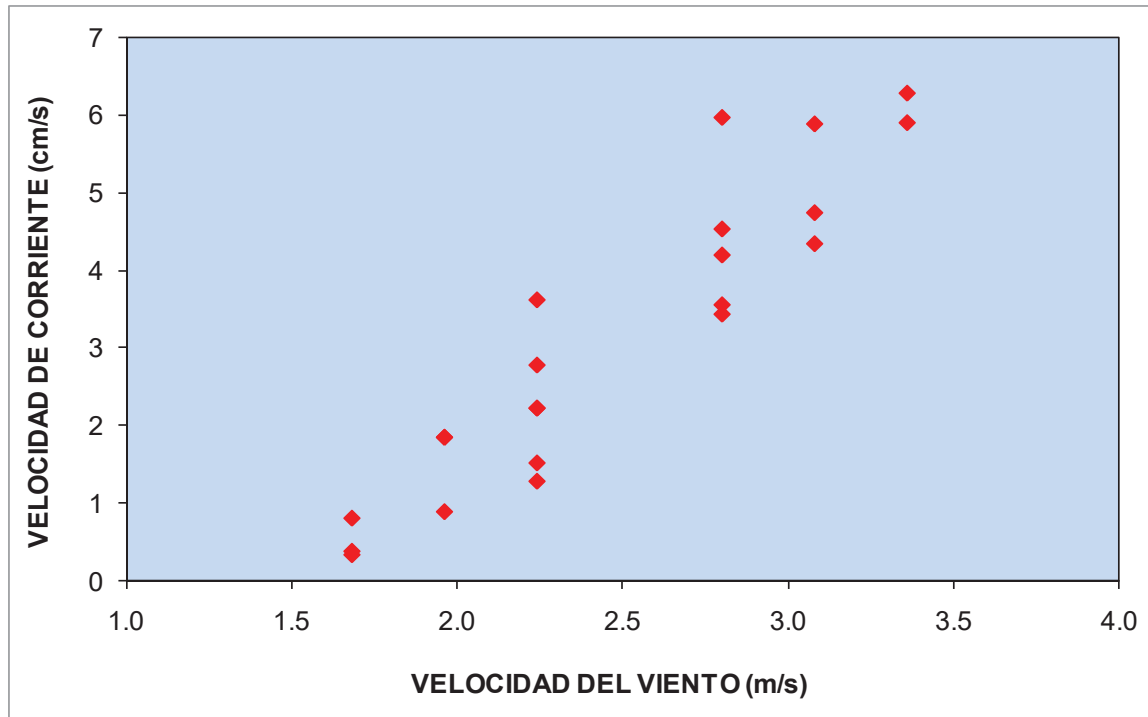


Figura 30. Correlación entre deriva superficial y la velocidad del viento ($r^2 = 0.93$),

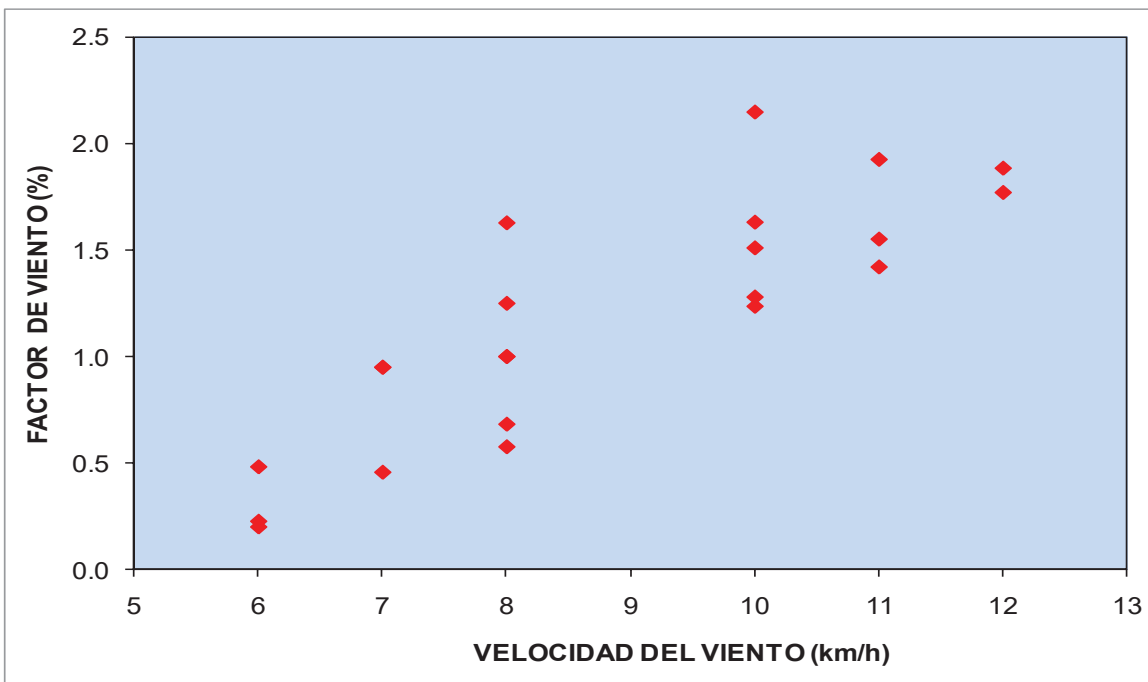


Figura 31. Correlación entre factor de viento y velocidad del viento ($r^2 = 0.85$)

Tabla 9. Movimiento del agua y factor del viento en el lago cráter La Alberca de Teremendo

VELETA DE SUPERFICIE			VELETA DE 2.0 m DE PROFUNDIDAD		
VELETA OBSERVADA No	DERIVA SUPERFICIAL (cm/s)	FACTOR DEL VIENTO (%)	VELETA OBSERVADA No	MOVIMIENTO DEL AGUA (cm/s)	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)
1	4	1.0	1	2	3.08
2	3	1.0	2		0
3	5	2.0	3	1	1.96
4	4	2.0	4	3	2.8
5	6	2	5	1	1.68
6	5	2	6	1	1.96
7	0	0	7	2	2.24
8	2	1	8	1	2.24
9	1	1	9	2	2.24
10	1	0	10	2	1.96
11	0	0	11	1	1.96
12	1	0	12	1	1.96
13	6	2			
14	6	2			
15	4	2			
16	3	1			
17	6	2			
18	4	1			
19	2	1			
20	2	1			
21	2	1			
22	2	1			

7.7. Caracterización fisicoquímica del agua

Se realizó un análisis de cluster para determinar el porcentaje de similitud entre las cinco estaciones de muestreo involucrando las 23 variables analizadas en los diferentes meses del año, indicando que existe un promedio de 99.0 % de similitud entre las estaciones de muestreo (Figura 32). Este resultado sugiere que las estaciones de muestreo presentan un patrón de comportamiento fisicoquímico similar.

Con base en lo anterior, la descripción de los parámetros fisicoquímicos del agua se realizó considerando que el lago se comporta como una unidad homogénea.

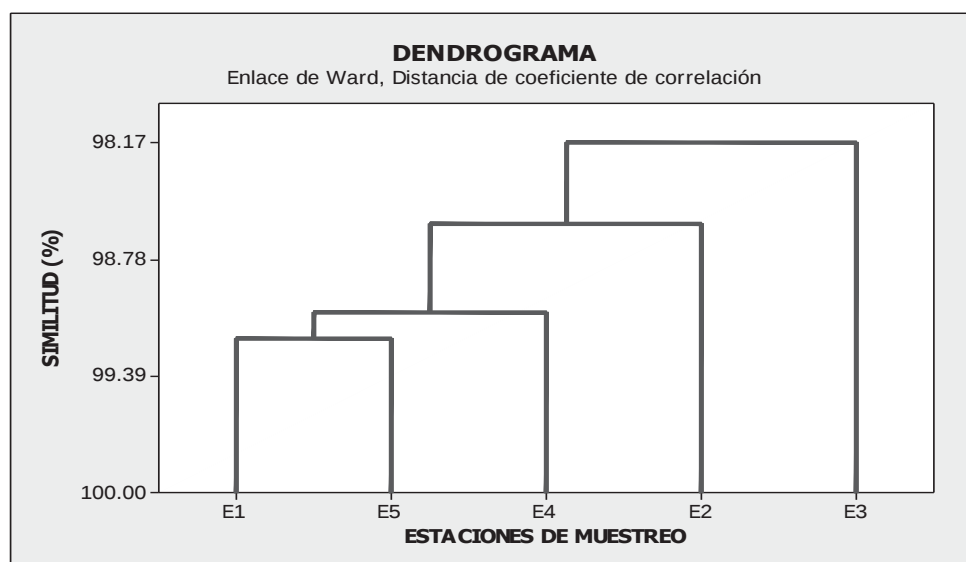


Figura 32. Dendrograma de similitud entre las estaciones de muestreo en el lago cráter La Alberca de Teremendo

Considerando que en el lago cráter La Alberca de Teremendo existen diferencias en los gradientes de la temperatura tanto en la columna de agua como en los meses muestreados, el análisis de los resultados de las variables fisicoquímicas se realizaron considerando el estrato superficial, medio y de fondo además de considerar la estacionalidad a través del año 2009.

Se realizó una matriz de correlación para identificar el grado de relación entre dos variables, considerando los registros de las cinco estaciones de muestreo y de los meses muestreados (Tabla 10).

Tabla 10. Correlación de variables

CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA DEL LAGO CRÁTER LA ALBERCA DE TEREMENDO

Variables	OD	Temp.	Con. elec.	pH	Alc. total	Carb. total	Bicarbon.	Ac. Carb.	Dur. total	Calcio	Mag.	FT	FRS	Amo	Nitrit	DBO	DQO	Sol. Tot.	Sol. sus.	Sol. Dis.	Turb.	Clo -a	
Oxígeno	1																						
Temperat	0.60	1																					
Conducti	-0.51	-0.43	1																				
Potencial	0.80	0.66	-0.55	1																			
Alcalinida	-0.58	-0.28	0.67	-0.47	1																		
Carbonat	0.87	0.73	-0.52	0.87	-0.47	1																	
Bicarbon	-0.86	-0.62	0.68	-0.81	0.82	-0.89	1																
Acido	-0.44	-0.32	0.56	-0.66	0.48	-0.42	0.53	1															
Dureza	-0.14	-0.19	-0.04	-0.19	-0.07	-0.31	0.17	0.12	1														
Calcio	-0.33	-0.35	0.29	-0.35	0.30	0.42	0.29	0.13	0.64	1													
Magnesio	0.01	-0.09	-0.21	-0.03	-0.13	-0.13	0.02	0.11	0.87	0.23	1												
Fósforo	-0.24	-0.23	0.54	-0.37	0.26	-0.14	0.26	0.38	0.01	0.28	-0.14	1											
Ortofosfa	-0.23	-0.03	0.44	-0.27	0.18	-0.15	0.19	0.31	0.06	0.35	-0.14	0.88	1										
Amonio	-0.35	-0.18	0.33	-0.40	0.17	0.36	0.31	0.26	0.37	0.49	0.18	0.67	0.80	1									
Nitritos	-0.47	-0.54	0.21	-0.38	0.06	-0.52	0.29	0.08	0.11	0.37	0.01	0.26	0.26	0.42	1								
DBO	0.42	0.256	-0.66	0.21	-0.51	0.34	-0.49	-0.18	0.18	-0.05	0.26	-0.25	-0.25	-0.12	-0.31	1							
DQO	0.29	0.11	-0.37	0.46	-0.37	0.39	-0.43	-0.38	0.11	-0.08	0.23	-0.04	-0.05	-0.10	0.33	-0.20	1						
Sólidos	0.24	-0.02	0.20	0.07	0.03	0.27	-0.13	0.06	-0.55	-0.53	-0.38	0.30	0.10	-0.16	0.05	-0.32	0.24	1					
Sólidos	0.73	0.36	-0.22	0.67	-0.38	0.78	-0.71	-0.38	-0.25	-0.16	-0.16	0.03	-0.01	-0.11	-0.15	0.28	0.26	0.36	1				
Sol.	0.84	0.35	-0.49	0.72	-0.58	0.72	-0.77	-0.47	-0.16	-0.23	0.05	-0.14	-0.18	-0.27	-0.27	0.44	0.23	0.21	0.70	1			
Sólidos	0.05	-0.01	-0.23	-0.18	-0.26	-0.08	-0.08	0.21	0.36	0.25	0.34	0.11	0.23	0.44	0.01	0.55	-0.28	-0.34	-0.01	0.14	1		
Turbidez	0.79	0.42	-0.37	0.74	-0.49	0.87	-0.82	-0.40	-0.28	-0.28	-0.16	0.09	-0.12	-0.28	-0.24	0.26	0.45	0.41	0.89	0.69	-0.16	1	
Clorofila-	0.92	0.59	-0.69	0.74	-0.61	0.85	-0.86	-0.45	-0.08	-0.31	0.08	-0.33	-0.33	0.36	-0.43	0.61	0.26	0.18	0.70	0.83	0.19	0.74	1

De acuerdo con el diagrama de cromaticidad el color real del agua del lago cráter La Alberca de Teremendo fue verde.

Con respecto a los valores de turbidez en el agua se registró un valor promedio de 19.9 Unidades Nefelométricas (UNT) con una desviación estándar de 20.5 UNT. El valor máximo fue de 79.2 NTU en la superficie durante el mes de abril, mientras el valor mínimo fue de 1.4 UNT en la zona intermedia de la columna del agua durante el mes de septiembre. En la superficie se observó un aumento en la turbidez del agua particularmente en los meses de noviembre a julio, mientras que en el resto del año la turbidez registró unidades similares en las tres profundidades de muestreo (Figura 33).

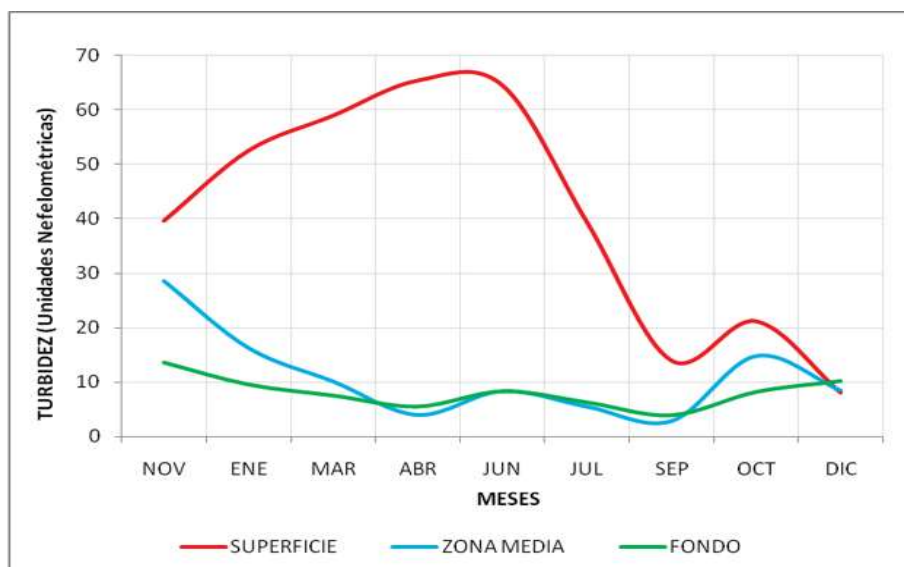


Figura 33. Variación temporal promedio del potencial de hidrogeno

Se registró un valor promedio de conductividad eléctrica de 821.0 $\mu\text{S/cm}$ con una desviación estándar de 90.05 $\mu\text{S/cm}$ (Figura 34). En el fondo del sistema, durante todos los meses, se registraron las concentraciones más altas de conductividad eléctrica; el valor máximo registrado fue de 1,042.0 $\mu\text{S/cm}$ durante el mes de julio. Mientras que en la superficie se obtuvieron las concentraciones menores, con un valor mínimo obtenido de 648.0 $\mu\text{S/cm}$ durante el mes de noviembre. De la misma manera, la zona de profundidad intermedia registró valores intermedios entre superficie y fondo con un máximo de 903.0 $\mu\text{S/cm}$ y un mínimo de 663.0 $\mu\text{S/cm}$.

De manera particular, en el mes de diciembre se registraron valores más homogéneos en las diferentes estaciones y estratos de muestreo con un promedio de 776.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una desviación estándar de 16.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Mientras que en el resto del año se registraron desviaciones estándar entre los 28.0 y 111.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$

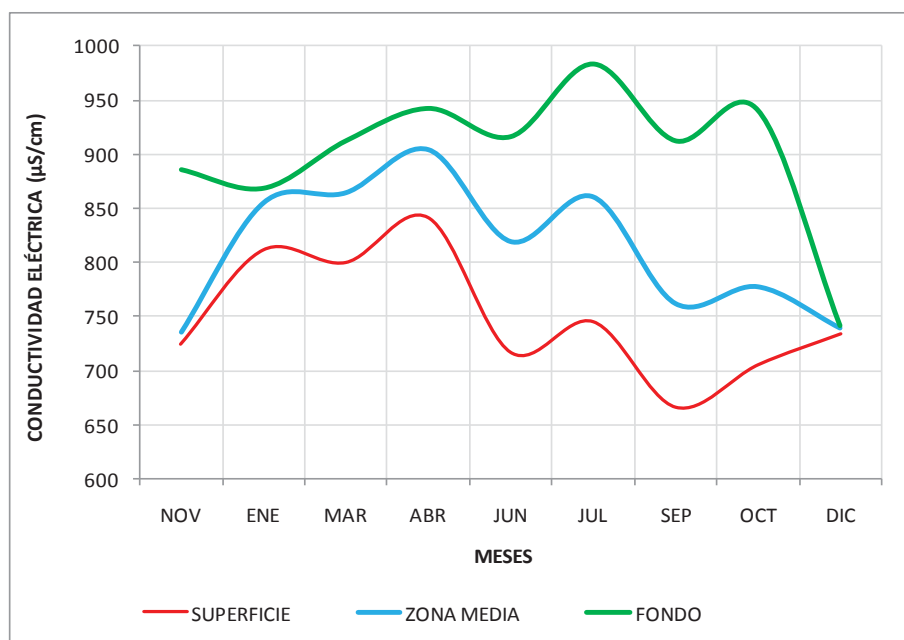


Figura 34. Variación temporal promedio de la conductividad eléctrica

En lo que refiere a la concentración de sólidos totales se registró un promedio de 383.4 mg/L con una desviación estándar de 157.1 mg/L. Sin embargo, durante el periodo de sequía se obtuvieron los valores más altos de sólidos totales en las tres profundidades de muestreo. La zona intermedia de profundidad registró una marcada disminución durante el mes de junio con relación a los valores de superficie y del fondo del sistema. El valor máximo registrado fue de 820.0 mg/L en la superficie en el mes de marzo, mientras que el valor mínimo fue de 65.0 mg/L en la zona intermedia durante el mes de junio (Figura 35).

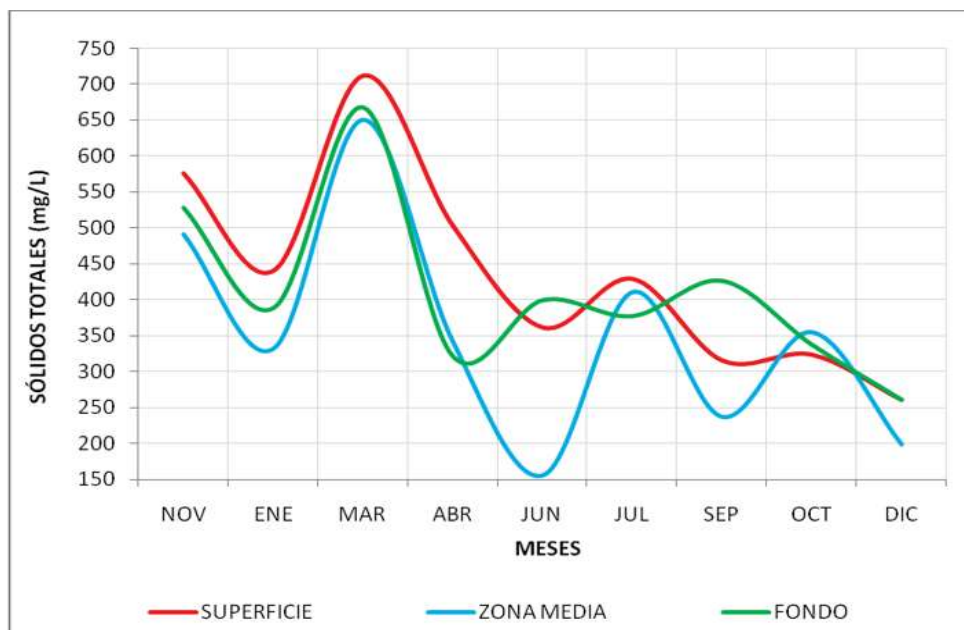


Figura 35. Valores promedio de sólidos totales del lago cráter La Alberca de Teremendo

La concentración de sólidos suspendidos totales registró un valor promedio de 17.7 mg/L con una desviación estándar de 11.6 mg/L. La cantidad de sólidos suspendidos totales en la zona de profundidad intermedia y en el fondo no registraron variación en sus valores de concentración, mientras que en la superficie se registró una amplia variación particularmente durante los meses de marzo, abril y junio. De esta manera el valor máximo fue de 52.5 mg/L en la superficie durante el mes de abril, mientras que el valor mínimo de sólidos suspendidos totales fue de 2.2 mg/L en la zona de profundidad intermedia durante el mes de octubre.

Se registró una relación directa entre la cantidad de sólidos suspendidos totales y la concentración de clorofila-a, con un coeficiente de correlación de 0.70 (Figura 36).

La concentración de sólidos disueltos totales registró un promedio de 14.8 mg/L con una desviación estándar de 11.3 mg/L. De manera particular, en la superficie del sistema se registraron altas concentraciones con un incremento en los meses de marzo y abril, con una disminución durante el mes de julio y un incremento en los meses de septiembre, octubre y diciembre. El valor máximo registrado fue de 43.5 mg/L durante el mes de abril,

mientras que la zona de profundidad intermedia y el fondo registraron valores similares de sólidos disueltos suspendidos. El valor mínimo fue de 2.0 mg/L en la zona de profundidad intermedia, durante el mes de noviembre.

Los sólidos residuales, se registró un valor promedio de 3.4 mg/L con una desviación estándar de 3.2 mg/L. La determinación de sólidos residuales indicó la existencia de concentraciones similares en las tres profundidades de muestreo, con un aumento en la superficie y en el fondo durante los meses de octubre y diciembre. El valor máximo obtenido fue de 17.3 mg/L en el fondo durante el mes de octubre, mientras que el valor mínimo fue de 0.8 mg/L en la zona de profundidad intermedia durante el mes de marzo (Figura 37).

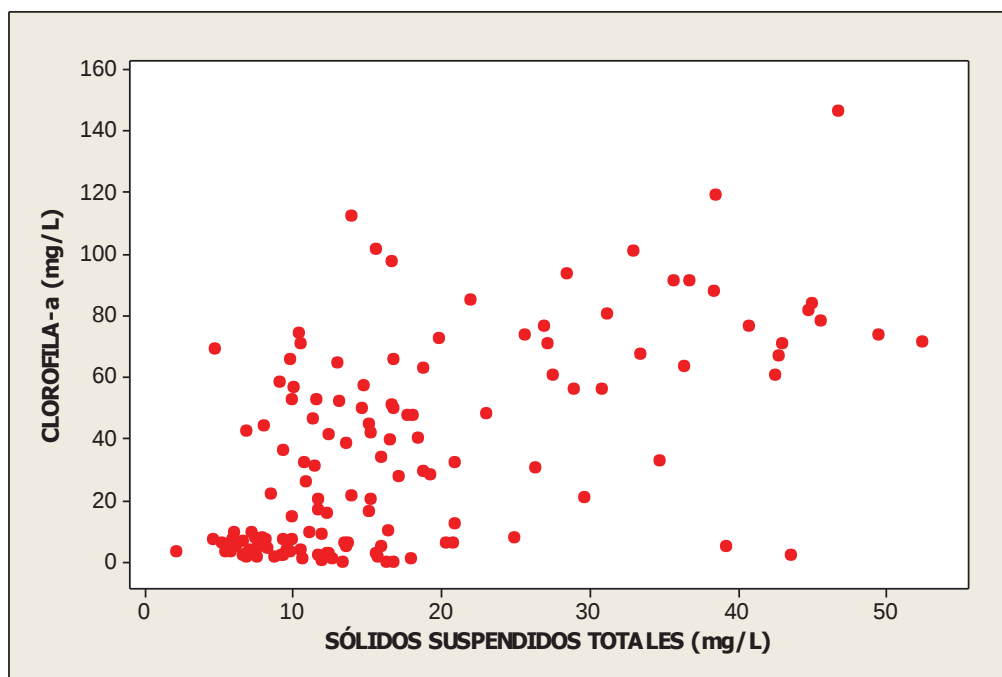


Figura 36. Correlación de sólidos suspendidos totales y clorofila-a. Coeficiente de correlación de 0.7

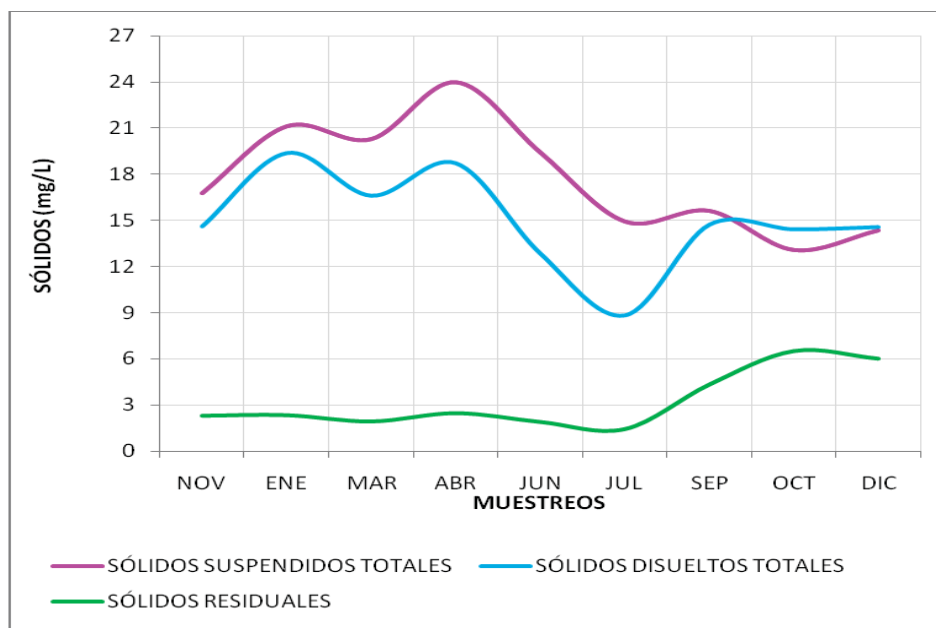


Figura 37. Valores promedio de sólidos del lago cráter La Alberca de Teremendo

Con relación a la concentración de sólidos sedimentables no existe una amplia diferencia en los valores, registrando un promedio de 0.2 mL/L

La concentración de oxígeno disuelto en el lago cráter La Alberca de Teremendo se caracterizó por la presencia de aguas oxigenadas en la superficie disminuyendo en su concentración a partir de los 3.0 m, con un fondo anóxico. En la superficie se registró un valor promedio de 6.1 mg/L, con una desviación estándar de 2.3 mg/L. El valor máximo se registró en el mes de octubre con una concentración de 9.9 mg/L. Los meses de noviembre y diciembre se registraron los valores mínimos de concentración de oxígeno disuelto con un promedio de 2.5 mg/L (Figura 38). De la misma manera, en la zona de profundidad intermedia la concentración del oxígeno disuelto fue menor a 1.0 mg/L.

Durante el mes de diciembre se registró una columna de agua homogénea a partir de los 2.0 m de profundidad con una concentración de oxígeno disuelto de 0.4 mg/L (Figura 38).

La saturación de oxígeno disuelto en la superficie del sistema registró un valor promedio de saturación de 64.9%. El valor máximo de saturación se registró durante el mes de octubre con un valor de 98.0%, mientras que el valor mínimo fue de 13.0% en el mes de diciembre.

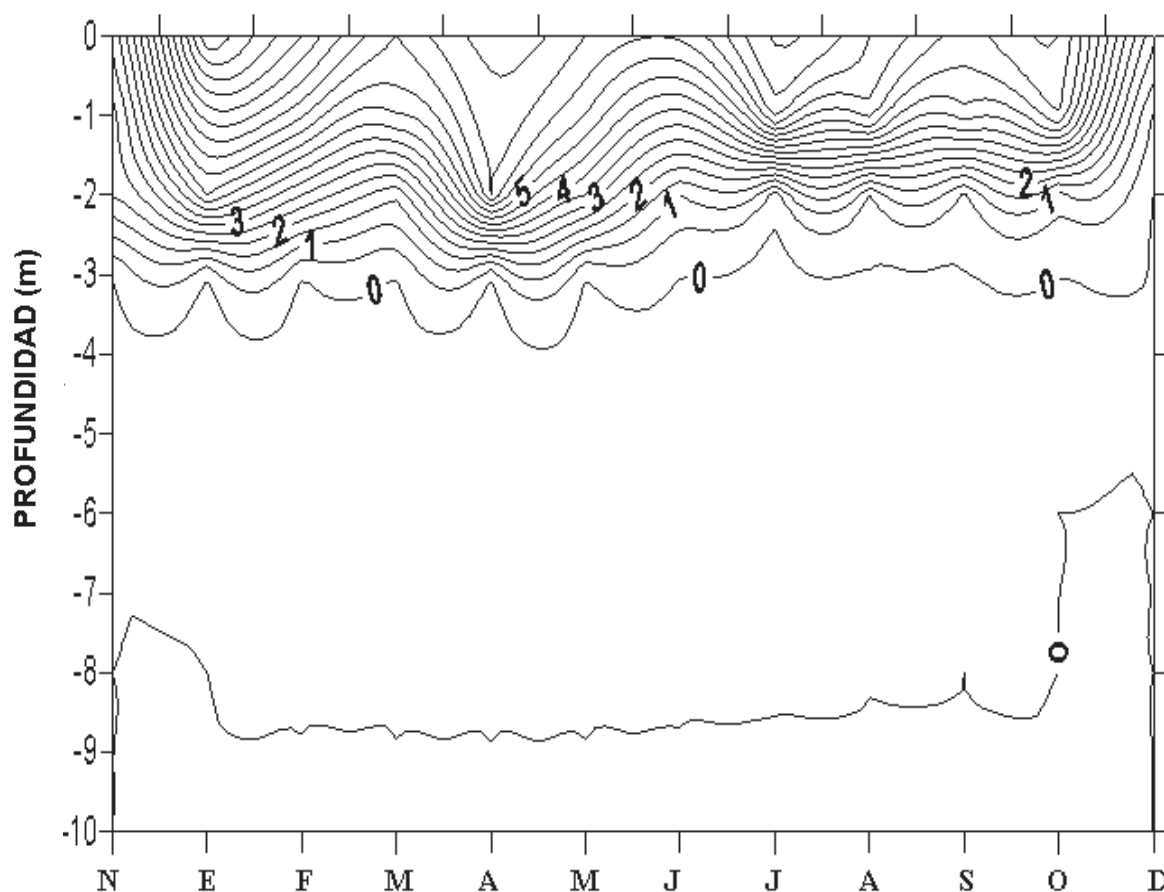


Figura 38. Distribución temporal del oxígeno disuelto en el lago cráter La Alberca de Teremendo (los números en el gráfico representan la concentración de oxígeno disuelto en mg/L)

El valor promedio registrado de potencial de Hidrógeno fue de 7.3 unidades con una desviación estándar de 0.9 (Figura 39). En la superficie se obtuvo un valor promedio de 8.2 durante la temporada lluviosa. En los meses de abril, junio, julio y septiembre se registraron valores de potencial de Hidrógeno superiores a 8.5. El mes de septiembre registró el valor máximo correspondiente a 9.4 unidades. Durante la época de estiaje o época seca los valores de potencial de Hidrógeno registraron una tendencia a los valores de neutralidad. La zona de profundidad intermedia registró valores que fluctuaron entre el carácter ácido, neutro y básico. El valor máximo registrado en la zona de profundidad intermedia fue de 8.7 durante el mes de junio, el valor mínimo fue 6.2 durante el mes de diciembre y el promedio de 7.1 unidades.

En el fondo se obtuvieron valores de potencial de Hidrógeno con tendencia hacia la acidez, con un valor mínimo de 5.8 registrado durante el mes de junio, mientras que el promedio fue de 6.5 unidades.

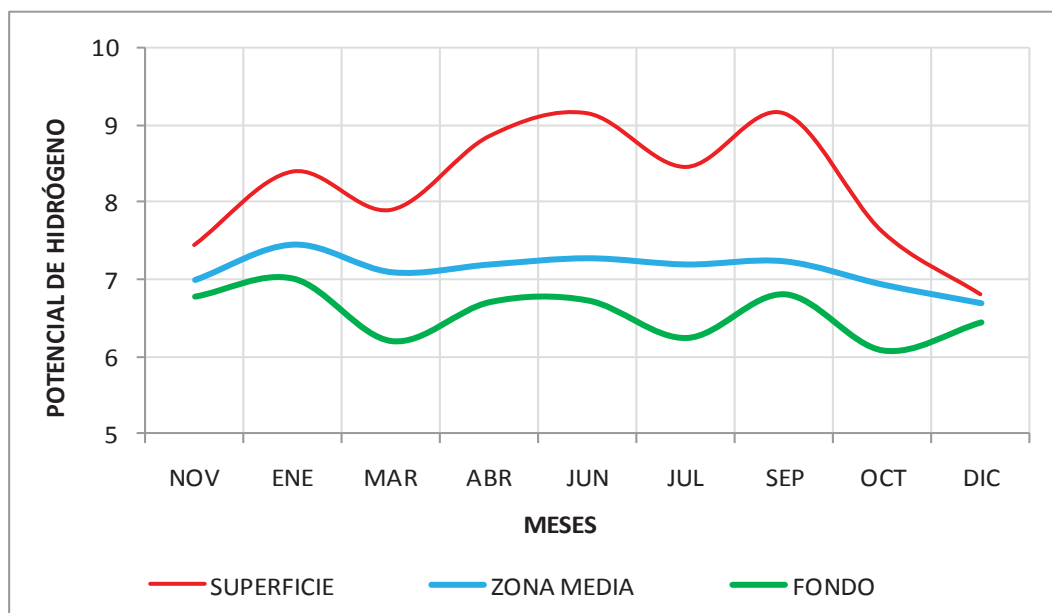
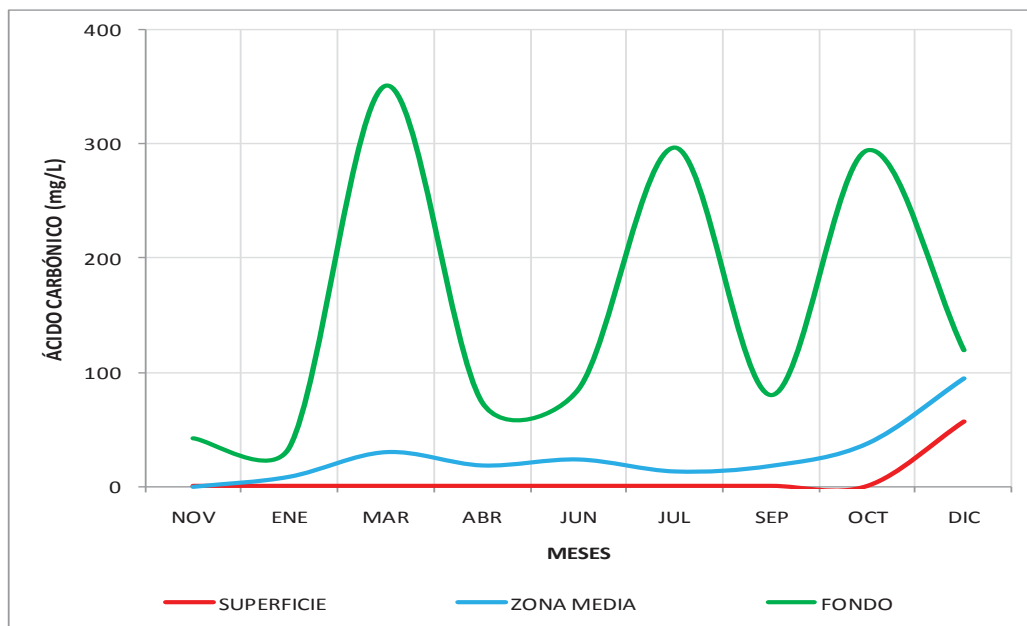


Figura 39. Variación temporal promedio del potencial de hidrogeno

La concentración promedio de bióxido de carbono disuelto fue de 62.6 mg/L con una desviación estándar de 108.5 mg/L (Figura 40). En la superficie del sistema únicamente durante el mes de diciembre se registró la presencia de ácido carbónico con un promedio de 56.9 mg/L. En la zona de profundidad intermedia se registró una concentración promedio de 28.7 mg/L. Finalmente, en el fondo del lago se registraron las concentraciones más altas, particularmente durante los meses de marzo, julio y octubre con valores promedio de 152.6 mg/L, la concentración mínima obtenida fue de 14.5 mg/L durante el mes de julio, mientras que la concentración máxima fue de 453.4 mg/L durante el mes de marzo.

Figura 40. Variación temporal promedio



dióxido de carbono

Los valores en la alcalinidad total registraron un promedio de 176.6 mg/L con una desviación estándar de 31.4 mg/L (Figura 41). Los valores indican que la concentración en la alcalinidad total es menor en la superficie con un aumento progresivo hacia el fondo del sistema. De esta manera, el valor más alto fue de 244.0 mg/L en el fondo, correspondiente al mes de septiembre, mientras que el mínimo fue de 106.0 mg/L en la superficie durante el mes de junio.

Durante la estación lluviosa se registraron intervalos de alcalinidad total más amplios en los diferentes estratos, mientras que en los meses de octubre, noviembre y enero (temporada seca) se registraron valores más homogéneos en la columna de agua (Figura 41).

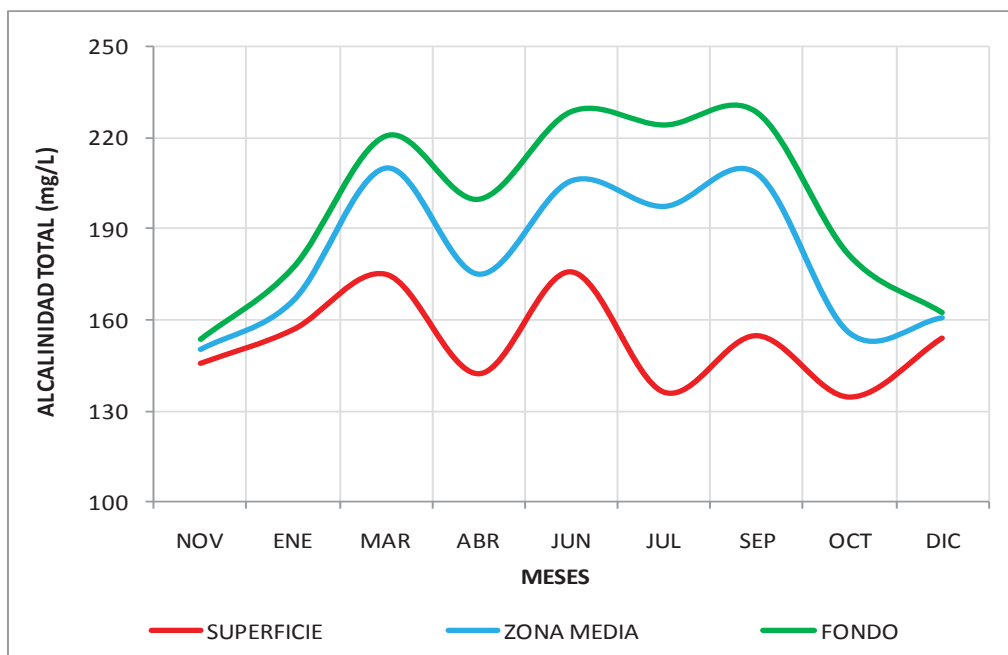


Figura 41. Variación temporal promedio de la alcalinidad total

La concentración promedio de bicarbonatos estimada fue de 155.0 mg/L con una desviación estándar de 55.6 mg/L. La concentración máxima fue de 244.0 mg/L registrada en el fondo durante el mes de septiembre mientras que el valor mínimo fue de 10.0 mg/L en la superficie del mes de abril.

Existe una correlación positiva del carbonato con el potencial de hidrogeno ($r^2 = 0.87$) y la clorofila-a ($r^2 = 0.84$).

La concentración promedio de carbonatos fue de 20.8 mg/L con una desviación estándar de 32.9 mg/L. La superficie registró concentración de carbonatos con un valor promedio de 58.4 mg/L, un máximo de 120.0 mg/L correspondiente al mes de junio (Figura 42), mientras que en el mes de diciembre no se registró concentración de carbonatos. En la zona de profundidad intermedia del lago cráter únicamente se registró una concentración de carbonatos durante el mes de noviembre. En el fondo no se registró la presencia de carbonatos.

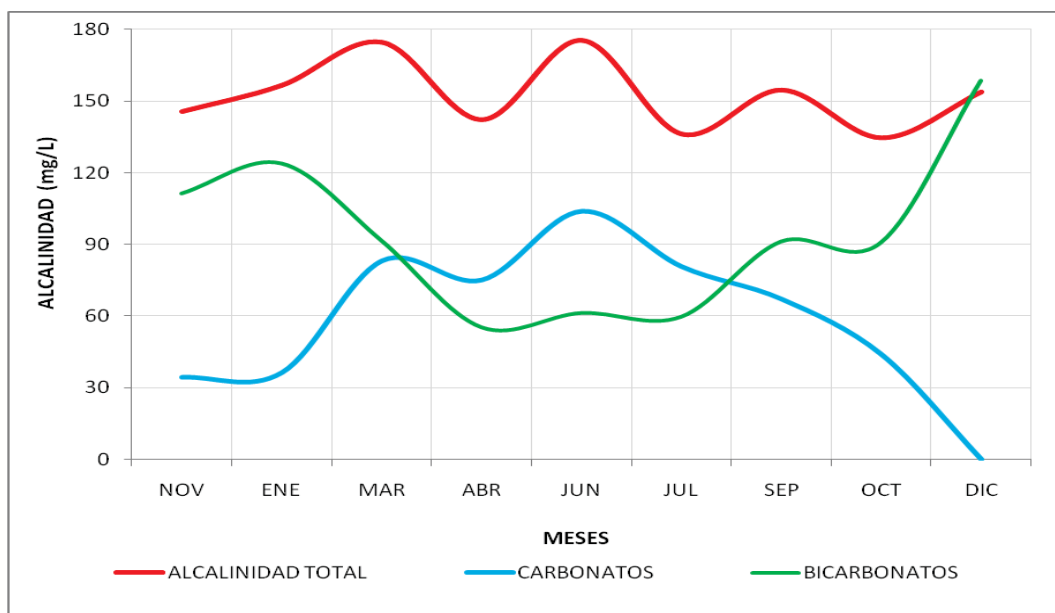


Figura 42. Variación temporal promedio de alcalinidad

La concentración promedio de dureza total fue de 125.8 mg/L con una desviación estándar de 35.9 mg/L. Los valores en la columna del agua fueron muy cercanos tanto en la superficie, zona de profundidad intermedia y el fondo. El valor máximo de dureza total fue de 216.0 mg/L registrado en la superficie durante el mes de enero. El valor mínimo fue de 60.0 mg/L registrado en la zona de profundidad intermedia, durante el mes de abril.

La Figura 43 indica un aumento significativo en el mes de enero, con una disminución en los meses de marzo y abril. Posteriormente se observó un aumento progresivo en el resto del año.

Con relación a los iones de calcio presentes en el agua los valores obtenidos durante el presente estudio indican que la concentración promedio fue de 22.6 mg/L, con una desviación estándar de 5.7 mg/L. La concentración máxima se obtuvo en el mes de enero en la superficie con un valor de 40.9, mientras que en el mes de marzo se registró una marcada disminución con respecto al resto del año con un valor mínimo detectado en el agua de 1.0 mg/L en la superficie (Figura 43).

En el mes de diciembre se registraron valores similares en la concentración de dureza asociada al calcio entre los estratos de muestreo de superficie, zona de profundidad intermedia y fondo.

Respecto a la presencia de magnesio en el agua los resultados obtenidos indican un valor promedio de 17.1 mg/L, con una desviación estándar de 7.5 mg/L. En los meses de noviembre, marzo, abril y junio se registraron valores en la concentración más bajos que el resto del año. El valor mínimo observado fue de 1.44 mg/L en el fondo durante el mes de abril, el valor máximo fue de 38.4 mg/L registrado en la superficie durante el mes de enero (Figura 43).

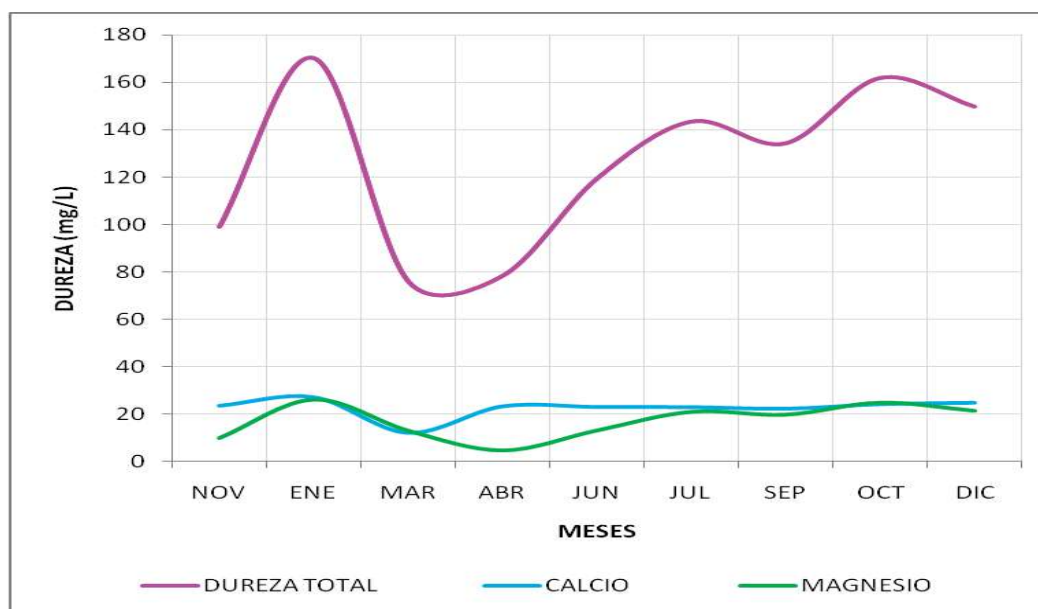


Figura 43. Variación temporal promedio de dureza

Los resultados obtenidos en la concentración de fósforo total mostraron un valor promedio de 231.0 $\mu\text{g/L}$ con una desviación estándar 150.3 $\mu\text{g/L}$ (Figura 44). Los valores en la concentración de fósforo total obtenidos del fondo indican que el mes de enero fue relativamente menor que los valores de la superficie y de la zona de profundidad intermedia. Los valores tanto de superficie como los de profundidad intermedia fueron relativamente similares. El valor máximo registrado fue de 939.5 $\mu\text{g/L}$ en el fondo del

sistema durante el mes de noviembre, mientras que el valor mínimo de concentración fue de 50.2 $\mu\text{g/L}$ en la zona de profundidad intermedia durante el mes de septiembre.

Los resultados obtenidos en la concentración de fósforo reactivo soluble u ortofosfatos en el sistema mostraron un promedio de 136.0 $\mu\text{g/L}$ con una desviación estándar de 136.6 $\mu\text{g/L}$ (Figura 44). Los valores indican que en el fondo se presentó una disminución en la concentración durante los meses de enero, julio y diciembre, mientras que en la superficie y en la zona de profundidad intermedia se manifiesta una tendencia menos variable tanto en la columna del agua como en los meses de muestreo. El valor máximo registrado fue de 176.7 $\mu\text{g/L}$ en el fondo durante el mes de noviembre, mientras que el valor mínimo de concentración fue de 23.5 $\mu\text{g/L}$ en el mes de noviembre en la zona de profundidad intermedia.

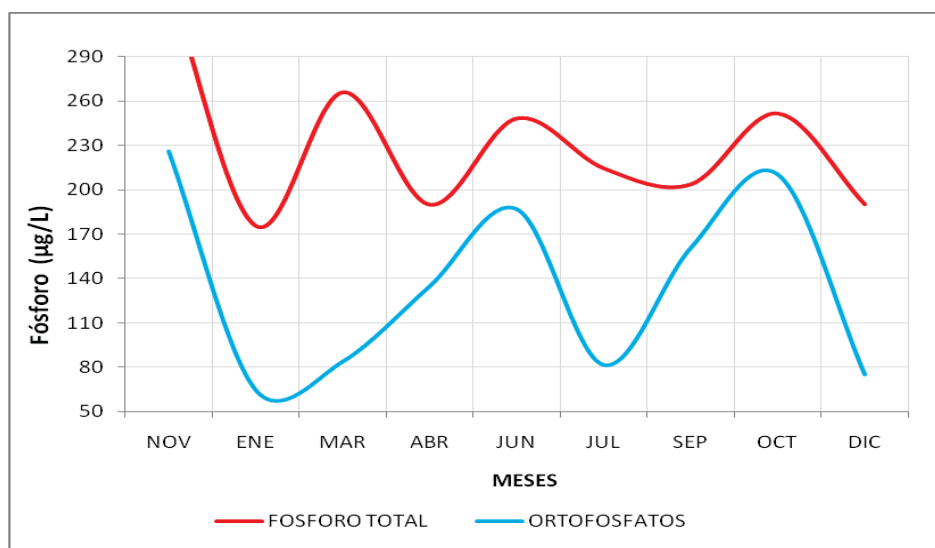


Figura 44. Variación temporal promedio de fósforo total y ortofosfatos

La concentración promedio de amonio en el lago cráter fue de 0.0169 mg/L con una desviación estándar de 0.0175 mg/L (Figura 45). La zona de profundidad intermedia y el fondo registraron una mayor variación temporal respecto a la concentración de superficie. En los meses de septiembre y octubre se registró un incremento significativo en la concentración de amonio en el fondo. El valor máximo detectado fue de 0.0924 mg/L en el fondo del sistema, durante el mes de octubre y un mínimo de 0.0013 mg/L en la superficie en el mes de abril.

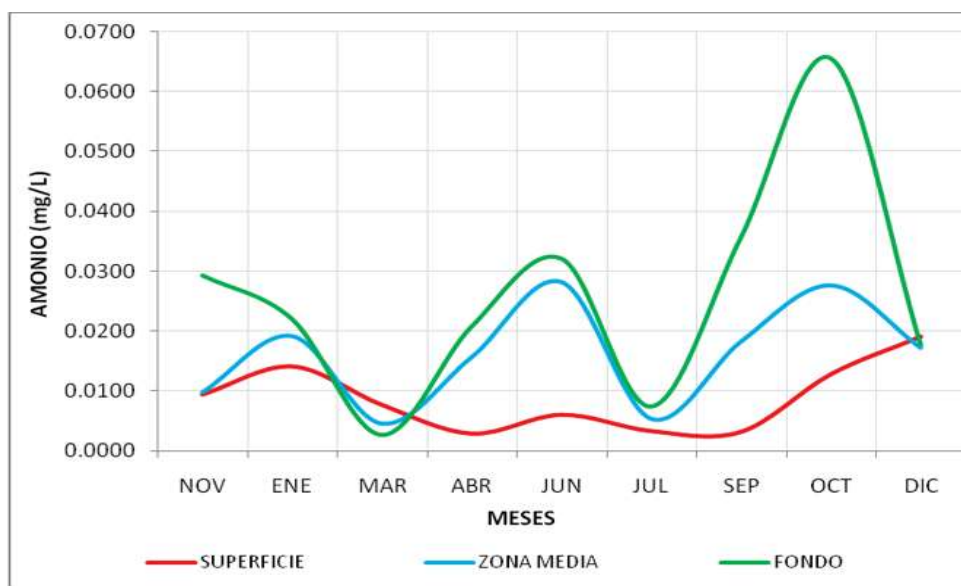


Figura 45. Variación temporal promedio de amonio

La concentración de nitrato disuelto en el agua registraron una concentración promedio equivalente a 0.013 mg/L, con una desviación estándar de 0.02, siendo el valor máximo de 0.09 mg/L en el fondo durante el mes de octubre, mientras que el valor mínimo detectado fue de 0.001 mg/L en el fondo.

El valor promedio en la concentración de nitritos en el agua fue de 0.02 mg/L con una desviación estándar de 0.02 mg/L (Figura 46). En el fondo se registraron los valores de concentración más altos de nitritos, con un incremento en los meses de noviembre y enero, mientras que en la superficie se registraron los valores de concentración más bajos con respecto a la zona de profundidad intermedia y el fondo. El valor máximo registrado fue de 0.09 mg/L en el fondo durante el mes de enero, mientras que el valor mínimo fue de 0.0 mg/L obtenido en diferentes meses de muestreo

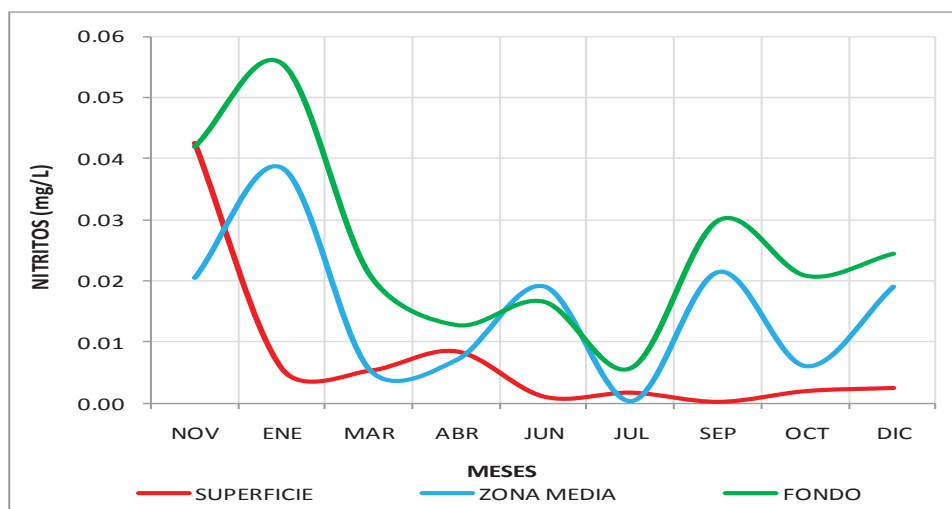


Figura 46. Variación temporal promedio de nitritos

El valor promedio de concentración de materia orgánica biodegradable fue de 11.7 mg/L con una desviación estándar de 7.8 mg/L (Figura 47). Durante los meses de marzo, abril y junio se registró una alta concentración de materia orgánica disuelta en la superficie con valores promedios de 17.0 mg/L. En los meses de julio y septiembre se detectó una disminución, mientras que en el mes de octubre se registró un aumento en la concentración. En la Figura 47 se observa que la zona de profundidad intermedia y el fondo registraron valores de concentración similares, con un incremento durante el mes de diciembre en donde se obtuvieron valores de concentración similares en los tres niveles de profundidad. El valor máximo de concentración fue de 36.0 mg/L en la superficie durante el mes de octubre, mientras que el valor mínimo de concentración fue de 1.6 mg/L en el fondo durante el mes de marzo.

Se registró un promedio de materia degradada químicamente de 4.61 mg/L con una desviación estándar de 8.7 mg/L (Figura 47). El análisis mediante la técnica de la demanda química de oxígeno indicó que los tres niveles de profundidad en el lago cráter registraron valores similares en los meses de noviembre enero y abril. En este último se registró una disminución en la concentración de materia orgánica particulada, con un incremento en la superficie durante los meses de junio, julio y septiembre. Finalmente, se registró una disminución durante el mes de diciembre. El valor máximo obtenido fue de 44.0 mg/L en la superficie durante el mes de enero, mientras que el valor mínimo de concentración fue de 1.0 mg/L durante el mes de octubre en el fondo.

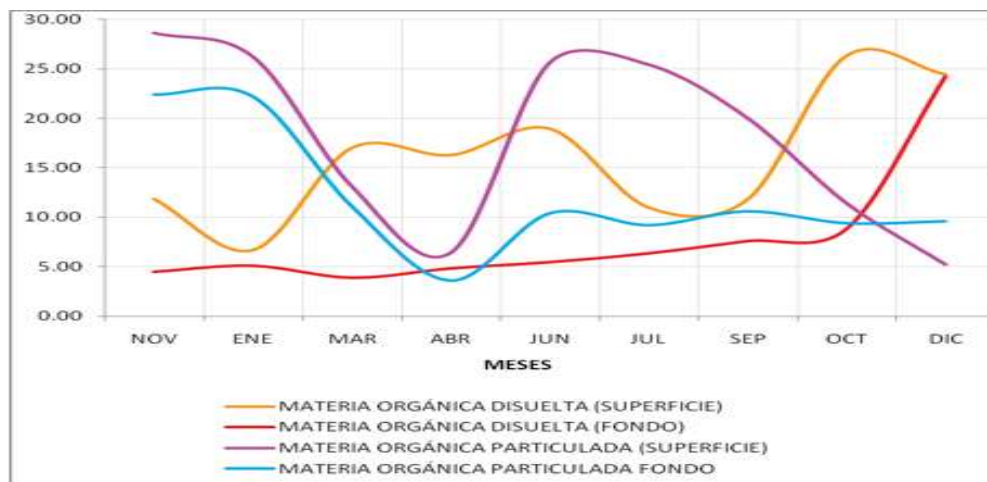


Figura 47. Variación temporal promedio de demanda química de oxígeno

El valor promedio registrado de clorofila-a fue de 34.7 mg/L con una desviación estándar de 33.1 mg/L (Figura 48). En la superficie se registraron los valores más altos de concentración con un valor promedio de 72.1 µg/L, el valor máximo fue de 146.3 mg/L en el mes de marzo, mientras que el valor mínimo fue de 30.7 µg/L en el mes de noviembre. La zona de profundidad intermedia registró valores promedio de 23.5 µg/L mientras que en el fondo se obtuvieron valores de 0.0 µg/L.

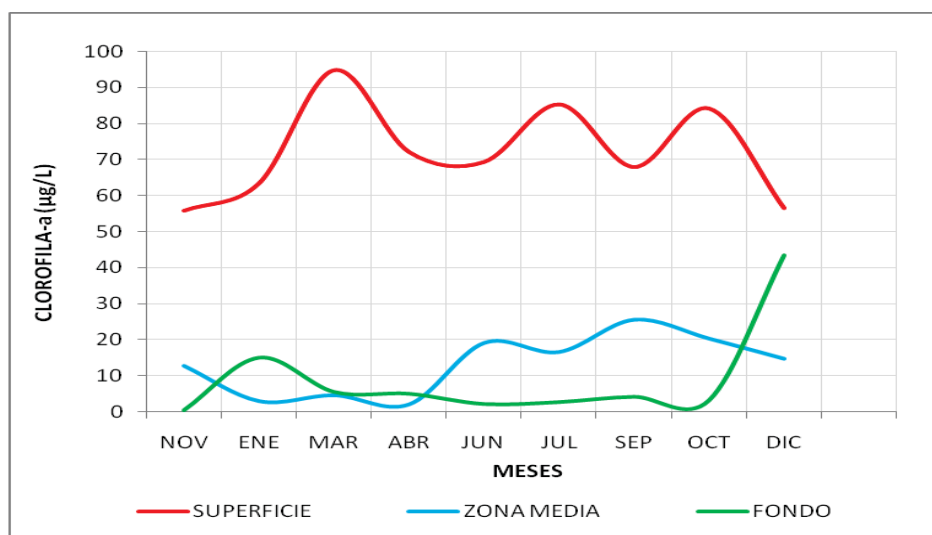


Figura 48. Variación temporal promedio de clorofila-a

La productividad primaria estimada en la superficie registró un promedio de 52.2 mgC/m³/día, con una desviación estándar de 11.6 mgC/m³/día. En la superficie del sistema se registraron las concentraciones mayores, el valor máximo registrado fue de 66.5 mgC/m³/día durante el mes de enero, el valor mínimo fue de 32.0 mgC/m³/día en el mes de diciembre. En el estrato de dos a tres metros de profundidad la productividad primaria disminuyó una concentración promedio de 15.2 mgC/m³/día, el mínimo fue de 1.5 registrado en el mes de septiembre (Figura 49).

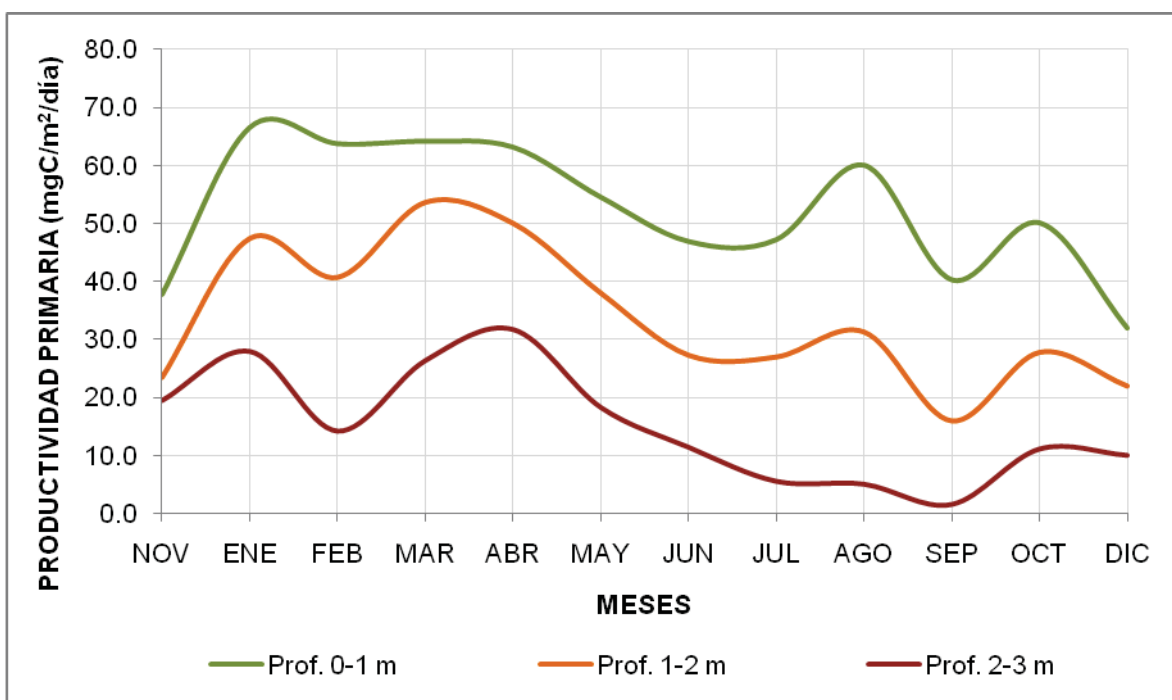


Figura 49. Productividad primaria por estratos

7.7. Sedimentos

Los sedimentos del lago cráter La Alberca de Teremendo presentaron una textura de tipo arcillosa con una composición de 11.51% arena, 71.08% arcilla y 30.29% de limo. El contenido de humedad fue de 77.1%, con una concentración de materia orgánica promedio de 33.9%. La concentración de fósforo total fue de 1.05 g/Kg y de ortofosfatos fue de 0.81 g/Kg.

VIII. DISCUSIÓN

La región central de México es una de las provincias que posee un amplio número de volcanes derivado de la intensa actividad que ha manifestado hasta el presente el Cinturón Volcánico Transmexicano, situado en el paralelo 19, que cruza el territorio nacional de este a oeste. Esta región se caracteriza por la presencia de cuencas lacustres que se ubican en zonas de influencia tectónica, volcánica y tecto-volcánica. El vulcanismo más reciente del estado de Michoacán se ha presentado en la Meseta P'hurépecha en la región centro y oriente del estado. Es el vulcanismo del denominado Corredor Tarasco y del oriente del estado de Michoacán el que incide en las cuencas lacustres del centro de México, incluyendo Cuitzeo-Charo, Chincua, Zacapu y Chapala (Israde-Alcántara, 1999) para formar a los lagos actuales como Chapala, Cuitzeo, Zacapu, Pátzcuaro, Zirahuén y algunos lagos cráter.

Los lagos cráter representan ecosistemas únicos y de gran valor ecológico, por su carácter de aislamiento y sus características propias en su calidad del agua. Sin embargo, la accidentada topografía del cráter, su tamaño relativamente pequeño y su actual dinámica ambiental los identifica como ecosistemas altamente frágiles con el riesgo de perder su diversidad biológica y sus atributos hidrológicos originales bajo los efectos de la presión del deterioro ecológico.

La región en donde se ubica el lago cráter La Alberca de Teremendo se describe por un clima templado subhúmedo con régimen de lluvias de verano (Cb), donde se registra diez veces más lluvia en la temporada húmeda del año en el mes de agosto, que en el mes más seco, es decir, marzo; la temperatura media de un mes por lo menos, desciende por debajo de los 18.0°C, mientras que la temperatura media anual se encuentra entre los 12.0 y 18.0°C, que representa un verano fresco y largo.

El porcentaje de precipitación invernal respecto a la cantidad total de lluvia es menor del 5.0% y la relación precipitación/temperatura es $43.2 < P/T < 55.0$, con un intervalo de oscilación de 5.0 a 7.0°C lo que representa poca oscilación (i'), es decir, que no existen variaciones significativas entre la temperatura anual más cálida y la más fría; el mes más cálido se presenta antes del solsticio de verano (g) indicando una marcha anual de temperatura tipo Ganges.

Lo anterior significa que la región en donde se ubica el lago cráter La Alberca de Teremendo recibe la precipitación en una temporada relativamente corta, caracterizada por lluvias torrenciales y una temporada seca larga en donde la insolación es directa sobre el lago cráter. El tipo de clima de acuerdo con el coeficiente de temperatura/precipitación es el menos húmedo de los climas sub húmedos lo que en consecuencia implica una baja aportación de agua de lluvia durante la temporada húmeda. Esta circunstancia necesariamente incide en el balance hidrológico y en las condiciones de humedad atmosférica que se presenta en el lago cráter.

Los lagos formados por la acción volcánica se caracterizan por una morfometría de forma relativamente uniforme comparado la variada morfología de otros sistemas como es el caso de los embalses.

El valor informativo del mapa batimétrico del lago cráter La Alberca de Teremendo, de acuerdo con los criterios sugeridos por Håkanson (1981), fue de 98.0% indicando que únicamente 2.0 % de área se encuentra sujeta a incertidumbre. Para incrementar el valor informativo del estudio batimétrico sería necesario realizar una campaña batimétrica con transectos más cercanos entre sí (50-75 m), así como una mayor longitud de sondeo. Sin embargo, considerando la homogeneidad del lago cráter, la información obtenida es razonable para la interpretación de procesos como el balance hidrológico, productividad primaria, dispersión de sedimentos y calidad del agua.

La relación de los parámetros morfométricos como longitud y amplitud máxima, amplitud media, perímetro o longitud de línea de costa, volumen y profundidad máxima y media, influyen en la dinámica de diversos procesos como la sedimentación, mezclado de la masa de agua, exposición al viento, generación de oleaje y distribución de gases disueltos.

El lago cráter La Alberca de Teremendo se encuentra dentro de una pequeña microcuenca delimitada por las paredes del cráter con una superficie de drenaje superficial de 76.0 ha, mientras que el lago posee un área total de 16.36 ha (0.1636 km²). Esta superficie comparada con otros sistemas lacustres michoacanos como los lagos de Cuitzeo (452.0 km²), Pátzcuaro (130.0 km²) y Zirahuén (10.4 km²) (Chacón, 1993) indica que es un sistema lacustre pequeño, comparado con el área superficial promedio de los

lagos cráter del territorio mexicano que es de 0.3545 km^2 , se infiere que el lago cráter La Alberca de Teremendo es relativamente pequeño dentro del grupo de lagos de origen volcánico que existen en el territorio nacional, considerando que el lago cráter con mayor área superficial es Alchichica en la Cuenca del Oriental en Puebla (1.8 km^2) (Gasca, 1982; Arredondo-Figueroa, 2002), mientras que el de menor área superficial es Manantiales (0.06 km^2) (Vázquez, 2007).

El lago cráter La Alberca de Teremendo es un sistema poco profundo, con una profundidad máxima de 11.0 m. La profundidad media (D) es uno de los parámetros morfométricos más utilizados, ya que es en diversos casos la profundidad a la cual se desarrollan algunos procesos dentro de cada sistema lacustre incluyendo la productividad primaria y algunas tendencias a la estratificación. En el lago cráter La Alberca de Teremendo se estimó una profundidad media (D) de 6.1 m. Los lagos profundos poseen proporcionalmente, una menor área superficial expuesta a la iluminación solar con tendencia a la baja productividad acuática, mientras que sistemas acuáticos poco profundos tiene una mayor área superficial expuesta a la incidencia de la luz solar además de estar estrechamente asociada a procesos ecológicos del medio terrestre.

Una forma de explicar los efectos de la profundidad sobre la dinámica de los procesos productivos en un lago es la aplicación de la relación superficie a volumen expresada como el radio de la extensión superficial sobre el volumen total del lago. En este sentido, un lago con un radio pequeño es un sistema que mantiene su mayor volumen en las capas profundas del lago lo que influye en menores tasas de evaporación y en la tasa de fotosíntesis de la superficie del agua. Por el contrario, un sistema con un valor alto en el radio de superficie a volumen sugiere que en sistemas tropicales se presenta una mayor tasa de evaporación del agua, además de que la superficie expuesta a la penetración de la luz es mayor con posibles tasas de productividad primaria altas.

En el lago cráter La Alberca de Teremendo el radio estimado de superficie a volumen es de 0.163, lo que sugiere que el mayor volumen de agua se encuentra expuesto a la insolación y que los procesos de evaporación prevalecen asociados a una mayor penetración espacial de la luz solar. Estas circunstancias influyen también en el balance hidrológico del lago, así como en la fluctuación de la temperatura de la columna del agua.

La profundidad relativa (Zr) expresa la profundidad máxima como un porcentaje del diámetro promedio de la superficie de un lago. La profundidad relativa se considera como un indicador de la estabilidad de la columna de agua. Wetzel (2001) señaló que la mayoría de los lagos superficiales poseen un valor de Zr menor al 2.0%, mientras que los sistemas profundos y de superficie pequeña exhiben una mayor estabilidad y tienen generalmente valores de Zr mayores del 4.0%. De acuerdo con lo anterior, el valor obtenido para el lago cráter La Alberca de Teremendo es de 2.5%. Lo anterior, sugiere poca estabilidad de la columna del agua, es decir que manifiesta una tendencia hacia la estratificación.

El índice de desarrollo de costa (DLC) es una relación entre la longitud y la circunferencia equivalente en el área. Este valor sugiere que para un lago con una forma perfectamente circular, el índice DLC deberá ser igual a 1.0. En el caso del lago cráter La Alberca de Teremendo el índice de desarrollo de costa fue de 1.08. Lo anterior indica un índice de desarrollo de costa cercano a una circunferencia, además de una baja rugosidad de fondo (1.53). La rugosidad de fondo explica la disposición de los sedimentos en el fondo del lago, así como su transporte dentro del sistema, como una medida de la irregularidad del fondo del lago.

La forma de rugosidad indica el grado de irregularidad topográfica, en el lago cráter La Alberca de Teremendo se obtuvo un valor de 28.0. Lo anterior indica que el lago cráter La Alberca de Teremendo posee una distribución de sedimentos homogénea y que los sedimentos acumulados en el fondo se han suavizado ligeramente con respecto a la distribución de sedimentos en la zona litoral.

En cambio, se presenta con una forma de rugosidad muy alta, lo que significa que la zona litoral actúa principalmente como un área de transporte y de transferencia, con pendientes abruptas lo que permite el transporte hacia el fondo.

Considerando que por ser un sistema poco elongado se presenta un bajo potencial para el desarrollo de comunidades litorales con relación al volumen de agua del lago. Esta es una característica que se observa en los lagos cráter (Hakanson, 1981, Kalff, 2003).

El lago cráter La Alberca de Teremendo presenta un valor de desarrollo de volumen (Dv) de 1.68. Los lagos con Dv igual a 1.0 tienen una forma de cono, mientras que un lago con un fondo plano posee valores de Dv cercanos a 2.0 (Kalff, 2003). Lo anterior se encuentra relacionado con la topografía del lago cráter en estudio, que indica que en los primeros 5.0 m de profundidad posee pendientes abruptas, esta pendiente se disipa presentando un área plana semejante a un tazón.

La curva hipsográfica directa establece la relación entre la profundidad y el área del lago, lo que indica que es poco homogéneo en la distribución de área con respecto a la profundidad. La curva hipsográfica relativa identifica al lago cráter de La Alberca de Teremendo como un lago de tipo “micro” considerando que la curva presenta dos puntos de inflexión. Estos valores lo clasifican como un lago de tipo linear (L) (Hakanson, 1981).

Esta clasificación de la forma del lago se identifica en la gráfica hipsográfica porcentual donde se determina las profundidades media y aquellas profundidades por cuartiles, sugiriendo que tres cuartas parte (75.0%) del área del lago cráter se ubica a los 4.0 m de profundidad, mientras que en el fondo posee una pequeña área.

Considerando que el lago cráter La Alberca de Teremendo es un sistema endorreico, el balance de agua se encuentra controlado principalmente por las diferencias entre la precipitación, evaporación y la infiltración procedentes del área de captación. Los registros del nivel del agua realizados durante el año 2009 indican que los meses con los valores de temperatura más altos que son abril y mayo, registraron las tasas más altas de evaporación superando las aportaciones de la lluvia. Esta situación en consecuencia ocasionó una disminución en el nivel del agua del lago cráter. Mientras que en la época lluviosa que se presenta en el verano, la evaporación disminuyó con un ligero desfase en la elevación del nivel del agua con respecto al inicio de la época lluviosa. En consecuencia, el escurrimiento tanto superficial como el agua de infiltración, manifestaron una demora relativa para que el sistema lacustre incrementara su nivel. El lago cráter registró su nivel más bajo durante el mes de julio (0.94 Mm^3), con un rápido aumento a partir del mes de agosto, alcanzando su nivel máximo durante el mes de septiembre (1.08 Mm^3). Al concluir la época lluviosa el nivel del lago inicia un descenso paulatino.

El volumen observado de agua en el lago cráter, es decir, el volumen medido en campo, es significativamente más alto que el volumen esperado mediante la estimación teórica obtenida con base a las variables de precipitación y evaporación en el área del lago cráter. Lo anterior, indica que la cantidad de agua que recibe el lago cráter y su elevación de nivel no solamente depende de la diferencia entre la precipitación y la evaporación, sino que necesariamente existe un suministro adicional de agua diferente a las aportaciones registradas de precipitación.

De acuerdo con INEGI (1982b) el tipo de roca en la zona de estudio es volcánica basáltica con una permeabilidad alta. Lo anterior, sugiere que el lago cráter La Alberca de Teremendo recibe agua mediante un flujo de infiltración del subsuelo, como lo indican la presencia de dos zonas de manantiales que se ubican dentro del cráter en orientación este y oeste respectivamente.

En consecuencia, la capacidad de infiltración es posiblemente alta, lo cual explica en principio el desfase en las oscilaciones anuales de nivel y su rápido incremento durante el mes de septiembre que se observan en el lago cráter.

Los resultados obtenidos del presente estudio sugieren que las diferencias entre la precipitación y la evaporación presentan efectos directos en los niveles del lago, no solamente en su ingreso directo sobre la superficie del lago, sino posiblemente en la dinámica de la infiltración.

De ser así, entonces el lago cráter La Alberca de Teremendo es un sistema frágil, particularmente en su sistema hidrológico y que puede ser afectado tanto por un proceso de deterioro como es el cambio de uso de suelo para la agricultura y los asentamientos humanos como el proceso de cambio climático, ya que hasta el momento los escenarios climáticos propuestos para el territorio nacional sugieren un incremento en la temperatura regional así como una disminución en la precipitación anual. Lo anterior afecta de manera particular al balance hidrológico.

Los movimientos provocados por la transferencia de energía del viento al agua es uno de los principales agentes externos que generan la hidrodinámica de un sistema lacustre, la eficiencia de esta transferencia de energía se encuentra determinada por la velocidad del

viento, la exposición del lago al viento, la morfometría del sistema lacustre y la estructura de la estratificación.

En el lago cráter La Alberca de Teremendo los vientos dominantes en el sistema lacustre son poco constantes tanto en las diferentes temporadas del año como en las diferentes horas del día. El sistema de vientos del lago cráter presentó su intensidad máxima después del medio día (12:00 horas), incrementando su intensidad por la tarde particularmente al principio de la temporada de otoño. Los vientos dominantes provienen del noreste, noroeste y sureste con una velocidad promedio de 9.0 km/h a lo largo del año.

Es posible que el sistema de vientos sea afectado por el pronunciado relieve del cráter. Las paredes del volcán extinto con una altura desde la superficie del lago de 300 m ofrecen una protección al lago que puede atenuar los efectos de los vientos sobre el sistema. Existe una correlación positiva ($r^2 = 0.93$) entre la deriva superficial y la velocidad del viento incidente, lo anterior sugiere que la hidrodinámica del lago cráter se encuentra influenciada principalmente por corrientes de deriva superficial generadas por el viento. El lago cráter La Alberca de Teremendo registró una baja deriva superficial (3.1 cm/s). De la misma manera, a los 2.0 m de profundidad se registró una corriente promedio de 2.5 cm/s.

La extinción de la luz en los lagos se incrementa con el aumento de la biomasa vegetal, la turbidez de origen inorgánico y el humus que en conjunto se encuentran suspendidos en el agua. El resultado es una tendencia hacia una delgada zona eufótica. Esta reducción de luz afecta directamente a la diversidad y distribución del fitoplancton, así como a la fauna del sistema lacustre a lo largo de la columna del agua.

El análisis de regresión lineal aplicado entre el logaritmo natural de los valores de la irradianza registrada en campo y la profundidad, presentó un valor en el coeficiente de extinción vertical determinado por la pendiente de la recta con un valor promedio de 9.4 m y una zona eufótica de 2.3 m, lo que significa que el 80% de la profundidad total del sistema acuático es una zona que presenta condiciones de oscuridad, lo que limita los procesos de productividad primaria y comparado con la laguna de la Media Luna e incluso con el lago cráter Alberca Los Espinos, los cuales presentan una zona eufótica de 32.94

m y 8.0 m respectivamente (Chacón, *et al.*, 2007), La Alberca de Teremendo es un sistema altamente turbio (Tabla 11), con altos valores de atenuación vertical de luz solar, en sus diferentes bandas cromáticas (azul, verde y rojo).

Esta tendencia en la extinción de la luz en el lago cráter La Alberca de Teremendo se manifiesta de manera inmediata en el primer metro de profundidad. Lo anterior sugiere que en el lago cráter existe una alta concentración de partículas suspendidas y pigmentos disueltos que aumentan los procesos de la reflexión, dispersión y absorción de la luz en el sistema. La luz infrarroja, roja y ultravioleta (UV) son absorbidas más rápidamente por el agua. Las longitudes de onda correspondientes a la luz azul y verde se extinguen antes que el color rojo el cual tiene longitudes de onda larga que no puede ser utilizada por una la mayoría de los organismos fotosintetizadores.

Tabla 11. Atributos ópticos de diferentes lagos

Sistema acuático	Zsd	Kd	c	Eu	Kd + c
Lago Cráter, Oregon, EUA.	45.0	0.06	0.50	12.00	0.56
Lago Tahoe, EUA	40.0	0.11	0.85	90.00	0.96
Lago Baikal, Rusia	40.0	0.12	0.86	75.00	0.98
Lago Mashu, Japón	38.0	0.14	0.91	71.00	1.05
Lago Ontario, Canadá	32.0	0.14	0.93	60.00	1.07
Lago Superior, Canadá	27.0	0.15	0.95	53.00	1.10
Lago Tangánica,	24.0	0.16	1.00	47.00	1.16
La Media Luna, S.L.P., México	22.0	0.14	1.14	32.94	1.28
Laguna de Zacapu, Mich., México	12.0	0.21	3.82	3.30	4.03
Zirahuén, Mich., México	6.5	0.30	1.20	15.10	1.50
La Alberca Los Espinos, Mich., México	4.5	0.34	2.41	11.19	2.75
La Alberca Tacámbaro, Mich., México	1.2	0.68	5.62	13.80	6.30
Lago de Pátzcuaro, Mich., México	0.4	3.10	10.26	1.58	13.36
La Alberca de Teremendo, México	0.25	10.92	14.1	2.3	25.02

De la misma manera, se estimó una profundidad de la zona eufótica de 1.8 m indicando una zona de productividad primaria en los dos primeros metros de profundidad de la columna de agua.

Los valores altos de K_d en este estudio sugieren altas concentraciones tanto de algas como de material inorgánico suspendido. El aumento en la zona eufótica registrado en el mes de diciembre posiblemente se debe a que los escurrimientos superficiales y el transporte de nutrientes son mínimos, además del periodo de circulación del sistema la cual mezcla el material suspendido en los tres primeros metros de profundidad a través de toda la columna de agua.

La lectura promedio de visibilidad con el disco de Secchi en La Alberca de Teremendo fue de 0.25 m, lo que comparado con otros lagos cráter en el estado de Michoacán como la Alberca de Tacámbaro con un valor de 1.2 m (Medrano, 2007) y el lago cráter Alberca Los Espinos con un valor de 4.5 m (Rendón *et al.*, 2007) es muy bajo. Más aún, si este valor se compara con otro de los sistemas de origen volcánico más transparentes del territorio nacional como es el lago cráter Alchichica (30.0 m) (Alcocer, 2002), entonces el valor promedio registrado para el lago cráter La Alberca de Teremendo sugiere un sistema de baja visibilidad.

La visibilidad del disco de Secchi ha sido empleada con frecuencia como una medida directa de la transparencia del agua, asumiendo que existe una relación constante entre la profundidad a la que desaparece el disco de Secchi (Z_d) y el coeficiente de atenuación vertical (K_d) con base a la ley de Lambert-Beer (En Chacón, 1993).

Con relación a la transmisión horizontal de la luz se observó que los valores de atenuación horizontal son muy altos con un promedio de 20.7 m. Lo anterior sugiere la presencia de altas concentraciones de sólidos suspendidos en el agua que favorecen a los procesos de dispersión de la luz.

Sin embargo, la interpretación de los valores registrados indica que en la superficie del sistema existe una transmisión de la luz del 2.0%, derivado de la presencia de la comunidad del fitoplancton que es la zona en donde se aprovecha la mayor cantidad de absorción de la luz solar para realizar la fotosíntesis.

El perfil de transmisión de la luz indica un aumento de la transmisión de la luz con la profundidad, es decir, en los primeros tres metros de profundidad existe una densa capa de sólidos suspendidos que limita la transmisión de la luz. A medida que aumenta la profundidad disminuye la concentración de sólidos suspendidos y aumenta la transmisión horizontal de la luz.

Lo anterior es posible asociarlo con los registros de turbidez en unidades Nefelométricas, los cuales indicaron concentraciones similares en el estrato medio y el fondo, mientras que en el estrato superficial se obtuvo un significativo aumento en la turbidez del sistema. Los valores observados en el coeficiente de atenuación horizontal y de turbidez (unidades Nefelométricas) de la luz sugieren la influencia de terrígenos posiblemente de origen alóctono o asociados a la naturaleza volcánica de los sedimentos. Este efecto puede ser un resultado de largos períodos de residencia de pequeñas partículas inorgánicas suspendidas además de material orgánico.

La distribución de la clorofila-a y de los sólidos suspendidos tienen determinada dependencia ($r^2 = 0.7$) sugiriendo que la mayor parte de los sólidos suspendidos en el sistema se encuentran asociados a las algas y el resto probablemente a material inorgánico. Los valores promedio de clorofila-a para el lago de cráter La Alberca de Teremendo se considera que son particularmente altos cuando se le compara con otros lagos mexicanos. La transmisión horizontal de la luz indica de manera más clara lo anterior, se identifica que en la superficie existe una capa con abundantes partículas suspendidas que disminuye conforme aumenta la profundidad, es decir, a partir de los tres primeros metros de profundidad disminuye la concentración de clorofila-a y de la misma manera disminuye la concentración de sólidos disueltos suspendidos.

El transporte de calor en el ecosistema acuático determina la influencia de diversos factores sobre el régimen hidráulico, las características fisicoquímicas del agua y su riqueza biológica dentro de un lago bajo diferentes escenarios, como el cambio estacional de temperatura.

En el lago cráter La Alberca de Teremendo se identificó una correlación positiva ($r^2=0.90$) entre la temperatura del agua y la temperatura ambiente. Con base en los resultados de

los perfiles de temperatura es posible identificar las variaciones térmicas anuales que ocurren en el lago cráter La Alberca de Teremendo.

Durante el mes de enero la temperatura en la superficie agua fue de 16.0°C con un máximo de diferencia de 1.5°C con respecto a la temperatura del fondo. En febrero la temperatura de superficie asciende hasta alcanzar 18.1°C, aumentando la diferencia entre superficie y fondo hasta en 2.7°C. A medida que la temporada calurosa continúa de abril a septiembre se registran las máximas temperaturas del agua, con un valor promedio de 22.5°C en la superficie y de 17.8°C en el fondo. La diferencia de temperatura entre superficie y fondo es de 4.7°C. El proceso de mezclado en el lago se presenta de octubre a marzo durante la época seca. La formación de capas de diferente temperatura inicia en el mes de abril y permanece constante durante la temporada lluviosa (mayo, junio, julio, agosto y septiembre).

En la época cálida y lluviosa la zona epilimnética se identifica en los primeros dos metros de profundidad y se caracteriza por un estrato superior de agua cálida. El metalimnio se ubica entre los 2.0 y 5.0 m de profundidad, en esta capa aumenta la discontinuidad térmica por la reducción de la temperatura de al menos 1.0 °C por cada metro de profundidad, definiéndose en este estrato la termoclina. El hipolimnio se ubica a partir de los 5.0 m de profundidad hasta el fondo y se caracteriza por ser un zona profunda, fría y con poco movimiento.

El periodo de lluvias de verano registrado en el lago volcánico Alchichica induce a una reducción gradual de 1.0°C en temperatura y a 0.5 g/L en la salinidad, disminución de 0.5 m en transparencia y un comportamiento irregular en el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (Alcocer y Filonov, 2007).

Las capas de epilimnio delgadas incrementan la posibilidad de que la materia orgánica particulada y los nutrientes asociados se alejen de la zona eufótica reduciendo su utilización dentro de los procesos de productividad acuática, además se convierte en una barrera para el transporte de los gases disueltos como el oxígeno, hacia las zonas más profundas, reduciendo la distribución de la fauna acuática.

Los valores en la densidad del agua sugieren que en la época correspondiente a la estación lluviosa existe la división del lago en capas con diferente densidad. En la superficie se identificaron aguas más cálidas y menos densas, este comportamiento de aumento progresivo de densidad se manifiesta hasta los 4.0 m y a partir de esta profundidad la columna de agua es homogénea, es decir la zona profunda posee aguas más frías y más densas. Mientras que en la estación seca no existen diferencias significativas de densidad en la columna de agua. Kalff (2003) menciona que en los trópicos durante la estación fresca el proceso de estratificación es revertido cuando la superficie se enfría reduciendo las diferencias de densidad hasta que el lago se mezcla.

Por su parte la amplia diferencia entre la temperatura máxima y la mínima que se registró a través del año (8.0 °C) sugiere que en La Alberca de Teremendo existen importantes aportes de calor al sistema durante las diferentes estaciones del año. La ganancia y pérdida de calor en los lagos tropicales es más pequeña comparada con aquella de los lagos que se ubican en latitudes o altitudes mayores.

Esto determina que el comportamiento sea más difícil de definir. La capacidad de almacenamiento de calor promedio fue de 11,129.4 cal/cm², con un rango de 9,341 - 12,239 cal/cm². Esta diferencia puede ser considerada como amplia comparada con los lagos de Valencia, Venezuela y Atitlán, Guatemala, los cuales presentan un rango de 4,755 – 5,862 cal/cm²/año y 22,110 – (-288,300) cal/cm²/año (Wetzel, 2001) respetivamente.

Las ganancias y pérdidas de calor en La Alberca de Teremendo pueden estar determinadas por la altitud y las estaciones del año; es decir durante la temporada más cálida (primavera y verano), la incidencia de los rayos solares sobre la superficie de la Tierra son más directos, creando gradientes en la temperatura y densidad del agua, donde la capa superficial o metalimnio posee aguas más cálidas y menos densa que disminuyen rápidamente con la profundidad, mientras que la zona profunda es una capa homogénea con aguas mas fría y menos densa.

Estas diferencias de temperatura y densidad en la columna de agua impiden la mezcla de agua desde la capa más profunda hasta la superficial creando una estratificación térmica.

En la estación seca (otoño e invierno), este proceso de estratificación térmica es revertido, existe pérdida de calor del agua, observando poca diferencia entre la temperatura de la superficie y la de fondo y en algunos meses como es el caso de diciembre y enero la temperatura es homogénea a través de la columna de agua, identificado este proceso como circulación.

El sistema convencional para clasificar los lagos de agua dulce de acuerdo a su temperatura propuesto por Förel (1895, En: Wetzel, 2001) modificado por Whipple (1898, Wetzel, 2001), divide a los lagos en tres tipos y tres órdenes de acuerdo a su temperatura de fondo, resultando en nueve tipos de agua dulce; polar, templado y tropical designados a su vez como de primer, segundo o tercer orden.

El lago cráter La Alberca de Teremendo se clasifica como un sistema tropical de segundo orden, debido a que la temperatura de superficie y fondo siempre es superior a los 4.0°C, además de presentar un período de circulación durante el invierno. De acuerdo a la clasificación propuesta por Hutchinson y Löffler (1956, Wetzel, 2001) y Hutchinson (1957, Wetzel, 2001) considerando su temperatura y períodos de circulación, se describe como un lago tropical cálido monomíctico, ya que su temperatura nunca baja de los 4.0°C, presenta un período de circulación en invierno y un período de estratificación térmica durante el verano. Lo anterior corresponde a lagos localizados en zonas montañosas de las regiones tropicales.

De acuerdo a la clasificación revisada de Lewis (1983 En: Kalff, 2003) en donde se integran al sistema de clasificación la profundidad, la latitud y un factor de corrección atendiendo a su altitud como variables para la clasificación de lagos (Kalff, 2003), el lago cráter La Alberca de Teremendo corresponde a un sistema monomíctico cálido.

El oxígeno disuelto en el agua es un indicador del metabolismo de un sistema acuático. Bajas concentraciones de oxígeno disuelto no solamente afectan la distribución y crecimiento de los peces e invertebrados, sino que también tiene una amplia influencia en la solubilidad del fósforo y otros nutrientes inorgánicos.

En el lago cráter La Alberca de Teremendo no se registró sobresaturación de oxígeno disuelto, el valor más alto fue octubre (98.0%), mientras que en noviembre y diciembre se

registró una baja saturación ($< 27.0\%$). Existe una relación directa ($r = 0.76$) entre la concentración de clorofila-a y la concentración de oxígeno disuelto en la superficie. Thomann y Mueller (1988) indican que las principales fuentes de oxígeno disuelto son la producción de oxígeno por parte de organismos autótrofos a través de la fotosíntesis, la reaeración del lago a través de su superficie libre y las entradas de oxígeno a través de tributarios al lago.

La fotosíntesis depende de la cinética de crecimiento de fitoplancton y en consecuencia de la disponibilidad de nutrientes y condiciones climáticas de luz y temperatura; en este sentido en La Alberca de Teremendo se registró una baja zona eufótica menor a los 2.0 de profundidad indicando que a partir de esta capa superficial los procesos fotosintéticos disminuyen. Es decir, se registró una brusca disminución en la concentración de oxígeno disuelto en los primeros dos metros de profundidad, disminuyendo a concentraciones menores a 1.0 mg/L a partir de los 3.0 m y permaneciendo anóxico desde los 4.0 m de profundidad hasta el fondo con excepción del mes diciembre en donde se registró una mínima concentración (0.4 mg/L) de oxígeno disuelto en toda la columna de agua.

Lo anterior puede estar asociado a que los lagos poco transparentes convierten la irradiación solar en calor cerca de la superficie. Los lagos turbios presentan un epilimnion menos profundo como resultado de que toda la energía absorbida en la capa superficial formará una amplia diferencia en la densidad del agua ocasionada por la diferencia en la temperatura entre la capa superficial que ha absorbido calor y la capa inferior de agua más fría y de mayor densidad.

Wetzel (2001) indica que el contenido de oxígeno del hipolimnion en lagos muy productivos –con gran cantidad de nutrientes y amplia producción orgánica- se agota rápidamente debido a los procesos de oxidación. La pérdida de oxígeno en el hipolimnion es el resultado del consumo realizado durante la oxidación de la materia orgánica en el agua y de manera particular de la interfase agua-sedimentos en donde la descomposición bacteriana es más intensa

La diferencia entre la cantidad de oxígeno presente por debajo de profundidad determinada se denomina déficit de oxígeno (Wetzel, 1983). En el caso del lago cráter La Alberca de Teremendo este déficit de oxígeno se registró entre el segundo y tercer metro

de profundidad, indicando una estrecha zona trofogénica, eufótica o fótica, en donde se realiza la actividad fotosintética y una zona trofolítica más amplia formada en el estrato profundo en donde se presenta la descomposición de la materia orgánica. Por lo tanto, la heterotrofia es dominante mientras que es posible que la autotrofia se inicie a partir del punto donde inicia la zona fótica. Esta relación de producción y consumo de oxígeno ofrece una estimación directa de la productividad de un lago.

La actividad de las comunidades biológicas puede ser evaluada de una manera análoga a la cuantificación del metabolismo en un organismo. El metabolismo de la comunidad es medido en un periodo de tiempo. La fotosíntesis total o bruta (P) se determina durante las horas de iluminación solar y se compara con la respiración total (R) durante un periodo de 24 horas. A partir de este procedimiento se puede establecer el radio P/R, sin conocer tasas específicas de fotosíntesis y respiración de individuos en el sistema. Es suficiente expresar que el incremento de oxígeno disuelto durante las horas de iluminación o periodo diurno refleja la fotosíntesis neta. La producción primaria bruta es proporcional a la cantidad de oxígeno generado. Considerando que el proceso de respiración predomina durante el periodo nocturno mientras el oxígeno es consumido.

El consumo de oxígeno nocturno (periodo de obscuridad de 12 horas) es el doble para representar la respiración total del ciclo dial (R). La mitad de esta respiración diaria es agregada a la fotosíntesis neta, la suma representa la producción primaria bruta (P) (Cole, 1994).

La proporción P/R tiende a variar día con día, de estación o de año pero puede ser indicador de la naturaleza del ecosistema. Cuando la proporción se acerca a 1.0 todo el material orgánico producido por organismos autótrofos es degradado para alcanzar un balance. Cuando la relación P/R es menor a 1.0, se considera al lago como un sistema heterotrófico alimentado por materia orgánica alóctona y cuando es mayor a 1.0 la dinámica productiva es dominada por producción primaria autóctona (Cole, 1994).

En este sentido, el lago cráter La Alberca de Teremendo es un sistema turbio con altas concentraciones de nutrientes y biomasa del fitoplancton. La proporción promedio de P/R es de 2.8 en la superficie, indicando que los organismos autótrofos producen más materia orgánica que puede aprovecharse por la respiración o puede almacenarse en los

sedimentos y en algún momento ser oxidada. A partir del primer metro de profundidad la proporción P/R es inferior a 1.0 dominando los procesos de heteretrofía o descomposición de la materia orgánica.

Los valores de conductividad eléctrica mostraron diferencias significativas a lo largo del año. Los valores relativamente altos tanto de conductividad eléctrica como de sólidos disueltos totales sugieren que las actividades de aprovechamiento que se llevan a cabo dentro de la cuenca en combinación con los procesos de evaporación son responsables por la alta concentración de iones en el agua.

Se registró un aumento en la concentración de iones en la estación seca relacionado posiblemente con la disminución en el nivel del agua por el proceso de evaporación. En este periodo seco las concentraciones en los diferentes estratos de muestreo registraron relativamente poca variación, acentuando esta condición en el mes de diciembre donde la desviación estándar de la conductividad eléctrica entre la superficie, la zona media y el fondo fue de 16.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ correspondiendo con el periodo de circulación del sistema. En la estación lluviosa se registró una disminución en la concentración de iones en la superficie aumentando esta condición en el mes de septiembre donde se registró el nivel de agua máximo, en el fondo la concentración de iones aumentó derivado probablemente del contacto con los sedimentos. Lo anterior sugiere que existe una disolución de iones con el aumento de agua en el sistema. Por su parte la zona media manifiesta que existe un aumento de la conductividad eléctrica en la columna de agua.

Lo anterior, es el resultado de la posible ocurrencia de dos procesos. En principio el lago cráter La Alberca de Teremendo es un sistema endorreico lo que favorece la concentración de sales en el agua con relación al tiempo. Un segundo proceso son la influencia de los escurrimientos superficiales, los cuales transportan material alóctono incluyendo materia fecal del ganado bovino y equino que pasta y abreva dentro del cráter, así como fertilizantes químicos derivados de los cultivos en las orillas del lago cráter, que llegan al sistema lacustre. Además por comunicación personal con los habitantes de la comunidad La Alberca se introducían directamente al lago detergentes derivado de las actividades de lavado de ropa y aseo personal esta actividad se realizó hasta el año 2005 cuando se proporcionó el servicio de agua potable a la comunidad extraída de un pozo que se ubica en la orilla suroeste del lago cráter.

La determinación de sólidos disueltos totales mide específicamente el total de residuos sólidos filtrables (sales y residuos orgánicos) que se encuentran presentes en forma ionizada o micro-granular en forma suspendida.

El promedio de sólidos disueltos totales para los ríos del mundo ha sido estimado en 120.0 mg/L (Livingston, 1963 *en* Cole, 1994). En el caso de los lagos, los valores de sólidos disueltos presentan una amplia variación. De acuerdo con Rawson (1951) y Hooper (1951) las concentraciones de sólidos disueltos totales guardan una correlación positiva con la productividad en lagos.

La alcalinidad se refiere a la cantidad y tipo de compuestos presentes que en conjunto modifican el potencial de Hidrógeno hacia lo alcalino. La alcalinidad se debe principalmente a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos.

El sistema de alcalinidad tiene interacciones importantes con los procesos de fotosíntesis y respiración. Durante el proceso de fotosíntesis se consume bióxido de carbono (CO_2), causando a su vez que el potencial de Hidrógeno aumente. El aumento en el potencial de Hidrógeno es el resultado de la baja en la concentración de bióxido de carbono (CO_2) libre que ocasiona a su vez una disminución en la concentración del ión hidronio (H^+) y en consecuencia un aumento en el potencial de Hidrógeno.

Con relación al potencial de Hidrógeno en el lago cráter La Alberca de Teremendo se registró un valor básico en la superficie, neutro en la zona intermedia y ácido en el fondo.

Se obtuvo una correlación directa del carbonato con el potencial de Hidrógeno y la clorofila-a ($r^2 = 0.87$ y 0.84 respectivamente) en el sistema. En la época lluviosa se registró un aumento en el potencial de Hidrógeno (> 8.5) con un aumento también en la concentración de carbonato asociado a una disminución proporcional en el bicarbonato. En la época seca se observó lo contrario, se registró una disminución en el carbonato, incluso en el mes de diciembre no se detectó su presencia, con una ligera disminución en la concentración de la clorofila-a y un aumento en el bicarbonato. Es decir, existe una correlación negativa entre el bicarbonato y la clorofila-a ($r^2 = 0.59$).

Los bicarbonatos fueron más abundantes en la zona de profundidad intermedia y en el fondo en donde el rango de valores del potencial de Hidrógeno se registró entre 6.7 y 7.5.

Por otro lado, los procesos de respiración aerobia y anaerobia generan bióxido de carbono (CO_2), causando la disminución en el potencial de Hidrógeno. Este proceso se registró de manera permanente en el fondo del lago cráter, como resultado de la descomposición de la materia orgánica, en las profundidades específicas en donde se agota el oxígeno pudieron presentarse condiciones de descomposición por la vía anaerobia, en consecuencia tiende hacia una condición de acidez que fue manifestada en valores promedio de 6.0.

Lo anterior coincide con lo registrado por Alcocer *et al.* (1998) en la Isla Isabel, en la cual se registra un potencial de Hidrógeno de 9.3, en la superficie del agua hasta ligeramente ácido de 6.4 en la zona anóxica.

La dureza del agua se encuentra regulada por el contenido de calcio y de magnesio, combinados principalmente con bicarbonatos y carbonatos (dureza temporal) y con sulfatos, cloruros y otros aniones de ácidos minerales (dureza permanente) (Wetzel, 2001). Por lo tanto, en el sistema existe la dureza temporal que se refleja en los resultados obtenidos de bicarbonatos.

De acuerdo con los valores de dureza total obtenidos en el lago cráter es posible asumir que las aguas de este sistema, se consideran como duras. Las aguas duras se caracterizan por concentraciones mayores a los 121.0 mg/L (Lind, 1985) en forma de carbonato de calcio (CaCO_3). La Alberca de Teremendo registró valores promedios de 125.0 mg/L.

El componente o ión dominante que determina la dureza en el sistema es el calcio que predomina en concentraciones brevemente mayores que las del ión magnesio. La proporción Ca/Mg es de 1.6. Lo anterior presenta dos efectos sobre la dinámica de ecológica del lago cráter. En principio la baja concentración de Magnesio en el agua representa posiblemente un factor limitante para la fijación de la clorofila en el sistema. Por otro lado, la concentración mayor de calcio constituye una fuente segura de este ión

disuelto para la construcción de caparazones y estructuras de protección en comunidades biológicas del fitoplancton como las diatomeas (Margalef, 1984, Wetzel, 2001).

Durante los meses de marzo y abril se registró una disminución en la dureza, esta puede ser el resultado del aumento en la temperatura y la evaporación.

La concentración de fósforo total así como en su forma disponible como fósforo reactivo soluble representa una de los insumos para la productividad primaria. Los altos valores de fósforo total (939.5 $\mu\text{g/L}$) registrados en el lago cráter La Alberca de Teremendo representan concentraciones típicas de lagos hipertróficos.

Los altos valores de ortofosfatos sugieren una amplia disponibilidad del fósforo en forma de fosfato reactivo soluble por parte de la comunidad vegetal. En el periodo de circulación térmica del sistema, los altos valores de fósforo total en la superficie estuvieron asociados con los también altos valores de la clorofila-a.

Las mayores concentraciones tanto de fósforo total como de ortofosfatos se registraron en el fondo del sistema, las cuales poseen una relación directa con la temperatura de fondo, sugiriendo que la temperatura del agua puede ser el factor determinante para la liberación del fosforo de los sedimentos a la columna de agua.

Por su parte en los sedimentos se registró una concentración promedio de fósforo total de 1.0 g/kg y de ortofosfatos correspondiente a 0.8 g/kg lo que indica que existe una amplia cantidad de fósforo retenido en los sedimentos el cual podría ser liberado al agua.

El amonio es el principal producto final de la descomposición de la materia orgánica realizado por bacterias heterótrofas. En el lago cráter se registró una amplia concentración de este compuesto principalmente en el fondo del sistema. Esta alta concentración probablemente está relacionada con la descomposición de la materia orgánica que existe en los sedimentos el cual posee una alta cantidad equivalente al 34.0%. En la superficie las concentraciones fueron más bajas respecto al fondo pero se consideran altas cuando alcanzan los niveles letales para peces en una concentración mayor de 0.025 mg/L.

Por el contrario, los compuestos de nitratos y nitritos fueron bajos principalmente en la superficie. Por lo tanto, es posible que el nitrógeno represente un nutriente limitante en el lago cráter para el crecimiento del fitoplancton en el mismo.

Los valores de nitrógeno en sus diferentes formas químicas sugieren que existe un proceso deficiente de nitrificación bacteriana y en consecuencia poca disponibilidad del nitrógeno en su forma de nitrato, para favorecer la productividad primaria acuática. Lo anterior sugiere que aunque existe una amplia cantidad de amonio en la columna de agua que no puede ser oxidado debido a la ausencia de oxígeno. A este respecto Kalff (2003) indica que se requieren 4.0 mg de oxígeno disuelto para la oxidación de un 1.0 mg de amonio (NH_4) a nitrato (NO_3), por lo tanto, el proceso de nitrificación emplea grandes demandas de oxígeno disuelto en el hipolimnio.

La relación de nitrógeno con fósforo estimada fue de un promedio de N/P 14.0. Lo anterior, significa que el fósforo permanece aún como un elemento químico limitante de la productividad primaria en el ecosistema.

Sin embargo, el nitrógeno no se encuentra en la abundancia necesaria para asegurar la limitación permanente del fósforo el cual se encuentra en grandes cantidades en el sistema. Este podría ser la explicación de que en los meses con estratificación térmica no existe una asociación de fósforo total con la clorofila-a, la cual puede estar limitada a la baja disponibilidad de nitrógeno como nitrato en el agua. Es conveniente indicar que el proceso de estratificación térmica regula todos ciclos fisicoquímicos y consecuentemente el metabolismo y productividad de un lago (Wetzel, 2001). Además de que este factor podría favorecer poblaciones mono específicas del grupo de las cianobacterias las cuales poseen la facultad de utilizar el amonio como fuente nutriente (Dodson, 2005).

La concentración de materia orgánica disuelta presentó valores superiores a aquellos que normalmente se registran en sistemas lacustres de carácter oligotrófico. Lo anterior puede explicarse por el ingreso de materia orgánica hacia el ecosistema acuático. En el lago cráter existe evidencia de aportes de materia orgánica al sistema lacustre que llega al lago de origen antropogénico incluyendo material fecal o residuos de agricultura o ganadería. Por lo tanto, es posible que una parte de la materia orgánica disuelta sea de carácter alóctono y se encuentre fuertemente asociado al medio terrestre que rodea al

vaso lacustre. Mientras que otra parte sea producto de la vegetación acuática que se ubica en toda la orilla del lago cráter. Para una condición de estratificación, la demanda de oxígeno de los sedimentos, puede causar hipoxia o anoxia en el hipolimnion. Esta es una condición en la cual los sedimentos provocan una disminución del oxígeno disuelto por la acumulación de material oxidable en el fondo, que al comenzar el proceso de mezcla provoca una demanda considerable de oxígeno en el epilimnion.

Esta elevada concentración de materia orgánica también se refleja en los sedimentos. De acuerdo a los valores de referencia para clasificar la concentración de materia orgánica en suelos volcánicos, una cantidad superior a 16.0% de materia orgánica se considera como muy alto (Aguilar, 1988).

El lago cráter La Alberca de Teremendo registró un porcentaje promedio de 33.9. Lo que indica que existe un importante aporte de materia orgánica derivado de las diferentes actividades que se realizan dentro del cráter y que por lo abrupto del relieve es relativamente rápida su deposición dentro del sistema lacustre.

Con los resultados obtenidos de este reconocimiento limnológico es posible identificar que el lago cráter La Alberca de Teremendo es un sistema acuático de agua dulce, poco profundo, con frecuentes periodos de discontinuidad térmica y ausencia de oxígeno en la columna del agua, con características de alta turbiedad derivada del origen volcánico de la región y de la concentración de materia orgánica, con una alta disponibilidad de nutrientes principalmente de fósforo. En consecuencia la productividad primaria o producción de biomasa vegetal es relativamente alta, comparada con otros sistemas lacustres regionales como los lagos de Pátzcuaro y Zirahuén (Chacón 1993).

Con base a lo anterior, es pertinente realizar una evaluación cuantitativa del estado trófico y el grado de contaminación de este sistema lacustre. Identificando que el estado trófico de un ecosistema es de gran trascendencia en gestión ambiental territorial, ya que permite determinar restricciones de uso de estos recursos y orientar medidas de recuperación y mitigación cuando corresponda.

El estado trófico de un ecosistema acuático es una condición difícil de definir ya que una descripción de la naturaleza trófica de cualquier sistema acuático se debería realizar con referencia al origen y formación del vaso lacustre, las propiedades del suelo y de las rocas

que conforman la cuenca de captación, además de considerar los registros históricos del uso y aprovechamientos tanto del vaso lacustre como de el medio que lo rodea.

Sin embargo, es un hecho que la eutroficación de un sistema acuático promueve circunstancias indeseables desde muchos puntos de vista: estético, turístico y, especialmente, ecológico y de aprovechamiento urbano derivado de un deterioro de su calidad. Por ello, se han desarrollado indicadores para definir las condiciones de salud de un sistema acuático.

Bajo esta condición, el término eutroficación se utiliza para describir los efectos biogeoquímicos y biológicos derivados de un incremento en el suministro y en la disponibilidad de nutrientes, generalmente compuestos de nitrógeno y fósforo, en los ecosistemas acuáticos.

En la Tabla 12 se presenta los promedios de las variables morfométricas, físicas y químicas que caracterizan a algunos lagos cráter que se ubican en la república mexicana, con la finalidad comparar estos sistemas acuáticos y el lago cráter La Alberca de Teremendo y así definir el estado ecológico de este sistema lacustre.

El lago cráter La Alberca de Teremendo posee un área total de 0.1636 km². Esta superficie comparada con el área superficial el lago cráter es Alchichica en la Cuenca del Oriental en Puebla (1.8 km²) se considera que el lago cráter La Alberca de Teremendo es relativamente pequeño dentro del grupo de lagos de origen volcánico que existen en el territorio nacional.

En el lago cráter La Alberca de Teremendo se estimó una profundidad media (D) de 6.1 m. Los lagos profundos poseen proporcionalmente, una menor área superficial expuesta a la iluminación solar con tendencia a la baja productividad acuática, mientras que sistemas acuáticos poco profundos tiene una mayor área superficial estrechamente asociada a procesos ecológicos del medio terrestre.

La visibilidad del disco de Secchi es una de las variables empleadas para evaluar el estado trófico de un lago.

Cuando la turbidez es debido a la presencia de fitoplancton más que el efecto de las partículas inorgánicas o al color del agua del sistema. De esta manera, un lago oligotrófico es un sistema que generalmente posee una transparencia igual o mayor que 6.0 m, mientras que un sistema hipereutrófico posee una transparencia igual o menor de 1.5 m (Kalff, 2003).

De acuerdo a lo anterior, el lago cráter La Alberca de Teremendo en relación con su valor de visibilidad (0.25 m) sugiere un sistema hipereutrófico, considerando que se registró una alta concentración de clorofila-a (72.1 µg/L), es posible que la turbidez sea ocasionada por la alta concentración de fitoplancton. En este sentido el lago cráter El Sol posee una alta transparencia y una baja concentración de clorofila-a definiendo su carácter de oligotrofia.

Las altas concentraciones de iones disueltos en el agua de La Alberca de Teremendo pueden estar favoreciendo un proceso de salinización del ecosistema, la amplia disponibilidad de fósforo aumenta la productividad acuática del sistema.

Naumann (1919) introdujo los términos generales de oligotrofia y eutrofia, definiéndolos en función de la comunidad fitoplanctónica.

Oligotrofia se define como un estado que se caracteriza por su baja biomasa fitoplanctónica, una alta transparencia del agua y una limitada concentración de nutrientes y sustancias húmicas. Por el contrario, eutrofia implica una elevada biomasa algal, reducida transparencia del agua, alta carga de nutrientes y baja concentración de sustancias húmicas.

Tabla 12. Comparación entre variables en diferentes lagos cráter blica mexicana

Variable	Alchichica Oliva <i>et al.</i> , 2001; Arredondo- Figueroa, 2002	Ataxcac Arredondo- Figueroa, 2002; Macek <i>et al.</i> , 2007	El sol Banderas- Tarabay <i>et</i> <i>el.</i> , 1991	Majahual Vázquez <i>et</i> <i>al.</i> , 2007	Verde Vázquez <i>et</i> <i>al.</i> , 2007	Isabel Alcocer <i>et al.</i> , 2007	Espinos Rendón <i>et</i> <i>al.</i> , 2007	Tacámbaro Medrano, 2007	Teremendo Autor
Área (km2)	1.81	0.29	0.23	0.49	0.12	0.03	0.09	0.08	0.16
volumen (Mm3)	69.90	6.10	1.50	16.00	0.20	-	1.86	1.08	1.00
Longitud máxima (km)	1.73	0.78	0.79	0.81	0.35	0.22	0.38	0.39	0.47
Profundidad máxima (m)	64.6	39.1	14.0	53.0	4.0	18.0	31.5	28.0	11.0
Profundidad media (D)	38.6	25.7	6.1	32.6	1.9	-	21.1	13.1	6.1
Desarrollo de volumen	1.80	1.90	-	1.80	1.30	-	4.49	1.40	1.68
Desarrollo de costa	14.40	18.80	-	1.10	0.90	-	0.72	1.18	1.08
Visibilidad de secchi (m)	8.00	4.70	9.00	2.30	0.40	0.10	4.50	1.20	0.25
Temperatura (°c)	20.4	20.1	8.8	28.3	28.4	30.0	16.8	23.8	17.8
Comportamiento térmico	Cálido monomíctico	Cálido monomíctico	Polimíctico	Cálido monomíctico	Polimíctico	Meromíctico	Polimíctico	Cálido monomíctico	Cálido monomíctico
Conductividad eléctrica (µs/cm)	11.6	10.9	19.3	146.5	207.9	100.0	125.0	194.3	821.0

CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA DEL LAGO CRÁTER LA ALBERCA DE TEREMENDO

Variable	Alchichica	Ataxcac	El sol	Majahual	Verde	Isabel	Espinos	Tacámbaro	Teremendo
Oxígeno disuelto (mg/l)	7.3	6.9	7.4	7.9	12.3	11.0	6.5	8.6	2.4
Potencial de hidrogeno	8.7	8.4	5.5	7.9	8.5	8.0	8.3	7.3	7.3
Nitratos (mg/l)	0.1600	0.0030	0.0047	0.6000	1.1000	7.4000	0.0160	0.1169	0.0128
Amonio (mg/l)	-	-	0.0029	0.2000	0.5000	3.9000	0.0040	0.0728	0.0169
Fósforo total (mg/l)	0.1200	-	0.0005	4.4000	4.4000	68.8000	0.0297	0.0230	0.2310
Ortofosfatos (mg/l)	0.0400	0.0430	-	0.8000	1.5000	-	0.0114	0.0034	0.1360
Clorofila "a" (µg/l)	2.9	4.0	1.1	57.2	153.6	-	2.2	3.4	34.7
Grado de eutrofización	Oligotrófico	Oligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hiper-eutrófico	Oligo-mesotrófico	Eutrófico	

En la Tabla 13 se identifican algunas características que pueden definir el estado ecológico de un sistema acuático (Dodson, 2005). En este sentido, en el área de estudio se practica de agricultura de riego y de temporal, el proceso de productividad primaria se realiza únicamente en los primeros tres metros de profundidad, el resto de la columna de agua es anóxico, posee una baja capa de algas que limita ampliamente la visibilidad del agua. Posee altas concentraciones de nutrientes en especial de fósforo. El color del agua es turbio con tendencia hacia el color café a verde.

Por lo anterior, el lago cráter La Alberca de Teremendo se puede definir como un sistema eutrófico considerando algunas variables las cuales fueron comparadas con otros lagos cráter que existen en México y con las características descritas en la Tabla 13.

En este sentido es necesario definir algunas medidas de conservación de este sistema acuático, las cuales deben estar orientadas a prácticas compatibles de uso de la microcuenca con el fin del mejoramiento de la calidad del agua.

Se deben restringir algunos usos que actualmente se presentan en el sistema acuático, como el de abrevadero para ganado vacuno y equino, libre pastoreo, uso de fertilizantes inorgánicos, deposición de basura; además se deben llevar a cabo algunas medidas de restauración como son protección de litoral, reforestación de las zonas altas y de pendiente pronunciada, control de la erosión y protección de manantiales.

Tabla 13. Características de lagos eutróficos y oligotróficos

Características	Lago oligotrófico	Lago eutrófico
Ubicación del lago y uso de la tierra	En la parte alta de la cuenca, alejado de la agricultura	En la parte baja de la cuenca, con uso de la tierra para agricultura
Productividad primaria	Baja, se produce tanto en el epilimnio como en el hipolimnio	Alta, confinada a la parte superior del epilimnio
Concentración de oxígeno en el hipolimnio durante el verano	Presente, mayor a 2 mg/L	Anóxico
Profundidad del disco de Secchi	Varios metro, frecuentemente dentro del metalimnio	Pocos metro, en el epilimnio
Zona fótica	La capa de algas se extiende hasta el hipolimnio	Incluye la parte baja del epilimnio debido a la densa capa de algas
Entrada de nutrientes inorgánicos	Baja	Alta, entran especialmente nitratos y fosfatos
Calidad del agua	Alta	Baja
Tamaño del lago	Todos los tamaños, incluyendo los lagos más grandes y profundos	Lagos de mediano a pequeños, frecuentemente superficiales
Apariencia del agua	Clara	Turbia, verde o gris
Producción de peces	Baja	Alta
Olor	Agua fresca	Algas fétidas
Textura del agua	Agua fresca	Viscosa
Desarrollo humano en la cuenca	Bajo	Agricultura intensa o desarrollo urbano
Ejemplo	Lago Tahoe, CA Lago Trout WI Crater Lake, OR Lago Dove, Tasmania	Lago Mendota, WI Lago Claro, CA

IX. CONCLUSIONES

El lago cráter La Alberca de Teremendo se encuentra situado en la vertiente sur de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano, dentro de la subprovincia Neovolcánica Tarasca, caracterizada por un vulcanismo reciente del Plioceno-Cuaternario es decir, entre 2.7 Ma y 40,000 años. Se clasifica fisiográficamente como sierra volcánica con llanuras, integrada por grandes cadenas montañosas de origen tecto-volcánico con amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arenas y cenizas y otras formaciones de origen volcánico que se encuentran dispersas en extensas llanuras, con una elevación promedio de 2,000 metros sobre el nivel del mar

El lago cráter La Alberca de Teremendo situado al suroeste del Altiplano Mexicano, es un lago tropical de altitud. Al igual que el resto de la región sur del altiplano el origen del lago se encuentra principalmente asociado con las actividades tecto - volcánicas de la última etapa del Terciario y el Cuaternario, lo cual continúa hasta el presente (Demant, 1978).

El clima de la región en donde se ubica el lago cráter La Alberca de Teremendo se describe por un clima templado subhúmedo con régimen de lluvias de verano, con poca oscilación térmica y la marcha anual de temperatura es de tipo Ganges.

El valor informativo del mapa batimétrico del lago cráter indica que únicamente 2.0 % de área se encuentra sujeta a incertidumbre. Mientras que el lago cráter es superficialmente pequeño y poco profundo en relación a otros sistemas acuáticos de origen volcánico del territorio nacional.

Se clasifica como un sistema de tipo *Lineal "micro"* considerando que la curva hipsográfica presenta dos puntos de inflexión.

El lago cráter La Alberca de Teremendo es un sistema endorreico, el balance de agua se encuentra controlado principalmente por las diferencias entre la precipitación, evaporación y la infiltración procedentes del área de captación.

Se considera un sistema frágil su sistema hidrológico y que puede ser afectado tanto por un proceso de deterioro como es el cambio de uso de suelo para la agricultura y los asentamientos humanos como el proceso de cambio climático.

Derivado del presente estudio se considera necesario determinar en el futuro la dinámica del proceso de infiltración hidráulica en el área de estudio, con respecto al ingreso de agua en el sistema, de manera que se determine el balance hidrológico con la precisión necesaria para definir estrategias de manejo que garanticen la permanencia de los niveles de agua en el sistema.

La hidrodinámica del lago se encuentra determinada principalmente por corrientes superficiales originadas por el viento con una posible deflexión hacia a la derecha por los efectos de la fuerza de Coriolis.

El lago posee un periodo de estratificación térmica y presenta déficit de oxígeno hipolimnético. Se detectan altos niveles de turbidez debido a la presencia de terrígenos de origen volcánico, descargas de origen doméstico y agrícola así como al incremento acelerado en las cargas de erosión. En consecuencia, el lago de cráter La Alberca de Teremendo se encuentra limitado en la disponibilidad de luz debido a los efectos de dispersión y atenuación de la luz solar por materiales inorgánicos de origen alóctono. La zona eufótica se encuentra localizada en una capa muy superficial en comparación con la profundidad de mezcla de agua. El lago es alcalino-carbonatado con niveles moderados de dureza, altos niveles de fósforo total, clorofila-a así como de sólidos suspendidos. Se aprecia una tendencia hacia la salinización del agua cuando se le compara con valores de conductividad registrados en el pasado.

X. REFERENCIAS

- Aguilar, V., 2003. Aguas continentales y diversidad biológica de México. Un recuento actual. CONABIO, *Biodiversitas*, 48: 15 p.
- Alcocer, J., A. Lugo, M. R. Sánchez y E. Escobar, 1998. Isabela crater-lake: a Mexican insular saline lake. *Hydrobiologia*, 381: 1–7 p.
- Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar, M. R. Sánchez y G. Vilaclara, 2000a. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic Lake Alchichica, Puebla, Mexico. *Verhandlungen Internationale Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnology*, 27: 3166–3169 p.
- Alcocer, J., E. Escobar y A. Lugo, 2000b. Water use (and abuse) and its effects on the crater-lakes of Valle de Santiago, Mexico. *Lakes & reservoirs: Research and Management*, 5: 145-149 p.
- Alcocer, J., E. Escobar y A. Lugo, 2001. The urgency of implementing sustainable water management plans in Mexico. En: Harper, D. y M. Zalewski (Eds). *Ecohydrology. Science and the sustainable management of tropical waters*. IHP-V, *Technical Documents in Hydrology* No 46. UNESCO, Paris, 96 pp.
- Alcocer, J., A. Lugo y M. G. Oliva, 2002. Los Lagos Cráter del Valle de Santiago, Guanajuato. En: De la Lanza Espino G., J. L. García Calderón (Comp). *Lagos y presas de México*. 2ª Edición. Editorial AGT Editor, México, 191-212 p.
- Alcocer, J., L. A. Oseguera, E. Escobar, L. Peralta y A. Lugo, 2004. Phytoplankton biomass and water chemistry in two high-mountain tropical lakes in Central México. *Artic, Antartic and Alpine Research*, 36: 342-346 p.
- Alcocer, J., O. A. Escolero y L. E. Marín-Stillman, 2005. Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. En: Jiménez, B. y L. Marín (Editores). *El agua en México vista desde La Academia*. Academia Mexicana de Ciencias. 57-78 p.

- Alcocer, J., y A. E. Folonov, 2007. A note on the effects of an individual large rainfall event on saline Lake Alchichica, México. *Environment Geology*, 53:777–783 p.
- Alcocer, J., D. P. López-Anaya y L. A. Oseguera, 2007a. Dinámica del carbono orgánico particulado en un lago tropical profundo. *En*: Hernández de la Torre, B., G. Gaxiola (Compiladores). *Carbono en ecosistemas acuáticos en México*. SEMARNAT, ENE.
- Alcocer, J., A. Lugo, M. R. Sánchez y L. A. Oseguera, 2007b. La Isla Isabela, Nayarit. *En*: De la Lanza-Espino. *Las Aguas Interiores de México. Conceptos y casos*. AGT Editor S.A. 391-398 p.
- Alcocer, J., E. Escobar y L. A. Oseguera, 2008. Acoplamiento pelágico-bentónico: respuesta de la zona bentónica profunda a la sedimentación del florecimiento invernal de diatomeas en el lago oligotrófico Alchichica, Puebla México. *Hidrobiológica*, 18, 115-122 p.
- Álvarez, J., 1950. Contribución al conocimiento de los peces de la Región de los Llanos, estado de Puebla (México). *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas*, 69 (2): 81-107 p.
- APHA. 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*,. 17^a edition. American Public Health, Inc. New York. 1193 pp.
- Armienta, M. A. y G. Vilaclara, S. De la Cruz-Reina, S. Ramos, N. Cenicerros, O. Cruz, A. Aguayo y F. Arcega-Cabrera, 2008. Water Chemistry of Lakes related to active Mexican Volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178: 249-258 p.
- Armitage, K. B. 1958. Lagos volcánicos de El Salvador. *Común.Inst. Trop. Cient.*, (1-2): 39-517 p.

- Arredondo, F. J., L. Borrego, R. Castillo y M. Valladolid, 1983. Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca de Oriental, Puebla, México. *Biótica*, 1: 31-47.8 p.
- Arredondo-Figueroa, J. L., 2002. Los Axalapascos de La Cuenca Oriental, Puebla. *En*: De la Lanza Espino G., J. L. García Calderón (Comp). *Lagos y presas de México*. 2ª Edición. Editorial AGT Editor, 191-212 p.
- Arreguín, C. F., P. Martínez-Austria y V. Trueba, 2004. El agua en México. Una visión institucional. *En*: Jiménez, B. L. Marín (Compiladores). *El agua en México vista desde la academia*. Academia Mexicana de Ciencias, México. 99-115 p.
- Banderas, T. A., R. González-Villela y G. De la Lanza-Espino, 1991. Limnological aspects of a high-mountain lake in Mexico. *Hydrobiologia*, 224: 1-10 p.
- Banderas-Tarabay, A. G., 1997. Phycoflora of the tropical high-mountain lake El Sol, Central Mexico, and some biogeographical relationships *Hydrobiologia*, 354: 17-40 p.
- Banderas-Tarabay, A. G. y R. González, 2002. Limnología de el Sol, un lago alpino tropical. *En*: De la Lanza Espino G., J. L. García Calderón (Comp). *Lagos y presas de México*. 2ª Edición. Editorial AGT Editor, México, 63-79 p.
- Bandy, W. L., C. A. Mortera-Gutierrez, J. Urrutia-Fucugauchi y T. W. C. Hilde, 1995. The subducted Rivera-Cocos plate boundary: where is it, what is it and what is its relationship to the Colima rift: *Geophysical Research Letters*, 22: 3,075-3,078 p.
- Beadle, L. C., 1966. Prolonged stratification and deoxygenation in tropical lakes. I. Crater Lake Nkugute, Uganda, compared with Lakes Bunyoni and Edward. *Limnology and Oceanography*, 11: 152-163 p.
- Caballero, M., G. Vázquez, S. Lozano-García, A. Rodríguez, S. Sosa-Nájera, A. C. Ruiz-Fernández y B. Ortega, 2006. Present limnological conditions and recent (ca. 340 yr) palaeolimnology of a tropical lake in the Sierra de Los Tuxtlas, eastern México. *Journal of Paleolimnology*, 35: 83-97 p.

- Cano, C. M., 2007. Evolución del Volcán La Hoya Estrada. Tesis de Maestría en Ciencias de La Tierra, UNAM, México. 135 p.
- Cantú, M. A., y H. Garduño, 2004. Administración de derechos de agua. De regularización a eje de la gestión de los recursos hídricos. En: Jiménez, B. L. Marín (Compilador). *El agua en México vista desde la academia*. Academia Mexicana de Ciencias, México. 99-115 p.
- Chacón, T. A., 1993. *Pátzcuaro un lago amenazado. Bosquejo limnológico*. Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo. 144 pp.
- Chacón, T. A., C. Rosas-Monge y J. Alvarado-Díaz, 2007. El Lago de Cuitzeo. En: De la Lanza-Espino (Compiladora). *Las Aguas Interiores de México, conceptos y casos*. Ed. AGT Editor, S. A. UNAM, México. 303-338 pp.
- Cole, G. A., 1994. *Textbook of limnology*. 4° edición. Waveland Press Inc
- CNA, Comisión Nacional del Agua, 2001, Programa Nacional Hidráulico 2001-2006. CNA. México. 412 pp.
- CNA, Comisión Nacional del Agua, 1998. Inventario de cuerpos de agua y humedales de México, escala 1:250 000. Subgerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, México.
- Correa, P. G., F. Vargas, S. L. Bravo, S. Figueroa, G. Sánchez-Díaz, E. Antaramián, X. Madrigal, A. Arévalo, G. Vargas-Urbe, M. Macias, G. Correa, V. Duran y J. M. Espinoza, 2003. *Atlas Geográfico del Estado de Michoacán*. SEP, UMSNH. Ed. Eddisa. 308 pp.
- De Buen, F., 1945. Investigaciones sobre la ictiología mexicana. I Atherinidae de aguas continentales de México. *Anales del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México*, 16(2): 475-532 p.

- Demant, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, *Instituto de Geología, Revista*, V. 2, 172-187 p.
- Demant, A., 1981. El Eje Neo-Volcánico Trans-México: estudio Vulcanológico y Petroológico: significancia geodinámica. Ph.D. Dissertation, Université De Droit, D'Economie et Des Science D'Aix-Marseille, 276 p.
- Demant, A., N. Labat-Jean, D. Michelet y J. Tricart, 1992. El Proyecto Michoacán 1983-1987. Medio Ambiente e Introducción a los trabajos arqueológicos. CEMCA. *Colection Etudes Mesoamericaines*, 11-22 p.
- Deevey, E. S., 1957. Limnological studies in Middle America *Transactions Connecticut Academy Arts Sciences*, 39.213-328 p.
- Dodson, S., 2005. *Introduction to Limnology*. McGraw Hill. 400 pp.
- Enfield, G. y S. O'Hara, 1999. Degradation, drought, and dissent: an environmental history of Colonial Michoacán, West Central México. *Annals of the Association of American Geographers*, 89: 402-419 p.
- Eric III, 2006. Banco de datos históricos nacional del Servicio Meteorológico nacional. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Escobar-Briones, E. y J. Alcocer, 2002. *Caecidotea williamsi* (Crustacea: Isopoda: Asellidae), a new species from a saline crater-lake in the eastern Mexican. *Plateau Hydrobiologia*, 477: 93–105 p.
- Escolero, O. A. y J. Alcocer, 2005. Deseccación de los lagos cráter del Valle de Santiago, Guanajuato. *En*: Jiménez, B. y L. Marín (Editores). *El agua en México vista desde La Academia*. Academia Mexicana de Ciencias. 99-115 p.

- Espinoza, H., P. Fuentes, M. T. Gaspar y V. Arenas, 1998. Notas acerca de la ictiofauna mexicana. En: Ramamoorthy, T. P., R. Bye, A. Lot y J. Fa (eds), *Biodiversidad biológica de México*. Instituto de Biología, UNAM, México, D.F. 227-249 p.
- Ferrari L., G. Pasquarè, S. Venegas-Salgado y F. Romero-Rios, 1999. Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block. *Geological Society of America*, special paper 334, 65-83 p.
- Ferrari, L., 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, V. LIII, 84-92 p.
- Folk, R. L., 1969, *Petrología de rocas sedimentarias*. UNAM, México D.F.
- Galván, A. y G. I. Labrada, 2007. Zooplankton de los lagos temporales: San Nicolás de Parangueo y Cintora, Valle de Santiago, Guanajuato, México. Primer Foro de Experiencias PAEA, Universidad Autónoma de México, Facultas de Estudios Superiores Ixtacala.
- Garcia, E., 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlos a las condiciones de la república mexicana)*. México D.F. 217 p.
- Garduño-Monroy, V. H., 1999. El vulcanismo del Mioceno-Pliocuatnario de Michoacán. En: Corona-Chávez, P. y I. Israde-Alcantara (Eds). *Carta Geológica de Michoacán escala 1:250,000*. UMSNH-IIM, Morelia, Michoacán. 46-74 p.
- Gasca, D. A., 1981. Algunas Notas de la génesis de Los Lagos Cráter de La Cuenca Oriental. INAH, México, *Colecciones Científicas* N° 98.
- Gasca, D. A., 1982. Génesis de los lagos cráter de la Cuenca de Oriental. *Colecciones Científicas del Instituto Nacional de Antropología e Historia*, 98, México. 45 p.
- Gee, G. W. y D. Or, 2002. En: Dane, J. H., G Clarke. *Methods of soil analysis*. Part 4-Physical methods. SSA Book Series 5.

- Green, J., 1986. Associations of zooplankton in six crater lakes in Arizona, in Mexico and New Mexico. *Journal of Zoology London*, 208: 135-159 p.
- Häkanson, L., 1981. *A manual of lake morphometry*. Springer-Verlag, Berlin. 78 pp.
- Häkanson, L., 1983. *Principles of lake sedimentology*. The Blackburn Press. 316 pp.
- Hecky, R. E., 1971. The paleolimnology of the alkaline, saline lakes on the Mt. Meru lahar. Ph.D. dissertation, Duke University, Durham, N.C. 209 pp.
- Holm-Hansen, O. y B. Rieman, 1978. Chlorophyll-a determination: improvements in methodology. *Oikos* 30, 438-447 p.
- Hutchinson, G. E., 1957. *A treatise on Limnology, 1. Geography and Physics of Lakes*. Wiley, New York. 540 pp.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1985a. *Síntesis geográfica del estado de Michoacán*.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1985b. *Carta Geológica, E14A12. Escala 1:50 000*. Coeneo de la Libertad.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1985c. *Carta Edafológica, E14A12. Escala 1:50 000*. Coeneo de la Libertad.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1999. *Carta hidrológica de aguas superficiales*. Escala 1:100,000; E. Michoacán.
- Israde Alcántara, I., 1999. Los lagos volcánicos y tectónicos de Michoacán. *En*: Corona-Chávez, P. E., I. Israde-Alcántara (Eds.). *Carta Geológica de Michoacán escala 1:250 000*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia. 46-74 p.
- Jerlov, N. G., 1976. *Marine optics*. Elsevier.

- Juday C., 1915. Limnology studies on some lakes in Central america. *Trans. Wis. Acad. Litt.* 18(1): 214-243 p.
- Kalff, J., 2003. *Limnology. Inland Water Ecosystems*. Prentice Hall, Upper Saddley River. 592 pp.
- Kilham, P., 1971. Biogeochemistry of African lakes and rivers. Ph.D. dissertation, Duke University, Durham, N.C. 199 pp.
- Kirk, J. T. O., 1983. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press. 401 pp.
- Kizito, Y. S., A. Nauwerck, L. J. Chapman y W. Koste, 1993. A limnological survey of some western Uganda crater lakes. *Limnologica*, 23: 335–347 p.
- Kling, G. W., 1988. Comparative transparency, depth of mixing, and stability of stratification in lakes of Cameroon, West Africa. *Limnology and Oceanography*, 33: 27–40 p.
- Lewis, W. M. Jr., 1983: A revised classification of lakes based on mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40: 1779-1787 p.
- Lind, O., 1985. *Limnology methods*. Kendall / Hunt Publishing Company. 191 pp.
- Llorente, J., N. Papavero y M. G. Simoes, 2002. *La distribución de los seres vivos y la historia de la tierra*. Ciencia para todos. SEP, FCE. 121 pp.
- Lugo, A., J. Alcocer, M. R. Sánchez y E. Escobar, 1998. Littoral protozoan assemblages from two Mexican hyposaline lakes. *Hydrobiologia*, 381: 9–13 p.
- Lugo, A., M. E. González, M. R. Sánchez y J. Alcocer, 1999. Distribution of *Leptodiatomus novamexicanus* (Copepoda: Calanoida) in a Mexican hyposaline lake. *Revista Biología Tropical*, 47:141–148 p.

- Lugo-Hubp, J., 2002. *La superficie de la tierra I. Un vistazo a un mundo cambiante. La Ciencia para todos No. 54*. Fondo de Cultura Económica, México. 148 pp.
- Macek, M., G. Vilaclara, A. Lugo y J. Alcocer, 2007. Lago de Ataxcac. *En*: De la Lanza-Espino, G. (comp). *Las Aguas Interiores de México. Conceptos y casos*. AGT Editor S.A. 200-212 p.
- Macias, J. L., 2005. Geología e historia eruptiva de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo. LVII, NÚM. 3, 379-424 p.
- Marín, L. E., 2002. Perspectives on Mexican. Ground Water Resources *Ground*, Vol. 40 No.6, p.570-571 p.
- MacIntyre, S. y J. M. Melack, 1982. Meromixis in an equatorial African soda lake. *Limnology and Oceanography*, 27: 595–609 p.
- Medrano, F., 2007. Estado trófico del lago cráter La Alberca de Tacámbaro, Michoacán México. Tesis de licenciatura, Facultad de Biología, UMSNH. 100 p.
- Melack, J. M., 1978. Morphometric, physical and chemical features of the volcanic crater lakes of western Uganda. *Arch. Hydrobiology*, 84: 430–453 p.
- Melack, J. M., 1979. Photosynthesis and growth of *Spirulina platensis* (Cyanophyta) in an equatorial lake (Lake Simbi, Kenya). *Limnology and Oceanography*, 24: 753–760 p.
- Miller, R. R., 1986. Composition and derivation of the freshwater fish fauna of México. *Anales Escuela de la Nacional de Ciencias Biológicas de México*, 30:121-153 p.
- Oliva, M. G., A. Lugo, J. Alcocer, L. Peralta y M. R. Sánchez, 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical hyposaline lake. *Hidrobiologia*, 466: 299-306 p.
- Ordóñez, E., 1906. Los Axalapascos de estado de Puebla. *Paregon Institute of Geology México*, 1(8): 348-405 p.

- Ortiz, S. C., 1984. *Elementos de Agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la república mexicana*. Universidad Autónoma Chapingo. 235 pp.
- Orozco, F. y A. Madinaveitia, 1941. Estudio químico de los lagos alcalinos. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 12: 429-438 p.
- Pasternack, G. B., y J. C., Varekamp, 1997. Volcanic lake systematic I. Physical constraints. *Bulletin of Volcanology*, 58, 528–538 p.
- Peralta, L., E. Escobar, J. Alcocer y A. Lugo, 2002. Oligochaetes from six crater lakes in Central Mexico: species composition, density and biomass. *Hidrobiología*, 467: 109-116 p.
- Prosser, M. V., R. B. Wood y R. M. Baxter, 1968. The Bishoftu crater lakes: A bathymetric and chemical study. *Arch. Hydrobiologie*, 65: 309–324 p.
- Ramírez-García, P. y R. Novelo, 1984. La vegetación acuática de los seis lagos cráter del Estado de Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 46: 75-78 p.
- Ramos, H. E., J. Alcocer, M. E. Ortega y A. Camacho, 2008. Nitrógeno: elemento limitante para el crecimiento fitoplanctónico en un lago oligotrófico tropical. *Hidrobiológica*, 18, 105-113 p.
- Rendón, M. B., A. Chacón y M. J. Rendon-López, 2007. Lago cráter: Alberca los Espinos, Villa Jiménez, Michoacán. *En: De la Lanza-Espino, G. Las Aguas interiores de México. Conceptos y casos*. AGT Editor S.A. 287-301 p.
- Ruiz, L. A. J., 1977. Algunos aspectos ecológicos de la Isla Isabel, Nayarit. Tesis de Biólogo. Facultad de Ciencias. UNAM. 115 pp.
- Ruiz-Martínez, V., 2003. Estudio paleomagnético del Cinturón Volcánico Transmexicano: Implicaciones Tectónicas. Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid. 248 p.

- Schmincke, H. U., 2006. *Volcanism*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 324 pp.
- Suter, M., O. Quintero, M. López, G. Aguirre, y E. Farrar, 1995. The Acambay graben—active intra-arc extension in the Trans- Mexican Volcanic Belt, Mexico: *Tectonics*, 1,245-1,262 p.
- Taylor, E. H., 1943. A new amblystimid salamander adapted to brackish water. *Copeia* 3: 151-156 p.
- Uribe, C. R. M. y J. Urrutia, 2005. Maars del Valle de Santiago. Un ejemplo de vulcanismo explosivo en el centro de México. *Vulcanologia Geos*, Vol. 25.
- Varekamp, J. C., G. B. Pasternack y G. L. Rowe Jr., 2000. Volcanic lake systematics II. Chemical constraints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97: 161–179 p.
- Vázquez, G., M. E. Favila, R. Madrigal, C. Montes Del Olmo, A. Baltanás y M. A. Bravo, 2004. Limnology of crater lakes in Los Tuxtlas, Mexico. *Hidrobiología*, 523: 59-70 p.
- Vázquez, G., S. Giménez, M. E. Favila y A. Martínez, 2005. Seasonal dynamics of the phytoplankton community and cyanobacterial dominance in a eutrophic crater lake in Los tuxtlas, Mexico. *Ecoscience*, 12(4): 485-493 p.
- Vázquez, G., M. Caballero, S. Lozano y A. Rodriguez, 2007. Las cráter de la región de Los Tuxtlas: Limnología, floral algal y estudio paleolimnológico de la deforestación reciente. En: De la Lanza-Espino, G. *Las aguas interiores de México. Conceptos y casos*. AGT Editor S.A. México. 215-232 p.
- Vilaclara, G., M. Chávez, A. Lugo, H. González y M. L. Gaytan, 1993. Comparative description of crater lakes basic chemistry in Puebla state, Mexico. *Verhandlungen Internationale Vereinigung fur Theoretische und Angewandte Limnology*, 25: 435-440 p.

Wetzel, R. G., 2001. *Limnology. Lake and River Ecosystems*. Third Edition. Academic Press, an Imprint of Elsevier. 1006 pp.

Zubieta, R. T. y A. C. Criollo, 2006. El Plan de manejo del área Natural Protegida “La Alberca” y “Cerro Hueco”. Facultad de biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y Secretaria de Urbanismo y Medio Ambiente. 43 pp.

Anexo 1.

Hoja de datos para calcular el almacenamiento de calor durante el mes de diciembre de 2009 (propuesta por Wetzel y Likens, 2000)

<i>I</i>	<i>II</i> (h_z)	<i>III</i> (A_z)	<i>IV</i>	<i>V</i> (t_z)	<i>VI</i> ($IV \cdot V$)
Profundidad (m)	Espesor de la capa (cm)	Área promedio de la capa (cm^2)	Volumen de la capa (cm^3) [II * III]	Temperatura promedio ($^{\circ}\text{C}$)	Ponderado, contenido calórico por capas ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^3$) IV*V]
0-1	100	1601960000	1.602E+11	15.7	2.5151E+12
1-2	100	1533910000	1.5339E+11	15.7	2.4082E+12
2-3	100	1456010000	1.456E+11	15.7	2.2859E+12
3-4	100	1321210000	1.3212E+11	15.7	2.0743E+12
4-5	100	1151710000	1.1517E+11	15.7	1.8082E+12
5-6	100	1011410000	1.0114E+11	15.7	1.5879E+12
6-7	100	892910000	8.9291E+10	15.7	1.4019E+12
7-8	100	673260000	6.7326E+10	15.7	1.057E+12
8-9	100	323960000	3.2396E+10	15.7	5.0862E+11
9-10	100	70260000	7026000000	15.7	1.1031E+11
Total ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^3$)					1.57575E+13
Área superficial (cm^2)					1636210000
Contenido calórico de todo el lago durante el mes de diciembre (cal/m^3)					9630.464305

Anexo 2.

Hoja de datos para calcular el almacenamiento de calor durante el mes de julio de 2009 (propuesta por Wetzel y Likens, 2000)

<i>I</i>	<i>II (h_z)</i>	<i>III (A_z)</i>	<i>IV</i>	<i>V (t_z)</i>	<i>VI (IV*V)</i>
Profundidad (m)	Espesor de la capa (cm)	Área promedio de la capa (cm ²)	Volumen de la capa (cm ³) [II * III]	Temperatura promedio (°C)	Ponderado, contenido calórico por capas (°C-cm ³) [IV*V]
0-1	100	1601960000	1.60196E+11	22.1	3.5403E+12
1-2	100	1533910000	1.53391E+11	21.2	3.2519E+12
2-3	100	1456010000	1.45601E+11	20.3	2.9557E+12
3-4	100	1321210000	1.32121E+11	19.4	2.5565E+12
4-5	100	1151710000	1.15171E+11	18.5	2.1249E+12
5-6	100	1011410000	1.01141E+11	18.1	1.8307E+12
6-7	100	892910000	89291000000	18.1	1.6162E+12
7-8	100	673260000	67326000000	18.0	1.2085E+12
8-9	100	323960000	32396000000	17.7	5.7341E+11
9-10	100	70260000	7026000000	17.6	1.2331E+11
Total (°C-cm³)					1.9781E+13
Área superficial (cm²)					1636210000
Contenido calórico de todo el lago durante el mes de julio (cal/m³)					12089.7708

Anexo3.

Datos estimación de la temperatura promedio en todo el volumen del lago cráter La Alberca de Teremendo

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Profundidad (m)	Temperatura (°C)	Estrato (m)	Volumen (m ³)	Volumen relativo	Temperatura media del estrato (°C)	Contenido de calor [IV*VI]	Temperatura promedio [V * VI]
0	22.5						
1	21.7	0-1	160196.0	0.160	22.10	3540331.60	3.53
2	20.7	1-2	153391.0	0.153	21.20	3251889.20	3.24
3	19.9	2-3	145601.0	0.145	20.30	2955700.30	2.94
4	18.8	3-4	132121.0	0.132	19.35	2556541.35	2.55
5	18.1	4-5	115171.0	0.115	18.45	2124904.95	2.12
6	18.1	5-6	101141.0	0.101	18.10	1830652.10	1.82
7	18.1	6-7	89291.0	0.089	18.10	1616167.10	1.61
8	17.8	7-8	67326.0	0.067	17.95	1208501.70	1.20
9	17.6	8-9	32396.0	0.032	17.70	573409.20	0.57
10	17.5	9-10	7347.0	0.007	17.55	128939.85	0.13
Total			1003981.0	1.000		19787037.35	19.71

Anexo 4. Valores promedio de calidad del agua obtenidos en el lago cráter La Alberca de Teremendo, Michoacán, México.

VARIABLE	Máx	Mín	$\bar{x}$	s
Temperatura (°C)	23.50	14.10	17.91	2.20
Conductividad eléctrica (µS/cm)	1042.00	648.00	821.22	90.05
Turbidez (Unidades nefelométricas)	79.20	1.09	18.31	19.63
Sólidos totales (mg/L)	820.00	65.00	383.36	157.11
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	52.50	2.20	17.74	11.63
Sólidos disueltos totales (mg/L)	43.50	2.00	14.98	11.38
Sólidos residuales (mg/L)	17.33	0.92	3.23	2.85
Sólidos sedimentables (ml/L)	0.4	0	0.2	-
Oxígeno disuelto (mg/L)	9.90	0.00	2.36	3.15
Potencial de Hidrógeno (Adimensional)	9.40	5.80	7.29	0.89
Alcalinidad total (mg/L)	244.00	106.00	176.60	31.40
Carbonatos (mg/L)	120.00	0.00	20.76	32.96
Bicarbonatos (mg/L)	244.00	10.00	155.53	55.58
Ácido carbónico (mg/L)	453.45	0.00	62.58	108.46
Dureza total (mg/L)	216.00	60.00	125.84	35.98
Calcio (mg/L)	40.88	4.01	22.57	5.73
Magnesio (mg/L)	38.37	1.44	17.15	7.51
Fósforo total (µg/L)	939.51	50.21	231.01	150.36
Ortofosfatos (µg/L)	776.68	23.48	136.04	136.60
Amonio (mg/L)	11.96	0.16	1.92	2.20
Nitritos (mg/L)	0.09	0.00	0.02	0.02
Nitratos (mg/L)	0.0911	0.0011	0.0128	0.0205
Demanda bioquímica de Oxígeno (mg/L)	35.99	1.61	11.67	7.79
Demanda química de Oxígeno (mg/L)	44.00	1.00	14.61	8.73
Clorofila-a (µ/L)	146.29	0	34.74	33.06

ANEXO I

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AC: Se refiere a las fechas obtenidas con base a dataciones radiométricas antes del nacimiento de Cristo.

Andesita: Roca de origen volcánico de color gris medio, que contiene entre 53 y 63% de sílice. El color, composición química, viscosidad y el carácter eruptivo son intermedios entre un basalto y una dacita.

AP: Antes del presente. Abreviación utilizada para una fecha ocurrida en el pasado.

Arco volcánico: Cadena de volcanes (islas o montañas) ubicada cerca de los límites de las placas tectónicas, formados como consecuencia del magmatismo asociado a las zonas de subducción.

Avalancha de escombros: Grandes deslizamientos que pueden ocurrir en un volcán y que desplazan grandes volúmenes de rocas y otros materiales a alta velocidad y a grandes distancias desde el volcán. Estos deslizamientos se producen por la inestabilidad de los flancos del volcán, evento que puede ocurrir por la intrusión de magma en el edificio volcánico, un sismo de gran magnitud o al debilitamiento de la estructura del volcán inducida por otros factores incluyendo la alteración hidrotermal.

Balístico (Fragmento): Fragmento de roca expulsado de forma violenta por una erupción volcánica y que sigue una trayectoria balística, en forma de elipse.

Basalto: Roca de origen volcánico de grano fino y color gris oscuro, que contiene menos de 53% de sílice (SiO_2). En estado fundido presenta una baja viscosidad, que implica una erupción generalmente no explosiva que produce flujos de lava.

Batimetría: Estudio cartográfico de la topografía del fondo que se encuentra debajo de la superficie de un sistema acuático o marino.

Blast: Término anglosajón que refiere a una explosión volcánica de gran escala producida por la despresurización violenta de un cuerpo de magma cercano a la superficie. Este fenómeno puede deberse a un deslizamiento de una parte de un edificio

volcánico. Un “blast” es una mezcla caliente de baja densidad de fragmentos de roca, ceniza y gases que se mueve a altas velocidades a través de la superficie terrestre.

Bloques y bombas volcánicas: Fragmentos de lava de tamaños superior a 64 mm expulsado por una erupción volcánica. Si son expulsados en estado sólido se denominan bloques, mientras que si son expulsados en estado semi-sólido o plástico se denominan bombas.

Caída de ceniza: (Lluvia de ceniza) Fenómeno por el cual la ceniza u otros materiales piroclásticos caen por acción de la gravedad desde una columna eruptiva. La distribución de ceniza es función de la dirección de los vientos dominantes.

Caldera: Gran depresión de origen volcánico, generalmente de forma circular o elíptica, de unidades de kilómetros hasta varias decenas de kilómetros de diámetro, formada por grandes erupciones volcánicas o por el colapso de un volcán debido al rápido vaciado del magma que se encuentra debajo de la montaña. La caldera tiene por lo general un diámetro mayor que el cráter original. La depresión u anfiteatro formada por el deslizamiento de un flanco de un volcán o colapso sectorial se denomina **caldera de avalancha**.

Cámara magmática: Reservorio subterráneo de magma ubicado varios kilómetros bajo un volcán.

Carbono-14: Método de dataciones radiométricas, basado en el decaimiento radiactivo del Carbono-14 en Carbono-12. Utilizado para determinar la edad de las erupciones volcánicas menores a 40,000 años antes del presente (AP).

Ceniza o ceniza volcánica: Fragmentos de roca de origen volcánico de tamaño menor a 2 milímetros expulsados en la atmósfera por una explosión volcánica.

Cinder: Fragmento de lava o roca de 1 cm de diámetro.

Colapso sectorial: Proceso de destrucción de una parte del edificio volcánico. Las avalanchas de escombros se producen por el colapso sectorial de un volcán.

Cono cinerítico: Volcán pequeño en forma de cono compuesto por cinders que se formaron alrededor de una ventana volcánica en un ángulo de reposo, aproximadamente de 32°, por ejemplo en el ángulo en que se apila un montículo de arena fina.

Columna eruptiva: El material expulsado por una erupción volcánica puede ascender verticalmente sobre el cráter, formando una nube de erupción o columna eruptiva.

Conducto volcánico: Pasaje subterráneo por el cual el magma asciende desde una cámara magmática hacia la superficie.

Corteza: Parte más externa y rígida de la Tierra. Generalmente está constituida de rocas de composición basáltica como los océanos o de rocas más silíceas como los continentes.

COSPEC: ver Espectrómetro de correlación

Cráter: Depresión de forma aproximadamente circular, de menos de 2 kilómetros de diámetro, con paredes de alta pendiente o muy empinadas, generalmente ubicada en la cima de un volcán y formada por la explosión o el colapso asociado/a con una erupción volcánica.

Cuaternario: Período de la historia geológica iniciado hace 2 millones de años. Está constituido por dos épocas: el Pleistoceno (2 millones – 10,000 años antes del presente) y el Holoceno (10,000 hasta el presente).

Dacita: Roca de origen volcánico de color gris claro y enriquecida en sílice (entre 63 y 68% SiO₂). En estado fundido presenta generalmente una alta viscosidad. Las erupciones de magmas dacíticos son generalmente explosivas y pueden producir grandes volúmenes de tefra, flujos piroclásticos y domos de lava.

Datación radiométrica: Método que permite determinar la edad de una roca en base al decaimiento radiactivo de diferentes elementos (e.g. Carbono-14).

DC: Se dice de las fechas obtenidas en base a dataciones radiométricas después del nacimiento de Cristo.

Deformación: Uno de los parámetros, que junto con la sismicidad y el control geoquímico permiten monitorear el estado de un volcán. El control de la deformación consiste en realizar medidas periódicas de la posición de puntos fijos y observar sus posibles variaciones en el tiempo. Estas medidas pueden ser realizadas por medio de inclinómetros, EDM (Electronic Distance Measure), GPS (Global Positioning System), entre otros.

Desplazamiento reducido (DR): Parámetro sísmico utilizado para cuantificar el tamaño de las explosiones volcánicas. Este parámetro es proporcional a la energía liberada por un evento explosivo. El DR se calcula en función de la amplitud del desplazamiento del terreno producida por una onda sísmica y la distancia recorrida por dicha onda.

Dique: Una intrusión tabular de magma ígnea que corta a lo largo de las fracturas o estructuras planas de las rocas vecinas.

Distanciómetro electrónico: Instrumento científico de alta precisión que permite medir con una precisión de milímetros distancias horizontales. Se compone de un espejo (prisma) que se coloca en un sitio fijo y desde otro punto, igualmente fijo, se emite un rayo láser hacia el espejo. Se mide el tiempo de viaje del láser y se determina la distancia. La comparación con medidas anteriores permite comparar las variaciones existentes.

Domo: Abultamiento en forma de cúpula formada por la acumulación de lava viscosa, caracterizada por presentar flancos muy pendientes. Generalmente están formados por lavas de composición andesítica, dacítica o riolítica y pueden alcanzar alturas de cientos de metros.

Escala de Richter: Escala que mide la magnitud o energía liberada por un sismo. Los incrementos de energía son de forma logarítmica, lo que quiere decir que un sismo de magnitud 8 libera 10 veces más energía que un sismo de magnitud 7. La magnitud de un sismo se estima en base a los registros de los instrumentos sísmicos.

Escoria: Fragmentos de lava formados cuando pequeños volúmenes de lava (generalmente basalto o andesita), aún en estado líquido, son expulsados hacia la

atmósfera, se enfrían en el aire y caen en forma de fragmentos oscuros de roca volcánica ricos en cavidades. Roca volcánica que contiene cavidades generadas por burbujas de gas atrapadas en la lava. La escoria se forma cuando bloques de lava cargados de gas son lanzados a la atmósfera durante una erupción y que se enfrían rápidamente en su caída.

Escudo volcán: Los escudo volcanes se originan de múltiples erupciones con lava basáltica o andesítica de baja viscosidad. Presentan pendientes largas y suavizadas pendientes con la forma de escudo de guerrero invertido.

Espectrómetro de correlación: Instrumento que permite de determinar la cantidad de dióxido de azufre (SO_2) en la columna de gases emitida desde el cráter. La medición de hace a partir de un sitio lejano al volcán.

Estrato volcán: Edificio volcánico de flancos con fuertes pendientes construido por el apilamiento de flujos de lava y niveles de

Estromboliana (erupción): Tipo de erupción volcánica caracterizada por un dinamismo eruptivo un poco más explosivo que en una tipo erupción hawaiana. En este tipo de erupción existe una importante producción de ceniza y escoria, la cual se acumula en los alrededores del cráter para formar un cono (cono de escoria o cono estromboliano). Este término proviene del volcán Stromboli (Italia).

Estación sísmica: Grupo de instrumentos científicos que permite detectar las vibraciones del suelo. Consta de un sensor sísmico (sismómetro) y de un equipo electrónico que transmite en tiempo real la señal sísmica desde el terreno hasta el Observatorio. Existen varios tipos de estaciones sísmicas. Generalmente, estos equipos registran las vibraciones del suelo en un rango de frecuencias comprendida entre 1 Hz y varios cientos de Hz. **Estación de un componente**, constituida por un sensor sísmico que detecta únicamente los movimientos verticales del suelo. **Estación de tres componentes**, constituida por un sensor sísmico que permite detectar el movimiento del suelo en las tres dimensiones (vertical y dos horizontales). **Estación de Banda Ancha**, Estación sísmica de tres componentes que pueden detectar las vibraciones del suelo dentro de una banda de frecuencias comprendida entre menos de 0.01Hz y varios cientos de Hz.

Flujo de lava: Derrame o corriente de roca fundida, originados en un cráter o en fracturas de los flancos del volcán, por erupciones generalmente no explosivas. Los flujos de lava descienden por los flancos del volcán restringidos únicamente a las quebradas y pueden viajar ladera abajo hasta por varias decenas de kilómetros, desplazándose generalmente a bajas velocidades, del orden de decenas y raramente de centenas de metros por hora para lavas de tipo andesitas a dacitas.

Flujo piroclástico: Mezcla caliente (300-800°C) de gases, ceniza y fragmentos de roca, que descienden por los flancos del volcán, desplazándose a grandes velocidades (75-150 km/h). Ocurren generalmente en erupciones grandes y explosivas o por el colapso del frente de un domo o un flujo de lava.

Flujos de lodo y escombros (lahares): Mezclas de materiales volcánicos, removilizados por el agua proveniente de la fusión del casquete glaciar, de un lago cratérico o de fuertes lluvias. Estos flujos se mueven ladera abajo, movidos por la fuerza de la gravedad, a grandes velocidades (hasta 85 km/h), siguiendo los drenajes existentes; sin embargo pueden sobrepasar pequeñas barreras topográficas con relativa facilidad.

Freática (erupción): Explosión de vapor, agua y otros materiales, resultado del calentamiento del agua subterránea y de la acumulación de vapor en niveles bajo la superficie. Este tipo de erupción ocurre cuando el agua subterránea entra en contacto con rocas calientes en las cercanías de un cuerpo de magma. En este tipo de erupción el magma no se encuentra involucrado.

Freatomagmática (erupción): Explosión volcánica que envuelve gases magmáticos y vapor, combinados con lava y otros fragmentos de roca. Este tipo de actividad volcánica es el resultado de la interacción entre el agua subterránea, del mar o de un lago y el magma.

Fuente de lava: Emisión explosiva de gases y materiales piroclásticos en estado fundido que ascienden decenas a cientos de metros del cráter. Este tipo de actividad es sostenida por minutos a horas de duración.

Fumarola: Una ventana o abertura en el piso que emite vapor de agua caliente (vapor) y/o gases de origen volcánico. Emanación de gases y vapor de agua, generalmente

a altas temperaturas, que salen de fracturas o grietas de la superficie de un volcán o de una zona con actividad volcánica. La mayor parte de los gases emitidos son vapor de agua, sin embargo se encuentran otros gases como CO₂, CO, SO₂, H₂S, CH₄ y HCl.

Fumarola Hidrotermal: Se refiere al agua calentada por el magma o en asociación con el magma

GPS (Global Positioning System): Sistema de Posicionamiento Global que permite conocer la ubicación (latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar) de un punto sobre la superficie terrestre, con base a las señales emitidas por una serie de satélites artificiales.

Hawaiiana (erupción): Tipo de erupción de magmas basálticos caracterizada por un dinamismo eruptivo poco o nada explosivo. Este tipo de erupción involucra fuentes de lava, cantidades restringidas de ceniza y escoria y produce generalmente flujos de lava que salen de una fractura o de un cráter. Este término proviene de las islas Hawaii.

Hidrotermal: Relacionado con las fuentes termales o con la acción de dichos fluidos. Se denomina **alteración hidrotermal** a las transformaciones que sufren las rocas o minerales por acción de los fluidos (agua y gases) calientes asociados a un cuerpo de magma.

Holoceno: Época de la historia de la Tierra, que forma parte del período Cuaternario y que se extiende desde hace 10,000 años atrás hasta el presente.

Hertz (símbolo Hz): Unidad de frecuencia. 1 Hz = 1 vibración por segundo. 0.01 Hz = 1 vibración por 100 segundos. 100 Hz = 100 vibraciones por segundo.

Ígneo: Ígneo es un término utilizado para el magma solidificado. Es también un término utilizado para describir los procesos asociados a la formación de rocas ígneas.

Ignea (roca): Roca ígnea es originada a partir del magma (roca derretida) que es enfriada y solidificada, ya sea dentro de la corteza terrestre o en la superficie de la misma. El magma que se solidifica dentro de la corteza terrestre se enfría lentamente y resulta

en una roca de cristal de grano grueso, por ejemplo la granita. El magma que se solidifica en o cerca de la superficie terrestre se enfría rápidamente y resulta en roca de grano fino por ejemplo el basalto o la obsidiana. La roca ígnea está compuesta en mayor parte por minerales de silicatos.

Inclinómetro electrónico: Instrumento que permite detectar las variaciones en la pendiente del terreno.

Intensidad: Escala subjetiva que mide los efectos de un sismo sobre las personas, las edificaciones y la naturaleza. Se utiliza generalmente la escala de Mercalli modificada.

Lahares : ver Flujos de lodo y escombros.

Lapilli: Fragmento de roca de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm emitido durante una erupción volcánica.

Lava: Término utilizado para referirse al magma que alcanza la superficie en forma líquida que ha perdido la mayoría de su contenido en gases. Roca fundida que erupciona de un cráter o una fisura eruptiva.

Lluvia ácida: Ciertos gases magmáticos (SO_2 y Cl, entre otros) emitidos por un volcán en erupción, al entrar en contacto con el agua atmosférica forman ácidos fuertemente corrosivos que caen a la superficie en forma de lluvia.

Lluvia de ceniza: Ceniza volcánica que cae de una columna de erupción o nube de ceniza.

Mapa de peligros: Mapa utilizado para representar las áreas afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos.

Magma: Roca fundida que contiene una fase líquida, gases disueltos, cristales de minerales y eventualmente burbujas de gas. Los magmas se forman a grandes profundidades en el manto o en la corteza terrestre. Cuando el magma ha perdido sus gases y alcanza la superficie se denomina **lava**. Si el magma se enfría al interior de la corteza terrestre forma las rocas intrusivas.

Magnitud: Valor que estima la energía liberada por un sismo. Se utiliza generalmente la escala de Richter.

Manto: Zona del interior del planeta ubicada entre la corteza y el núcleo.

Nube de ceniza: Masa de gases y ceniza, generada por una explosión volcánica o derivada de un flujo piroclástico.

Nube ardiente: ver Flujo piroclástico.

Núcleo: Parte más interna de la Tierra.

Roca Llao: la roca Llao está compuesta de lava riodacita (rica en sílice y con magma de alta viscosidad) que por lo general llena el cráter de explosión.

Peleana (erupción): Tipo de erupción volcánica caracterizada por el crecimiento de un domo de lava viscosa, el cual puede ser destruido por un colapso gravitacional o por explosiones de corta duración, produciendo flujos piroclásticos o nubes ardientes. Este término proviene del volcán Montagne Pelée, Martinica.

Peligros volcánicos: Fenómenos potencialmente dañinos que pueden ocurrir durante una erupción volcánica. En términos probabilísticos los peligros volcánicos representan la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente peligroso.

Piroclastos: Fragmentos de roca volcánica fracturada emitidos durante una erupción volcánica explosiva. Incluye piedra pómez, ceniza y otros fragmentos de roca.

Placas tectónicas: Grandes fragmentos que constituyen el envoltorio externa de la Tierra. Estas placas se encuentran “flotando” sobre una capa más dúctil y plástica del manto terrestre y se desplazan lentamente a con una velocidad promedio de varios cm / año.

Pliniana (erupción): Tipo de erupción volcánica caracterizada por una extrema violencia y explosividad en la cual grandes cantidades de ceniza y otros materiales piroclásticos son expulsados de manera continua hacia la atmósfera, formando una columna de erupción de varios decenas de kilómetros de altura (generalmente entre 10 y 40 km).

Este término hace referencia a Plinio el Joven, quién observó describió con un gran realismo la erupción del volcán Vesubio (Italia) en el año 79 DC.

Piedra pómez: Roca volcánica de color claro, llena de cavidades que la hacen muy poco densa y que frecuentemente pueden flotar. Generalmente tiene una composición dacítica a riolítica. Las cavidades se forman por la expansión de los gases volcánicos durante salida hacia la superficie.

Punto caliente: Área de una placa tectónica, donde el magma asciende desde muy profundo en el manto y erupciona en la superficie del planeta.

Piroclástico: Roca fragmentada (clástico) de materiales formados por una erupción volcánica.

Piroclástico flujo: Una mezcla caliente, seca, de desplazamiento rápido y de ceniza de alta densidad, pómez, fragmentos de roca y gas que se forman durante erupciones explosivas o a partir del colapso de un domo de lava.

Riodacita: Roca ígnea extrusiva de textura cristalina o vidriosa, con una composición intermedia entre dacita y riolita.

Reservorio magmático: ver Cámara magmática.

Riesgo volcánico: Representa los efectos dañinos de un peligro volcánico. En términos probabilísticos constituye la probabilidad de pérdida de vidas humanas, destrucción de la propiedad o pérdida de la productividad en un área afectada por un fenómeno volcánico.

Riolita: Roca volcánica de color claro, que contiene 69 % o más de sílice. El estado fundido presente una muy alta viscosidad.

Sílice: Molécula formada por un átomo de silicio y dos átomos de oxígeno (SiO_2), que constituye la base de la estructura cristalina de la mayor parte de minerales. Es el más importante factor que controla la viscosidad de los magmas. Entre más alto sea el contenido de sílice, más alta es la viscosidad.

Sismo: Sacudida del suelo producido por el movimiento abrupto y violento de una masa de roca a lo largo de una falla o fractura de la corteza terrestre. Los volcanes activos presentan una gran variedad de eventos sísmicos. **Sismos de largo período (LP)**, que se encuentran asociados al movimiento de fluidos magmáticos bajo presión en los conductos volcánicos. **Sismos Volcano-tectónicos (VT)**, asociados al fracturación de rocas bajo un volcán. **Sismos híbridos**, mezcla de varios tipos de señales sísmicas.

Sismógrafo: Instrumento científico de alta precisión que detecta, ampliar y graba las vibraciones (ondas sísmicas) producidas por los sismos.

Subducción: Proceso por el cual una placa tectónica colisiona con otra y se introduce en el manto terrestre bajo la otra placa. Los arcos volcánicos se forman paralelos a las zonas de subducción.

Tefra: Término general que comprende cualquier material sólido emitido explosivamente durante una erupción volcánica (ver también ceniza, lapilli, bloques y bombas volcánicas, pómez, piroclastos).

Tremor volcánico: Señal sísmica continua y rítmica que generalmente precede o acompaña las erupciones volcánicas. El tremor volcánico está asociado al movimiento de magma o de otros fluidos magmáticos al interior del conducto volcánico.

Tuff: Término utilizado para describir los materiales piroclásticos consolidados

VEI: El Índice de Explosividad Volcánica (Volcanic Explosivity Index: VEI), es una escala ampliamente utilizada para describir el tamaño de las erupciones volcánicas, basada entre otros factores, en el volumen de material emitido. La escala VEI varía entre 0 y 8. Una erupción con un VEI de 0 denota una erupción no explosiva, sin importar el volumen de productos emitidos. Las erupciones con un VEI de 5 o más son consideradas “muy grandes” y ocurren raramente alrededor del planeta (alrededor de una erupción cada década).

Ventana: Una abertura en la cima del volcán o en sus pendientes a través de los cuales fluyen los materiales volcánicos de erupción (lava y gas). Una ventana circular es conocida como cráter y una ventana lineal es conocida como fisura.

Viscosidad: La viscosidad es una medida de la resistencia de un material a fluir en respuesta a un esfuerzo. La melaza posee una alta viscosidad mientras que el agua tiene una baja viscosidad. Mientras más viscoso sea el magma más explosivo es un volcán. Entre más alto sea el contenido de sílice, más alta es la viscosidad.

Volcán: Es una ventana de la superficie de la Tierra a través del cuál erupciona roca derretida, ceniza y gases. Es también un término para identificar una estructura del paisaje o topoforma que es construida a base de materiales de erupción.

Volcán compuesto (estrato volcán): Volcán compuesto de varias capas de flujos de lava de alta viscosidad y escombros fragmentados incluyendo lahar y depósitos piroclásticos.

Volcán dormido a latente: Un volcán que se encuentra inactivo en fase eruptiva pero que es probable que en el futuro vuelva a la actividad.

Volcán escudo: Tipo de edificio volcánico caracterizado por las suaves pendientes de sus flancos, producidas por la acumulación de flujos de lava de baja viscosidad (basaltos).

Volcán extinto: Un volcán inactivo o que no se encuentra en erupción y que es probable que no vuelva a entrar en actividad eruptiva.

Vidrio volcánico: Si el magma se enfría rápidamente (como durante una erupción volcánica explosiva en presencia de agua o hielo), este no podrá cristalizar y formará un material similar al vidrio.

Vulcaniana (erupción): Tipo de erupción volcánica caracterizada por la ocurrencia de eventos explosivos de corta duración que emiten material en la atmósfera hasta altitudes del orden de 20 km. Generalmente, este tipo de actividad está asociada a la interacción entre el agua subterránea y el magma (erupción freatomagmática).