



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL LAGO DE
CHAPALA CON BASE EN INFORMACIÓN DOCUMENTAL
DISPONIBLE

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

ING. SERGIO ALBERTO RODRÍGUEZ RIVERA

DIRECTOR DE TESINA: DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

NOVIEMBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimiento

A mis padres, Sergio y Celina, por todo su amor y apoyo incondicional. A mi madre por siempre impulsar a mejorar y no conformarme con nada. A mi padre por ayudar a buscar soluciones a problemas en momentos de incertidumbre y confusión. Gracias a los dos por ser mi ejemplo a seguir y por aguantar todo mi mal humor en noches largas de trabajo, mi ausencia en momentos importantes y por darme todo lo que ustedes tienen sin un momento de duda. También quisiera agradecer por darme la educación, los valores y la libertad que hoy conozco ya que, sin ustedes, mi vida no sería la misma.

A mi familia por siempre impulsarme hacia adelante, brindarme ayuda, darme sus consejos y cariño en todo momento.

A mis amigos y todas aquellas personas que, sin intereses personales, me han acompañado a lo largo de toda mi preparación personal, profesional y como especialista. Todas aquellas personas nuevas que me brindaron su apoyo, contaron sus experiencias y sus puntos de vista cuando el propio no era el más adecuado. Gracias por estar a mi lado en las buenas, en las malas y en las peores.

A mis compañeros dentro de la Facultad de Ingeniería y a los que cursaron junto conmigo, la especialidad en Ingeniería Sanitaria, con quienes he vivido buenas (en su mayoría) y algunas frustrantes experiencias, siempre por el beneficio profesional. Ustedes son los que me han enseñado, me han hecho reír y, sobre todo, entender la importancia de nuestra profesión y nuestra especialidad en la vida diaria.

A mis maestros que me han preparado para ejercer mi profesión y también a crecer personalmente. Ustedes realizaban su trabajo, pero su pasión y dedicación al hacerlo es lo que hizo que realmente disfrutara la Ingeniería. De igual manera, a mi director de tesis, el Dr. Enrique César Valdez que siempre estuvo pendiente de mi preparación como especialista.

A la UNAM por ser un espacio donde encontré personas muy especiales, creé amistades muy fuertes y pude tener un pensamiento libre para desarrollar mi carrera, mi especialidad y forma de ser.

Contenido

i.	Índice de Figuras	2
ii.	Índice de Tablas	3
1.	Antecedentes	4
1.1.	Introducción	4
1.2.	Objetivos	5
1.2.1.	Objetivo General	5
1.2.2.	Objetivos Particulares	5
1.3.	Alcances	5
2.	Caracterización Regional	6
2.1.	Ubicación y generalidades	6
2.2.	Clima	6
2.3.	Flora y fauna.....	6
2.4.	Hidrología.....	7
2.5.	Geología y uso de suelo	8
2.6.	Medio socioeconómico	9
3.	Normatividad	9
4.	Resultados del estudio realizado (ITESO).....	11
5.	Índice de calidad del agua (ICA)	19
5.1.	Índice de calidad del agua (ICA)	19
5.1.1.	pH.....	21
5.1.2.	Color	21
5.1.3.	Turbiedad	21
5.1.4.	Grasas y aceites.....	21
5.1.5.	Sólidos suspendidos totales (SST)	21
5.1.6.	Sólidos disueltos totales (SDT)	21
5.1.7.	Conductividad	21
5.1.8.	Alcalinidad.....	21
5.1.9.	Dureza	21
5.1.10.	Nitratos	21
5.1.11.	Nitrógeno amoniacal.....	21
5.1.12.	Fosfatos totales.....	21
5.1.13.	Cloruros.....	22
5.1.14.	Oxígeno disuelto	22
5.1.15.	DBO	22
5.1.16.	Coliformes totales	22
5.1.17.	Coliformes fecales	22
5.1.18.	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	22
5.2.	Índice de calidad del agua (IMTA e Instituto de Ingeniería, UNAM)	24
5.3.	Otros índices de calidad	25
5.4.	Cálculo del Índice de Calidad del Agua para el Lago de Chapala	25
6.	Análisis de resultados	28
7.	Conclusiones	29
8.	Referencias.....	30

i. Índice de Figuras

Figura 1.1: Disponibilidad de agua en México (SEMARNAT, 2008)	4
Figura 2.1: Ubicación y municipios aledaños al Lado de Chapala (SCIELO, Adriana Hernández García) 6	6
Figura 2.2: Subcuenca RH12Db, Lago de Chapala (SIATL, INEGI).....	7
Figura 2.3: Dirección de flujo subcuenca RH12Db, Lago de Chapala (SIATL, INEGI).....	7
Figura 2.4: Unión de mapas de Uso de Suelo y Vegetación de Jocotepec (F-13-D-75), Zacoalco de Torres (F-13-D-85), Chapala (F-13-D-76), Tizapán el Alto (F-13-D-86), Ocotlán (F-13-D-77) y Sahuayo de Morelos (F-13-D-87) (INEGI)	8
Figura 2.5: Leyenda en mapas de Uso de Suelo y Vegetación Uso de Suelo y Vegetación de Jocotepec (F-13-D-75), Zacoalco de Torres (F-13-D-85), Chapala (F-13-D-76), Tizapán el Alto (F-13-D-86), Ocotlán (F-13-D-77) y Sahuayo de Morelos (F-13-D-87) (INEGI)	8
Figura 4.1: Localización de estaciones de las 34 muestreo	11
Figura 4.2: Concentraciones de Arsénico Total desde el 2013 hasta el 2018 comparado con normas	13
Figura 4.3: Valores promedio de la concentración de Arsénico Total para cada estación de muestreo	14
Figura 4.4: Concentraciones de Arsénico Total comparadas con NOM-127-SSA1-1994.....	14
Figura 4.5: Concentraciones de Arsénico Total comparadas con NOM-001-SEMARNAT-1996	15
Figura 4.6: Concentraciones de Arsénico Total comparadas con las guías de calidad de agua potable de la OMS	15

ii. Índice de Tablas

Tabla 3.1: Comparativa entre las normas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-127-SSA1-1994, su modificación y las guías de la OMS.....	10
Tabla 4.1: Nombre completo de las 34 estaciones	12
Tabla 4.2: Valores promedio para parámetros en estudio	13
Tabla 4.3: Resultados de las mediciones de parámetros comparadas con la NOM-127-SSA1-1994 ...	16
Tabla 4.4: Resultados de las mediciones de parámetros comparadas con la NOM-001-SEMARNAT-1996	17
Tabla 4.5: Resultados de las mediciones de parámetros comparadas con las guías de la OMS	18
Tabla 5.1: Parámetros y peso relativo para cada uno	19
Tabla 5.2: Escala de clasificación de la calidad del agua para DBO5, DQO y SST	20
Tabla 5.3: Clasificación del ICA dependiendo el uso.....	23
Tabla 5.4: Parámetros y peso relativo para cada uno, IMTA e I.I., UNAM	24
Tabla 5.5: Clasificación del ICA dependiendo del uso del agua, IMTA e II, UNAM	25
Tabla 5.6: Cálculo de índice de calidad del agua Lago de Chapala	25
Tabla 5.7: Clasificación del ICA del Lago de Chapala	26
Tabla 5.8: ICA de las 34 estaciones de muestreo del Lago de Chapala	27

1. Antecedentes

1.1. Introducción

El agua es un derecho humano fundamental para el crecimiento y desarrollo de cualquier ser vivo. Es por ello que debemos cuidarla y hacer uso consciente de ella, evitando su desperdicio y su contaminación. Mantener la calidad de un cuerpo de agua puede resultar complicado si se desconoce qué lo contamina y qué tan contaminado se encuentra desde el principio, por lo que se necesita realizar estudios y análisis para comenzar el tratamiento. En México, el agua es reconocida como un tema estratégico y de seguridad nacional, siendo elemento central de las políticas ambientales y económicas. Lograr que todos los cuerpos de agua superficiales y subterráneos del país conserven y mejoren su calidad para que aporten caudales óptimos para el abastecimiento es de vital importancia para el crecimiento económico y calidad de vida de la población. Se busca garantizar que los habitantes tengan acceso a una forma segura de agua, evitando problemas de salud, medio ambiente y que garanticen la gestión integral de los recursos hídricos.

Las principales fuentes de agua en México son los ríos, manantiales y acuíferos. Las aguas superficiales, desgraciadamente, se encuentran contaminadas principalmente por descargas domésticas (municipales), industriales y por diferentes actividades económicas en la cercanía, lo que ha ocasionado un grande deterioro en la flora y fauna que se encuentra a lo largo del respectivo cuerpo de agua. Es por esto que se requiere realizar un tratamiento adecuado y eficiente del agua, prolongando la vida en cuerpos de agua y la calidad de suelo.

En México hay una desigualdad respecto a la disponibilidad del agua. La disponibilidad del agua se cuantifica como el volumen total de líquido que hay en una región. La población de cada región puede alterar este valor, pues se calcula el agua disponible para cada habitante. Debido al crecimiento de población, la disponibilidad de agua en grandes ciudades disminuye considerablemente con el paso de los años como se observa en la Figura 1.1.

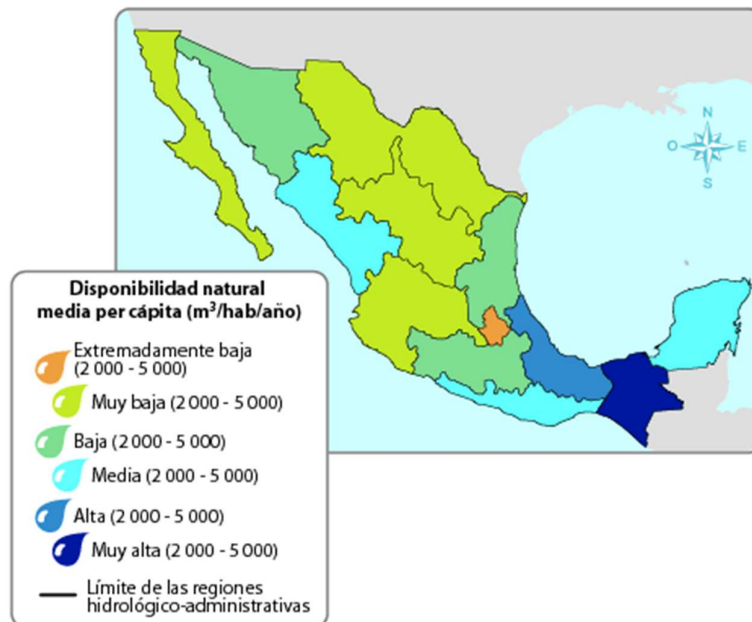


Figura 1.1: Disponibilidad de agua en México (SEMARNAT, 2008)

La siguiente tesina consiste en una interpretación de los datos generados a partir de una evaluación de la calidad del agua del Lago de Chapala realizada por personal del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO).

El lago de Chapala es el lago más extenso de la República Mexicana y en febrero del 2009 fue declarado sitio RAMSAR (Humedal de Importancia Internacional) por su diversidad e importancia biológica. A pesar de eso, el lago está en peligro debido a las descargas industriales, la sobre explotación del agua y las actividades económicas que se realizan a su alrededor, dañando seriamente la vida acuática.

El estudio mencionado recolectó información de 34 estaciones de monitoreo ubicadas a lo largo del lago, entre el 21 de noviembre del 2012 y el 8 febrero del 2018. Las estaciones mencionadas proporcionaron medidas de distintos parámetros importantes para realizar una evaluación de calidad del agua; por ejemplo: DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno), Escherichia Coli, Mercurio, Nitrógeno, pH, Plomo, Sólidos Disueltos y Suspendidos Totales, entre otros.

Para determinar la calidad del agua del lago de Chapala, habrá que realizar una comparativa de los valores obtenidos en el estudio con los límites máximos permisibles establecidos en diferentes Normas Oficiales Mexicanas como lo son la NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-127-SSA1-1994, normatividad de la OMS (Organización Mundial de la Salud), al igual que diferentes índices de calidad del agua ya que el lago es una fuente de abastecimiento de una de las ciudades más grandes e importantes del país como lo es Guadalajara y toda su zona metropolitana (ZMG), aportando más del 60% del agua que llega. Todo lo anterior se conjuntará de manera que se haga un análisis crítico de la situación actual del lago, proponiendo soluciones para mejorar la calidad del agua de manera sustentable.

1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo General*

- Aplicar los conocimientos, obtenidos durante la especialidad, acerca de los procedimientos para realizar la evaluación de la calidad del agua en el Lago de Chapala, Jalisco.

1.2.2. *Objetivos Particulares*

- Realizar una evaluación de la calidad del agua a partir de los datos obtenidos por parte de personal del ITESO, dando una mayor profundidad a lo ya hecho con ayuda de los conceptos impartidos por la Especialización de Ingeniería Sanitaria de la UNAM.
- Obtener un índice de calidad del agua a partir de los datos recaudados en el estudio del 2018.

1.3. Alcances

Se hará una comparativa entre los resultados del estudio realizado anteriormente y las normas mexicanas correspondientes, señalando los parámetros más críticos y la zona donde se ubica cada uno. También se busca obtener un índice de calidad del agua del lago de Chapala limitándonos a los datos obtenidos, conociendo que se necesitan muchos más para poder dar una calificación completa. En el momento de calcular el índice de calidad del agua (ICA), se harán los ajustes necesarios para evitar una compensación positiva o perjudicar el resultado final. Se utilizarán índices conocidos por México e internacionales con la finalidad de realizar un análisis adecuado.

2. Caracterización Regional

2.1. Ubicación y generalidades

El lago se encuentra al oriente del estado de Jalisco y al noroeste del estado de Michoacán. Tiene una superficie máxima de 114,659 ha (hectáreas) donde el 86% (98,606.74 ha) pertenece al estado de Jalisco mientras que el 14% (16,052.26 ha) a Michoacán. Se encuentra rodeado por las poblaciones de Chapala, Ajijic, San Juan Cosalá, El Chante, Jocotepec, Ocotlán y La Barca entre otras como se ve en la Figura 2.1.



Figura 2.1: Ubicación y municipios adyacentes al Lago de Chapala (SCIELO, Adriana Hernández García)

Tiene una longitud media de 82 km y un ancho de 19 km, un volumen mayor a los 8 Km³ y se sitúa en una altitud de 1520 metros sobre el nivel del mar. Dentro del lago, existen 3 islas: Isla de Mezcala, Isla de los Alacranes y la Isla Menor.

2.2. Clima

Al igual que distintos destinos del centro de la República Mexicana, el clima del lago de Chapala es semi-cálido y semi-húmedo con lluvias en verano y clima frío en los meses de invierno. La temperatura máxima, mínima y media anual es aproximadamente 35°C, 0°C y 19.4°C. Afortunadamente para la gente, lo que hace a este lugar cálido son los rayos del sol y no el aire, lo que lo vuelve muy agradable cuando se encuentra alguien en el interior del hogar o de algún establecimiento.

2.3. Flora y fauna

Chapala es hogar de centenares de plantas y especies animales, siendo un lugar de grandísima riqueza ecológica. El lago es considerado sitio protegido RAMSAR. A partir del 2009, la convención RAMSAR ha hecho gran trabajo para la conservación de humedales con la misión de minimizar los impactos ambientales negativos y accesibilidad al agua, su diversidad biológica y el uso racional de estos ecosistemas mediante acciones locales, nacionales y de cooperación internacional.

Podemos encontrar 9 familias con más de 30 especies de peces (pescado blanco, bagre, charal, mojarra, etc.) al igual que patos, gaviotas y garzas. Algunas de las especies fueron introducidas al lago. Por otro lado, encontramos árboles como ahuehetes, sauces, matorrales de zapote blanco,

huizache y copales entre otros. En los cerros aledaños podemos encontrar encinos y pinos mientras que en el lago predomina el lirio, incluso considerado como una plaga.

2.4. Hidrología

El lago de Chapala se ubica en la cuenca Lerma - Santiago (RH12), dentro de la región hidrológica del mismo nombre. Se encuentra en la subcuenca RH12Db que lleva por nombre Lago de Chapala (Figura 2.2).

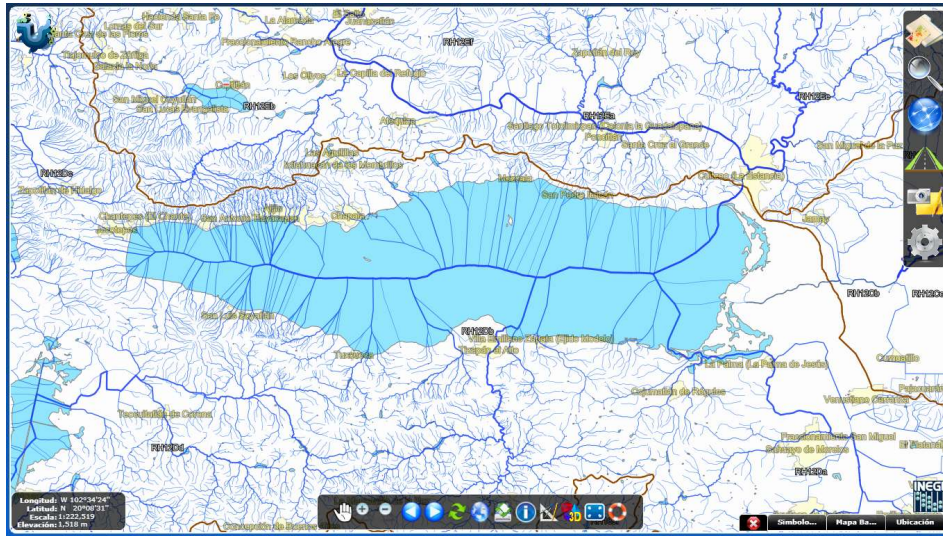


Figura 2.2: Subcuenca RH12Db, Lago de Chapala (SIATL, INEGI)

Como se aprecia en la Figura 2.3., el lago es alimentado por el río Lerma (sureste), los ríos Huaracha y Duero se juntan en el río de la Pasión y llegan al lago mientras que el río Zula desemboca en el río Santiago (noreste) muy cerca de su nacimiento, por lo que se le categoriza como una subcuenca exorreica.

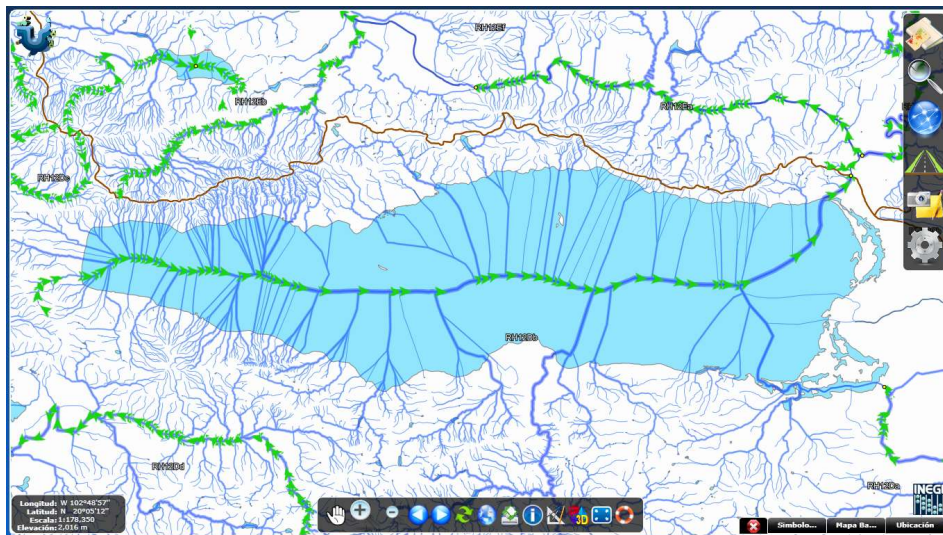


Figura 2.3: Dirección de flujo subcuenca RH12Db, Lago de Chapala (SIATL, INEGI)

2.5. Geología y uso de suelo

La roca predominante es el basalto con un 51.3% mientras que también hay otro tipo de rocas ígneas extrusivas básicas de origen volcánico, aluvial y arenisca. Por otro lado, se puede encontrar suelo de tipo vertisol que es muy utilizado en actividades agrícolas por su fertilidad y dureza, aunque es un suelo muy susceptible a la salinidad.

A las orillas del lago encontramos distintos usos de suelo, principalmente agropecuario y pesca, aunque hay un sinnúmero de comercios y turismo, ilustrado en las Figuras 2.4 y 2.5.



Figura 2.4: Unión de mapas de Uso de Suelo y Vegetación de Jocotepec (F-13-D-75), Zacoalco de Torres (F-13-D-85), Chapala (F-13-D-76), Tizapán el Alto (F-13-D-86), Ocotlán (F-13-D-77) y Sahuayo de Morelos (F-13-D-87) (INEGI)

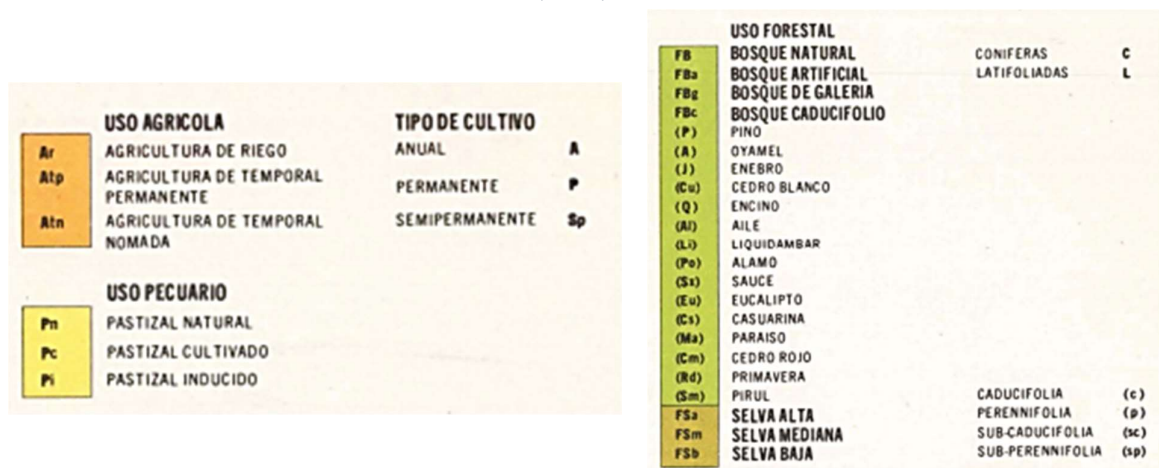


Figura 2.5: Leyenda en mapas de Uso de Suelo y Vegetación de Jocotepec (F-13-D-75), Zacoalco de Torres (F-13-D-85), Chapala (F-13-D-76), Tizapán el Alto (F-13-D-86), Ocotlán (F-13-D-77) y Sahuayo de Morelos (F-13-D-87) (INEGI)

2.6. Medio socioeconómico

El lago se encuentra rodeado de diferentes municipios de Jalisco y Michoacán. No se puede decir que todos los poblados aledaños al lago han logrado un desarrollo económico importante por su ubicación ya que algunos poblados cercanos tienen una buena economía mientras otros no. Las localidades de Chapala, Jocotepec, Ajijic y Jamay han sido beneficiadas de manera significativa por el turismo nacional e internacional. Las cabeceras municipales de Ocotlán, la Barca y Poncitlán han crecido y se han desarrollado de manera industrial.

La actividad económica principal alrededor del lago es la agricultura y el turismo (artesanía, hotelería y actividad restaurantera) mientras que, en lugares de menor economía, podemos encontrar pescadores.

3. Normatividad

Para realizar un correcto análisis de los parámetros de calidad, habrá que compararlos con los límites establecidos en las normas mexicanas e internacionales. CONAGUA, junto con el apoyo de distintos organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento actualiza el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS), brindando apoyo para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de dichos sistemas. Dentro del MAPAS, podemos encontrar cuáles son las normas aplicables para cada parte del sistema dentro del ciclo urbano del agua. Dentro del MAPAS, en la sección de sistemas de abastecimiento de agua potable (Libro 24), encontramos el marco normativo que comprende:

- **Artículo 115 constitucional** – “Los municipios tendrán a su cargo el otorgamiento de los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales.”
- **NOM-230-SSA1-2002** – “Establecer los procedimientos sanitarios para el muestreo bacteriológico y fisicoquímico del agua para uso y consumo humano...”
- **Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994** – “Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.”
- **NOM-179-SSA1-1998** – “Establece los requisitos y especificaciones que deberán observarse en las actividades de control de la calidad del agua para consumo humano...”

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) están diferenciadas dependiendo el uso del agua, es decir, los límites cambian dependiendo si es agua residual descargada en cuerpos de agua, descargada en el sistema de alcantarillado o si se trata de agua para consumo humano.

Por esta razón, los investigadores del ITESO utilizaron la NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-127-SSA1-1994 y guías sobre las concentraciones máximas recomendadas para agua potable de parte de la Organización Mundial de la Salud (OMS) como estándares en el estudio realizado.

A pesar de que la NOM-001 aplica para descargas de aguas residuales, ésta contiene los límites máximos permisibles para contaminantes básicos en diferentes cuerpos de agua como ríos, aguas costeras, suelo y embalses naturales tanto de uso en riego agrícola, uso público urbano y protección de la vida acuática. La NOM-127 y las guías de la OMS sí son para agua potable y nos conciernen para el trabajo a realizar.

En la Tabla 3.1 podemos observar las diferencias que existen entre las normas y las guías de la OMS. Hay que notar que no se utilizaron todos los parámetros de las normas en los estudios y algunos valores no son existentes lo cual afectará el índice de calidad del agua realizado más adelante.

Tabla 3.1: Comparativa entre las normas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-127-SSA1-1994, su modificación y las guías de la OMS

Parámetro	Modificación a la NOM-127-SSA1-1994	NOM-127-SSA1-1994	Unidades	NOM-001-SEMARNAT-1996	Unidades	OMS	Unidades
Arsénico Total	0.025	0.05	mg / L	0.10	-	0.01	mg / L
Coliformes Fecales	0.00	0.00	-	1000.00	NMP/100 ml	0.00	NMP/100 ml
Cromo Total	0.05	0.05	mg / L	0.50	-	0.05	mg / L
DBO	NA	NA	-	30.00	-	NA	-
DQO	NA	NA	-	NA	-	NA	-
E. Coli	0.00	0.00	-	1000.00	-	0.00	-
Mercurio Total	0.001	0.001	mg / L	0.005	-	0.006	mg / L
Nitrógeno Amoniacal	0.50	0.50	mg / L	NA	-	NA	-
Nitritos	1.00	0.05	mg / L	NA	-	3.00	mg / L
Nitratos	10.00	10.00	mg / L	NA	-	50.00	mg / L
Nitrógeno Orgánico	NA	NA	-	NA	-	NA	-
Nitrógeno Total	NA	NA	-	15.00	mg / L	NA	mg / L
Ortofosfatos	NA	NA	-	NA	-	NA	-
Fósforo Total	NA	NA	-	5.00	-	NA	-
Plomo Total	0.01	0.025	mg / L	0.20	-	0.01	mg / L
pH superficial	6.5 a 8.5	NA	-	5 a 10	-	-	-
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	1000.00	1000.00	mg / L	NA	-	600.00	mg / L
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	NA	NA	-	40.00	-	NA	-

También existen diferentes normas mexicanas que especifican los métodos de muestreo y para el análisis de cada parámetro mencionado en la tabla anterior. Es importante señalar esto pues en caso de que la calidad del agua no sea buena o apta para el consumo humano, se pueda proponer alguna

denuncia a las autoridades correspondientes, presentando las pruebas realizadas de manera correcta y respaldadas por la ley.

4. Resultados del estudio realizado (ITESO)

Para interpretar los datos obtenidos a lo largo de 6 años, se calcularon promedios de las concentraciones de los parámetros seleccionados para cada estación. Una vez obtenidos los promedios, se realizó una comparación con las normas mencionadas en el capítulo anterior, señalando cuáles estaciones presentaban valores por encima de los límites establecidos.

Se realizaron muestreos a lo largo de 34 estaciones de monitoreo de parámetros físicos, químicos y biológicos, siendo 37 variables en total. Hay que remarcar que no se midieron los mismos parámetros en todas las estaciones (no se midieron todos los parámetros en cada estación, solo algunos) y las muestras no fueron obtenidas en la misma fecha, es decir, no existió un calendario definido o una frecuencia de muestreo constante. A pesar de lo anterior, cada estación mostrada en la Figura 4.1 fue visitada al menos 9 veces.



Figura 4.1: Localización de estaciones de las 34 muestreo

Por falta de espacio y mejor resolución de la Figura 4.1., se acortaron los nombres. La Tabla 4.1. muestra los nombres completos de las 34 estaciones.

Tabla 4.1: Nombre completo de las 34 estaciones

# ESTACIÓN	ESTACIÓN LACUSTRE	NOMBRE CORTO
1	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 12	L.C.E.L. 12
2	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 21	L.C.E.L. 21
3	ESTACION LITORAL E	E.L.E
4	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 16	L.C.E.L. 16
5	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 14	L.C.E.L. 14
6	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 04	L.C.E.L. 04
7	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 17	L.C.E.L. 17
8	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 22	L.C.E.L. 22
9	ESTACION LITORAL C	E.L.C.
10	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 11	L.C.E.L. 11
11	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 15	L.C.E.L. 15
12	LAGO DE CHAPALA LITORAL I	L.C.L. I
13	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 20	L.C.E.L. 20
14	ESTACION LITORAL G	E.L.G
15	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 07	L.C.E.L. 07
16	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 28	L.C.E.L. 28
17	ESTACION LITORAL D	E.L.D
18	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 13	L.C.E.L. 13
19	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 02	L.C.E.L. 02
20	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 01	L.C.E.L. 01
21	ESTACION LITORAL H	E.L.H
22	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 08	L.C.E.L. 08
23	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 10	L.C.E.L. 10
24	ESTACION LITORAL F	E.L.F
25	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 06	L.C.E.L. 06
26	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 24	L.C.E.L. 24
27	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 23	L.C.E.L. 23
28	ESTACION LITORAL B	E.L.B
29	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 03	L.C.E.L. 03
30	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 27	L.C.E.L. 27
31	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 05	L.C.E.L. 05
32	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 25	L.C.E.L. 25
33	LAGO DE CHAPALA ESTACION LACUSTRE 26	L.C.E.L. 26
34	ESTACION LITORAL A	E.L.A

Una vez realizadas las mediciones y calculados los promedios de las concentraciones para cada parámetro, se utilizaron gráficos para representar los resultados. El estudio realizado muestra un mapa con el valor promedio para cada estación, los resultados de cada muestreo comparados con el valor establecido en las normas NOM-001, NOM-127 y las guías de la OMS a lo largo de los años del estudio y el promedio de los valores que arrojó cada muestreo. La Tabla 4.2 muestra un resumen de los valores promedio para los parámetros que se pueden comparar con las normas de la Tabla 3.1.

Tabla 4.2: Valores promedio para parámetros en estudio

Parámetro	Promedio Global	Unidades
Arsénico Total	0.0125	mg / L
Coliformes Fecales	7,048.470	NMP / 100 mL
Cromo Total	0.004330	mg / L
DBO	6.360000	mg / L
DQO	46.920	mg / L
Escherichia Coli	516.460	NMP / 100 mL
Mercurio Total	0.001075	mg / L
Nitrógeno Amoniacal	0.183468	mg / L
Nitrito	0.010976	mg / L
Nitrato	0.255106	mg / L
Nitrógeno Orgánico	0.912462	mg / L
Nitrógeno Total	1.341187	mg / L
Orto Fosfato	0.505550	mg / L
Fósforo Total	0.619922	mg / L
Plomo Total	7.814814	mg / L
pH	8.832693	mg / L
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	594.76	mg / L
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	59.50	mg / L

Las Figuras 4.2 y 4.3 muestran un ejemplo de cómo se presentaron los resultados. Este formato se repite a lo largo del estudio para cada uno de los componentes mencionados anteriormente.

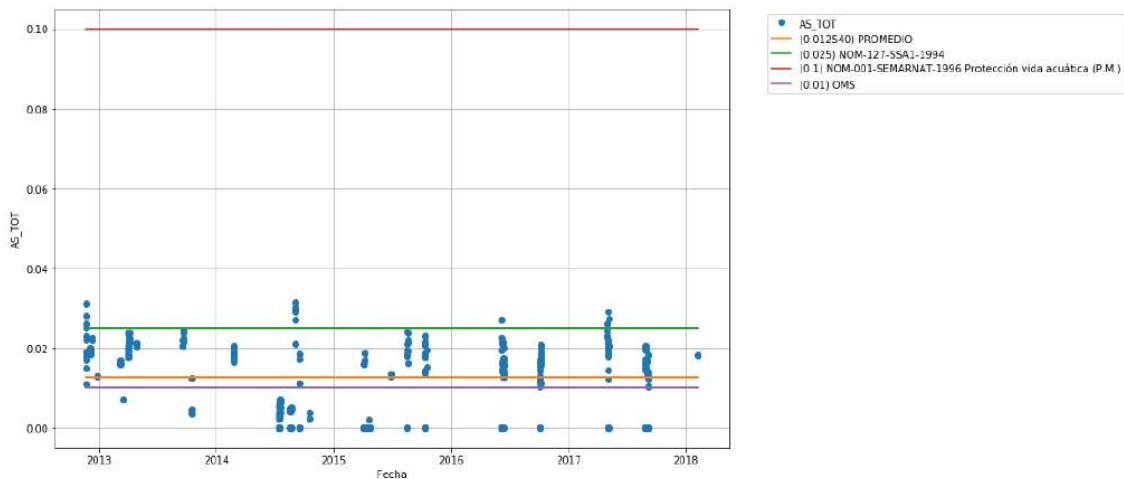


Figura 4.2: Concentraciones de Arsénico Total desde el 2013 hasta el 2018 comparado con normas

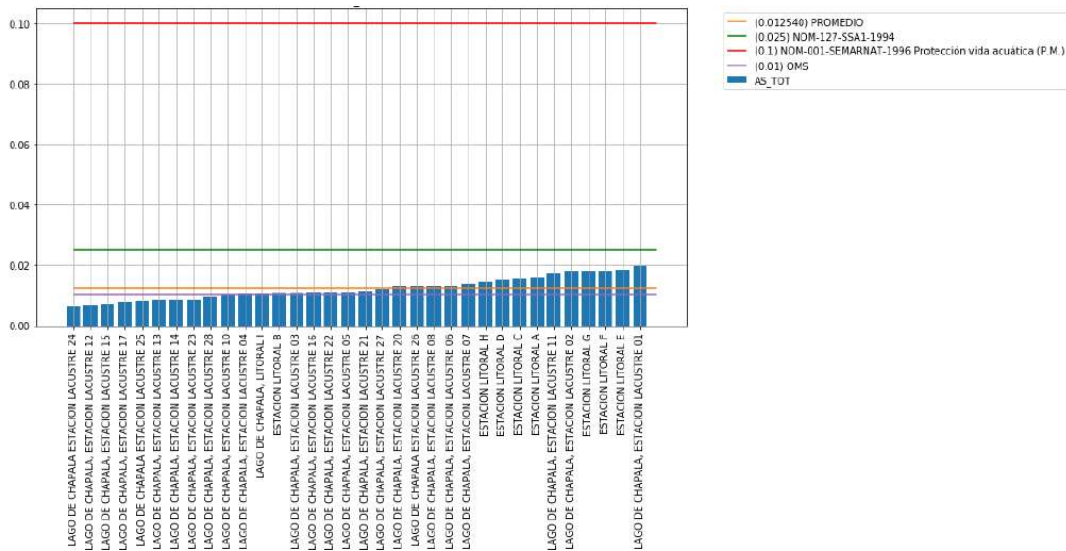


Figura 4.3: Valores promedio de la concentración de Arsénico Total para cada estación de muestreo

Posteriormente, se realizó una comparación de los datos de cada estación con las normas. La escala de colores muestra qué tanto se acerca el valor promedio de cada estación al límite establecido para cada parámetro dentro de la normas mexicanas. Si el valor promedio es igual o supera al límite establecido, se pintará de rojo mientras que si el valor se encuentra por debajo, se utilizará un color verde como se muestra para el caso del arsénico total en la Figura 4.4. Esto se repitió para la mayoría de los 18 parámetros mencionados anteriormente (Tabla 4.2) ya que son los contaminantes incluidos en la NOM-127-SSA1-1994, por ejemplo, el parámetro de Arsénico Total.

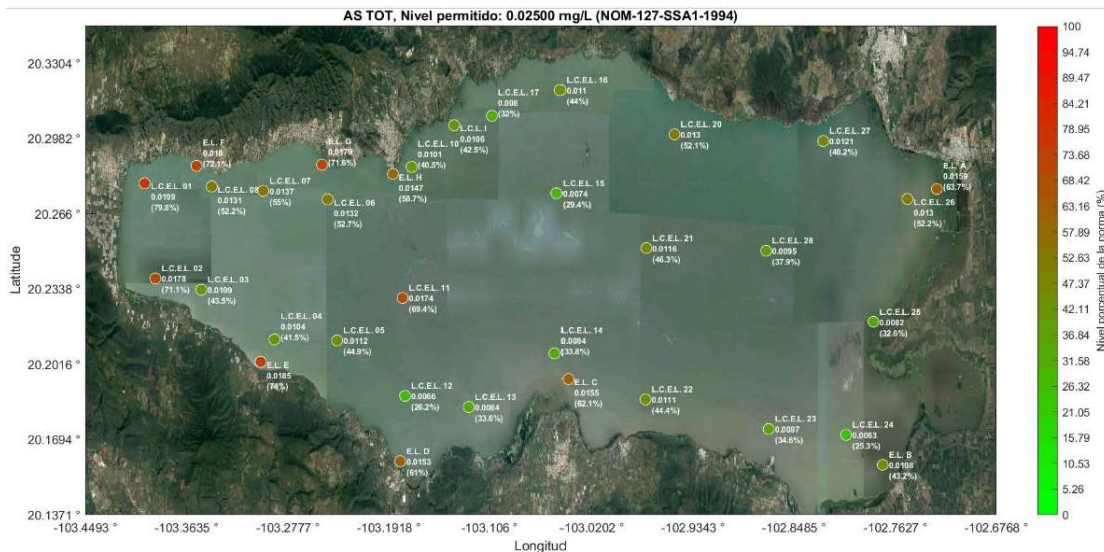


Figura 4.4: Concentraciones de Arsénico Total comparadas con NOM-127-SSA1-1994

La Figura 4.4 corresponde a las lecturas de Arsénico Total comparadas con la NOM-127-SSA1-1994 mientras que las Figura 4.5 corresponde a la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la Figura 4.6 a las guías para la calidad del agua potable de la OMS.

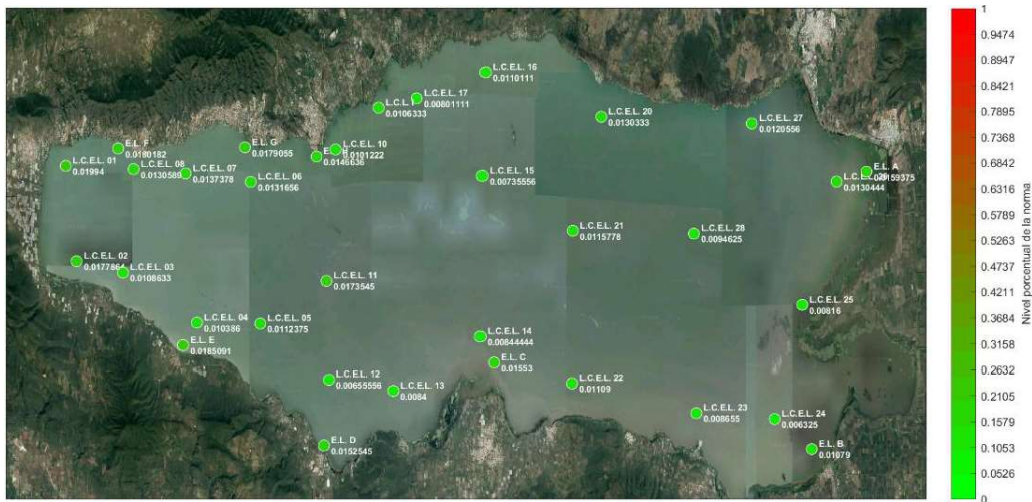


Figura 4.5: Concentraciones de Arsénico Total comparadas con NOM-001-SEMARNAT-1996



Figura 4.6: Concentraciones de Arsénico Total comparadas con las guías de calidad de agua potable de la OMS

Gracias a las muestras tomadas, se puede ver que las estaciones localizadas en la periferia del lago no cumplen con lo establecido en las normas en algunos casos. Para otros parámetros (DBO₅, DQO y SST) se puede recurrir la Tabla 5.2 elaborada por CONAGUA y SEMARNAT donde se establecen límites y se clasifica la calidad del cuerpo de agua.

A continuación, las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5 muestran la comparación para todos los parámetros medidos con las diferentes normas con la misma escala de colores. Los espacios sin color son aquellos parámetros no incluidos en las diferentes normas aplicadas.

Tabla 4.3: Resultados de las mediciones de parámetros comparadas con la NOM-127-SSA1-1994

# ESTACIÓN	NOMBRE CORTO	Arsénico Total	Coliformes Fecales	Cromo Total	DBO	DQO	E. Coli	Mercurio Total	Nitrógeno Amoniacoal	Nitritos	Nitratos	Nitrógeno Orgánico	Nitrógeno Total	Orto Fosfato	Fósforo Total	Plomo Total	pH	Sólidos Disueltos	Sólidos Suspendid
1	L.C.E.L. 12	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
2	L.C.E.L. 21	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
3	E.L.E	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
4	L.C.E.L. 16	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
5	L.C.E.L. 14	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
6	L.C.E.L. 04	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
7	L.C.E.L. 17	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
8	L.C.E.L. 22	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
9	E.L.C.	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
10	L.C.E.L. 11	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
11	L.C.E.L. 15	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
12	L.C.L. I	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
13	L.C.E.L. 20	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
14	E.L.G	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
15	L.C.E.L. 07	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
16	L.C.E.L. 28	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
17	E.L.D	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
18	L.C.E.L. 13	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
19	L.C.E.L. 02	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
20	L.C.E.L. 01	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
21	E.L.H	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
22	L.C.E.L. 08	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
23	L.C.E.L. 10	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
24	E.L.F	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
25	L.C.E.L. 06	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
26	L.C.E.L. 24	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
27	L.C.E.L. 23	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
28	E.L.B	Green	Red	Green			Green	Green	Orange	Green	Green					Green		Yellow	
29	L.C.E.L. 03	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
30	L.C.E.L. 27	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
31	L.C.E.L. 05	Green	Red	Green			Green	Green	Orange	Green	Green					Green		Yellow	
32	L.C.E.L. 25	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
33	L.C.E.L. 26	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	
34	E.L.A	Green	Red	Green			Green	Green	Yellow	Green	Green					Green		Yellow	

Tabla 4.4: Resultados de las mediciones de parámetros comparadas con la NOM-001-SEMARNAT-1996

# ESTACIÓN	NOMBRE CORTO	Arsénico Total	Coliformes Fecales	Cromo Total	DBO	DQO	E. Coli	Mercurio Total	Nitrógeno Amoniacal	Nitritos	Nitratos	Nitrógeno Orgánico	Nitrógeno Total	Orto Fosfato	Fósforo Total	Plomo Total	pH	Sólidos Disueltos	Sólidos Suspendedos
1	L.C.E.L. 12	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
2	L.C.E.L. 21	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
3	E.L.E	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
4	L.C.E.L. 16	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
5	L.C.E.L. 14	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
6	L.C.E.L. 04	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
7	L.C.E.L. 17	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
8	L.C.E.L. 22	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
9	E.L.C.	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
10	L.C.E.L. 11	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
11	L.C.E.L. 15	Green	Red	Green	Yellow		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
12	L.C.L. I	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
13	L.C.E.L. 20	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
14	E.L.G	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
15	L.C.E.L. 07	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
16	L.C.E.L. 28	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
17	E.L.D	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
18	L.C.E.L. 13	Green	Red	Green	Yellow		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
19	L.C.E.L. 02	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
20	L.C.E.L. 01	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
21	E.L.H	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
22	L.C.E.L. 08	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
23	L.C.E.L. 10	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
24	E.L.F	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
25	L.C.E.L. 06	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
26	L.C.E.L. 24	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
27	L.C.E.L. 23	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
28	E.L.B	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
29	L.C.E.L. 03	Green	Red	Green	Yellow		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
30	L.C.E.L. 27	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
31	L.C.E.L. 05	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
32	L.C.E.L. 25	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
33	L.C.E.L. 26	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red
34	E.L.A	Green	Red	Green	Green		Green	Green					Green		Green	Green	Green		Red

Tabla 4.5: Resultados de las mediciones de parámetros comparadas con las guías de la OMS

# ESTACIÓN	NOMBRE CORTO	Arsénico Total	Coliformes Fecales	Cromo Total	DBO	DOO	E. Coli	Mercurio Total	Nitrógeno Amoniacal	Nitritos	Nitratos	Nitrógeno Orgánico	Nitrógeno Total	Orto Fosfato	Fósforo Total	Plomo Total	pH	Sólidos Disueltos	Sólidos Suspendidos
1	L.C.E.L. 12	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
2	L.C.E.L. 21	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
3	E.L.E	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
4	L.C.E.L. 16	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
5	L.C.E.L. 14	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
6	L.C.E.L. 04	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
7	L.C.E.L. 17	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
8	L.C.E.L. 22	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
9	E.L.C.	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Orange	
10	L.C.E.L. 11	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
11	L.C.E.L. 15	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
12	L.C.L. I	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
13	L.C.E.L. 20	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
14	E.L.G	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
15	L.C.E.L. 07	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
16	L.C.E.L. 28	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
17	E.L.D	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
18	L.C.E.L. 13	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
19	L.C.E.L. 02	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
20	L.C.E.L. 01	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
21	E.L.H	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
22	L.C.E.L. 08	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
23	L.C.E.L. 10	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
24	E.L.F	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
25	L.C.E.L. 06	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
26	L.C.E.L. 24	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Orange	
27	L.C.E.L. 23	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
28	E.L.B	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Orange	
29	L.C.E.L. 03	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
30	L.C.E.L. 27	Green	Orange	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
31	L.C.E.L. 05	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
32	L.C.E.L. 25	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Orange	
33	L.C.E.L. 26	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	
34	E.L.A	Green	Red	Green			Green	Green		Green	Green					Green		Red	

5. Índice de calidad del agua (ICA)

Un índice de calidad del agua nos permite resumir de manera conveniente la gran cantidad de datos y parámetros de calidad del agua, dándonos la oportunidad de comunicarnos fácilmente con personas no especializadas en el tema, es decir, a la población de manera general. El índice es el resultado de un cálculo matemático de las medidas de calidad y proporciona una breve descripción respecto al estado de calidad del agua. Dicho índice es solamente una herramienta que permite calificar al agua más no sustituye los estudios y análisis profesional que se debe realizar cuando se estudia un cuerpo de agua.

El ICA se define como el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo y tendrá una calificación numérica donde el agua altamente contaminada tendrá valores cercanos al 0% mientras que un 100% reflejará que el agua se encuentra en excelentes condiciones.

5.1. Índice de calidad del agua (ICA)

SEMARNAT, CONAGUA y otras organizaciones crearon un índice y este consta de 18 parámetros con distintos pesos relativos (W_i) dependiendo de la importancia de cada parámetro. La Tabla 5.1 muestra los parámetros y los pesos relativos a cada uno de ellos:

Tabla 5.1: Parámetros y peso relativo para cada uno

Parámetro	Peso (W_i)	Parámetro	Peso (W_i)
Demanda Bioquímica de Oxígeno	5.0	Nitrógeno en nitratos	2.0
Oxígeno disuelto	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliformes fecales	4.0	Color	1.0
Coliformes totales	3.0	Dureza total	1.0
Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)	3.0	Potencial de Hidrógeno (pH)	1.0
Conductividad eléctrica	2.0	Sólidos suspendidos	1.0
Fosfatos totales	2.0	Cloruros	0.5
Grasas y aceites	2.0	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal	2.0	Turbiedad	0.5

Gracias a que el crecimiento poblacional y de industrias han impactado los cuerpos de agua con sus descargas, hay parámetros que no se consideraron al establecer los pesos relativos antes mencionados.

Es por esto que SEMARNAT propone el uso de la Tabla 5.2. la cual es de gran ayuda para clasificar la calidad del agua considerando solamente 1 parámetro como lo es la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), DQO (Demanda Química de Oxígeno) y los SST (Sólidos Suspendidos Totales).

Tabla 5.1: Escala de clasificación de la calidad del agua para DBO₅, DQO y SST

Criterio (mg/L)	Clasificación	Color
DBO ₅ ≤ 3 DQO ≤ 10 SST ≤ 25	EXCELENTE No contaminada	AZUL
3 < DBO ₅ ≤ 6 10 < DQO ≤ 20 25 < SST ≤ 75	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable	VERDE
6 < DBO ₅ ≤ 30 20 < DQO ≤ 40 75 < SST ≤ 150	ACEPTABLE Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	AMARILLO
30 < DBO ₅ ≤ 120 40 < DQO ≤ 200 150 < SST ≤ 400	CONTAMINADA Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal	NARANJA
DBO ₅ > 120 DQO > 200 SST > 400	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales o no municipales	ROJO

Para el cálculo del ICA, se sigue la siguiente ecuación general:

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

Donde:

- ICA Índice de Calidad del Agua
- I_i Índice de calidad del parámetro i
- W_i Peso relativo del parámetro i

El valor real de cada parámetro se transforma mediante una fórmula y nos arroja un valor “I_i” entre 0 y 100. Si el valor es mayor o menor a dichos límites, se tomará el valor del límite. La sumatoria de los valores relativos para los 18 parámetros es igual a 36.5 unidades. En caso de no contar con datos para los 18 parámetros, se ajusta la sumatoria de “W_i” a los parámetros utilizados. Se realiza la operación y se recurre a tablas donde existen intervalos de calidad similares a los de la Tabla 5.2.

Las ecuaciones para el cálculo de “Ii” son:

5.1.1. *pH*

- Si $pH < 6.7$:

$$I_{pH} = 10^{0.2335 pH + .440}$$

- Si $6.7 < pH < 7.3$

$$I_{pH} = 100$$

- Si $pH > 7.3$

$$I_{pH} = 10^{4.22 - .293 pH}$$

5.1.2. *Color*

$$I_C = 123 \times C^{-0.295}$$

5.1.3. *Turbiedad*

$$I_T = 108 \times T^{-0.178}$$

5.1.4. *Grasas y aceites*

$$I_{GyA} = 87.25 \times GyA^{-0.298}$$

5.1.5. *Sólidos suspendidos totales (SST)*

$$I_{SST} = 266.5 \times SST^{-0.37}$$

5.1.6. *Sólidos disueltos totales (SDT)*

$$I_{SDT} = 109.1 - 0.0175 \times SDT$$

5.1.7. *Conductividad*

$$I_{Conduct} = 123 \times C^{-0.295}$$

5.1.8. *Alcalinidad*

$$I_{Al} = 105 \times A^{-0.186}$$

5.1.9. *Dureza*

$$I_{Dur} = 10^{1.974 - 0.00174 \times D}$$

5.1.10. *Nitratos*

$$I_{NO3} = 162.2 \times NO_3^{-0.343}$$

5.1.11. *Nitrógeno amoniacal*

$$I_{NH3} = 45.8 \times NH_3^{-0.343}$$

5.1.12. *Fosfatos totales*

$$I_{PO4} = 34.215 \times PO_4^{-0.46}$$

5.1.13. *Cloruros*

$$I_{Cl} = 121 \times Cl^{-0.223}$$

5.1.14. *Oxígeno disuelto*

$$I_{OD} = 100 \times \frac{OD}{OD_{SAT}}$$

5.1.15. *DBO*

$$I_{DBO} = 120 \times DBO^{-0.0673} \quad \text{o} \quad I_{DBO} = 120 \times DBO^{-0.673}$$

5.1.16. *Coliformes totales*

$$I_{CT} = 97.5 \times CT^{-0.27}$$

5.1.17. *Coliformes fecales*

$$I_{CF} = 97.5 \times (5 \times CF)^{-0.27}$$

5.1.18. *Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)*

$$I_{SAAM} = 100 - 16.678 \times SAAM + 0.1587 \times SAAM^2$$

Dependiendo de la calificación o índice de calidad, se puede clasificar las condiciones del cuerpo de agua. Entre mayor sea el índice, mejor será la calidad del agua en estudio. La Tabla 5.3 muestra una clasificación para el método descrito anteriormente:

Tabla 5.3: Clasificación del ICA dependiendo el uso

ICA	Uso Público	Recreo	Pesca y Vida Acuática	Industria Agrícola	Navegación	Transporte Desechos Tratados
100	Aceptable No requiere de purificación	Aceptable para	Aceptable para	Aceptable No requiere de purificación	Aceptable	Aceptable
90	Requiere de una ligera purificación	todo tipo de deporte acuático	todo tipo de organismos	Requiere una ligera purificación	para todo	para todo
80	Mayor		Excepto especies		tipo de	tipo de transporte
70	necesidad de tratamientos	Aceptable pero no recomendable	muy sensibles	Sin tratamiento	navegación	de desechos
60			Dudoso para especies sensibles	para la industria normal		tratados
50	Dudoso	Dudoso para contacto directo	Solo organismos muy resistentes	Con tratamiento para		
40	Inaceptable	Sin contacto con el agua		la mayor parte de la insutria		
30		Muestras obvias de contaminación	Inaceptable	Uso muy restringido	Contaminado	
20		Inaceptable		Inaceptable	Inaceptable	
10						Inaceptable
0						

5.2. Índice de calidad del agua (IMTA e Instituto de Ingeniería, UNAM)

Este método se basa en el método de Dinius de 1974 y el Instituto de Ingeniería de la UNAM le hizo algunas modificaciones. Los pesos relativos de cada parámetro (Tabla 5.4) fueron pensados para que la suma de todos fuera igual a una unidad. El cálculo del ICA, se emplea la siguiente ecuación:

$$ICA = \prod_{i=1}^n Q_i^{W_i}$$

Donde:

- ICA Índice de Calidad del Agua
- n Número de parámetros elegidos
- Qi Calidad del parámetro i
- Wi Peso relativo del parámetro i, entre 0 y 1, mostrado en la Tabla 5.2.1

Tabla 5.4: Parámetros y peso relativo para cada uno, IMTA e I.I., UNAM

Parámetro	Peso (Wi)	Unidad
Oxígeno disuelto	0.103	% saturación
DBO	0.096	mg / L
DQO	0.053	mg / L
pH	0.063	Unidades de pH
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	0.033	mg / L
Coliformes Totales	0.083	NMP / 100 mL
Coliformes Fecales	0.143	NMP / 100 mL
Nitratos	0.053	mg / L
Nitrógeno amoniacal	0.043	mg / L
Fosfatos	0.073	mg / L
Fenoles	0.033	µg / L
Diferencia de temperatura	0.043	° C
Alcalinidad	0.055	mg / L CaCO ₃
Dureza	0.058	mg / L CaCO ₃
Cloruros	0.068	mg / L

Al calcular el ICA, se puede clasificar en 6 diferentes rangos: Excelente (E), aceptable (A), levemente contaminada (LC), contaminada (C), fuertemente contaminada (FC) y excesivamente contaminada (EC). Cada rango puede variar dependiendo del uso del agua como se muestra en la Tabla 5.5:

Tabla 5.5: Clasificación del ICA dependiendo del uso del agua, IMTA e II, UNAM

ICA	Agua Potable	Agricultura	Pesca y Vida Acuática	Industrial	Recreativo
100	E	E	E	E	E
90	A	A	E	A	E
80	LC	A	E	A	E
70	C	LC	A	LC	A
60	C	LC	LC	LC	A
50	FC	C	C	C	LC
40	FC	C	FC	C	C
30	EC	FC	FC	FC	FC
20	EC	FC	EC	FC	FC
10	EC	EC	EC	EC	EC

5.3. Otros índices de calidad

Es normal esperar que otros países tengan su propio índice de calidad del agua, con sus respectivas ecuaciones. Estos pueden ser incluso más estrictos o laxos que el de México. Algunos de estos índices son los siguientes:

- Índice de la National Sanitation Fundation (NSF) de Estados Unidos
- Índice del Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) de Canada

5.4. Cálculo del Índice de Calidad del Agua para el Lago de Chapala

Por tratarse de un cuerpo de agua en México y por los parámetros disponibles, calcularemos el índice de calidad explicado en el punto 5.1. Para facilitar el cálculo y debido a falta de las mediciones de cada estación, se utilizarán los valores promedio para los 18 parámetros presentados anteriormente. Los resultados a continuación en la Tabla 5.6:

Tabla 5.6: Cálculo de índice de calidad del agua Lago de Chapala

Parámetro	Promedio	li	Wi	li*Wi
Arsénico Total	0.0125	-	-	-
Coliformes Fecales	7,048.470	5.77161168	4.0	23.0864467
Cromo Total	0.004330	-	-	-
DBO	6.360000	34.550522	5.0	172.75261
DQO	46.920	-	-	-
Escherichia Coli	516.460	-	-	-
Mercurio Total	0.001075	-	-	-
Nitrógeno Amoniacal	0.183468	81.9340242	2.0	163.868048
Nitrito	0.010976	-	-	-
Nitrato	0.255106	259.146686	2.0	200
Nitrógeno Orgánico	0.912462	-	-	-
Nitrógeno Total	1.341187	-	-	-
Orto Fosfato	0.505550	-	-	-
Fósforo Total	0.619922	42.6325688	2.0	85.2651376
Plomo Total	7.814814	-	-	-

pH	8.832693	42.8569195	1.0	42.8569195
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	594.76	98.6917	0.5	49.34585
Sólidos Suspensos Totales (SST)	59.50	58.7659736	1.0	58.7659736
SUMATORIA			17.5	795.941

Al aplicar la ecuación general:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n (I_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} = \frac{795.941}{17.5} = 45.482$$

De acuerdo con la Tabla 5.3, podemos observar que la calidad es muy mala y hay mucha oportunidad de mejorar.

Tabla 5.7: Clasificación del ICA del Lago de Chapala

ICA	Uso Público	Recreo	Pesca y Vida Acuática	Industria Agrícola	Navegación	Transporte Desechos Tratados
100	Aceptable No requiere de purificación	Aceptable para	Aceptable para	Aceptable No requiere de purificación	Aceptable	Aceptable
90	Requiere de una ligera purificación	todo tipo de deporte acuático	todo tipo de organismos	Requiere una ligera purificación	para todo	para todo
80	Mayor		Excepto especies		tipo de	tipo de transporte
70	necesidad de tratamientos	Aceptable pero no recomendable	muy sensibles	Sin tratamiento	navegación	de desechos
60			Dudoso para especies sensibles	para la industria normal		tratados
50	Dudoso	Dudoso para contacto directo	Solo organismos muy resistentes	Con tratamiento para		
40	Inaceptable	Sin contacto con el agua		la mayor parte de la industria		

De acuerdo con el cálculo del índice de calidad del agua y las recomendaciones dadas, se tiene que aplicar un tratamiento al agua para poder consumirla o utilizar el agua en la industria agrícola. También puede representar peligro para la vida acuática.

Debido a las dimensiones del Lago de Chapala, un índice de calidad del agua general no representa las condiciones reales del Lago. Por esta razón, se repitió el cálculo del ICA para las 34 estaciones monitoreadas a lo largo del muestro. Los resultados se muestran en la Tabla 5.8. Se utilizó una escala de colores en el resultado final del ICA en donde una calificación de 100 se representa de color verde, 50 en un tono naranja y 0 en color rojo.

Tabla 5.8: ICA de las 34 estaciones de muestreo del Lago de Chapala

NOMBRE CORTO	Coliformes Fecales	DBO	Nitrógeno Amoniacal	Nitratos	Fósforo Total	pH	Sólidos Disueltos Totales (SDT)	Sólidos Suspendedos Totales (SST)	SUMATORIA LiWi	ICA
L.C.E.L. 12	7305.00	5.97	0.22	0.14	0.57	8.71	628.07	50.06	803.62	45.92
L.C.E.L. 21	2894.82	9.44	0.23	0.17	0.55	8.88	632.18	36.48	763.63	43.64
E.L.E	9553.09	1.93	0.11	0.08	0.57	9.06	581.58	34.81	1049.55	59.97
L.C.E.L. 16	2325.36	9.89	0.23	0.15	0.60	8.89	646.26	74.73	742.70	42.44
L.C.E.L. 14	3563.91	10.59	0.25	0.61	0.97	8.59	561.15	80.32	720.25	41.16
L.C.E.L. 04	4736.00	7.08	0.19	0.09	0.55	8.72	651.44	40.07	802.83	45.88
L.C.E.L. 17	5001.91	11.83	0.26	0.15	0.62	8.69	652.13	71.59	721.53	41.23
L.C.E.L. 22	5874.18	7.87	0.19	0.29	0.57	8.71	617.66	47.14	782.49	44.71
E.L.C.	12418.10	3.46	0.20	0.36	0.88	8.96	508.92	55.47	863.04	49.32
L.C.E.L. 11	8449.36	3.64	0.20	0.03	0.69	9.01	582.96	80.40	853.00	48.74
L.C.E.L. 15	2669.45	14.96	0.15	0.21	0.51	8.76	633.94	39.03	757.92	43.31
L.C.L. I	3901.27	8.31	0.19	0.75	0.49	8.76	619.89	35.29	795.10	45.43
L.C.E.L. 20	4233.27	8.59	0.22	0.15	0.57	8.87	643.10	77.35	753.91	43.08
E.L.G	8703.55	1.76	0.11	0.07	0.57	9.10	603.21	38.04	1069.44	61.11
L.C.E.L. 07	2852.73	8.15	0.13	0.07	0.52	8.87	621.43	26.64	824.72	47.13
L.C.E.L. 28	3602.45	6.65	0.20	0.17	0.60	8.76	643.64	32.65	807.99	46.17
E.L.D	9219.55	2.56	0.16	0.06	0.59	9.08	572.84	31.87	959.04	54.80
L.C.E.L. 13	5150.09	13.60	0.20	0.27	0.81	8.73	617.90	56.79	718.71	41.07
L.C.E.L. 02	9844.55	1.95	0.11	0.06	0.55	9.10	608.71	30.21	1051.08	60.06
L.C.E.L. 01	11649.90	2.35	0.10	0.02	0.52	9.07	622.88	38.40	1008.03	57.60
E.L.H	8289.91	2.84	0.16	0.05	0.58	8.93	557.45	39.22	937.93	53.60
L.C.E.L. 08	3578.18	7.69	0.25	0.07	0.57	8.72	619.14	48.70	775.25	44.30
L.C.E.L. 10	3346.36	6.99	0.24	0.10	0.55	8.70	619.39	92.98	775.90	44.34
E.L.F	6591.73	1.98	0.09	0.02	0.56	9.01	620.04	32.68	1061.94	60.68
L.C.E.L. 06	1032.00	6.58	0.23	0.10	0.50	8.88	655.69	24.09	827.18	47.27
L.C.E.L. 24	13145.60	2.64	0.13	1.08	0.72	8.72	459.92	87.90	945.16	54.01
L.C.E.L. 23	12114.90	3.01	0.12	0.87	0.70	8.60	471.94	66.02	934.33	53.39
E.L.B	10489.80	3.98	0.33	0.84	0.72	8.70	484.97	115.20	814.91	46.57
L.C.E.L. 03	5412.50	14.40	0.11	0.10	0.51	8.78	597.01	44.33	770.14	44.01
L.C.E.L. 27	3860.70	4.16	0.23	0.33	0.62	8.84	630.49	84.28	837.12	47.84
L.C.E.L. 05	5334.40	5.29	0.40	0.17	0.57	8.85	637.78	89.69	776.00	44.34
L.C.E.L. 25	13688.10	4.21	0.20	0.76	0.76	8.65	465.05	115.88	830.31	47.45
L.C.E.L. 26	17873.50	4.84	0.10	0.28	0.64	8.94	538.19	91.06	850.87	48.62
E.L.A	14059.90	6.15	0.12	0.14	0.75	8.60	560.13	138.18	807.34	46.13

Al observar la Tabla anterior (Tabla 5.8) se puede notar que pocas de las estaciones tienen un ICA menor al promedio mientras que las que presentan una calificación mayor, no son mucho mejores.

6. Análisis de resultados

Al empezar a investigar al respecto de la calidad del agua del lago más grande del país, se encontraron varios artículos donde gente reportaba una calidad deplorable del agua. Existen quejas contra los municipios que rodean este cuerpo de agua y contra la Comisión Estatal del Agua Jalisco. Sorprendentemente, el SINA (Sistema Nacional de Información del Agua) señala que no existe tal problemática y presentan datos en donde la calidad es “excelente” y que no existe ningún tipo de contaminante en incumplimiento con lo que establecen las normas mexicanas.

Como se puede apreciar en las Figuras y Tablas del capítulo 4, el agua de Chapala presenta todos los contaminantes estudiados, a pesar de que las concentraciones son menores (en algunos casos) de los límites que marcan las normas mexicanas. A pesar de esto, la presencia de metales y compuestos químicos dañinos para la salud humana como de la vida acuática tiene que ser considerada dentro del tratamiento del agua recolectada para consumo humano.

La presencia de metales como mercurio, plomo, cromo y arsénico son un potencial peligro para la población que no tiene acceso a otra fuente de agua para su consumo o para su utilización en el campo. Han existido casos de gente que sufre de enfermedades renales crónicas, probablemente por el consumo cotidiano de agua contaminada a lo largo de los años. Pescadores han reportado que existe una gran cantidad de fauna muerta en los sectores industriales de la costa del lago, lo que indica que no hay control en el tratamiento del agua que utilizan y esta es “botada” al lago sin conciencia de las consecuencias.

Las altas concentraciones de E. Coli y coliformes fecales confirman que existen descargas de aguas negras y/o que no hay un buen control de los desechos animales en toda la extensión de la periferia del lago, al igual que la presencia de nitrógeno y fósforo. El uso descontrolado de fertilizantes ha creado un amplio problema de eutrofización en el lago, provocando el desarrollo de algas y plantas que limitan el acceso a oxígeno y luz solar que la vida acuática necesita. Inclusive, reporteros y gente local han señalado la existencia de una plaga de lirio.

Por otro lado, la comparativa entre las guías de calidad del agua de la Organización Mundial de la Salud y las normas mexicanas es impactante. En parámetros que las 2 normas comparten como lo es el arsénico total o el E. Coli, se puede ver que, en algunos casos, las normas mexicanas son mucho menos estrictas que lo que establecen las guías de la OMS.

Los valores promedio de DBO, DQO y SST caen sobre el rango de calidad “buena calidad” y “aceptable” lo cual resulta ser muy engañoso pues hubo estaciones en donde las mediciones superaban por mucho el límite legal.

A pesar de que el agua del lago de Chapala abastece de este recurso a la Ciudad de Guadalajara y a gran parte de las zonas aledañas, no es un cuerpo de agua donde se pueda consumir el agua directamente pues existen contaminantes potencialmente peligrosos como el E. Coli y los coliformes fecales. Un símil muy notable es el lago de Valle de Bravo a pesar de la diferencia de tamaños.

El conocer las normas mexicanas que comprenden los temas de calidad del agua para consumo humano y de descargas de aguas residuales brindan la oportunidad de abordar el tema de la calidad del agua del Lago de Chapala y aplicar una evaluación a partir de los datos recolectados por personal del ITESO.

A pesar de la gran cantidad de información otorgada en el trabajo realizado por el ITESO, existen algunas dudas acerca del procedimiento ejecutado como la cercanía de las estaciones de muestreo a la orilla del lago. Este dato, por más simple que sea, puede afectar las mediciones de los parámetros de manera significativa.

7. Conclusiones

Gracias al trabajo realizado en el ITESO y a los diferentes reportes de calidad del agua, se puede notar que existe una deficiencia en la calidad del agua del Lago de Chapala. La presencia de algunos contaminantes puede no significar nada en un instante, pero a largo plazo pueden ser un gran daño a la población humana y animal que vive en ese lugar. De igual manera, la presencia y concentración de otros contaminantes explican la situación actual del lago: plaga de flora como lirio, la eutrofización y mortandad de fauna acuática y la inexplicable razón de enfermedades crónicas en población que no tiene otra alternativa que consumir agua del lago para poder vivir y trabajar.

Esta tesina tenía como objetivo realizar el cálculo de un índice de calidad. A pesar de que un índice de calidad del agua sirve para comunicar la situación puntual de un cuerpo de agua en el tiempo, es una gran herramienta para tomar muestras y realizar estudios más avanzados. Incluso, permite a más gente saber cómo es la calidad de un cuerpo de agua sin la necesidad de estar presente en el momento del muestreo o de los estudios. La determinación del ICA para cada estación da un panorama más amplio acerca de la ubicación más desfavorable a lo largo y ancho del lago en comparación de un índice general. Hay que considerar que no se pudieron utilizar todos los parámetros necesarios para el cálculo del ICA, por lo que la calificación puede ser considerada un tanto incompleta.

Una vez realizado el análisis de la situación actual del lago, es de suma importancia realizar alguna labor al respecto para mejorar las condiciones de la calidad del agua. Un mejor control en la descarga de aguas residuales (tanto municipales como de origen industrial), fomentar a que las condiciones particulares de descarga (CDP's) emitidas por las autoridades sean más rigurosas, un adecuado uso de fertilizantes y pesticidas, un buen manejo del uso de suelo y campañas de limpieza del lago pueden ayudar a recuperar la buena condición del mismo. Esto ayudaría a mantener este sitio turístico agradable para la gente, impulsar a que sea un lugar más próspero económicamente y sin problemas de salud en la población local que es el objetivo más importante.

Como especialista, se espera poder realizar trabajos con la finalidad de mantener y mejorar los niveles de concentración de diferentes parámetros básicos, así como las propiedades físicas de los cuerpos de agua de manera que tengan una buena calidad. Así como hay que dar tratamiento a los recursos naturales que tenemos disponibles, hay que tener una gran vigilancia y monitoreo de ellos con el solo objetivo de mantener dichos cuerpos de agua sanos desde un punto de vista ecológico, sin contaminantes y disponibles para su posible consumo responsable.

8. Referencias

- Bautista-ávalos, Dinora & Cruz-Cárdenas, Gustavo & Moncayo-Estrada, Rodrigo & Teodoro Silva García, José & Estrada-Godoy, Francisco. (2013). Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México. Revista internacional de contaminación ambiental. 30. 263-274.
- Calidad del agua (Nacional); CONAGUA; obtenido de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=calidadAgua>
- Diseño de Platas Potabilizadoras de Tecnología Simplificada, Libro 24 MAPAS, ANEAS, obtenido de: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro24.pdf>
- Guías para la calidad del agua de consumo humano, 4ta edición, OMS, obtenido de: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?ua=1>
- Guías para la calidad del agua potable, 3ra edición, OMS, obtenido de: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/gdwq3_es_full_lowres.pdf
- Lago de Chapala; Comisión Estatal del Agua Jalisco; obtenido de <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/chapala/#lago>
- Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS); Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento de México A.C. (ANEAS); obtenido de: <http://aneas.com.mx/manual-de-agua-potable-alcantarillado-y-saneamiento-mapas-conagua-2015/>
- Mapas de Uso de Suelo y Vegetación; INEGI; obtenido de: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#>
- Mapas de Uso de Suelo y Vegetación Chapala (F-13-D-76); INEGI; obtenido de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Usosuelo_hist/1_50_00/serie_I/702825652395.pdf
- Mapas de Uso de Suelo y Vegetación Jocotepec (F-13-D-75); INEGI; obtenido de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Usosuelo_hist/1_50_00/serie_I/702825652388.pdf
- Mapas de Uso de Suelo y Vegetación Ocotlán (F-13-D-77); INEGI; obtenido de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Usosuelo_hist/1_50_00/serie_I/702825652401.pdf
- Mapas de Uso de Suelo y Vegetación Sahuayo de Morelos (F-13-D-87); INEGI; obtenido de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Usosuelo_hist/1_50_00/serie_I/702825652494.pdf
- Mapas de Uso de Suelo y Vegetación Tizapán el Alto (F-13-D-86); INEGI; obtenido de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Usosuelo_hist/1_50_00/serie_I/702825652487.pdf
- Mapas de Uso de Suelo y Vegetación Zacoalco de Torres (F-13-D-85); INEGI; obtenido de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/tematicas/Usosuelo_hist/1_50_00/serie_I/702825652470.pdf

- Mezcala: encuentros y desencuentros de una comunidad, Adriana Hernández García, SCIELO, obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-05652006000200004
- Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994; obtenido de: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>
- Normas Oficiales Mexicanas NOM-001, NOM-002, NOM-003; obtenido de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105139/Normas Oficiales Mexicanas.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105139/Normas_Oficiales_Mexicanas.pdf)
- Monitoreo de calidad del agua; CONAGUA; obtenido de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/145524/Monitoreo de calidad del agua en Mexico 2012-2015.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/145524/Monitoreo_de_calidad_del_agua_en_Mexico_2012-2015.pdf)
- Red nacional de medición de la calidad del agua (Renameca); CONAGUA; obtenido de: <https://files.conagua.gob.mx/transparencia/CalidaddelAgua.pdf>
- Real Academia Española. (2014). Diccionario de la lengua española (23° edición). Obtenido de <https://rae.es>
- Sistema Nacional de Información Municipal; obtenido de: <http://www.snim.rami.gob.mx/snim1.html>
- Un ecosistema en peligro de extinción el lago de Chapala; Teorema Ambiental, Revista Técnico Ambiental; obtenido de: <http://www.teorema.com.mx/agua/un-ecosistema-en-peligro-de-extincion-el-lago-de-chapala/>