

***SA.C2 Calidad del agua del lago de Chapala:
una aproximación al riesgo de afectación a la salud
por exposición a agua contaminada***

ALEJANDRA CASTELLANOS MÁRQUEZ
ANA SOFÍA MACÍAS ASCANIO

Los datos de calidad del agua de un río o un lago permiten conocer las tendencias espaciales y temporales de los fenómenos de contaminación, así como su relación con las dinámicas del entorno. Además, sirven para sentar las bases de una evaluación de *riesgo de afectación a la salud por exposición a agua contaminada*, dado que son un insumo para verificar si existe el peligro, o no, o de tener consecuencias negativas sobre la salud de los ecosistemas y las sociedades.

Para conocer la calidad no es suficiente una muestra aislada o una “fotografía”, pues al ser un fenómeno que implica a un territorio deben de integrarse en la perspectiva del ciclo del agua, las dinámicas sociales, económicas, culturales, ambientales y políticas que suceden a su alrededor. Por lo tanto, la interpretación de datos forma parte de un entramado que contiene la distribución espacial de la información, su localización y sus tendencias históricas y territoriales. La finalidad de la generación y el análisis de datos debe de ser el cuidado y la preservación de la calidad del agua o, en segunda instancia, la identificación de tóxicos, y determinar si existe o no riesgo por contaminación, así como diversas estrategias para mitigar los impactos que se provocan.

Los datos de la calidad del agua se obtienen tanto en lo espacial como en lo temporal. Para poder identificar patrones, siniestros y anormalidades se requiere tener información constantemente actualizada y bien distribuida. Los datos se componen de las concentraciones de un conjunto de parámetros que globalmente se identifican como indicadores de diversas formas de contaminación. Cuando se cuente con un registro de histórico de esos parámetros y sus concentraciones será posible conocer tendencias temporales sobre compuestos específicos, así como siniestros o eventualidades —por ejemplo, una descarga directa de mercurio— que se puedan identificar puntualmente. En este caso, mientras mayor antigüedad tenga la base datos, mejor será la perspectiva temporal.

La mirada o perspectiva espacial vincula la información con un lugar específico y su relación con la calidad del agua; por ejemplo, en un lago no serán las mismas condiciones de calidad del agua en la zona donde desemboca un río que atraviesa varias ciudades, en la ribera del lago, que en la zona central donde yace un manantial con aguas termales. Asimismo, no se esperará la misma calidad en una zona de descargas de aguas urbanas con tratamiento y una zona agrícola sin tratamiento. A esto se le añaden las particularidades territoriales y su relación multidireccional desde la escala local hasta la global.

La relación entre la calidad del agua y la escala territorial es única e irrepetible: cada territorio tiene sus dinámicas económicas particulares, de las cuales se generan aguas residuales, asimismo, sus actividades domésticas, de las cuales también se generan aguas residuales, se encontrarán localizadas en un tipo de clima que ha dado lugar a su vez a sus dinámicas culturales, de las cuales también se generan aguas residuales; al mismo tiempo que necesitan agua potable para poder tener salud, limpieza, economía y vida social. Esta relación se da

entre la calidad del agua que necesita el territorio y al mismo tiempo los residuos que genera a través del agua y que, finalmente, se exponen al medioambiente, en caso de que no exista un tratamiento previo.

En este capítulo hablaremos sobre la calidad del agua en las dos comunidades ribereñas de Mezcala de la Asunción y San Pedro Itzicán, en Poncitlán, Jalisco, en la ribera del lago de Chapala. Se presenta la sistematización de los datos generados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y un análisis sobre los límites de concentración que deben tener para no ser un riesgo potencial para la salud. El objetivo general de la dimensión de medioambiente es sentar las bases para desarrollar un análisis integral del riesgo de afectaciones a la salud por contacto con agua contaminada en Mezcala y San Pedro Itzicán. Se presume que lo anterior puede contribuir al conocimiento hidrológico, en el marco de la investigación interdisciplinaria sobre la crisis sociohídrica que está viviendo dicho territorio.

ANTECEDENTES: LA DENUNCIA DE LOS POBLADORES DE SAN PEDRO ITZICÁN Y MEZCALA DE LA ASUNCIÓN ANTE EL TRIBUNAL LATINOAMERICANO DEL AGUA Y OTROS DATOS SOBRE CONTAMINACIÓN EN CHAPALA

Actualmente, y desde hace aproximadamente dos décadas, en la ribera de Chapala, en el municipio de Poncitlán, un conjunto de comunidades de ascendencia indígena ha presentado un clamor social ante problemas de salud pública relacionados con afectaciones al sistema nervioso central e insuficiencia renal, principalmente.

Ante este clamor social, durante 2018 un equipo interdisciplinario del ITESO se organizó con actores de Mezcala de la Asunción y San Pedro Itzicán para elaborar una demanda por las violaciones a los derechos humanos de estas comunidades, la cual se presentó ante el Tribunal Latinoamericano del Agua (TLA), cuya audiencia tuvo lugar en octubre de 2018 y fue dedicada a casos de contaminación y agresión en territorios y pueblos indígenas de América Latina, y que se encuentra mejor descrita en la introducción de este libro (véase la sección S1).

La demanda fue elaborada de manera interdisciplinaria, con equipos de trabajo que reunieron e integraron información vinculada al caso desde distintos frentes, como sistematización y recuperación de notas periodísticas, trabajos académicos en torno a la contaminación del lago de Chapala, el nombramiento de Chapala como sitio Ramsar, humedal de importancia internacional; información generada por ciudadanas y ciudadanos; la declaración de Mezcala que da cuenta de los procesos de contaminación por sedimentos, agroquímicos, pesticidas y una extinción muy notoria de especies de peces dentro del lago.

Dentro del archivo de la demanda se incluyó un análisis estadístico sobre medidas de tendencia central de los datos generados por la Conagua y solicitados por transparencia, que fue realizado por parte del equipo que trabajó la dimensión de derecho al medioambiente sano y a la salud (DMA) de esta investigación. El análisis consistió en la obtención de promedios globales de las concentraciones de los parámetros evaluados y su comparación con el promedio por estación. Asimismo, se integraron referencias sobre calidad del agua como los límites máximos permisibles de la normatividad mexicana¹⁹ en materia de descargas y de

19. La NOM-001-SEMARNAT-1996 "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales" y la NOM-127-SSA1 "Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

potabilización, los rangos para los indicadores de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua, y recomendaciones para el agua potable de la Organización Mundial de la Salud.

Algunos de los hallazgos principales fueron que el promedio por estación y promedio general de arsénico rondaba en concentraciones mayores a 0.01 mg/L, que es el límite máximo que recomienda la OMS en agua potable —pero no la norma mexicana de agua potable—. Por otro lado, las coliformes fecales mostraron un valor promedio general de 7,048.5 NMP/100 mL. Según la Norma Mexicana de aguas residuales, no deberían de descargarse más de 1,000 NMP/100 mL. El análisis tuvo una relevancia tal dentro del archivo de la demanda que el jurado de la audiencia emitió la siguiente recomendación específica en el veredicto del caso:

Que el estado mexicano aplique y actualice las normas ambientales de calidad del agua potable, así como las normas referentes a las condiciones generales y particulares de descarga de agua de origen industrial, agroindustrial y minero, para que se ajusten a los estándares internacionales con el fin de garantizar la preservación de la calidad del agua superficial y subterránea y la salud de los ecosistemas y la población en general (Tribunal Latinoamericano del Agua, 2018).

Si bien las modificaciones en la normatividad no garantizan su cumplimiento en sí mismo, esta solicitud iba en el sentido de disminuir el umbral de riesgo generado por la presencia de altas concentraciones de ciertos contaminantes. Sin embargo, en 2021 se realizó una modificación a la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, pero esta no mostró cambios significativos, simplemente modificó algunos rangos como el promedio diario de arsénico para lagos cambio de 0.2 mg/L a 0.15mg/L. No obstante, como se insiste, no es en la modificación de la norma como disminuirá o protegerá a los cuerpos de agua, sino la correcta aplicación de esta.

Tanto los resultados del análisis como la sentencia del TLA y la necesidad de seguir profundizando en el conocimiento sobre la calidad del agua de un lago tan importante como Chapala dieron pie a que, a través de esta investigación, se diera continuidad al análisis desde diferentes enfoques estadísticos y obtener información más clara sobre la calidad del lago de Chapala y de las fuentes donde obtienen agua estas comunidades.

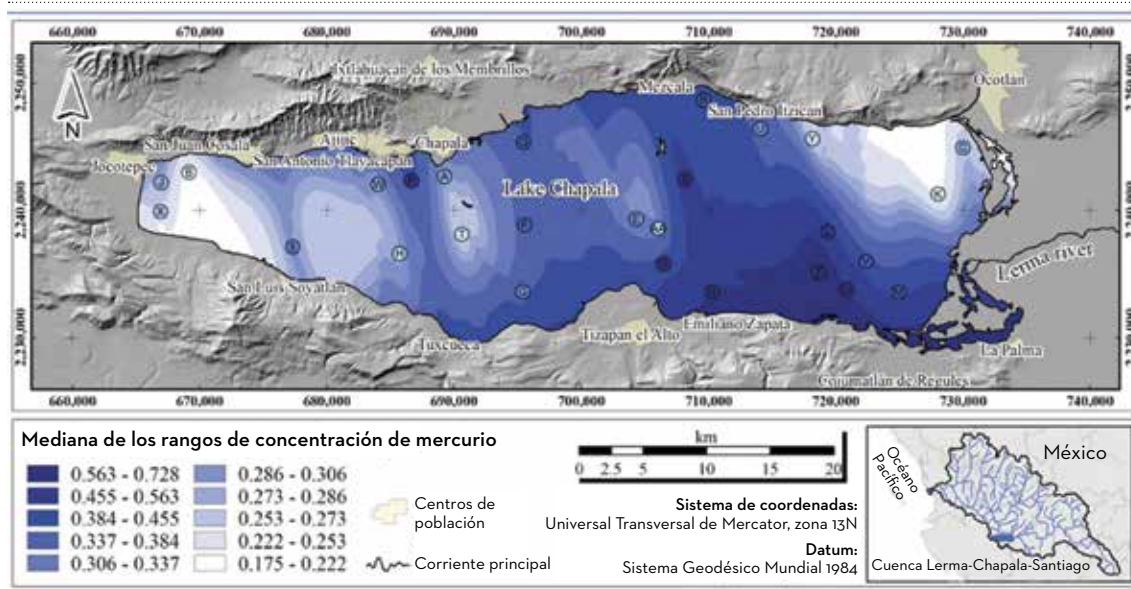
Se comenzó por una actualización de datos para ampliar el rango temporal; se realizó una limpieza de la base de datos y se analizó la distribución espacial sobre las estaciones de monitoreo.

El trabajo que se realizó durante el Tribunal no ha sido el único que habla sobre la contaminación de Chapala. A continuación, se presentan algunos antecedentes sobre estudios relacionados realizados por otros investigadores.

Para Noyola Medrano (2019) la zona más contaminada del lago de Chapala se encuentra en la desembocadura del río Lerma y se desvía hacia la ciudad de Guadalajara a través del río Santiago. Asimismo, la zona del oeste, pegada al municipio de Jocotepec, se nutre de aguas superficiales en forma de escurrimiento, mientras que en la parte central prolifera el agua subterránea.

Por otro lado, Lind y Dávalos-Lind (2002) identifican cinco problemas principales en el lago de Chapala: la proliferación de lirio, un declive generalizado en la pesca, como consecuencia de la disminución de especies, disminución de la producción de fitoplancton —fundamental para la cadena alimenticia—, explosiones de algas y bioacumulación en pescado para consumo. El mismo autor enfatiza en que los problemas de calidad del agua mantienen una

FIGURA 4.2.1 DISTRIBUCIÓN DE LA MEDIANA TOTAL DE LA CONCENTRACIÓN DE MERCURIO EN PECES EN EL LAGO DE CHAPALA



Fuente: Stong et al., 2013, p.1839).

relación estrecha con la cantidad, haciendo la siguiente correlación: a menor cantidad de agua, mayor probabilidad de aumentar los problemas relacionados con la calidad del agua.

Desde otra perspectiva, también se realizó un estudio en el lago de Chapala sobre la presencia de mercurio en peces (Stong, Alvarado, Shear, De Anda, Ramírez & Díaz, 2013, p.1836), partiendo de la identificación de fuentes de mercurio para el lago de Chapala, provenientes principalmente del río Lerma, que recibía descargas de actividades manufactureras, producción industrializada de alimentos, petroquímicas e industrias metaleras. Asimismo, en el estudio se presentaron resultados de análisis sobre la calidad del agua, los cuales indicaban que, además, del río Lerma vienen sólidos disueltos totales (SDT) y amoníaco.

A pesar de las tendencias en distribución, en esta publicación se concluye claramente que esta información no es suficiente para llegar a conclusiones definitivas sobre el mercurio en peces, dado que solamente un pez del total de la muestra excedía los límites establecidos por la normatividad mexicana sobre mercurio en alimentos (p.1839). Sin embargo, según una referencia a recomendaciones internacionales sobre niveles de tolerancia, se puede consumir pescado de Chapala de manera restringida, es decir, esporádicamente.

Otro de los problemas que se han percibido y estudiado en los alrededores del lago de Chapala es la contaminación por agrotóxicos, a este respecto se dice que

[...] los productos agroquímicos utilizados en la subcuenca de Chapala se emplean con frecuencia en niveles superiores a los recomendados por los fabricantes. El uso de fertilizantes y pesticidas es alto (del orden de 25,000 toneladas por año), los cuales incluyen en sus fórmulas algunas sustancias altamente tóxicas como el metil paratión y el carbofurano. Múltiples estudios en el mundo a lo largo de décadas demuestran claramente los efectos negativos de los productos químico-orgánico-sintéticos en los seres humanos, incluyendo la aparición de cáncer, tumores o defectos de nacimiento. Estos productos químicos

también tienen impactos potencialmente graves en los peces, aves y otros organismos que utilizan las aguas del lago de Chapala ya sea directa o indirectamente (Juárez, 2013, p.6).

La contaminación por agroquímicos sucede en gran medida por la falta de regulación y capacitación sobre uso y disposición final de los tóxicos que se manipulan. Asimismo, el exceso y mal uso deriva en la contaminación del lago de Chapala y generación de eutrofización, lo que provoca la proliferación de lirio y alteraciones al ecosistema.

Finalmente, a partir de información generada por la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad de Agua en el periodo 2012–2018, la Conagua realizó un diagnóstico de la calidad del agua con el objetivo de conocer si existe una condición en la calidad del agua del lago de Chapala que pueda estar asociada a los efectos negativos en la salud pública. Los resultados muestran que algunos metales/metaloideos han rebasado los límites establecidos por la normatividad mexicana en materia de agua potable (debe recordarse que es más laxa que las recomendaciones de la OMS), por ejemplo, para níquel, arsénico y mercurio total. Asimismo, en este mismo libro, en el capítulo S3.C1, se enuncian y desarrollan los 14 problemas del lago de Chapala, basados en la ficha del lago publicada por Corazón de la Tierra (Juárez, 2021).

METODOLOGÍA: UNA APROXIMACIÓN CONCEPTUAL AL ANÁLISIS DEL RIESGO

Aunque no existe una sola definición de *riesgo*, organizaciones referentes como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos lo definen como la probabilidad de ocurrencia de efectos adversos a la salud humana o a los ecosistemas, resultantes de la exposición a un estresor ambiental, el cual puede ser cualquier agente físico, químico o biológico. En línea con esta definición, el riesgo depende de qué tanto ese agente está presente en el medio —suelo, agua, aire, etc.—, normalmente conocido como la magnitud del *peligro*, qué tanto contacto o *exposición* tiene una persona o ecosistema con ese medio y qué tanto el estresor afecta la salud de las personas y los ecosistemas, una particularidad conocida como *toxicidad* (EPA, 2022).

Por otro lado, la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR por sus siglas en inglés) afirma que el riesgo es la probabilidad de que un evento —o una serie de eventos— produzca un efecto negativo en las personas, sistemas o activos. Generalmente, se describe como una función de la magnitud de estos efectos —*peligro*—, el grado de *exposición* de las personas o activos amenazados, así como la *vulnerabilidad* de los elementos expuestos (UNDRR, 2022).

Por su parte, una de las definiciones del concepto de vulnerabilidad se refiere al conjunto de características de una población relevantes en términos de la pérdida o efecto negativo esperado, que determinan si la exposición al peligro constituye un riesgo (De Alba-Martínez & Márquez-Azúa, 2017). También definida como el grado de probabilidad de que los humanos o los sistemas ambientales sufran un daño al estar expuestos a un peligro o sufrir una perturbación, la conceptualización de la vulnerabilidad impone un reto al desarrollo de métricas, debido a la falta de consenso en el significado exacto del término, la complejidad de los sistemas que se analizan y el hecho de que no es un fenómeno directamente observable (Luers et al., 2003).

Por otro lado, en los problemas de contaminación de agua, el riesgo se relaciona con varios tipos de *incertidumbre respecto al destino y origen de los contaminantes*, por lo que su análisis debe complementarse con métodos adecuados de adquisición y tratamiento de información.

En este sentido, es decisivo determinar *las variables que convencionalmente expresan su calidad*, como, por ejemplo, la concentración de metales pesados o de coliformes totales, las cuales reflejan varias condiciones, como la carga de aguas residuales, las características de los flujos ambientales, etc. (Ganoulis, 2009).

El *riesgo de contaminación de agua* frecuentemente se encuentra expresado en términos de la concentración específica de ciertas sustancias fisicoquímicas, pero también de índices biológicos que indican el estado de los ecosistemas acuáticos (Ganoulis, 2009). El agua como recurso es un *sistema no lineal* que exhibe características de variabilidad, incertidumbre y aleatoriedad. Por ello, la estructura del análisis de riesgo depende del sistema que se esté modelando y dónde se encuentra ubicado, al dirigirse, según sea el caso, a la contaminación del agua subterránea, del suministro urbano, de los flujos ambientales, o bien, al riesgo a la salud pública o el desarrollo de *índices de riesgo de calidad del agua* (Liu et al., 2018).

Estos últimos pueden ser expresados en porcentajes indicativos de una escala cualitativa —ordinal—, por ejemplo en “inviabile sanitariamente”, “riesgo alto”, “riesgo medio”, “riesgo bajo” o “sin riesgo” (Dueñas-Celis et al., 2018), así como en una escala numérica, por ejemplo del 1 al 5 que refleje si la concentración de cierto parámetro significa o no un riesgo para la salud, o simplemente puede tener un impacto regulatorio (DWI, 2018). En el caso mexicano, según la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua, esta traducción de datos o rangos cuantitativos a cualitativos se realiza según el indicador; por ejemplo, para coliformes fecales, la escala se presenta como se muestra en la tabla 4.2.1.

Adicionalmente, el suministro de agua limpia se ha convertido en una condición necesaria para asegurar el bienestar del planeta, por lo que han surgido *conflictos entre las demandas de diferentes usuarios*, enmarcados en una confrontación constante de promover el crecimiento económico y un deterioro cada vez mayor de la calidad del agua a escala mundial. Tal *complejidad* debe considerarse en conjunto con una examinación cuidadosa del contexto (Ganoulis, 2009) y de los aspectos institucionales en materia del agua dentro del territorio.

Por todo lo anterior, como premisa fundamental del trabajo de la dimensión de Medio Ambiente Sano se establecen los factores que serán tomados en cuenta en una aproximación conceptual al análisis de riesgo por exposición al agua contaminada, tomando en cuenta el peligro y la toxicidad de agentes fisicoquímicos y biológicos presentes en cuerpos de agua superficiales y subterráneos cercanos a localidades que pudieran estar expuestos a sus efectos negativos.

Cabe resaltar que definimos *contaminación* como la presencia de una sustancia cuya concentración se encuentra constantemente cerca o por encima de las referencias nacionales y globales en materia de calidad del agua. La contaminación se correlaciona con el peligro directamente: si el agua está contaminada, existe peligro. De ahí la necesidad de contar con datos sobre calidad del agua como un insumo para esta aproximación al riesgo. Sin embargo, la sola existencia del peligro no indica necesariamente afectación, pues debe de existir algún mecanismo de exposición a esa contaminación. Esto amerita otro tipo de investigación no vinculada necesariamente con los datos de calidad del agua.

En este sentido, como se ha comentado anteriormente, el objetivo general de la dimensión de medioambiente ha sido sentar las bases para desarrollar un análisis integral del riesgo de afectaciones a la salud por contacto con agua contaminada, en Mezcala de Asunción y San Pedro Itzicán. Se presume que lo anterior puede contribuir al conocimiento hidrológico en el marco de la investigación interdisciplinaria sobre la crisis sociohídrica que está viviendo ese territorio.

TABLA 4.2.1 ESCALA COLIFORMES FECALES

Cualitativa ordinal	Rangos de concentración	Se lee como: la calidad del agua según la concentración de coliformes fecales es:
Excelente	$CF \leq 100$ NMP/100mL	Excelente si es menor a 100 <i>Número más probable por cada 100 mililitros</i> (NMP/100 mL).
Buena calidad	$100 < CF \leq 200$ NMP/100mL	Buena calidad si esta entre 100 y 200 NMP/100 mL
Aceptable	$200 < CF \leq 1,000$ NMP/100mL	Aceptable si está entre 200 a 1,000 NMP/100mL
Contaminada	$1,000 < CF \leq 10,000$ NMP/100mL	Contaminada si está entre 1,000 y 10,000 NMP/100 mL
Fuertemente contaminada	$CF > 10,000$ NMP/100 mL	Fuertemente contaminada si es mayor a 10,000 NMP/100 mL

Fuente: Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua.

Para ello se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1. Delimitar el área de estudio en términos del sistema hidrogeológico y superficial: los productos de este trabajo se pueden encontrar en el capítulo S3.C2 Delimitación del área de estudio, los cuales incluyen:
 - La cartografía base del área de estudio y zonas aledañas.
 - La delimitación hidrogeológica preliminar del sistema acuífero, más allá del contorno político-administrativo.
2. Generar conocimiento a partir de la información disponible y validación en campo sobre el peligro de contaminación en el agua superficial y subterránea con la que las comunidades de interés tienen mayor contacto, a través de las siguientes actividades:
 - Definición de las sustancias de interés en función de normas y recomendaciones; información disponible y solicitudes de información sobre la calidad del agua del lago de Chapala; parámetros más usados en otros estudios, tanto en aguas superficiales y subterránea; concentraciones relevantes de variables.
 - Representación de datos e interpretación de resultados de estadística descriptiva, de las bases de datos disponibles sobre la calidad del agua del lago de Chapala con énfasis en el análisis de la distribución de los datos.
 - Entrevistas semiestructuradas sobre las dinámicas y relación de las comunidades de interés con el agua, para diseñar un plan de muestreo con consideraciones de diseño geoestadístico, de las principales fuentes de agua superficial y subterránea.
 - Realización de campañas de muestreo dentro del área de estudio.
 - Análisis e integración de resultados, con la finalidad de definir tendencias espaciales de concentración de contaminantes en las fuentes de agua superficial y subterránea del área de estudio.
3. Definir un modelo conceptual preliminar sobre los factores involucrados en la determinación de un índice de riesgo de afectaciones a la salud por exposición al agua contaminada.

- Establecer una relación conceptual entre los componentes del índice de riesgo.
4. Proponer líneas de investigación futuras y recomendaciones para poder desarrollar un índice de riesgo de afectaciones a la salud por exposición al agua contaminada. Por su parte, en el capítulo interdisciplinario se incorporarán consideraciones de justicia ambiental.

CALIDAD DEL AGUA DEL LAGO DE CHAPALA 2012–2018: UNA INTERPRETACIÓN SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS

El peligro por contaminación del agua se manifiesta si y solo si se tienen compuestos tóxicos en altas concentraciones que puedan perjudicar al entorno con el que están interactuando. Para saber si existe o no peligro en las poblaciones aledañas al lago de Chapala es indispensable conocer las características de la calidad del agua y compararlas con las normas mexicanas y las recomendaciones globales que refieren a la concentración máxima en la que pueden estar sin ocasionar daños a la salud.

Las referencias que se tomaron para este análisis fueron las mismas que se utilizaron en el análisis previo para la demanda del Tribunal Latinoamericano del Agua: la norma oficial mexicana para consumo de agua, la norma oficial mexicana para descargas de aguas residuales a ríos y lagos; las referencias de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua y una global, y las recomendaciones para el agua potable de la Organización Mundial de la Salud publicadas en 2017.²⁰ Estas referencias se ven reflejadas en formas de líneas que presentan el límite superior o inferior en cada uno de los gráficos.

Lo primero que se realizó para esta nueva etapa del análisis fue la actualización con nuevos datos a partir de una solicitud de transparencia igual a la anterior, la cual pedía “Resultados históricos de los análisis de laboratorio de calidad del agua de los puntos de muestreo ubicados en el lago de Chapala”. La respuesta permitió actualizar la base de datos y resultó en un total de 14,220²¹ datos, agrupados en 37 variables físico-químicas y biológicas, de las cuales se analizaron solo 25, que corresponden a 34 estaciones de monitoreo. Los análisis que dieron lugar a los datos se realizaron entre el 21 de noviembre de 2012 y el 29 de julio de 2018.

Las primeras características que quisimos conocer fueron las tendencias en el programa de muestreo de la Conagua y cada estación fue visitada entre 9 y 13 veces. Los encargados del monitoreo tardaban cinco meses en promedio en regresar a la misma estación, pero la variación llegaba a ser de 3 a 7 meses. En cada visita se muestreaban de 1 a 11 estaciones —del total de 34—. El promedio de visitas fue de 6 estaciones al día.

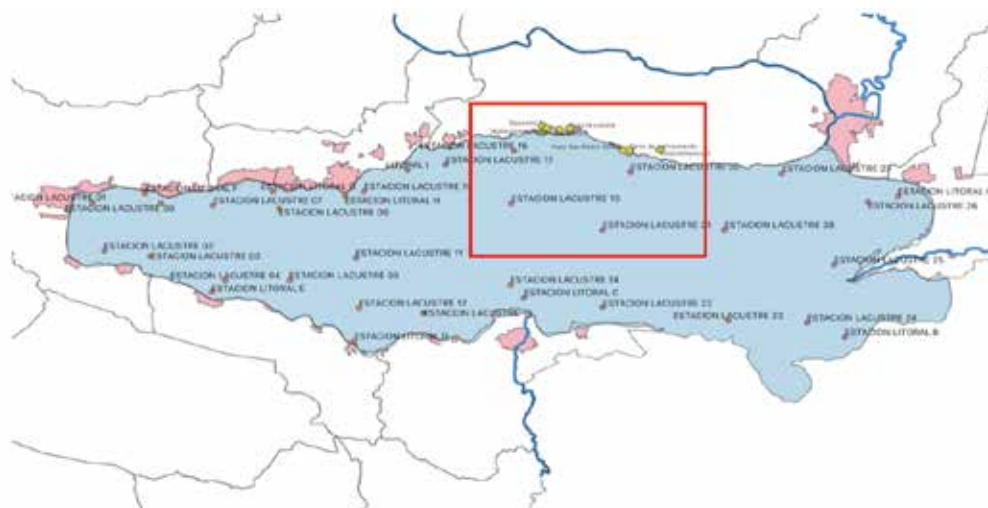
Para poder representar y hacer una lectura rápida de los datos por cada variable se realizaron gráficos de cajas de bigotes, que son herramientas estadísticas que permiten visibilizar la distribución de los datos, sus valores máximos y mínimos, la mediana, los cuartiles y los datos aberrantes o que se desfasan del grupo de datos.

Las gráficas de cajas y bigotes se utilizaron para dos análisis de la base de datos: uno para conocer las tendencias generales de las variables y otro para conocer el comportamiento por

20. La calidad del agua en las descargas residuales según la “Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales”, 2) la calidad del agua en cuerpos superficiales y subterráneos según la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua (RNMCA) y 3) la calidad del agua en la extracción para uso y consumo humano según la NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.”

21. Es el número de datos después de la limpieza que se realizó con la metodología basada en Croghan y Egeghy (2003).

FIGURA 4.2.2 UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO DENTRO DEL LAGO DE CHAPALA



* Es importante destacar que las estaciones Lacustre 16 y 15 están cerca de Mezcala, y las estaciones Lacustre 20 y 21 cerca de San Pedro Itzcán.

estación de variables que resultaron de relevancia por mostrar evidencia de contaminación en el lago de Chapala.

En el primer análisis se realizaron 5 grupos de 5 variables diferentes y la lectura que se da es solo para entender el comportamiento global de las variables en todo el lago; se separaron los datos según el temporal de lluvias —de junio a septiembre— y temporal seco —de octubre a mayo—, con la finalidad de comparar el comportamiento de las variables, pues algunas tienden a aumentar su concentración en temporal seco —como los metales y metaloides— y algunos otros cuando hay lluvias —como sólidos suspendidos totales.

Los grupos de variables —nomenclatura usada en base de datos y nombre del compuesto— se muestran en la figura 4.2.4. Los metales y metaloides corresponden a aquellos clasificados así según la tabla periódica; las bacterias fecales vienen de aguas residuales urbanas y agrícolas, e incluye al conjunto de bacterias en las coliformes fecales y también se presenta la concentración de *Escherichia coli*.

Los indicadores generales son aquellas variables que suelen describir las condiciones físicas de un cuerpo de agua. El oxígeno disuelto es indispensable para la vida acuática, y es el único indicador cuyo límite permisible es mínimo. El agua debe tener un mínimo de 5 mg/L de oxígeno disuelto para que pueda sostener vida. El pH se relaciona con el tipo de sales e incluso con la geología, y la temperatura con el clima y la estación del año —o algún evento geológico o antropogénico—. La temperatura guarda una relación con el ambiente y sus ciclos y tanto la conductividad como la turbidez indican la cantidad de sales ionizadas que están presentes en el agua —sin considerar si estas sales son tóxicas o no para la salud.

Los indicadores de la Conagua forman parte de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua, con los cuales describen la calidad del agua, porque proporcionan un panorama general. Los nutrientes son formas de nitrógeno o fósforo y generalmente están asociados con descargas de actividades agropecuarias. Son los principales causantes de la eutrofización: proceso de contaminación que sucede por las alteraciones al estado trófico ocasionadas por el exceso de nutrientes (FAO, 1997, p.41).

FIGURA 4.2.3 ILUSTRACIÓN DE UN GRÁFICO DE CAJAS Y BIGOTES, Y SUS COMPONENTES

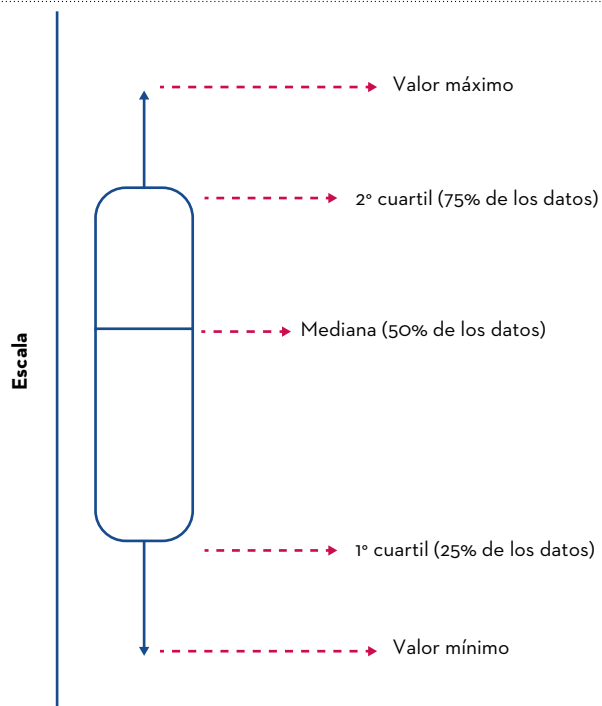
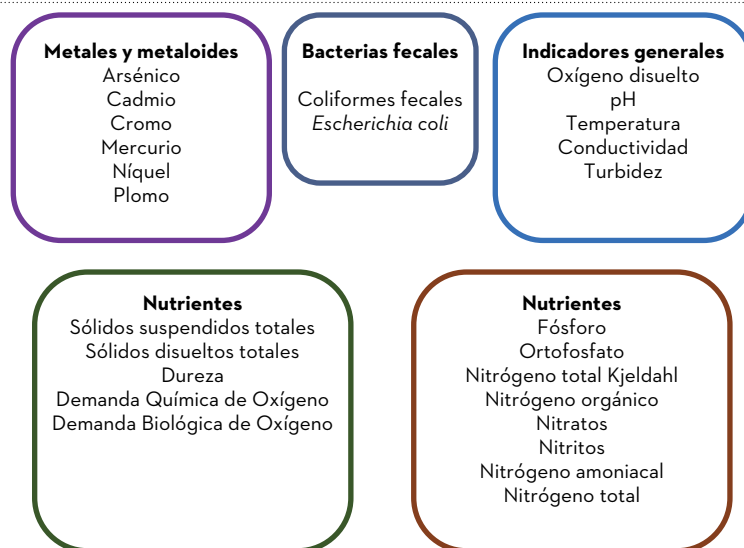


FIGURA 4.2.4 VARIABLES AGRUPADAS DE BASE DE DATOS



El segundo momento consiste en el análisis de los datos generados de cada estación a partir de los gráficos de cajas y bigotes de aquellas variables que resultaron con mayor relevancia por demostrar, con referencia a la normatividad aplicable, que el lago de Chapala se encuentra contaminado. Estas fueron arsénico, coliformes fecales y demanda química de oxígeno.

Los límites máximos permitidos, recomendaciones o rangos de calificación para cada uno se muestran a continuación.

El arsénico puede estar en concentraciones máximas de 0.025 mg/L según la NOM 127 de agua para uso y consumo humano y 0.01 mg/L según la OMS.

La toxicidad del arsénico depende en gran medida de su forma química, diferenciándose dos grupos de compuestos: inorgánicos y orgánicos. Los compuestos inorgánicos del arsénico son los más tóxicos y aparecen, sobre todo, en aguas [...] la exposición a diversos tipos de arsénico inorgánico se ha asociado a diversos tipos de cánceres como hígado, pulmones y piel, así como a diabetes (Basu et al., 2014). Por otra parte, los compuestos orgánicos de arsénico se encuentran frecuentemente en alimentos y suponen la vía principal de exposición de la población al arsénico (Aragónés, 2001; Ferrer, 2003; Montoya et al., 2015, pp. 106–107).

Las descargas que contengan *coliformes fecales* no deben de tener más de 1,000 NMP/100 mL de concentración según la norma de descargas de aguas residuales. Según la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua (RNMCA), si hay de 1,000 a 10,000 NMP/100 mL el agua se encuentra *contaminada*, en tanto que si es mayor a 10,000 NMP/100 mL el agua está *fuertemente contaminada*.

Finalmente, para la *demanda química de oxígeno* (DQO) se tienen los rangos establecidos por la RNMCA, que dice que el agua se encuentra *contaminada* si tiene una concentración de 40 a 200 mg/L y *fuertemente contaminada* si rebasa los 200 mg/L. La DQO no dice cuáles compuestos son tóxicos, pero indica que el agua no tiene buena calidad.

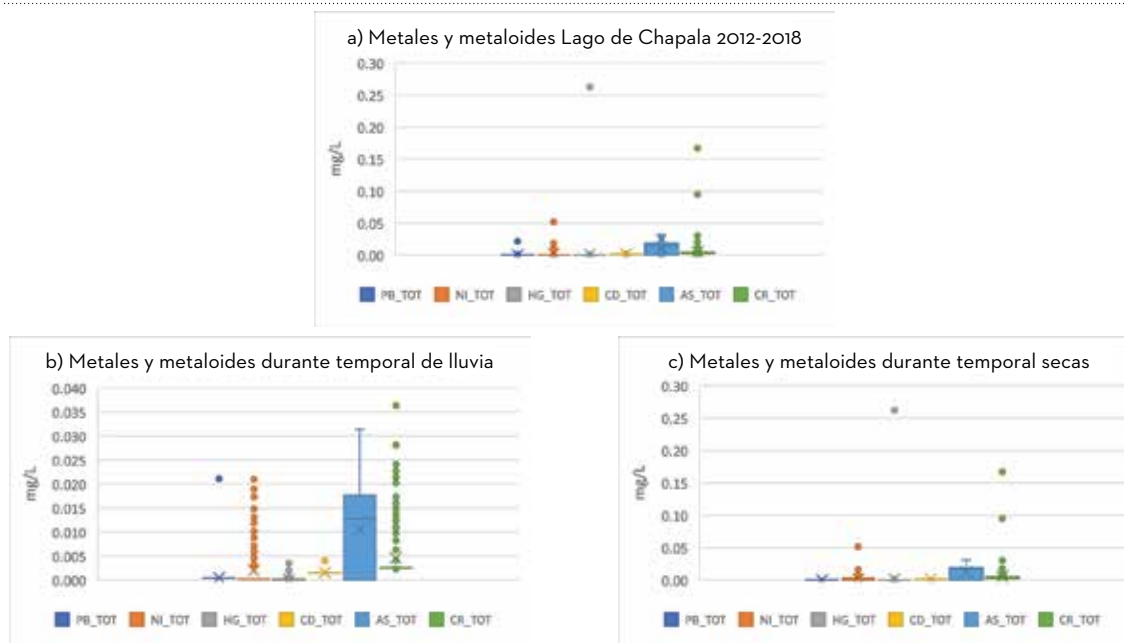
Resultados de las variables agrupadas

A continuación se presentan las gráficas de cajas y bigotes del total de los datos agrupados según sus características previamente descritas. Se presenta la información tanto de los datos generales como de los datos durante la temporada de lluvias y secas, que corresponde a los periodos de junio a octubre y noviembre a mayo, respectivamente.

Descripción de gráficas sobre los datos de las variables agrupadas en metales y metaloides:

- Mercurio, cromo y níquel tienen valores atípicos que se encuentran muy por encima de los valores usuales.
 - Estos muestreos sucedieron durante el temporal de secas, para las tres variables.
- Plomo tuvo un dato atípico o aislado, se dio en época de lluvias con una concentración de 0.0211; valor que rebasa el límite establecido por la NOM 127 que establece un límite de 0.01 mg/L.
- Durante el periodo de lluvias las concentraciones de metales y metaloides fueron menores. Esto se puede apreciar en el eje y las gráficas de temporal.

FIGURA 4.2.5 METALES Y METALOIDES MONITOREADOS EN EL LAGO DE CHAPALA



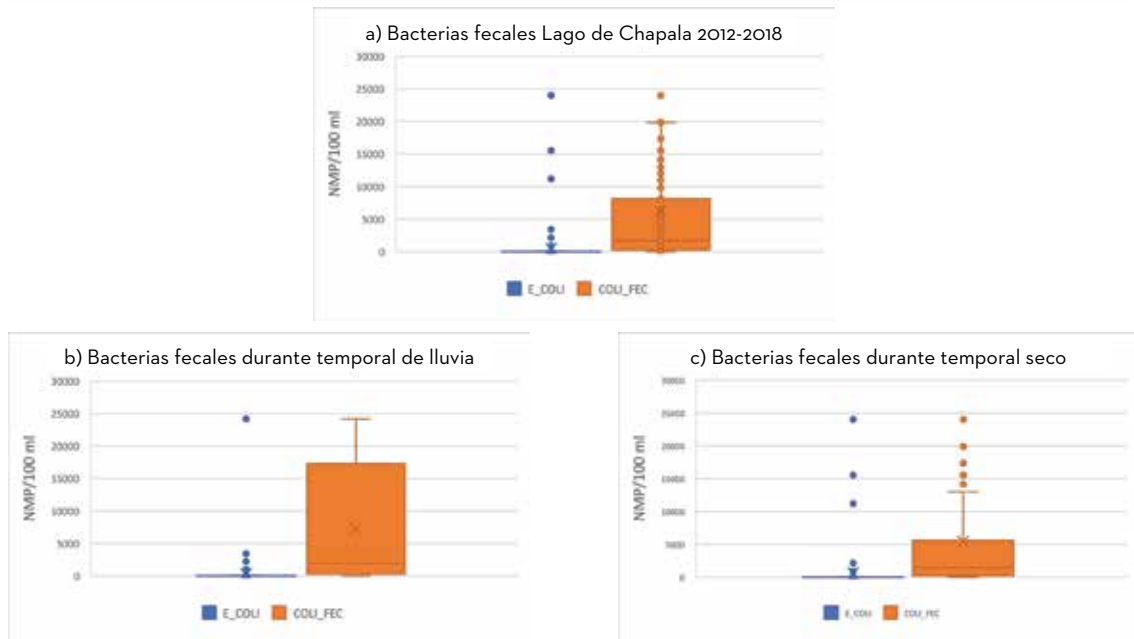
La nomenclatura de las gráficas sigue la original otorgada por la Conagua: PB_TOT es plomo total, NI_TOT es níquel total, HG_TOT es mercurio total, CD_TOT es cadmio total, AS_TOT es arsénico total y CR_TOT es cromo total.

- La gráfica del temporal de lluvias tiene un comportamiento similar a la del temporal seco siempre y cuando no se tomen en cuenta los datos atípicos de níquel total, mercurio total y cromo total.
- La caja de bigotes de cadmio se concentra en un único valor —el límite detectable— y solo un dato en temporal de lluvias que demostraba presencia de cadmio.
- Los datos de arsénico tienen una distribución más clara y tiene la mayoría de los datos en los tres primeros cuartiles; el último es más más disperso. Por lo tanto vale la pena destacar algunos aspectos, sin dejar a un lado que esta lectura es sobre el total de los datos y no considera las particularidades espaciales y temporales.
 - Tomar en consideración el límite máximo permitido de arsénico en agua para consumo, que es de 0.025 mg/L
 - Tomar en consideración la recomendación de la OMS 2017 sobre la concentración máxima de arsénico que es 0.01 mg/L.
 - El promedio de los 197 datos registrados de arsénico es de 0.0105. Valor mayor que lo recomendado por la OMS.
 - La mediana está en el valor 0.0127, que también es mayor que lo recomendado por la OMS.
 - Arsénico es una variable que tiene información relevante con respecto a la primera lectura sobre sus medidas de tendencia central.

La presencia y concentración de las coliformes fecales son formas de contaminación que vienen principalmente de descargas de aguas residuales urbanas sin tratamiento.

Consideraciones generales de bacterias fecales:

FIGURA 4.2.6 BACTERIAS FECALES MONITOREADAS EN EL LAGO DE CHAPALA



a) corresponde a las cajas de bigotes de todos los datos, b) a la gráfica para el temporal de lluvia, y c) para el temporal seco. La nomenclatura de las gráficas sigue la original otorgada por la Conagua: E-COLI corresponde a *Escherichia coli* y COLI-FEC a Coliformes fecales.

- En temporal de lluvias aumentó la concentración de Coliformes fecales (tercer cuartil 17,329 vs 5,610).
- *Escherichia coli* (E-COLI) tuvo concentraciones menores, aunque el valor máximo coincide con coliformes fecales. Esto cobra sentido al saber que la E-COLI es un subconjunto de las coliformes fecales.
- Durante el temporal seco existieron más datos atípicos para E-COLI.
- Tanto la mediana (2,010 NMP/100mL) como la media (7,368.60 NMP/100mL) de coliformes fecales supera lo establecido por la norma de descargas de aguas residuales con un límite máximo permitido de 1,000 NMP/100 mL.
- Dado los valores tan elevados en la concentración de coliformes fecales, se considera como variable para el análisis por estación.

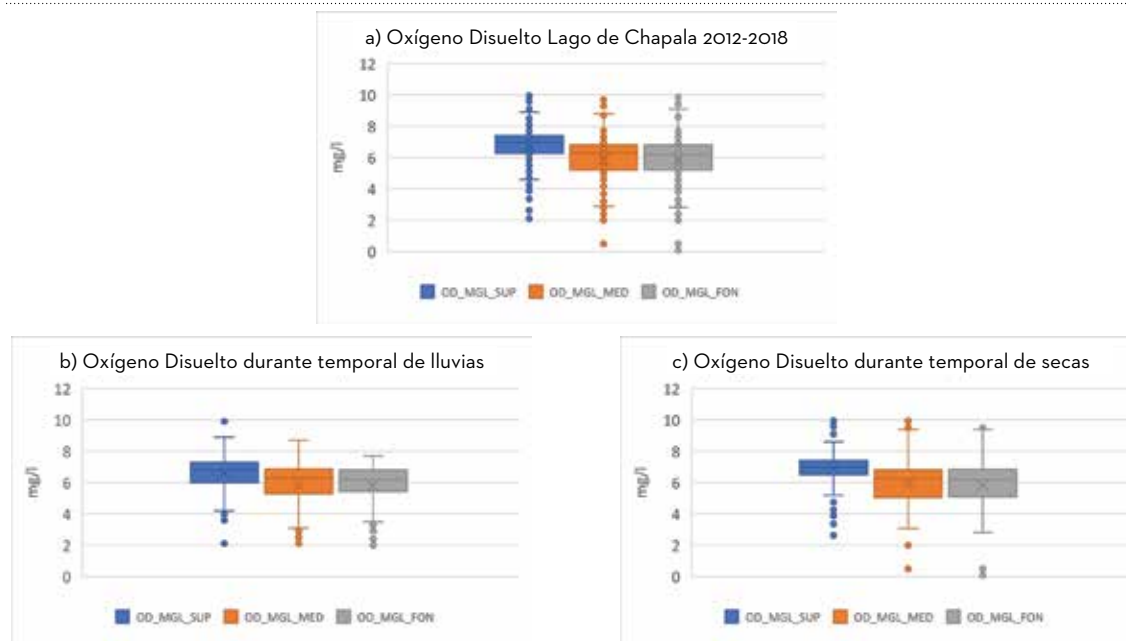
Los indicadores generales se presentan de manera particular, ya que vale la pena analizarlos por separado, además de que tienen unidades diferentes que no es posible presentar en una sola gráfica. Estos indicadores son más descriptivos de la calidad del agua del lago de Chapala.

La presencia de oxígeno disuelto es de vital importancia para la vida de cualquier cuerpo de agua. En este caso, se recomienda que la concentración mínima sea de 5mg/L. Es decir, que se espera que sea mayor de 5 para considerar que un cuerpo de agua tiene buena oxigenación y no pone en riesgo la salud de su población.

Consideraciones para el oxígeno disuelto:

- La concentración de oxígeno disuelto fue mayor para la superficie del lago en todos los casos y fue disminuyendo conforme aumentó la profundidad de la medición.

FIGURA 4.2.7 OXÍGENO DISUELTO EN EL LAGO DE CHAPALA



a) corresponde a las cajas de bigotes de todos los datos, b) a la gráfica para el temporal de lluvias, y c) para el temporal seco. La nomenclatura de las gráficas sigue la original otorgada por la Conagua. OD_MGL_SUP es la toma de Oxígeno Disuelto en la superficie del lago; OD_MGL_MED es la toma a media profundidad y OD_MGL_FON es la toma realizada al fondo.

- Durante el temporal seco las concentraciones —del segundo y el tercer cuartil— de la medición superficial se concentraron entre 6.5 y 7, mientras que durante el temporal de lluvias la concentración comenzó en 5. Es decir, que en temporal seco el oxígeno disuelto tiende a ser mayor que durante temporal de lluvias.
- Durante el temporal seco la concentración de OD fue mayor en el fondo y en la medición del medio.

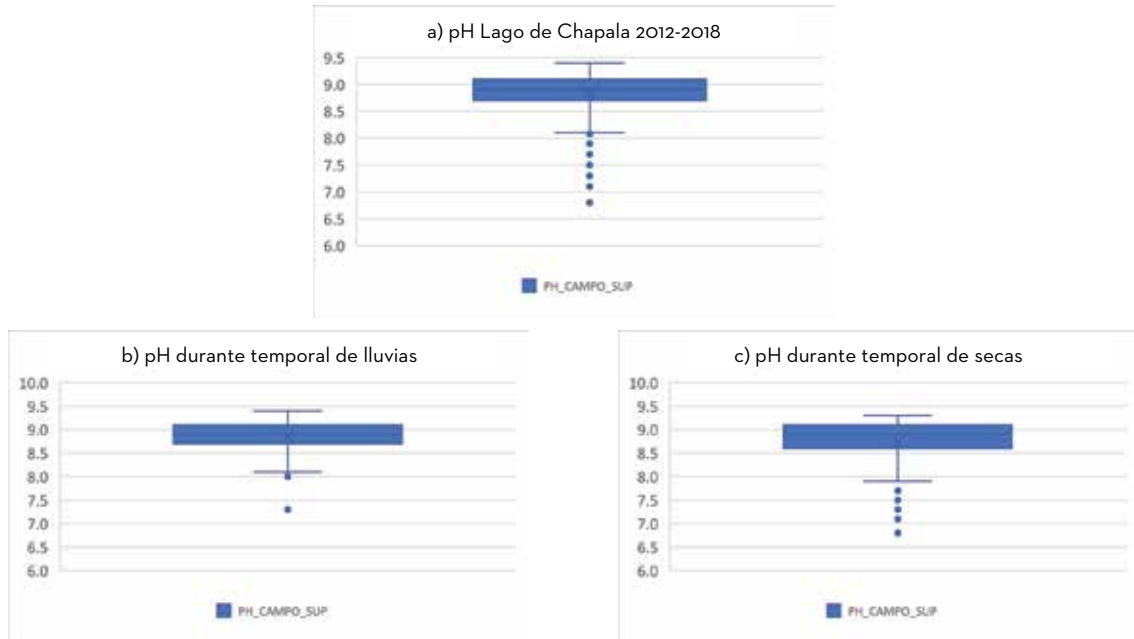
Según el pH, el lago de Chapala tiende a ser alcalino, pues la mayor parte de los datos se concentran en un pH mayor a 7. Las tendencias según el temporal se aprecian en la figura 4.2.8. Consideraciones generales para pH:

- El pH del lago de Chapala osciló entre 6.8 y 9.3.
- Durante el temporal de lluvias se concentró entre poco más de 8 y 9.3.
- En temporal seco existieron valores más bajos incluso un dato por debajo de 7 que indica acidez.
- Durante el temporal de lluvias el pH tiende a ser más elevado y con menos variación que durante el temporal seco.

Una de las características físicas más importantes de un lago es su temperatura, de esto dependerán diversos factores ambientales. A continuación, se muestran los datos sobre la temperatura a nivel superficial, medio y al fondo del lago de Chapala.

En el lago de Chapala la temperatura decrece conforme aumenta el nivel de profundidad; esto se debe a que las capas superficiales del agua se calientan por la exposición directa a

FIGURA 4.2.8 PH MONITOREADO EN EL LAGO DE CHAPALA



a) corresponde a las cajas de bigotes de todos los datos, b) a la gráfica para el temporal de lluvia, y c) para el temporal seco. La nomenclatura de las gráficas sigue la original otorgada por la Conagua: PH_CAMPO_SUP corresponde a la toma de pH en la superficie del lago de Chapala.

los rayos del sol. Durante los periodos de pocas lluvias los gradientes de temperatura suelen ser más acentuados (Rodríguez & Marín, 1999).

Otro factor importante en las gráficas sobre la temperatura es que existe una gran diferencia entre la cantidad de datos según la profundidad: se tenía alrededor de 45% de datos del fondo en relación con los datos superficiales y 80% de los datos de la profundidad media respecto de los superficiales. Por ello, se sugiere dar mayor énfasis a los datos de agua superficial porque son más, en comparación con los otros.

Consideraciones generales para temperatura:

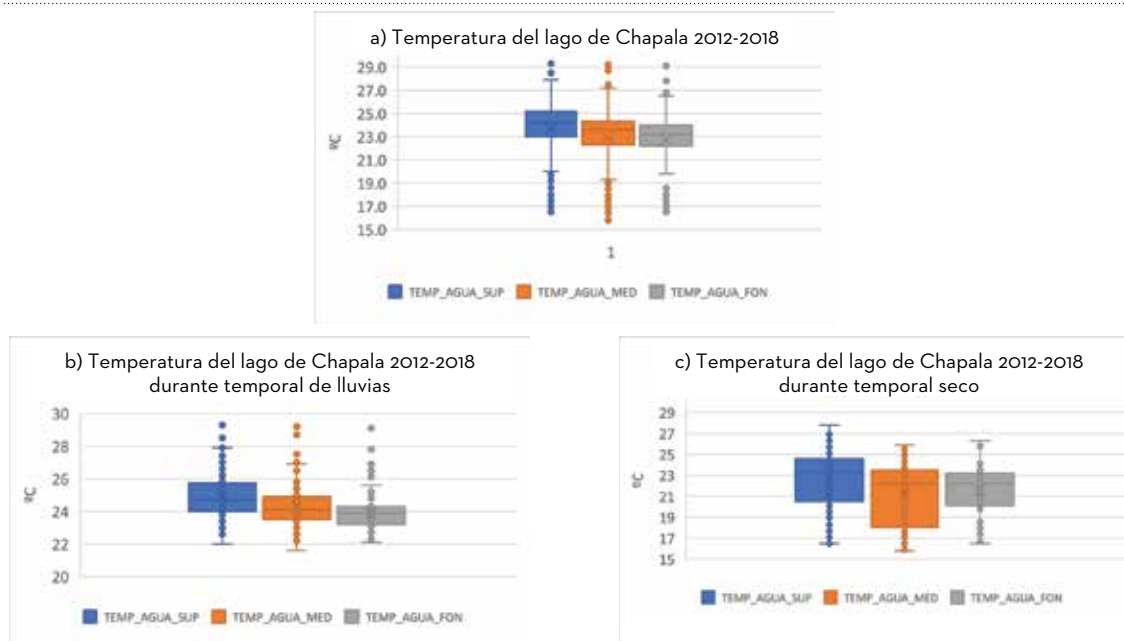
- La temperatura general del lago de Chapala osciló entre 16.5 °C y 29.3 °C; el 50% de los datos se concentran entre 23 °C y 25 °C.
- Durante el temporal de lluvias la temperatura osciló entre 22 °C y 27.9 °C. Considera principalmente verano y un poco de primavera y otoño.
- Durante el temporal seco la temperatura osciló entre 28 °C y 17 °C. Es importante considerar que se considera poco de otoño y primavera y totalmente invierno.

Otro indicador de calidad del agua que se presenta es la conductividad, la cual señala la presencia de iones solubles (Rodríguez & Marín, 1999); como referencia se recomienda que el agua potable se mantenga por debajo de los 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Boyd, 2017).

Consideraciones generales para conductividad:

- La conductividad general para el lago de Chapala oscila entre 473 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1,235 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor mínimo fuera de los cuartiles de 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

FIGURA 4.2.9 TEMPERATURA MONITOREADA EN EL LAGO DE CHAPALA



a) corresponde a las cajas de bigotes de todos los lados, b) a la gráfica para el temporal de lluvias, y c) para el temporal seco. La nomenclatura de las gráficas sigue la original otorgada por la Conagua: TEMP_AGUA_SUP corresponde a la toma superficial, TEMP_AGUA_MED a profundidad media y TEMP_AGUA_FON al agua de fondo; se desconocen las medidas de profundidad exactas.

- La conductividad suele aumentar durante el temporal de lluvias y disminuir durante temporal seco.
- Durante el temporal de lluvias se tiene un rango menor de valores de conductividad, en comparación con el temporal seco.

La turbidez se relaciona directamente con indicadores como los sólidos suspendidos totales, es un indicador de contaminación, ya que evalúa qué tan poco transparente es el agua. La referencia para la turbidez, según la OMS, es que no deba de superar los 5 UTN e idealmente debe de estar por debajo de 1 UTN (Robredo, s.f.).

Consideraciones generales para turbidez:

- La mayoría de los datos de turbidez tienen valores menores a 66 UTN, según la gráfica general.
- Los valores máximos de turbidez se dieron en temporal seco. Además de que el rango es más elevado, también se presentaron datos atípicos, llegando a un máximo de 800 UTN.
- Los tres datos más altos corresponden al temporal seco.

Los indicadores generales dan cuenta de que el lago de Chapala es un lago alcalino, con niveles de oxígeno disuelto con tendencia a ser mayores que 5 mg/L —lo cual es buen indicador de calidad del agua—, con una temperatura que oscila entre 29 °C y 22 °C en temporal de lluvias y 29 °C y 17 °C en secas; una conductividad alrededor de 500 y 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que evidencia presencia de sales disueltas en el agua.

FIGURA 4.2.10 CAJAS DE BIGOTES PARA DATOS GENERALES, DURANTE TEMPORAL DE LLUVIAS Y TEMPORAL SECO PARA CONDUCTIVIDAD EN EL LAGO DE CHAPALA (2012-2018)

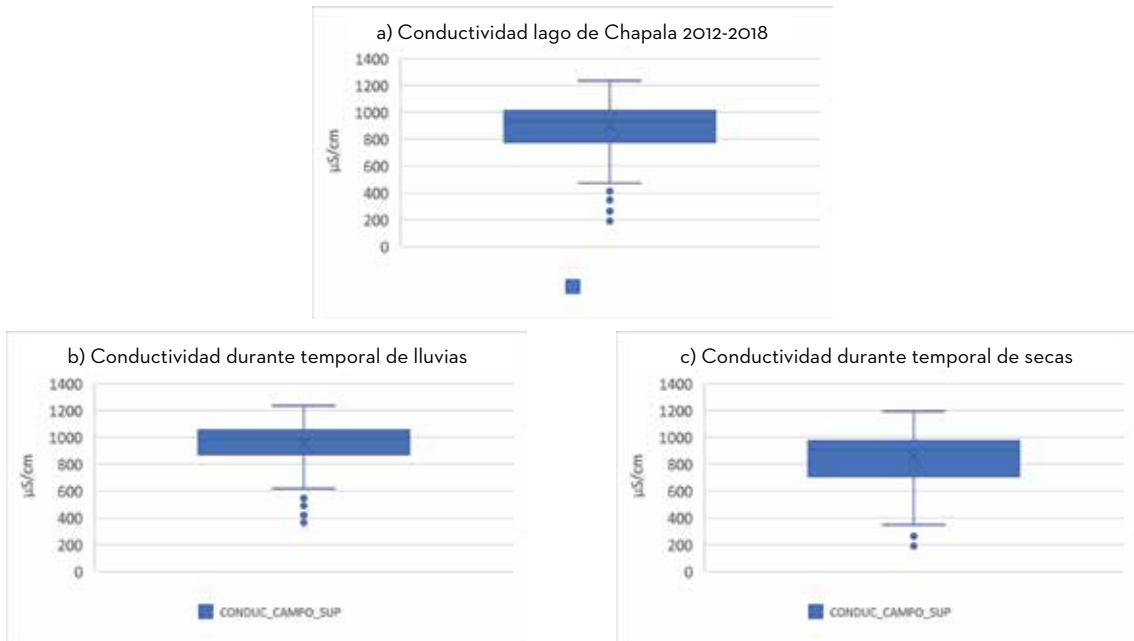


FIGURA 4.2.11 CAJAS DE BIGOTES PARA DATOS GENERALES, DURANTE TEMPORAL DE LLUVIAS Y TEMPORAL SECO PARA TURBIDEZ EN EL LAGO DE CHAPALA (2012-2018)

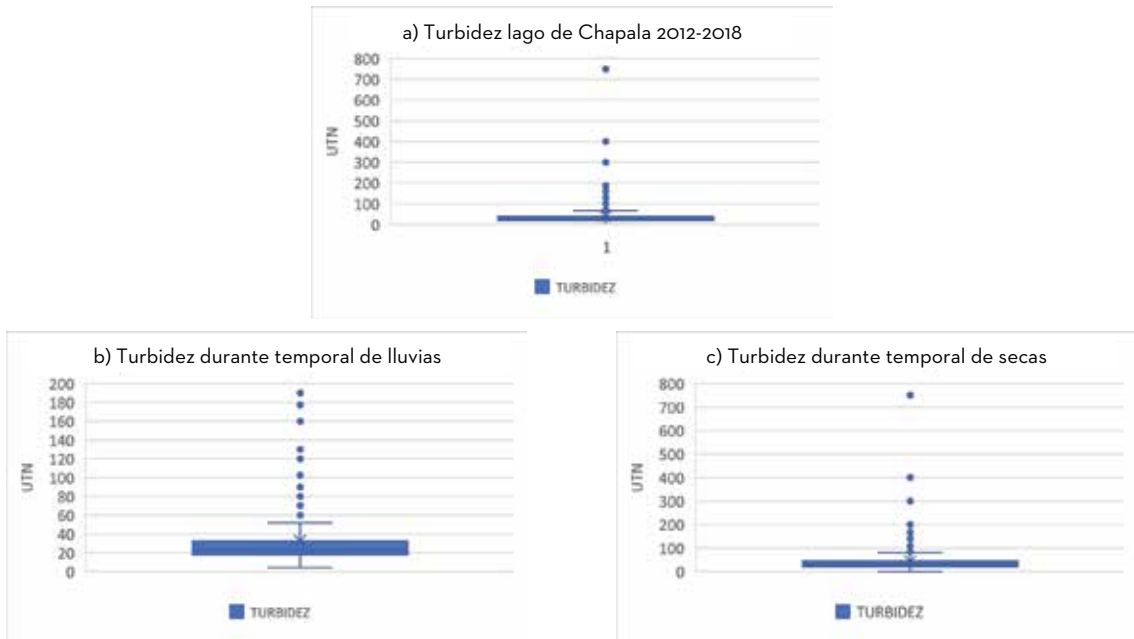
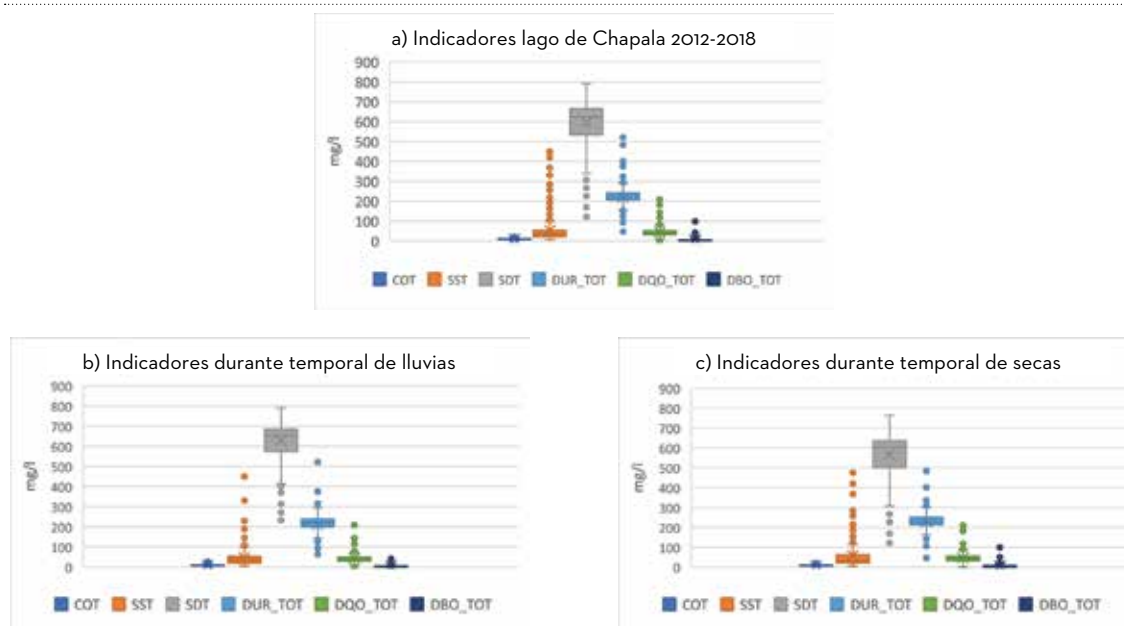


FIGURA 4.2.12 CAJAS DE BIGOTES PARA DATOS GENERALES, DURANTE TEMPORAL DE LLUVIAS Y TEMPORAL SECO PARA INDICADORES EN EL LAGO DE CHAPALA (2012-2018)



Una vez presentados los datos para los indicadores generales, se muestran a continuación los indicadores que la Conagua utiliza para dar cuenta de la calidad del agua en México, que son meramente descriptivos e ilustrativos, pero en este caso no se pueden identificar riesgos directos a la salud solo con los datos generados a partir de estas variables. Estos incluyen los sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, dureza total, demanda química de oxígeno y demanda biológica de oxígeno.

Consideraciones generales para indicadores:

- SDT es mayor en temporal de lluvias.
- Dureza total tiene valores atípicos elevados en temporal de lluvias.
- DBO tiene valores atípicos en temporal seco.

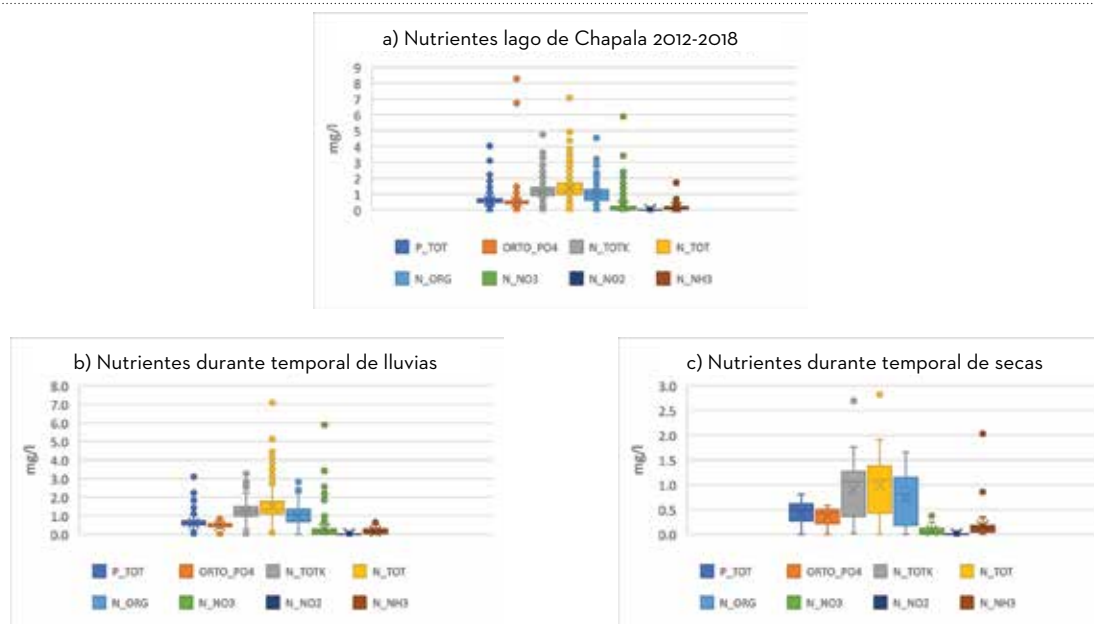
Al comparar las medianas y los promedios de todos los indicadores con sus respectivas escalas de evaluación, solamente la demanda química de oxígeno (DQO) demostró un promedio que la categorizaba como contaminada según la clasificación de la RNMCA, por lo que será la variable a evaluar espacialmente.

Finalmente, para las gráficas sobre datos agrupados, se presentan a continuación los nutrientes, que generalmente son compuestos de nitrógeno y fósforo.

Consideraciones generales para nutrientes:

- Ortofosfato tiene dos valores atípicos que se presentan en temporal seco.
- Nitrógeno total es más elevado en temporal de lluvias.
- Nitratos tiene valores más elevados en lluvia.
- Nitrógeno amoniacal tiene valores más elevados en temporal seco.

FIGURA 4.2.13 NUTRIENTES



- Ninguna de las formas de nutrientes resultó tener valores o concentraciones que significaran contaminación del agua.

En la figura 4.2.14 se presentan las gráficas de cajas y bigotes de las variables que se analizaron por estación que muestran los datos por estación. En el caso de arsénico todas las estaciones han tenido concentraciones más elevadas que lo recomendado por la OMS y la mayoría según lo que establece la NOM 127. Las estaciones que mostraron tener concentraciones más elevadas que lo recomendado por la OMS en todas las tomas son aquellas pegadas al oeste del lago de Chapala (véase la figura 4.2.2. Ubicación de estaciones de monitoreo dentro del lago de Chapala).

Por otro lado, en relación con las coliformes fecales, la mayoría se encuentra en lo que la Conagua establece como fuertemente contaminada. Se aprecia que la NOM 001 sobre descargas tiene un límite de 1000 NMP/100mL, la cual queda muy por debajo del común de los datos e indica que el lago de Chapala es receptor de aguas residuales sin tratamiento.

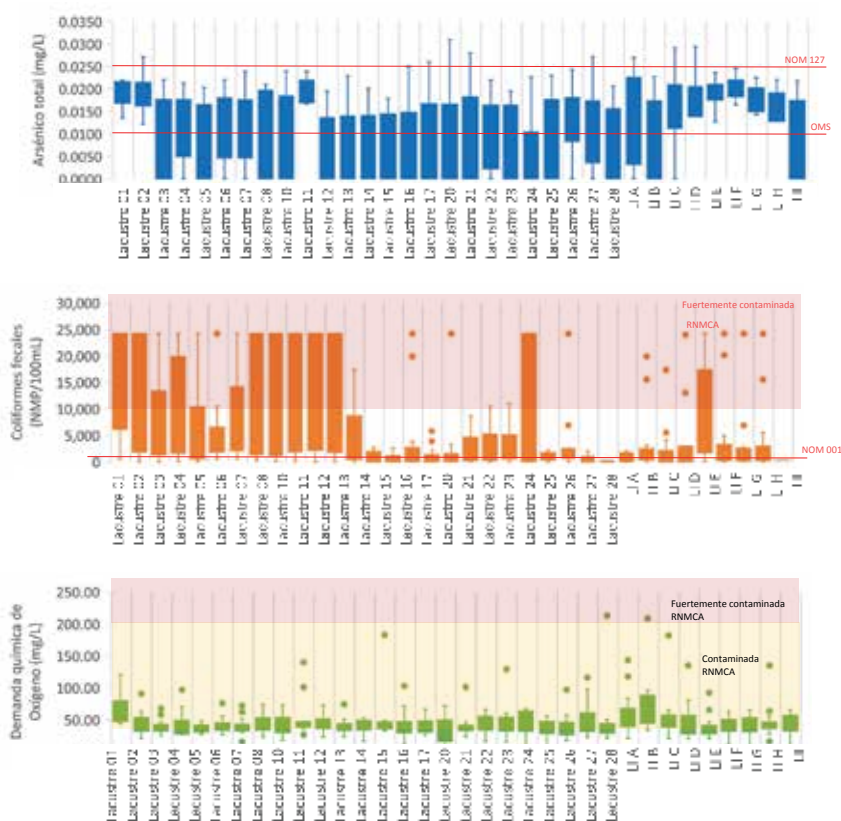
Finalmente, respecto de la demanda química de oxígeno, la mayor parte de los datos se encuentran en lo que la Conagua establece como contaminado. Este indicador suele ilustrar la presencia de compuestos provenientes de procesos industriales o agrícolas.

Con estos datos es posible apuntar hacia la existencia del peligro por exposición a contaminantes, en especial por arsénico, pero es importante evidenciar que es necesario tener estudios a mayor profundidad para identificar o descartar otros compuestos que puedan ser tóxicos.

EXPLORACIÓN Y TRABAJO DE CAMPO

Las variables descriptivas de la calidad del agua del lago de Chapala revelan ciertos patrones por temporada de lluvias y seca como cambios en el pH, en el rango de tem-

FIGURA 4.2.14 CONCENTRACIONES POR ESTACIÓN DE MONITOREO



peraturas y todos los cambios que se desencadenan de esto: vaporización del agua y volatilización de compuestos, por un lado, pero concentración de aquellos que se encuentran disueltos.

Por otro lado, en el análisis por estaciones se puede ver que la calidad de agua del lago de Chapala, la concentración de arsénico y de bacterias coliformes fecales resulta por arriba de la normatividad nacional en la mayoría de las estaciones de monitoreo, y por encima de la recomendación de la Organización Mundial de la Salud, en otra medida igualmente relevante. Asimismo, se cuenta con otra evidencia de contaminación que son los datos de la variable demanda química de oxígeno, que también demuestra que el lago de Chapala se encuentra contaminado.

Sobre todo, el arsénico y las bacterias coliformes fecales han sido resaltadas por algunas investigaciones sobre contaminación del agua en el lago de Chapala, específicamente en el municipio de Poncitlán, que a su vez enfatizan la necesidad de investigar la relación de altas concentraciones con la prevalencia de casos de enfermedad renal en ese territorio.

En el marco de este proyecto, un grupo de investigadoras de la Universidad de Berkeley realizó una investigación sobre la calidad del agua de consumo humano y su relación con la prevalencia de enfermedad renal en algunas comunidades de Poncitlán y Chapala. A partir del análisis de bacterias coliformes totales, *E. coli* y arsénico, tanto en garrafones como en agua de la llave, se concluyó que la calidad del agua es un asunto de vital importancia en las

comunidades ribereñas del lago de Chapala, demostrando que niveles inadecuados de estos parámetros representan un peligro que potencialmente perpetúa la alta prevalencia de enfermedad renal crónica e infecciones gastrointestinales en la región (Smith et al., 2020).

Por todo lo anterior se decidió diseñar un plan de muestreo de calidad del agua enfocado principalmente al arsénico y bacterias coliformes fecales de las principales fuentes de agua superficial y subterránea. Para ello se procedió a realizar entrevistas a profundidad sobre las dinámicas y relación que las comunidades tienen con el agua.

En este punto, los diálogos interdisciplinarios con las otras dimensiones del equipo resultaron muy enriquecedores, toda vez que se pudo obtener información sobre las principales fuentes de agua, como el hecho de que varios hogares en Mezcala cuentan con pozos de los cuales extraen agua que, aunque no consideran completamente potable, utilizan para lavar los trastes y la ropa. En caso de que el servicio de agua sea intervenido en algunas ocasiones, y dependiendo de la necesidad, también la pueden utilizar para beber.

Se realizaron dos entrevistas a profundidad con personas clave de cada comunidad y que han sido actores fundamentales para el desarrollo de esta investigación: a Anita por parte de la comunidad de San Pedro Itzicán, y a Juanita por parte de Mezcala (véase la sección S1). En estas entrevistas se indagó sobre la cotidianidad del servicio público, con énfasis en los mecanismos de distribución de agua de cada comunidad. También se investigó sobre el consumo de agua extraída de los pozos artesanales domésticos, este tema se amplía en el capítulo S4.C1.

Hallazgos específicos de la comunidad de San Pedro Itzicán:

- Se encontró que tiene cinco barrios principales: La Peña —el más grande—, Capulín, Arena, Centro y Rincón.
- El servicio de abastecimiento público de agua a través del sistema de tuberías es intermitente y principalmente proviene de un pozo de agua termal de 300m de profundidad, que cuenta con una torre de enfriamiento. Se distribuye a la mitad de la población.
- En los momentos de intermitencia en el servicio el gobierno municipal provee pipas con agua que abastecen los hogares, cargadas ya sea del mismo pozo o del Pozo La Cuesta, en Mezcala.
- La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) se encuentra fuera de operación, por lo que estas se descargan de manera directa en el lago de Chapala.

Hallazgos específicos de la comunidad de Mezcala:

- Se encontró que tiene tres barrios principales: La Cuesta, Ojo de Agua y Mezcala.
- El abastecimiento público de agua a través del sistema de tuberías tiene como fuentes principales dos pozos: Pozo La Cuesta y Pozo Mezcala, que proveen agua a los barrios de los cuales tomaron su nombre. Cada uno de estos pozos tiene un depósito desde el cual se distribuye el agua. El barrio Ojo de Agua se abastece principalmente del Pozo Mezcala.
- Dentro de la comunidad se encuentra un pozo para el abastecimiento de cualquier persona que sirve principalmente a los barrios Mezcala y Ojo de Agua.
- Varios hogares tienen pozos artesanales de aproximadamente 4 a 8 metros de profundidad, de los cuales directamente obtienen agua para lavar los trastes y la ropa, principalmente.

- La PTAR está en operación. Sin embargo, el barrio La Cuesta no está integrado al drenaje, por lo que descarga sus aguas residuales directamente al lago.

Hallazgos relevantes para ambas localidades:

- Como fuente de agua para beber, es común la compra de garrafones a las purificadoras locales, las cuales se abastecen en su mayoría a través de la compra de pipas de agua pre-tratada con ósmosis inversa, provenientes de pozos de concesión privada. Por otro lado, algunas purificadoras tienen su propio pozo, en donde también realizan el pretratamiento y la potabilización. En estos casos, se puede asumir que existe un mayor control sobre la fuente de agua utilizada y menor riesgo de contaminación en su transportación, como ocurre en las pipas que llevan el agua pretratada a las potabilizadoras.
- Solo pocas personas tienen los recursos para comprar garrafones de marcas comerciales de agua potable (Santorini, Bonafont, Ciel).
- Se observó que una alternativa a las intermitencias en el abastecimiento público de agua, reportadas como altamente frecuentes, es acarrearla desde el lago de Chapala. Principalmente, esta agua es usada para actividades de limpieza, sin embargo, sobre todo en los hogares de escasos recursos en donde no pueden comprar garrafones de agua purificada, puede utilizarse para cocinar y beber. Los hogares que tienen pozo artesanal en Mezcala tienen la ventaja de poder solventar esta situación abasteciéndose de estos.
- Las personas tienen una fuerte relación con el lago, toda vez que es parte de su rutina cotidiana. Frecuentemente pasan días de campo en la orilla, se meten a bañar y lavan su ropa ahí.
- El lago de Chapala también es la principal fuente de proteína para las personas, pues la pesca y el consumo de pescado crudo —ceviche— son prácticas comunes. Cerca del lago se desarrollan actividades que pueden contaminar el agua, tales como la cría de ganado porcino.

Para validar la información obtenida en las entrevistas se realizó una salida de exploración tanto a San Pedro Itzicán como a Mezcala, y se retomó el contacto con algunas de las purificadoras, con las que ya se había organizado un taller (véase la sección S5).

En esa salida se pudo confirmar la complejidad de la dinámica de distribución del agua. Es importante considerar que la contaminación puede ocurrir en varios puntos de la cadena, desde la fuente hasta el contacto con las personas, ya sea vía cutánea o ingesta. Como resalta Smith et al. (2020), la contaminación del agua puede ocurrir en los hogares mismos, toda vez que es común que, en respuesta a un servicio de abastecimiento público intermitente, incierto, y en algunos casos nulo, se almacene agua en cisternas o tanques en el techo, que son altamente vulnerables a la contaminación microbiana.

Asimismo, mantener la inocuidad en el proceso de potabilización representa muchos retos. El agua se transporta desde los pozos en pipas que también son vulnerables a la contaminación, mientras que la reutilización de garrafones requiere una desinfección muy rigurosa para evitar la propagación de bacterias que pudiera residir en el propio contenedor.

En contraposición, hay varios puntos de “tratamiento” en la cadena de suministro. En lo que respecta al agua para beber, se lleva a cabo un pretratamiento con ósmosis inversa que se hace en los pozos de concesión comercial, antes de la potabilización, la cual, a su vez,

FIGURA 4.2.15 DIAGRAMA DE FLUJO SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN SAN PEDRO ITZICÁN, A PARTIR DE LA ENTREVISTA CON ANITA (HABITANTE Y LÍDER COMUNITARIA)

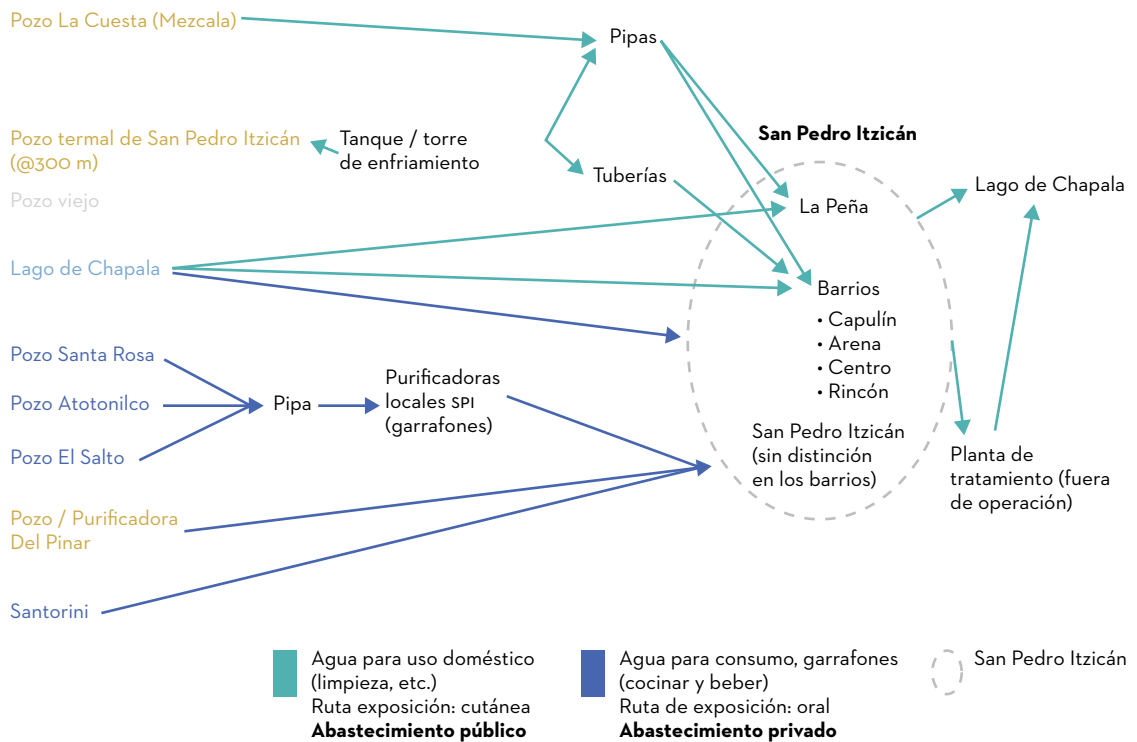
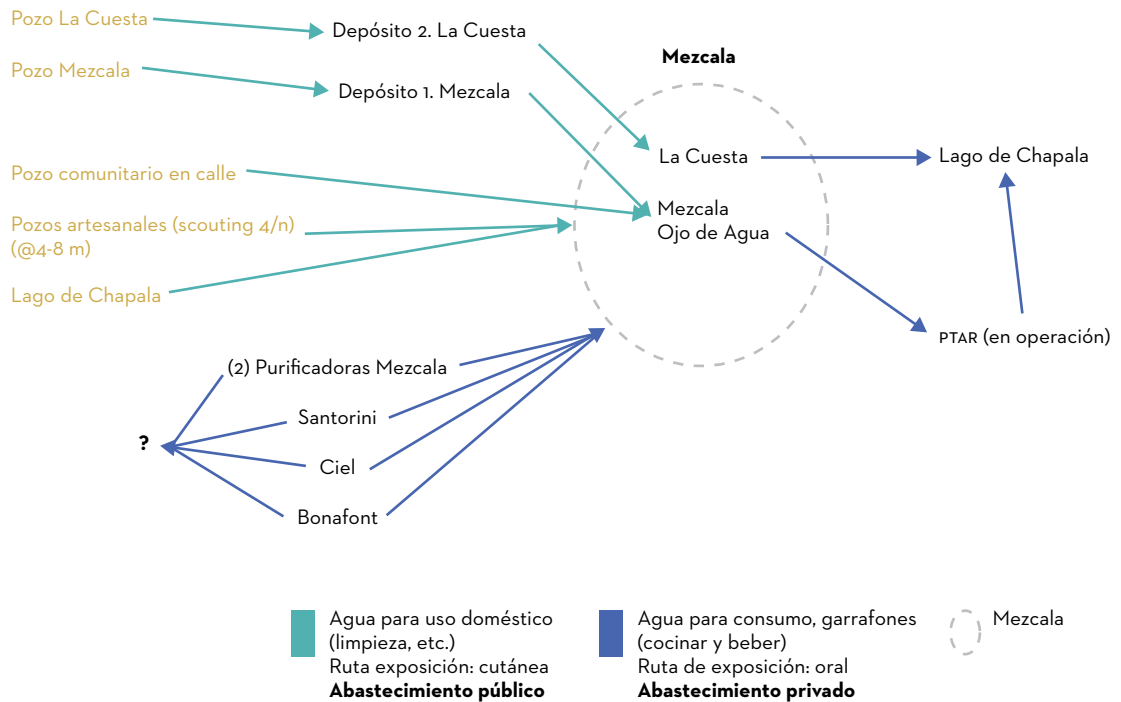


FIGURA 4.2.16 DIAGRAMA DE FLUJO DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN MEZCALA DE LA ASUNCIÓN A PARTIR DE ENTREVISTA A JUANITA (HABITANTE)



cuenta con varios métodos de tratamiento y filtrado. Por su parte, se presume que el agua de uso doméstico también es sometida a un tratamiento al momento de la extracción (véase el capítulo S4.C1). Las fuentes que sí son directamente usadas para uso doméstico son los pozos artesanales, el pozo comunitario de Mezcala y, evidentemente, el agua del lago de Chapala, cuando se entra en contacto con él.

El uso de estos pozos también representa un riesgo potencial de contaminación, pues en la salida de exploración se encontró que se mantienen en condiciones muy diversas, siendo algunos resguardados bajo techo, dentro de la casa, mientras que otros se localizan en el patio. La mayoría carece de una tapa hermética que prevenga la contaminación externa, e incluso uno de ellos se encontró rociado con veneno para ratas, con la justificación de evitar la proliferación de esa plaga. Asimismo, se encontró que el pozo comunitario de la calle no cuenta con ningún tratamiento y tampoco está resguardado, por lo que es altamente vulnerable a ser contaminado por derrame de sustancias.

Por lo anterior, y bajo un presupuesto limitado, se decidió muestrear algunos de estos puntos que representan las diferentes fuentes de agua para uso doméstico y potable, con plena conciencia de que existen varios puntos de potencial contaminación, por un lado, y tratamiento para mejorar su calidad, por otro.

Así pues, se diseñaron las campañas de muestreo de tal forma que se pudieran comparar los resultados en temporada de sequía y temporada de lluvias, por lo que se realizó un muestreo a principios de mayo y otro a finales de noviembre. Cabe resaltar que los resultados del primer muestreo nos permitieron replantear el segundo, lo cual redujo el número de análisis solicitados estratégicamente. Por ello, se muestrearon 11 puntos en temporada de secas y 6 en temporada de lluvias. Se realizaron varios análisis de cada punto, aunque la discusión se dirigió hacia los resultados de arsénico y coliformes fecales, con la finalidad de validar las conclusiones del análisis estadístico que se expone en la sección anterior.

Los análisis se realizaron a través de un laboratorio químico acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA). Al momento de recolectar la muestra se realizaron análisis *in situ* para contrastar con los resultados de laboratorio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre los puntos que se muestrearon en ambas campañas se encuentran pozos artesanales, pozos de abastecimiento público, pozos de concesión comercial y un pozo comunitario, así como puntos de muestreo en el lago de Chapala, cerca de una vía de acceso desde Mezcala y otra desde San Pedro Itzicán.

En los puntos de muestreo del lago de Chapala las concentraciones de arsénico resultaron por arriba de las recomendaciones de la OMS y, por lo tanto, también de la norma 127 tanto en temporada de lluvias como en temporada de sequía; asimismo, en el muestreo de temporada de lluvias de un pozo de concesión comercial. Sin embargo, cabe resaltar que la muestra fue tomada antes del pretratamiento con ósmosis inversa y la potabilización, en donde es muy probable que la concentración de arsénico sea reducida a niveles seguros.

Los datos obtenidos sobre las concentraciones de arsénico en el lago de Chapala son útiles para validar algunos de los hallazgos del análisis estadístico que se muestra en la sección anterior. Como se puede ver en la figura 4.2.14, todas las estaciones de monitoreo presentaron concentraciones de arsénico más elevadas que lo recomendado por la OMS, mientras que la

mayoría excede el nivel máximo permisible que establece la NOM 127. Esto coincide con los valores fuera de norma para el arsénico en los dos puntos en los que se muestreó el lago de Chapala, tanto en temporada de sequía como de lluvias.

Respecto de las bacterias coliformes fecales, en temporada de lluvias se detectaron valores en todos los puntos de muestreo, aunque ninguno de ellos se encontró por arriba de las recomendaciones criterio, por lo que en este caso no se pudieron validar los resultados que se muestran en la figura 4.2.14 con respecto a coliformes fecales. Cabe resaltar que esto se puede deber a que se tomó una sola muestra, y dado que este resultado tiene que ver con descargas puntuales no se puede confiar con tan poca información.

Finalmente, los resultados por arriba de las normas criterio para el análisis de arsénico en el lago de Chapala nos hacen coincidir con la preocupación reportada en Smith et al. (2020) sobre la relación que esto puede tener con la prevalencia de enfermedad renal en estas comunidades.

Cabe resaltar que los muestreos realizados en ese estudio no fueron hechos en el lago de Chapala, sino en agua de los garrafones y agua de la llave. No obstante, se considera que los resultados de este trabajo abonan a las conclusiones de Smith et al. (2020) porque en las observaciones de campo se resaltó que el lago de Chapala constituye una fuente de agua de consumo humano —lavar trastes y ropa, etc.—, sobre todo en las frecuentes temporadas en las que el servicio de abastecimiento municipal no funciona correctamente. Además, se observó que la personas tienen una fuerte relación recreativa con el lago, lo que aumenta el índice de exposición también por vía cutánea.

CONCLUSIONES

El lago de Chapala tiene niveles de arsénico sistemáticamente elevados en relación con las recomendaciones internacionales e incluso con la normatividad local, asimismo, las coliformes fecales están en niveles muy elevados en todo el lago de Chapala y la demanda química de oxígeno también da cuenta de que se trata de un lago contaminado. Además, en el muestreo que se realizó dentro del marco de este proyecto las muestras tomadas del lago de Chapala salieron con valores mayores a lo recomendado por la OMS, lo que valida los datos de la Conagua analizados.

Los valores de las coliformes fecales y la DQO muestran claramente que el agua del lago de Chapala está contaminada. Esto apunta a la necesidad de profundizar en los impactos que estos niveles puedan tener sobre los ecosistemas y sobre las comunidades aledañas. Por otro lado, la presencia de coliformes fecales indica también que el lago de Chapala recibe descargas de aguas residuales sin tratamiento.

En las entrevistas fue posible identificar las fuentes de agua para el abastecimiento dentro de las dos localidades, sin embargo, fue también posible dejar en evidencia que existe una relación entre las personas de las localidades y el lago de Chapala, pues en caso de no tener agua corriente, la gente sigue usando el lago como fuente de agua para actividades domésticas. No fue posible identificar contaminación en las fuentes de agua subterránea de ambas localidades.

RECOMENDACIONES

Ya que el lago de Chapala es un receptor de escurrimientos agrícolas y aguas residuales, valdría la pena muestrear compuestos que no están en la norma, como pesticidas e hidrocarburos. Estos compuestos podrían arrojar más información sobre el origen de la contaminación del lago de Chapala, dado que es más fácil relacionarlos con las actividades anteriormente descritas.

Por otro lado, dada la compleja dinámica de distribución del agua en ambas comunidades es difícil determinar los mecanismos de exposición a sustancias tóxicas y patógenos. Como se mencionó en la descripción de las salidas de exploración y muestreo, la contaminación puede darse en varios puntos de la cadena, toda vez que, a partir de ser extraída de la fuente, normalmente el agua es transportada al punto de potabilización y luego a los hogares. De la misma manera, en varios momentos se dan diferentes tratamientos que, si bien no se encontraron estandarizados, tienen el potencial de remover y reducir las concentraciones de estos componentes a niveles seguros.

Por ello, es recomendable realizar una campaña de monitoreo a todo lo largo de la cadena, para comparar la calidad del agua en cada tramo, tener una mejor trazabilidad de las sustancias tóxicas y visualizar las rutas de exposición que pueden estar incrementando el riesgo de sufrir afectaciones a la salud. En este estudio se investigaron las fuentes, aunque en el trayecto al consumo humano el agua pudo haber sido contaminada debido al transporte entre los diferentes eslabones de la cadena, o bien, purificada, dados los múltiples puntos de tratamiento.

También será importante que se incremente el nivel de representatividad de los datos, pues los presentados aquí se obtuvieron con un presupuesto restringido y no permiten hacer aseveraciones sobre la calidad del agua. Lo que sí se pudo concretar fue una prevalidación del análisis estadístico de las bases de datos del lago de Chapala. En este sentido, se suman a las razones para establecer un programa permanente y transparente de monitoreo que también incluya las fuentes de agua subterránea.

Si bien planteamos las bases conceptuales de un análisis de riesgo —peligro, exposición y vulnerabilidad—, la complejidad de la manera en la que interactúan las diferentes variables requiere una investigación mucho más detallada de cada una. En lo que a vulnerabilidad respecta, será importante considerar sus diferentes dimensiones —genética, nutrición, marginación, higiene, etc.— ante el daño potencial.

Finalmente, si bien no tenemos certeza científica del riesgo a sufrir afectaciones a la salud por exposición a contaminantes, consideramos que esta investigación se suma a los argumentos existentes, como la demanda del TLA, para exigir que las políticas públicas en la materia se conduzcan bajo el principio precautorio.

REFERENCIAS

- Boyd, C. E. (2017). *Conductividad eléctrica del agua, parte 1*. <https://www.globalseafood.org/advocate/conductividad-electrica-del-agua-parte-1/>
- De Alba-Martínez, H., & Márquez-Azúa, B. (2017). Hacia la creación de un índice de riesgo para diseñar y evaluar un servicio ecosistémico de regulación de inundaciones en microcuenca urbanas. *Tecnogestión*, 14(1).
- Dueñas-Celis, M. Y., Dorado-González, L. M., Espinosa-Macana, P., & Suescún-Carrero, S. H. (2018). Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano en zonas urbanas

- del departamento de Boyacá, Colombia, 2004–2013. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 36(3), 101–109. <https://doi.org/10.17533/udea.rfnsp.v36n3a10>
- DWI. (2018). *Dwi Compliance Risk Index (CRI)*. Agosto.
- EPA. (2022). *About Risk Assessment*.
- Ganoulis, J. (2009). Risk Analysis of Water Pollution. En *Risk Analysis of Water Pollution*. <https://doi.org/10.1002/9783527626663>
- Juárez, A., López, L. & Orozco, N. (2021). *Ficha Informativa ILBM (Lake Brief) del Lago Chapala, México*. Instituto Corazón de la Tierra/Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas/International Lake Environment Committee Foundation.
- Liu, Y., Zhang, J., & Zhao, Y. (2018). The risk assessment of riverwater pollution based on a modified non-linear model. *Water (Switzerland)*, 10(4), 1–12. <https://doi.org/10.3390/w10040362>
- Luers, A. L., Lobell, D. B., Sklar, L. S., Addams, C. L., & Matson, P. A. (2003). A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 13(4), 255–267. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(03\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(03)00054-2)
- Montoya, E. A. R., Hernández, L. E. M., Escareño, M. P. L., & Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 103–118. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57339210001>
- Rodríguez, J. M., & Marín, R. (1999). *Fisicoquímica de aguas*. Ediciones Diaz Santos. <https://books.google.com.mx/books?id=ogt-ra9MHHwC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Smith, C. D., Jackson, K., Peters, H., & Herrera-Lima, S. (2020). Lack of Safe Drinking Water for Lake Chapala Basin Communities in Mexico Inhibits Progress toward Sustainable Development Goals 3 and 6. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 8328.
- UNDRR. (2022). *Understanding risk*. <https://www.undrr.org/building-risk-knowledge/understanding-risk>

