



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
CARRERA DE BIOLOGÍA
LABORATORIO DE PROYECTOS AMBIENTALES



Caracterización física y química del agua de los manantiales de Cuatro Ciénegas, Coahuila.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

PRESENTA:

BRYAN GARCÍA CUEVAS

Directora de Tesis: Biól. Maricela Arteaga Mejía.



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.

En memoria de Martin Hugo Mendieta Esquivel, un excelente ser humano, fuiste un gran apoyo durante toda mi carrera y siempre creíste en mí.

Qué encuentres la paz donde quiera que te encuentres amigo.

Agradecimientos

Esta tesis es el reflejo largo proceso de esfuerzo, mío, de mi familia y de mis amigos. Con este trabajo concluyo algo que en algún momento de mi vida parecía un sueño, un sueño que no ha sido fácil alcanzar y tengo que agradecer a tantas personas, que no cabrían aquí.

En primer lugar a Maricela Arteaga Mejía, por ser un excelente ser humano, una profesora cálida y humana que cuenta con un enorme corazón y quién hizo posible la realización de esta tesis.

Agradezco a mi familia:

Mi abuela Grace, quien a lo largo de toda mi vida me ha acompañado y se ha esforzado tanto como yo para verme alcanzar mis objetivos y que desde niño siempre impulsó en mí al científico en el que me convertí.

A mis tíos Bárbara y Víctor, que desde que tengo memoria han estado presentes, han sido una gran influencia positiva y un soporte emocional enorme.

A mi madre, que no se rinde nunca, y jamás he visto doblegarse por muy difícil que estén las circunstancias, me enseñó a ser resiliente y a descubrir lo fuerte que puedo ser.

A mi primillocuchi Xicani que ha sido como un hermanito menor siempre, gracias por aguantar tantas cosas que no te tocaban y ser siempre tan comprensivo.

A mis padrinos Rocío Yaca y Gustavo Ramírez por ver siempre lo mejor de mí; me enseñaron que la familia muchas veces se encuentra en los lugares menos esperados, y dios siempre abre una puerta cuando cierra otra.

A mi hermano Joshua que pasó las peores etapas de mi vida su lado y no me imagino haber pasado por lo mismo sin su compañía.

A mis amigos:

A Héctor Hernández, Verónica Ramírez, Graciela García y Daniel Huerta mis amigos queridos que me apoyaron desde que los conocí, hicieron mi camino menos pesado.

A José María Sánchez Escoto, gracias por apoyarme y ser paciente (casi siempre) con mi estrés durante casi toda la carrera y ser un excelente compañero.

A Elihú Muños Estrada mi amigo que siempre, pero absolutamente siempre, ha estado presente en las buenas, malas, la cercanía y la distancia.

A Tania Mora, tantos momentos inolvidables juntos, una excelente profesora y amiga.

A Andrea Sánchez Manzo, Judith Carina Posadas Hernández, Selene González Ruiz, Sofía Calleja Miguel y Vianey López Pacheco, por hacer mi etapa de universitario inolvidable, por ser un excelente equipo, por ser tan inteligentes y perseverantes y por haber conformado el mejor y más ñoño grupo desde primer semestre. Pocos grupos de amigos pueden decir que estuvieron juntos toda la carrera, las quiero.

Por último pero no menos importante a los profesores Irene Castillo Chaires, Jorge Antonio Valdivia Anistro y Lourdes Alberta Castillo Granada, por ayudar en la realización de este trabajo y a quienes aprecio mucho.

Índice

Siglarío	1
Resumen	2
Introducción	3
Marco teórico	5
Estado del arte	5
La importancia del agua	5
Calidad del agua	6
Clasificación de las aguas según su composición química	9
Clasificación por el predominio de uno o de varios iones	10
Peligro de salinización o sodificación en suelos no salinos	11
Clasificación con base en la conductividad eléctrica (C.E.)	12
Clasificación con base en la RAS	13
Elementos traza (ET)	14
Metales pesados como contaminantes del agua	14
Características físicas y químicas que determinan la calidad del agua	17
Temperatura	18
pH	18
Oxígeno disuelto (OD)	18
Alcalinidad	19
Ion sulfato	19
Ortofosfatos (PO_4^{3-})	20
Cloruros (Cl^-)	20
Nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-)	20
Zona de estudio	21
Ubicación	21
Clima	23
Fisiografía y relieve	24
Geología	25
Edafología	27
Hidrología	29
Caracterización ecológica	32

Contexto socioeconómico	33
Actividades económicas dentro del ANP del VCC	34
Problemática	35
Justificación	36
Hipótesis	37
Objetivo general	37
Objetivos particulares	37
Método	38
Etapa de gabinete	38
Etapa de campo	39
Etapa de laboratorio	41
Etapa de gabinete (procesamiento de datos)	42
Resultados y análisis	44
Análisis de las características más sobresalientes de los manantiales del VCC durante la temporada de estiaje	47
Análisis de las características más sobresalientes de los manantiales del VCC durante la temporada de lluvias	64
Variaciones estacionales	67
Clasificación química de las aguas de los sitios de estudio	68
Análisis de la relación de parámetros entre sitios estudiados por componentes principales (ACP)	71
Cambios en la composición química de agua en la laguna Churince y Poza Azul a lo largo del tiempo	74
Conclusiones	79
Referencias bibliográficas	81
Anexos	93
Anexo A	94
Anexo B	95
Anexo C	96
Anexo D	97
Anexo E	99
Anexo F	100
Anexo G	102
Anexo H	104

Anexo fotográfico	106
Los Hundidos	106
Poza Azul	108
Los Domos	110
Laguna Churince y Manantial Churince	112

Siglarlo

°C: Grados Celsius

ACP: Análisis de Componentes Principales

Ag⁺: Ion plata

ANP: Área Natural Protegida

APFF: Área de Protección de Flora y Fauna

Au₃⁺: Ion aúrico

Ba: Bario

BaCl: Cloruro de bario

BaSO₄: Sulfato de bario

Bi⁺: Ion bismuto

C. E.: Conductividad Eléctrica

C: Carbono

C₄H₆O₆: Ácido tartárico

C₆H₇NO₃S: Ácido sulfanílico

Ca: Calcio

Cd: Cadmio

Cl⁻: ion Cloruro

Co: Cobalto

CO₂: Bióxido de carbono

CO₃⁻: Carbonato

CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

CONANP: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

Cr: Cromo

Cu: Cobre

DOF: Diario Oficial de la Federación

E. U. A.: Estados Unidos de América

ET: Elementos traza

FAO: Food and Agriculture Organization (Organización de las naciones unidas para la Alimentación y la Agricultura)

Fe: Hierro

Fe₃⁺: ion Férrico

g: Gramos

h: hora

H₂SO₄: Ácido sulfúrico

hab: habitantes

HCL: Ácido clorhídrico

HCO₃⁻: ion bicarbonato

Hg⁺: ion mercurioso

HNO₃: Ácido nítrico

IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

INE: Instituto Nacional de Ecología

INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada)

K: Potasio

L: Litro

LDI: Límite de Detección Instrumental

LFD: Ley Federal de Derechos

LN: Longitud Norte

LO: Longitud Oriente

MA: Millones de años

meq: Miliequivalentes

Mg: Magnesio

mg: miligramo

ml: Mililitros

mm: milímetros

Mm³: Millones de metros cúbicos

Mn: Manganeso

Mo: Molibdeno

mS: mili Siemens

N: Normal

NA: No aplica

Na: Sodio

NaCl: Cloruro de sodio

NASA: National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio)

ND: No detectado

Ni: Níquel

nm: Nanómetros

NNED: N-alfanafitilendiamina dihidrocloro

NO₂⁻: ion Nitrito

NO₃⁻: ion Nitrato

NW: Noroeste

O. D.: Oxígeno disuelto

P: Fósforo

Pb: Plomo

Pb₂⁺: ion plomo

PCZ: Punto de Carga Cero

pH: potencial de Hidrógeno

ppm: partes por millón

PtCl₆²⁻: ion hecacoroplatinato

RAS: Relación de Adsorción de sodio

S: Azufre

Sb₃⁺: ion antimonioso

Se: Selenio

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SeO₃²⁻: ion selenito

SeO₄²⁻: ion selenato

SGM: Sistema Geológico Mexicano

Sn: Estaño

SO₄²⁻: ion Sulfato

TAC: Alcalinidad Total

Te: Telurio

Ti: Titanio

TI: Talio

U. S. EPA: United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América)

U: Uranio

UV: Ultravioleta

UV-VIS: Ultravioleta Visible

V: Vanadio

VCC: Valle de Cuatro Ciénegas

VO₃²⁻: ion metavanadato

WWF: World Wild Foundation (Fondo Mundial para la Naturaleza)

Zn: Cinc

µS: micro Siemens

Resumen

En el APFF Cuatro Ciénegas Coahuila la calidad del agua en los manantiales es de gran interés por su relación con la agricultura y la presencia de un alto grado de endemismos microbiológicos, flora y fauna. En la presente investigación se realizó la revisión histórica de los estudios relacionados con la caracterización física y química de Laguna Churince y Poza Azul evidenciándose el deterioro en Laguna Churince desde 1965 (fecha del primer estudio registrado), a la actualidad, acentuándose la mala calidad del agua después de la virtual extinción de esta laguna en 2006, a causa de una sequía prolongada y la sobre explotación de los acuíferos del VCC y El Hundido. Por su parte la Poza Azul forma parte del área núcleo del APFF Cuatro Ciénegas y cuenta con acceso restringido, lo que posiblemente le ha permitido permanecer prácticamente sin cambios en su composición física y química en los últimos 15 años.

De igual manera se estudió la calidad del agua, su caracterización hidrogeoquímica y la presencia de metales pesados, a partir de la realización de parámetros físicos y químicos del agua en los manantiales durante las temporadas de estiaje y lluvias del año 2019. Se recolectaron muestras de agua en 11 manantiales distribuidos en el APFF, la primera campaña de muestreo se realizó en marzo y la segunda en septiembre. Los resultados obtenidos mostraron, con respecto a la normativa de la Ley Federal de Derechos, que existe presencia de metales pesados en concentraciones superiores a lo establecido, principalmente cadmio (Cd). No existe evidencia de contaminación por aguas residuales por lo que se consideró la presencia de estos metales como de ocurrencia natural. Se determinó que el agua en los manantiales estudiados es mayoritariamente sulfatada-magnésica y a través del análisis estadístico multivariado se pudo determinar que los manantiales son variados en cuanto a su composición física y química y la proximidad geográfica entre los mismos no está directamente relacionada con la calidad de sus aguas, encontrándose pozas con calidades de agua diferentes aún al estar separadas por unos pocos metros, lo que hace que cada una posea un ambiente único. Se registró el aumento de las concentraciones de selenio (Se) y Cd en época de lluvias, por lo que es en esta temporada cuando se debe tener cuidado con su uso en riego agrícola.

Introducción

El Valle de Cuatro Ciénegas (VCC) es considerado el humedal más relevante dentro del desierto chihuahuense y uno de los más destacados en México. A nivel mundial está clasificado como un sitio RAMSAR (humedal de importancia internacional), y también está considerado dentro de las Regiones Prioritarias para la Conservación declaradas por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) (INE, 1999).

El 7 de noviembre de 1994 fue declarada Área Natural Protegida (ANP) (Gobierno de México, s/f), con el carácter de área de Protección de Flora y Fauna, en 1999 se publicó su programa de manejo (INE, 1999). En la ANP de 84 hectáreas, ubicada en el municipio de Cuatro Ciénegas de Carranza del estado de Coahuila, habita un amplio abanico de especies de flora y fauna rivalizando con la diversidad de las Islas Galápagos (Souza, 2012), muchas de ellas endémicas, que son la justificación más importante de su categorización. Los valores más altos de endemismo se registran en moluscos, crustáceos y peces (Gobierno de México, s/f), sin mencionar la diversidad microbiológica que caracteriza a este lugar único.

El VCC es un lugar árido y extremadamente hostil, habitado por organismos que son capaces de sobrevivir con escasos nutrientes, una salinidad y radiación ultravioleta elevada y temperaturas extremas. Los manantiales y pozas del VCC son importantes para estudiarlos ya que albergan colonias de algas verde-azules (o cianobacterias) similares a algunas de formas de vida antiguas (Souza, 2012). Las comunidades bacterianas, que prosperan en los ambientes ricos en sulfato, crean estructuras distintivas similares a los arrecifes llamadas estromatolitos, se trata de ambientes únicos en nuestro planeta que nos pueden ayudar a entender el origen de la vida tal como la conocemos (NASA, 2013).

Los estudios de la calidad del agua en los manantiales del VCC han sido escasos, antes de 1968, muchos de los remanentes de lagos pluviales se extinguieron y no fueron estudiados (Minckley, 1968). Actualmente la disponibilidad del agua en el VCC está mermada debido a la actividad humana, la agricultura intensiva y el cambio climático; propiciando un descenso marcado del nivel freático de la región mismo que ha llevado a la desaparición de diversas pozas, consideradas

microhábitats y con ellos información valiosa de las características físicas y químicas en las cuales se desarrollan estos organismos (Forti et al., 2003). Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo conocer la calidad del agua a través de la caracterización física y química en 10 manantiales del VCC en temporadas de estiaje y de lluvia, además de contrastar los resultados obtenidos con los de estudios anteriores para identificar los cambios de la calidad el agua en el sistema y sumarse al registro que se tiene de los estudios en más de 200 manantiales.

Marco teórico

Estado del arte

Los trabajos de caracterización de la calidad del agua de los manantiales del VCC son escasos. Se tiene como estudio base el trabajo de Minckley (1968) con la información limnológica preliminar. Posteriormente Forti et al. (2003), publicaron un artículo del acuífero del VCC cuyo contenido se relaciona con el análisis de algunos parámetros físicos y químicos de los manantiales. Johanensen et al. en 2004 realizaron un estudio isotópico y de hidroquímica del mismo sitio. García M. en 2005 realizó la medición de diversos parámetros físicos y químicos de algunas pozas. En el mismo año el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), realizó el estudio más completo que se tiene registrado hasta hoy, ya que recolectó información de varias pozas del VCC y del valle aledaño “El Hundido”, estos resultados corresponden al artículo publicado por Aldama et al. en 2007 “Comportamiento hidrogeológico de los acuíferos Cuatro Ciénegas y El Hundido, Coahuila, México”. En 2008 el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) comenzó el monitoreo del nivel del agua y la temperatura de algunas pozas luego que se detectara el descenso dramático del nivel hídrico en la laguna Churince en 2006. Finalmente, Wolaver et al. (2013) presentaron un estudio de los orígenes y mecanismos de los manantiales de VCC.

La importancia del agua

Ecológicamente el agua es importante porque es el medio en el cual muchos organismos se desarrollan además de que la distribución de la vegetación sobre la superficie de la Tierra está más controlada por la disponibilidad de este recurso que por cualquier otro factor. El agua juega un papel importante en dar forma a la superficie de la tierra a través de los procesos de disolución, de erosión y de deposición. Los grandes cuerpos de agua ejercen un control considerable sobre la temperatura de las masas de aire de la tierra circundante (Asadollahfardi, 2015).

El aumento de la población humana, la industrialización y el consiguiente incremento en el consumo de agua y su contaminación, en combinación con los impactos del cambio climático han magnificado las presiones sobre los recursos

mundiales de agua dulce. En muchas regiones áridas y semiáridas, la disponibilidad de agua dulce es muy limitada (Singh, 2018). Esta disponibilidad siempre ha sido y sigue siendo un importante factor que afecta a la población humana. Pero, a medida que la población mundial ha crecido, la calidad del agua se ha convertido en un tema igualmente importante (Boyd, 2015).

Los recursos hídricos se utilizan en varios sectores, principalmente para fines domésticos o de utilidad directa para la industria, para la minería, para las áreas urbanas, la recreación, la producción de energía y la producción agrícola, forestal y pesquera, así como para el mantenimiento de ecosistemas protegidos y no explotados (FAO, 2000). Cada sector toma un porcentaje diferente del total de agua utilizada en el mundo, para México el 61% del agua es para usos consuntivos y proviene de fuentes de agua superficiales, y el 39% de fuentes de agua subterránea. Del total del agua empleada en el país el 76% se destina para la agricultura, el 14.4% para el abastecimiento público, 4.9% a la industria y el 4.7% para la generación de energía (Figura 1) (CONAGUA, 2018). La agricultura sigue consumiendo la mayor parte, aunque la industria tiene la tendencia a crecer más rápidamente en el uso del agua. La red urbana, aun cuando tiene un porcentaje menor, va también creciendo continuamente (FAO, 2000).



Figura 1. Porcentajes del uso del agua en México. Fuente: CONAGUA, 2018.

Calidad del agua

La calidad del agua, junto a la cantidad, son dos indicadores de los sistemas ambientales para calcular el índice de sostenibilidad ambiental que considera la habilidad de los países para proteger el medio ambiente en las próximas décadas (Chávez y Alipaz, 2007). El recurso hídrico natural es un sistema de cierta

complejidad, no homogéneo, que puede estar constituido por una fase acuosa, una gaseosa y una o más fases sólidas (García, 2015). Cualquier propiedad física, química o biológica que influya en la idoneidad del vital líquido para los sistemas ecológicos naturales o el uso por los humanos es una variable de calidad del agua, y el término *calidad* se refiere a la idoneidad del agua para un propósito particular, de esta forma se puede identificar si es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado; por ejemplo: el consumo humano o el ambiente, y en su caso, los eventuales procesos de depuración requeridos para la remoción de elementos indeseables o riesgosos. Hay literalmente cientos de variables de calidad del agua, pero para un propósito particular, sólo unas pocas variables suelen ser de interés. Los estándares de calidad del agua se han desarrollado para servir como directrices y selección de los suministros de agua para diversas actividades o para proteger los cuerpos de agua de la contaminación (Boyd, 2015; CONAGUA, SEMARNAT, 2018).

La calidad del agua potable es una consideración de salud. El agua potable no debe tener concentraciones excesivas de minerales, debe estar libre de toxinas y no contener organismos patógenos. Las personas prefieren que el agua potable sea clara y sin mal olor o sabor. Existen estándares de calidad del agua para diversas actividades como el baño, las aguas de uso recreativo y para el agua de cultivo o captura de peces y de mariscos, cuyo destino final es el consumo humano (Boyd, 2015). Diversas enfermedades se pueden propagar a través del contacto con agua contaminada; las ostras y algunos otros mariscos pueden acumular patógenos o compuestos tóxicos presentes en el agua, haciéndolos peligrosos para el consumo humano. El agua para el ganado no tiene que ser de tan alta calidad como el agua para consumo humano, pero no debe causar enfermedad o muerte en los animales. Las concentraciones excesivas de minerales en el agua de riego tienen efectos osmóticos adversos en las plantas, y también debe estar libre de sustancias fitotóxicas. Su uso para la industria también debe ser de calidad adecuada; es posible que se necesite agua de calidad extremadamente alta para algunos procesos, e incluso el agua de alimentación de calderas no debe contener sólidos

suspendidos excesivos o una alta concentración de dureza de carbonatos (Boyd, 2015; Asadollahfardi, 2015).

El uso del agua para riego depende del contenido y tipo de sales. Su calidad tiene efectos importantes sobre la producción de cultivos, así como en el deterioro químico del suelo (García, 2015).

Los problemas más comunes derivados de la calidad del agua para fines agronómicos se deben a los siguientes efectos:

- **Salinidad:** a medida que aumenta el contenido de sales en la solución del suelo, se incrementa la tensión osmótica y, por tanto, la planta tiene que hacer mayor esfuerzo para absorber el agua por las raíces, o sea, disminuye la cantidad de agua disponible para las plantas (García, 2015).
- **Infiltración:** contenidos relativamente altos de sodio y bajos de calcio provocan que las partículas de suelo tienden a disgregarse, ocasionando una reducción en la velocidad de infiltración del agua, que puede implicar poca disponibilidad para el suelo (García, 2015).
- **Toxicidad:** algunos iones (sodio, cloro y boro), se pueden acumular en los cultivos en concentraciones suficientemente altas y pueden reducir el rendimiento de las cosechas, además facilitan la obstrucción de algunos sistemas de riego (García, 2015).
- **Otros efectos:** en ocasiones hay que considerar los nutrientes contenidos en el agua de riego, con el fin de restringir la fertilización o porque produzcan excesos contraproducentes. Otras veces pueden producir corrosión excesiva en el equipo de riego, aumentando costos de mantenimiento (García, 2015).

Varios autores han mostrado el riesgo que presuponen altos niveles de metales pesados (MP) en el agua (Yang et al., 1996, Taboada-Castro, 2002) que derivan en la acumulación de estos en los suelos agrícolas y el efecto adverso potencial para la salud humana debido a la bioacumulación en las plantas de cultivo, el ganado y los productos derivados de la ganadería (p. ej. la leche). Se han encontrado niveles

altos de MP en la leche de vacas alimentadas con alfalfa cultivada con agua rica en estos cationes (Castro-González et al, 2018).

Clasificación de las aguas según su composición química

Son muchas las clasificaciones propuestas para poder comparar diversos tipos de aguas y conocer sus características en particular. Estas comparaciones se hacen comparando las concentraciones obtenidas con valores establecidos como lo que propone el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América (U. S. Salinity Laboratory) para clasificar el agua de acuerdo con su cantidad de sales disueltas (Wilcox, 1955), que pueden ser expresadas en mg/L (ppm), y/o en meq/L. Una concentración de 1 ppm significa que una millonésima parte del peso de la muestra corresponde al peso de la sustancia. En disoluciones acuosas equivalen a mg/L. Una concentración de 1 meq es igual a la concentración en ppm o mg/L dividida por el peso equivalente. El peso equivalente es igual al peso atómico o molecular dividido por la valencia (Fernández, 2009).

Las clasificaciones se pueden sintetizar en dos grupos según el predominio de uno o de varios iones, o en el contenido de determinadas sales. Dentro de las clasificaciones (iónicas) se pueden encontrar: Alekine, Scholler, Schoucarev-Slavianov, Bazilevich, Filatov entre otras. Y como ejemplo de clasificación salinas tenemos Chase Palmer, Souline, Zakharina, Noisette, entre otras (Fernández, 2009).

La clasificación de las aguas es una herramienta que permite conocer algunas de las características de la zona de estudio o su posible riesgo para el uso en determinadas actividades. Por ejemplo las aguas duras (aguas con elevado contenido de calcio y magnesio), se asocian con cuencas de captación de rocas sedimentarias, de las cuales las más comunes son las de piedra caliza y creta. Las aguas blandas (aguas con bajo contenido de calcio y magnesio) suelen haber estado en contacto con rocas impermeables como el granito (Neira, 2006). Es importante conocer la composición química del agua para saber si esta será apta para actividades como el riego, consumo humano o si podrá ocasionar daños en tuberías e infraestructura, como es el caso de las aguas duras.

Clasificación por el predominio de uno o de varios iones

Clasificación de Schoeller. Tiene en cuenta diversos caracteres a los que se da un orden de importancia:

1. Concentración del ion cloruro (Cl^-)
2. Concentración en ion sulfato (SO_4^{2-})
3. Concentración en iones bicarbonatos y carbonatos ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)
4. Incide de desequilibrio cloro-alkalino (índice de cambio de bases).

Distingue además varios tipos de aguas dentro de estos 4 grupos hasta alcanzar 36 tipos (Fernández, 2009).

Clasificación de Schukarev-Slavianov. Emplea como índice de clasificación los iones que aparecen en un porcentaje mayor de 25% del total de miliequivalentes de aniones o cationes.

Aniones:

Grupo 1: Aguas carbonatadas

Grupo 2: Aguas sulfatadas

Grupo 3: Aguas cloruradas

Grupo 4: Aguas bicarbonatadas sulfatadas

Grupo 5: Aguas bicarbonatadas cloruradas

Grupo 6: Aguas sulfato cloruradas

Grupo 7: Aguas cloruradas bicarbonatadas

Cationes:

Grupo 1: Aguas cálcicas

Grupo 2: Aguas magnésicas

Grupo 3: Aguas sódicas

Grupo 4: Aguas cálcico-magnésicas

Grupo 5: Aguas cálcico-sódicas

Grupo 6: Aguas magnésico-sódicas

Grupo 7 Aguas cálcico-magnésicas-sódicas (Fernández, 2009).

Peligro de salinización o sodificación en suelos no salinos

Gran parte de las tierras irrigadas corren peligro de saturarse de sal, lo que reduce las cosechas y puede dañar las tierras e impedir su recuperación (FAO, 2002), es por eso que es importante determinar este riesgo, al conocer la composición química de las aguas.

Para definir el peligro de salinización o sodificación del suelo a partir de parámetros medidos en el agua de riego, se utilizó el esquema propuesto por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América (U. S. Salinity Laboratory), conocido como Normas de Riverside (Wilcox, 1955). Este sistema se basa en la medida de la conductividad eléctrica del agua para determinar el riesgo de salinización del suelo y en el cálculo de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), para definir el riesgo de sodificación o alcalinización, se utiliza la fórmula:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Se definen cuatro clases de riesgo de salinización y otras cuatro de riesgo de sodificación, resultando en total 16 clases de agua (C1-S1, C1-S2, etc.; (ver Figura 2) cada una de las cuales tiene diferentes condicionantes para ser utilizada en regadío (Wilcox, 1955).

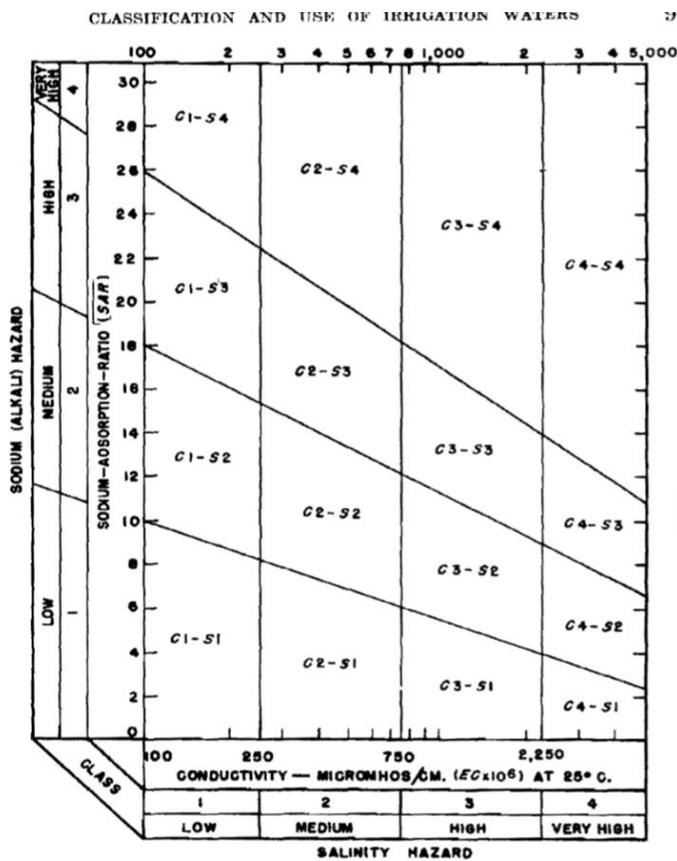


Figura 2. Diagrama de uso de las aguas de riego propuesto por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América en 1954. (Wilcox, 1955).

Clasificación con base en la conductividad eléctrica (C.E.)

El agua de baja salinidad (C1)

puede usarse para riego en la mayoría de los cultivos y suelos, con poca probabilidad de que se desarrolle un problema de salinidad. Se requiere algo de lixiviación, pero esto ocurre bajo prácticas de riego normales, excepto en suelos de muy baja permeabilidad (Wilcox, 1955).

El agua de salinidad media (C2)

se puede usar si ocurre una cantidad moderada de lixiviación. Las plantas con tolerancia moderada a la sal pueden cultivarse en la mayoría de los casos sin prácticas especiales para el control de la salinidad (Wilcox, 1955).

El agua de alta salinidad (C3)

no se puede usar en suelos con drenaje restringido. Incluso con un drenaje adecuado, se puede requerir un manejo especial para el control de la salinidad, y se deben seleccionar plantas con buena tolerancia a la sal (Wilcox, 1955).

El agua de muy alta salinidad (C4) no es adecuada para el riego en condiciones normales, pero puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, y con drenaje adecuado, el agua de riego se debe aplicar en exceso para proporcionar una lixiviación considerable y se deben seleccionar cultivos muy tolerantes a la sal (Wilcox, 1955).

Clasificación con base en la RAS

La clasificación de las aguas de riego con respecto a la RAS se basa principalmente en el efecto del sodio (Na) intercambiable de acuerdo con la condición física del suelo. Sin embargo, las plantas sensibles a Na pueden sufrir daños como resultado de la acumulación de este en sus tejidos cuando sus valores intercambiables son más bajos que los efectivos para causar el deterioro de la condición física del suelo (Wilcox, 1955).

El agua con bajo contenido de sodio (S1) se puede usar para riego en casi todos los suelos con poco peligro de desarrollar niveles dañinos de Na intercambiable. Sin embargo, los cultivos sensibles a este elemento, como los árboles frutales de hueso (melocotones, albaricoques, nectarinas, ciruelas y cerezas) y los aguacates, pueden acumular concentraciones perjudiciales de Na (Wilcox, 1955).

El agua de sodio medio (S2) presentará un peligro del elemento apreciable en suelos de textura fina de alta capacidad de intercambio catiónico, especialmente en condiciones de baja lixiviación, a menos que el yeso esté presente en el suelo. Esta agua se utilizará sobre suelos de textura gruesa u orgánica que tengan buena permeabilidad (Wilcox, 1955).

El agua con alto contenido de sodio (S3) puede producir niveles dañinos por Na intercambiable en la mayoría de los suelos y requerirán un manejo especial, buen drenaje, alta lixiviación y adiciones de materia orgánica. Los suelos gipsófilos pueden no desarrollar niveles dañinos del elemento en su forma intercambiable contenido en estas aguas. Se pueden requerir enmiendas químicas para reemplazar el Na intercambiable, excepto que las enmiendas pueden no ser factibles con aguas de muy alta salinidad (Wilcox, 1955).

El agua con alto contenido de sodio (S4) generalmente no es satisfactoria para fines de riego, excepto en salinidad baja y tal vez media, donde la solución de Calcio (Ca) del suelo o el uso de yeso u otras enmiendas pueden hacer posible el uso de estas aguas (Wilcox, 1955).

A veces, el agua de riego puede disolver suficiente Ca de los suelos calcáreos para disminuir considerablemente el riesgo por Na y esto debe tenerse en cuenta para el uso de aguas C1-S3 y C1-S4. Para suelos calcáreos con altos valores de pH o para suelos no calcáreos, la concentración de este elemento de las aguas en las clases C1-S3, C1-S4 y C2-S4 puede mejorarse mediante la adición de yeso al agua. Del mismo modo, puede ser beneficioso agregar yeso al suelo periódicamente cuando se usan aguas C2-S3 y C3-S2 (Wilcox, 1955).

Elementos traza (ET)

Los ET u oligoelementos son aquellos elementos que, aunque presentes en cantidades muy pequeñas, en los tejidos corporales, son nutrientes esenciales porque que desempeñan una serie de funciones indispensables para mantener la vida. Sus ingresos inadecuados deterioran las funciones tisulares, y por lo general, producen la enfermedad. Estos se pueden dividir en esenciales, no esenciales y elementos tóxicos. Sin embargo, se debe reconocer que cualquier elemento traza se hace tóxico cuando ingresa al organismo en grandes cantidades (Alarcón-Corredor, 2009).

El enriquecimiento de las aguas continentales con elementos traza se ha producido no sólo a través de los procesos naturales, sino también como consecuencia de las actividades humanas: domésticas, agrícolas e industriales. Los elementos son liberados a la atmósfera en forma de vapores o bien unidos a partículas, de ahí que la atmósfera sea el medio más importante para su transporte hacia los sistemas acuáticos y terrestres lejanos al punto de origen de la contaminación (Song, 1999; Pelayo, 2006; Alloway ed., 2013; Barzegar, 2019).

Metales pesados como contaminantes del agua

En los cerca de 60 años en los que se ha utilizado en química el término "metal pesado" no ha sido definido por ningún organismo autorizado como la IUPAC, sin

embargo se le ha dado una gama tan amplia de significados por diferentes autores que no tiene uno solo (IUPAC, 2002). Se puede encontrar una relación entre la densidad (gravedad específica) y cualquiera de los diversos conceptos fisicoquímicos que se han utilizado para definir a los "metales pesados" y la toxicidad o ecotoxicidad atribuida a estos (IUPAC, 2002).

Debido a lo anterior en este trabajo se considerará como metal pesado a *todo aquel metal o metal de transición cuya densidad sea igual o mayor a 5 veces la densidad del agua* (IUPAC, 2002).

Varios de los MP de acuerdo con la definición anterior, son esenciales para las plantas y / o animales y deben estar presentes en cantidades adecuadas. Algunos no metales o metaloides, como As, Sb y Se son considerados usualmente como MP, aunque se comportan químicamente como no metales (Alloway ed., 2013).

Los MP se encuentran y liberan naturalmente en el ambiente a partir de los procesos pedogenéticos de desgaste de los materiales parentales a niveles que se consideran como traza (<1000 mg/kg) y rara vez son tóxicos (Kabata-Pendias y Pendias, 2001). El ciclo geoquímico de los metales es un proceso que naturalmente se desarrolla lentamente, sin embargo, la perturbación y la aceleración del este ciclo por las actividades antropogénicas ha propiciado que la mayoría de los suelos y de los cuerpos acuáticos de los entornos rurales y urbanos acumulen uno o más MP por encima de los valores de fondo definidos, siendo en ocasiones lo suficientemente altos como para causar riesgos para la salud humana, flora, fauna y ecosistemas (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Los MP que comúnmente se encuentran en sitios contaminados, en orden de abundancia son: plomo (Pb), cromo (Cr), arsénico (As), zinc (Zn), cadmio (Cd), cobre (Cu) y mercurio (Hg). Esos metales son importantes porque que son capaces de disminuir la producción de cultivos, se pueden bioacumular y se lleva a cabo su biomagnificación en la cadena trófica (Asrari, 2014).

Los MP son liberados a la atmósfera en forma de vapores o bien unidos a partículas (aerosoles), de ahí que la atmósfera sea el medio más importante para su transporte

hacia los sistemas acuáticos y terrestres lejanos al punto de origen de la contaminación. Las aguas superficiales son más vulnerables a la contaminación que las aguas subterráneas porque son fácilmente influenciadas por aguas residuales o por escorrentías. La degradación de la calidad del agua es inevitable debido al crecimiento de la población, al aumento de la contaminación, sequía y defoliación de la vegetación; por lo tanto, la calidad de los recursos de agua superficial debe ser monitoreada de cerca para hacer frente a los impactos anticipadamente (Pelayo, 2006, Barzegar, 2019; Song, 1999).

Los MP son persistentes, es decir, no pueden ser degradados, mediante procesos biológicos (ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos) ni antropogénicamente, y pueden movilizarse al modificarse las características de los ambientes naturales (Odobasic, 2012).

En el agua, los MP se transforman rápidamente y se sedimentan en el fondo en forma de carbonatos, sulfatos y sulfuros insolubles. En el momento en que se agota la capacidad de absorción del sedimento, aumenta la concentración de iones metálicos en el agua (Odobasic, 2012, Alloway ed., 2013).

Los MP disueltos son aquellos que en muestras no acidificadas o en estado coloidal pasan a través de una membrana de poro de $0,45\ \mu$ (NMX-AA-051-SCFI-2001). Los MP en el agua aparecen en diferentes formas químicas y en diferentes condiciones de oxidación, por lo que su toxicidad está cambiando, dependiendo de la forma química en la que se encuentran. Por lo tanto, el conocimiento de la concentración total de metales en agua contaminada a menudo es insuficiente para tener información adecuada sobre su efecto nocivo. La mayoría de los estudios sobre el tema de la toxicidad de los MP muestra que el ion metálico hidratado libre es la forma más tóxica, porque es significativamente más fácil y rápido de absorber en partículas suspendidas o coloides (Odobasic, 2012; Alloway ed., 2013).

Los MP también pueden aparecer en forma de complejos inorgánicos y orgánicos, unidos a la fracción coloidal conocidos como metales suspendidos y estos son retenidos por una membrana de poro de $0,45\ \mu$. (NMX-AA-051-SCFI-2001). Algunos ejemplos de complejos son polihidróxidos y polisilicato, como polímeros y pseudo-

coloides (hidróxidos metálicos, ácido húmico) y adsorbidos a partículas suspendidas u organismos vivos (p. ejem., microorganismos), (Odobasic, 2012).

La movilidad de los MP en el agua va a depender de diferentes parámetros químicos como: pH del agua, presencia de carbonatos (CO_3^{2-}) y fosfatos (PO_4^{3-}), óxidos de hierro hidratados, contenido de materia orgánica y sulfuros y alcohol (significativo para el proceso de movilización de los metales pesados en el agua) (Odobasic, 2012).

Una vez que han entrado en los ecosistemas acuáticos, los MP se transforman a través de procesos biogeoquímicos y se distribuyen entre varias especies con distintas características fisicoquímicas y su concentración es regulada por diferentes procesos. La sorción es un proceso geoquímico por el cual los contaminantes disueltos (en forma iónica) en el agua pueden ser atraídos y retenidos en los sólidos con los que interactúan. Los fenómenos de sorción incluyen la adsorción, la absorción, el intercambio iónico y la coprecipitación. La adsorción indica que los contaminantes disueltos se adhieren a las superficies de sólidos; la absorción en cambio sugiere que se introducen dentro de la estructura de los sólidos; el intercambio iónico involucra la sustitución de un contaminante por otro en el sólido; y la coprecipitación indica la formación de un nuevo compuesto en la superficie de un sólido ya existente. Ha sido ampliamente reportado que la sorción es uno de los principales controles de la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos como los MP. Los factores que determinan la capacidad de sorción de los sólidos son: punto de carga cero (PZC) y el área superficial (Martínez, 2018, Bradl, 2005).

Características físicas y químicas que determinan la calidad del agua

Temperatura

La temperatura (en conjunto con la luz), determinan el proceso de fotosíntesis y, este a su vez, depende a su vez de la latitud, la altitud y la regionalidad del sistema acuático. Lo anterior determina los procesos de circulación, de renovación de masas de agua o de confinamiento, de advección y aspectos relevantes en la dinámica física y química del sistema, incluyendo el metabolismo y la fisiología de los organismos que lo habitan (Gómez et al., 2014).

pH

El pH es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua. Los organismos requieren un margen estrecho de valores de pH. En los extremos finales de la escala de 2 ó 13, ocurren daños físicos en las agallas, esqueletos y aletas de algunos organismos acuáticos. Los cambios en pH pueden alterar la concentración de otras sustancias en el agua modificando el nivel de toxicidad, por ejemplo: una disminución en el pH puede aumentar la cantidad de mercurio (Hg) soluble en el agua, en tanto que un aumento puede causar la conversión del ion amonio no tóxico (NH_4^+) a la forma de amoníaco tóxico (amoníaco sin ionizar) (NH_3^0) (California State Water Resources Control Board, s.f.).

Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto (OD) es importante en los cuerpos acuáticos porque interviene en las funciones metabólicas de los organismos, como la respiración (en el caso de los organismos aerobios) y en muchas reacciones químicas de oxido-reducción. Su concentración de oxígeno en el agua se debe principalmente al proceso fotosintético de las plantas, algas y bacterias acuáticas, además de la difusión atmosférica. Su solubilidad depende de tres factores que son: la temperatura, la presión atmosférica y el contenido de sales disueltas. La concentración del OD muestra variaciones estacionales resultado de las condiciones ambientales (Gómez et al., 2014).

En la dinámica acuática, su concentración varía a lo largo del día. Durante las primeras horas de la mañana generalmente las concentraciones de OD son bajas, más tarde a medida que se incrementa el proceso de fotosíntesis, se puede observar un incremento gradual y constante que puede alcanzar al atardecer una

sobresaturación. La producción y abundancia de este gas está limitada por factores como la temperatura, la biomasa de productores primarios, la transparencia, la cantidad de nutrientes, la materia orgánica en descomposición y los organismos consumidores (Gómez et al., 2014).

Alcalinidad

El término alcalinidad se refiere a la cantidad de ácido que se requiere para titular las bases contenidas en una muestra de agua expresadas en miligramos por litro de equivalentes de carbonato de calcio (CaCO_3). Existen numerosas bases en el agua; sin embargo, las predominantes en las aguas naturales son: bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos (OH^-) (Gómez et al., 2014).

No existe una relación directa inherente, entre la alcalinidad y la productividad, sin embargo, un incremento en la alcalinidad aumenta la disponibilidad de fósforo y otros nutrientes. Las aguas que contienen 40 mg/L o más de alcalinidad total son consideradas más productivas que las de baja alcalinidad. Los niveles de alcalinidad total para aguas naturales pueden ir de menos de 5 mg/L a más de 500 mg/L (Gómez et al., 2014).

Ion sulfato

La forma más común de azufre en el agua es el ion sulfato (SO_4^{2-}) y su concentración puede variar de acuerdo con la naturaleza geológica e hidrológica de la cuenca en la que se asienta el cuerpo de agua (Gómez et al., 2014).

En lugares donde pueda aumentar la concentración de fitoplancton, se pueden presentar zonas anaerobias debido a la descomposición de materia orgánica, en las que las bacterias sulfatoreductoras se activan metabólicamente. Estas bacterias toman el oxígeno de los sulfatos (SO_4^{2-}) formando sulfuro de hidrógeno (H_2S), el cual es un compuesto de olor desagradable y altamente tóxico, que elimina muchos organismos del medio, excepto las bacterias anaeróbicas del ecosistema (Severiche y Gonzales, 2012). El ion sulfato es uno de los aniones más comunes en las aguas naturales, se encuentra en concentraciones que varían desde unos pocos hasta varios miles de mg/L (Gómez et al., 2014)

Ortofosfatos (PO_4^{3-})

El fósforo (P) es uno de los elementos minoritarios tanto en el universo inerte como vivo, por ello puede llegar a ser un nutriente limitante para la productividad primaria tanto en un cuerpo de agua como en Tierra (Mercado-Camargo, 2017).

El P se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente como fosfatos, los cuales se clasifican en: ortofosfatos (PO_4^{3-}), fosfatos condensados y fosfatos orgánicos. Las formas "disueltas" principalmente son inorgánico, ortofosfatos (PO_4^{3-}), y condensados, pero también como fosfatos orgánicos (ácidos nucleicos, proteínas, fosfolípidos, fosfoamidas, fosfatos de azúcar, fosfatos de inositol, amino fosfonatos y pesticidas orgánicos de fósforo) (Worsfold et al., 2016).

El ortofosfato es muy soluble y es la fracción útil que absorben las plantas autótrofas, por lo tanto, es la principal forma biodisponible de P y en algunos casos constituye el nutriente limitante de crecimiento (Worsfold et al., 2016).

Cloruros (Cl^-)

Los cloruros son sales que resultan de la combinación del gas cloro (anión) con un metal (catión). El cloro (Cl_2) es altamente tóxico y es usualmente utilizado como desinfectante, sin embargo, en combinación con un metal, como el sodio (Na), es esencial para la vida, dado que, pequeñas cantidades de cloruros son requeridas para la función celular en los seres vivos. En la naturaleza las sales de cloruro de sodio, cloruro de potasio (KCl), y cloruro de calcio (CaCl_2) están ampliamente distribuidas. El cloruro, en forma de ion Cl^- , es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua, su contenido procede de fuentes naturales, aguas residuales y vertidos industriales. El efecto antropogénico está mayormente asociado con el ion sodio (Iowa Department of Natural Resources, 2009).

Nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-)

Los compuestos nitrogenados presentes en las aguas naturales están íntimamente relacionados con el ciclo del nitrógeno. La mayor parte del nitrógeno aparece en forma gaseosa en la atmósfera (78 % en volumen), en forma oxidada constituye una relativamente importante fracción en los suelos y sustancias orgánicas (tejidos de animales o vegetales que lo extraen de la atmósfera para su metabolismo); en las

rocas, solo se presenta como elemento minoritario (De Miguel-Hernández y Vázquez-Taset, 2006).

El nitrógeno puede aparecer en forma de NH_3^0 , NH_4^+ y por oxidación, estas formas reducidas pueden transformarse en NO_2^- y finalmente en NO_3^- que es la forma más usual y estable (Cabrera, 2003). Hasta 1995, el proceso de nitrificación conocido estaba relacionado con el consumo de oxígeno; es decir, el NH_4^+ se consideraba relativamente estable en condiciones anóxicas, se describió posteriormente a esta fecha la oxidación del NH_4^+ en condiciones anaerobias, considerando el NH_4^+ como donador de electrones y el NO_3^- como aceptor final; a este proceso se le denominó Anammox (Sanabria, 2009).

El ion nitrito puede estar presente en las aguas bien como consecuencia de la oxidación del NH_3^0 o como resultado de la reducción microbiana o no de los nitratos. Su presencia en el agua debe considerarse como un indicio fundado de una posible contaminación reciente (dada su inestabilidad) y tal vez de la no potabilidad del agua debido a la toxicidad de este ion (De Miguel-Hernández y Vázquez-Taset, 2006). Los nitritos pueden producir compuestos cancerígenos, las nitrosaminas, por su reacción con aminas secundarias o terciarias, además de interaccionar con los glóbulos rojos de la sangre produciendo metahemoglobinemia que impide el transporte de oxígeno al cuerpo (Cabrera, 2003).

De acuerdo con lo anterior es importante conocer la calidad de los manantiales ya que la composición física y química de las mismas interfieren con los procesos metabólicos y fisiológicos del organismo que habitan en ellos. Por lo que tener un entendimiento de las dinámicas y los procesos que ocurren dentro de un cuerpo de agua es esencial para la preservación de la vida que estos albergan.

Zona de estudio

Ubicación

El Desierto Chihuahuense es el desierto más grande de Norteamérica, está localizado principalmente en los estados de Chihuahua y Coahuila, cubriendo algunas pequeñas áreas de los estados de Arizona, Nuevo México y Texas en los

Estados Unidos y de los estados de San Luis Potosí y Zacatecas en México (INE, 1999). El municipio de Cuatro Ciénegas de Carranza, Coahuila, se ubica en la parte central del estado, a 80 km al oeste de la ciudad de Monclova, en el desierto central de Chihuahua (también conocido como altiplano septentrional) (LN 26° 50' 41" y LO 102° 8' 11") y se encuentra entre los dos macizos montañosos más grandes de México, al este de la Sierra Madre Oriental y al oeste la Sierra Madre Occidental. La humedad que viene tanto del Golfo de México como del Pacífico es bloqueada por ambas cadenas montañosas, fenómeno que dio origen al desarrollo de este desierto (INE, 1999).

El VCC se decretó como Área Natural Protegida (ANP) en la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) en el Diario Oficial de la Federación el 7 de noviembre de 1994, con una extensión de 3,632.6 km² (ver figura 3). En el año de 1997, la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Ahora SEMARNAT) asignó recursos para apoyar el equipamiento y los gastos de

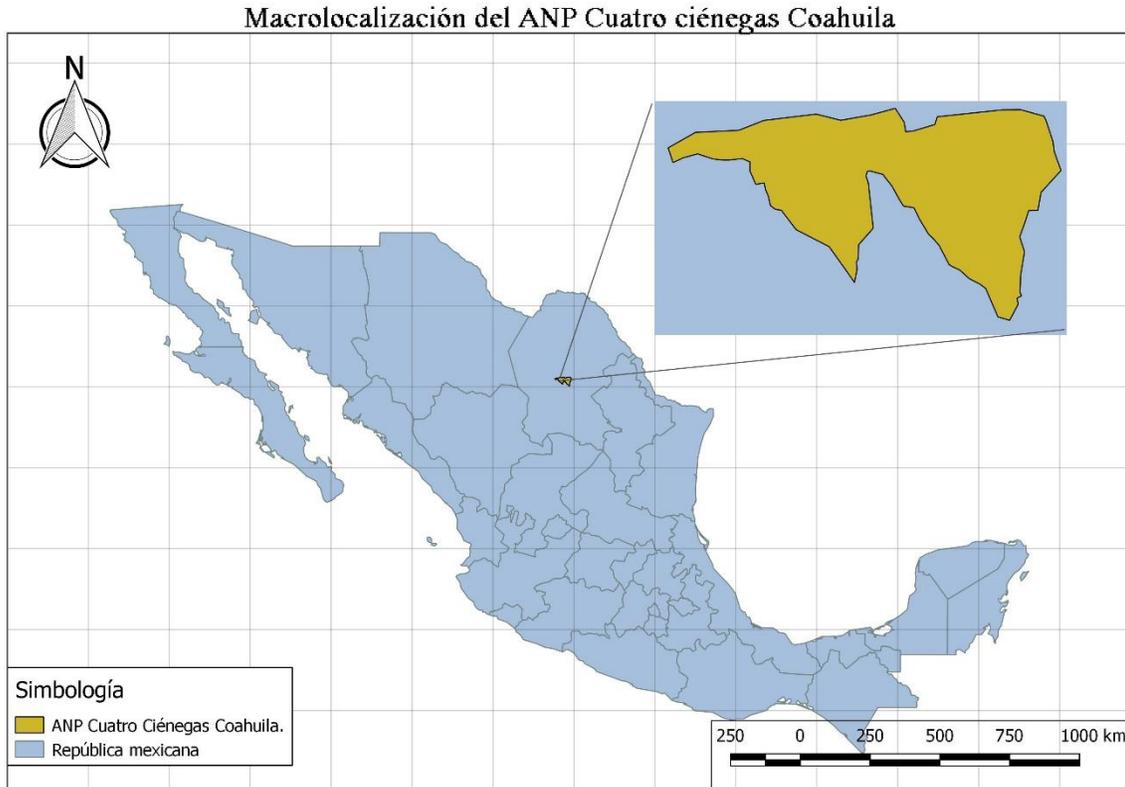


Figura 3. Macrolocalización del ANP Cuatro Ciénegas Coahuila.

operación, acciones que garantizaron la presencia permanente de personal capacitado en el área, lo que ha disminuido significativamente los impactos y amenazas en los recursos naturales del área (CONANP, 2007; CONABIO, 2015; CONANP, 2002).

Clima

El área es semiárida con una evaporación potencial de 2000 mm/año aproximadamente, con una precipitación media anual medida (1942–2003), con un máximo de 421 mm (1985) y un mínimo de 42.8 mm (1942). Es común en este tipo de climas muy secos continentales que la precipitación en un año pueda variar mucho respecto de las que se anotan como promedio. Así hay años muy secos y otros bastante húmedos en donde prevalecen los primeros. Marzo, resulta la época más seca y donde la mayor frecuencia se acumula en el rango de cero mm de precipitación (INE, 1999).

Alrededor del 80% de la precipitación total ocurre entre mayo y octubre; la temperatura media anual es de 16.3°C, siendo junio y enero los más cálidos con 28°C y más fríos en 2.9°C, respectivamente (Cardona, 2018). El período libre de heladas es de marzo a octubre, su frecuencia anual es de 20 a 40 días y la de granizadas de 1 a 2 días; los vientos predominantes tienen dirección noroeste con un rango de 8 a 20 Km/h (CONABIO, 2015).

Fisiografía y relieve

El APFF Cuatro Ciénegas, está en el límite entre dos Provincias Geológicas, el Golfo de Sabinas y la Plataforma de Coahuila, donde la Sierra de La Fragua sirve como parteaguas (ver figura 4). El Valle está rodeado por altas montañas, resultado de plegamientos, algunos de ellos, especialmente la Sierra de San Marcos y Pinos, presenta una gran cantidad de fracturas que posiblemente sean las que permitan la recarga de los manantiales. El agua de la lluvia atraviesa la formación La Peña hasta llegar a la formación Cupido, existen fracturas en el material arcilloso que permiten que el agua tienda a salir (INE, 1999).

La región está constituida por montañas con estratos plegados, predominantemente Mesozoicas del Cretácico y Jurásico los que descansan sobre un basamento del paleozoico de sedimentos marinos del pérmico y algunas rocas intrusivas post-

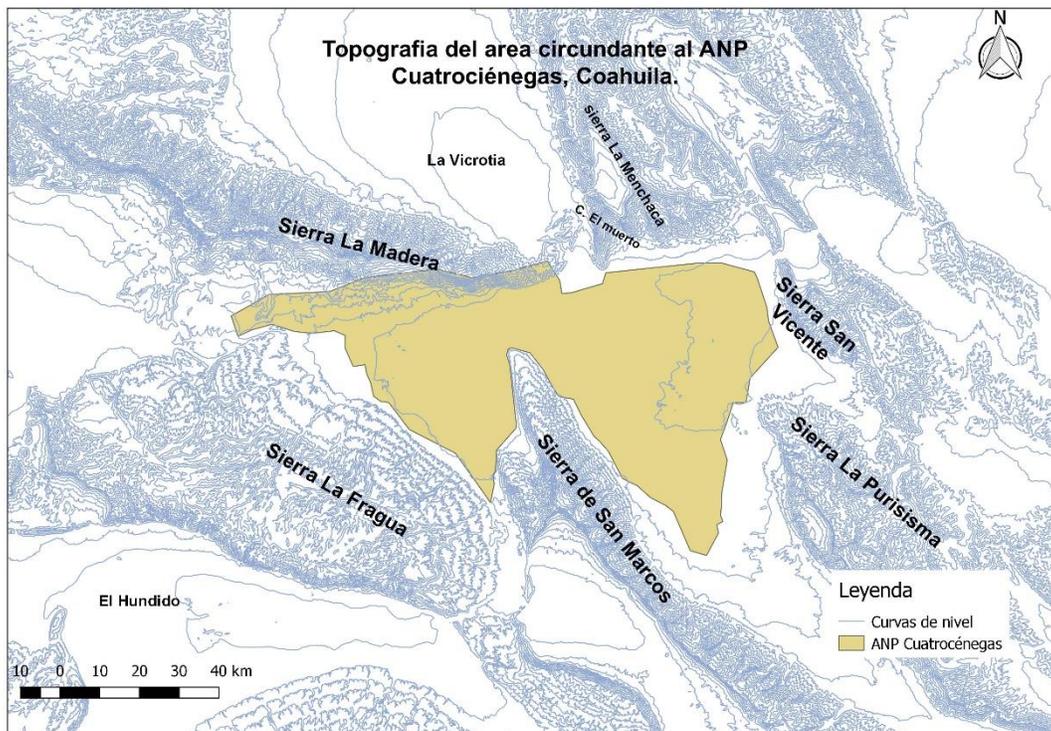


Figura 4. Relieve del Valle de Cuatro Ciénegas Coahuila.

Pérmico. En la cuenca aluvial predominan los depósitos terrígenos del Terciario y Cuaternario (CONANP, 2002).

La formación orogénica, del centro de Coahuila y por ende del área, se inició con el levantamiento de la porción sur del eje estructural marathón-ouachil. Esto provocó

la transgresión del mar en el complejo denominado “Geosinclinal Mexicano”, que existió a lo largo del centro y norte de México desde el Triásico hasta el Cretácico tardío, aproximadamente 160 millones de años (MA) (CONANP, 2002).

Fisiográficamente la región forma parte de la Provincia de la Sierra Madre Oriental y dentro de esta conforma a la subprovincia denominada Sierras y Llanuras Coahuilenses. En esta subprovincia predominan sierras de roca caliza de origen Mesozoico y de origen sedimentario marino, que fueron sometidas a esfuerzos corticales de tensión y compresión, y dieron origen a levantamientos serranos abruptos compuestos de rocas calizas, que se alternan con valles intermontanos orientadas de noroeste a sureste, en su mayoría escarpadas y más bien pequeñas. Sus ejes estructurales están bien definidos y se presentan especialmente en el sur anticlinales alargados con los lomos erosionados. Entre estas sierras se extienden amplias bajadas, lomeríos y llanuras de materiales aluviales. El VCC es una cuenca endorreica dominada por una zona plana de suelos de tipo calcisol, está rodeado por las siguientes sierras: al Norte La Madera y La Menchaca, al Oeste La Purísima y San Vicente, al Sur San Marcos y Pinos y al Sureste La Fragua. Siendo la de La Madera la más alta de todas, con una altitud superior a los 2000 msnm (CONANP, 2002; INE, 1999; CONABIO, 2015).

Geología

El lado oriental del VCC está dominado por piedra caliza de carbonato cretáceo, y el lado occidental está dominado por yeso jurásico. Como consecuencia, los suelos dominantes en la cuenca son los calcisoles y los gipsisoles en el lado este y oeste, respectivamente. Los estratos superficiales están constituidos por rellenos aluviales y rocas calizas permeables depositadas en un ambiente marino. Dichos estratos están subyacidos por areniscas y rocas metamórficas que constituyen el basamento impermeable (Aldama, 2007).

El VCC es parte de un sistema de formaciones similares que se repiten en toda la Subprovincia de las Sierras y Llanuras Coahuilenses, los estratos geológicos predominantes en las montañas de Coahuila son del Mesozoico, con un piso en la parte central del Estado de formaciones graníticas y en el Norte por estratos

Precámbricos, que, junto con otras rocas del Paleozoico, indican que en estos sitios hubo una masa de tierra adyacente a un mar del Pérmico. En el Mesozoico, emergen las Sierras de Coahuila y el mar se reduce formando la península de Coahuila, los depósitos de yeso en la parte central de Coahuila indican la línea costera y la recesión del mar. Los depósitos ígneos del Terciario, y los sedimentos lacustres se encuentran erosionados, pero no modificados, lo mismo sucede con los conglomerados depositados en los valles intermontanos y en los pies de monte (INE, 1999).

En el extremo sureste del VCC, sobre la sierra hay yacimientos metálicos (ver tabla 1), que fueron explotados desde el siglo pasado por una mina que llegó a ser muy importante regionalmente, llamada Reforma, la cual ya no se encuentra en operación (INE, 1999).

Tabla 1. Yacimientos metálicos presentes en Cuatro Ciénegas Coahuila. Fuente: SGM-2, 2013.

Nombre del yacimiento	Sustancia	Estado	Observaciones
Orozco	Zn, Cu, Pb	Inactivo	La localidad consiste en un tiro inclinado de 8 m de profundidad aproximadamente, que está labrado en la caliza de la Formación Aurora de edad Cretácico En la bocamina se observa un manto de óxidos de fierro (hematita y limonita) con cantidades subordinadas de calcita y manganeso y está emplazada en la caliza.
Amalia Margarita	U, Mo, Cd, V, Tl, Te, Ti, Zn	Inactivo	En la localidad existe una mina y consiste en un socavón labrado en la caliza de la Formación Aurora y ubicada en la porción nororiente de la sierra San Marcos y Pinos. La obra minera tiene un rumbo NW10°, una sección de 1 x 1.20 x 10 m, aproximadamente. Actualmente se encuentra inundada.

Así mismo se han encontrado yacimientos de minerales metálicos en la Sierra de San Marcos y Pinos (Ver figura 5), los cuales se encuentran actualmente inactivos o no están siendo explotados (SGM-2, 2013).

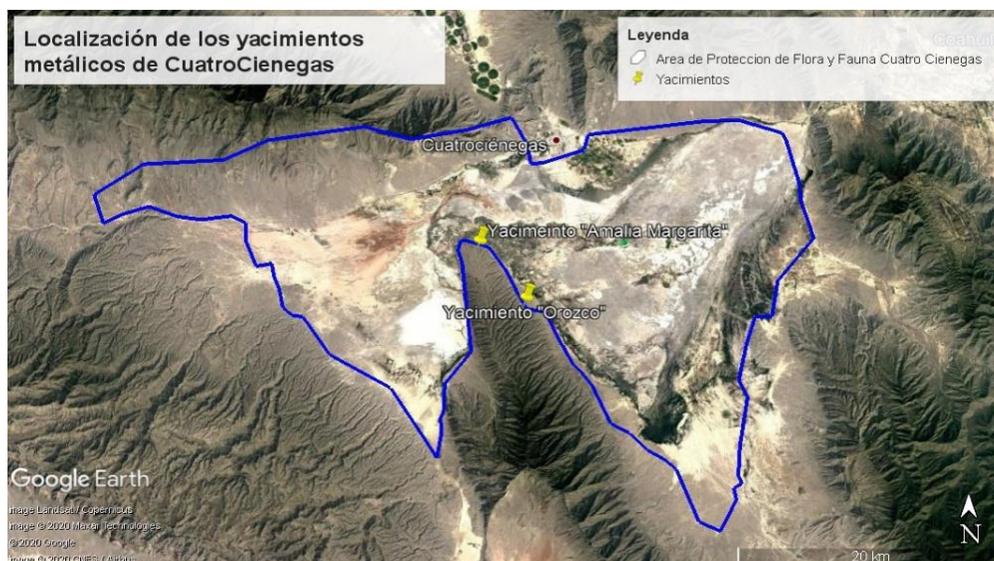


Figura 5. Localización de los yacimientos metálicos de Cuatrociénegas. Fuente: SGM-2, 2013.

Edafología

En la zona, los suelos predominantes son los litosoles de color pardo y textura media, asociados a otros suelos (rendzinas) más profundos y oscuros que subyacen a material calcáreo y se ubican en las regiones más altas. También se encuentran a los litosoles asociados con regosoles calcáreos. En las bajadas de algunas sierras como La Madera, predominan xerosoles de textura media y le siguen el regosol calcáreo (Ver figura 6) (CONANP, 2002; INE, 1999).

En zonas donde se acumula el agua se encuentran xerosoles lúvicos y gypsicos que presentan problemas de salinidad y sodicidad. Además, se encuentran suelos lacustres o aluviales muy alcalinos, de tipo solonchak órtico. En las sierras que rodean al APFF de Cuatrociénegas predominan los suelos rocosos de tipo litosol, suelos someros con profundidades de 5 a 10 cm. En el piso del Valle se presentan suelos de tipo aluvial, que son el resultado del acarreo y acumulación de materiales hacia las partes más bajas, como solonchak, xerosol, regosol y yermosol de textura

media. Algunos de ellos son de los de tipo salino y yesoso, siendo el producto de la evaporación provocada por las altas temperaturas. Las características químicas de los suelos salinos están determinadas principalmente por el tipo y cantidad de sales presentes; de esta manera en el valle los suelos se agrupan en tres tipos: suelos salinos, sódicos salinos y sódicos no salinos (CONANP, 2002; INE, 1999).

Por su origen, los suelos en su mayoría presentan gran cantidad de sales disueltas del tipo carbonatos, sulfatos como el yeso (presentan por lo menos de 8 a 10 milímetros de salinidad). Estas sales además del suelo se encuentran en solución en las pozas de la región y en forma de sales cíclicas que son transportadas por el viento (INE, 1999).

El VCC cuenta también con afloramientos de yeso, que en algunas partes se presentan como campos de dunas, las cuales son las segundas en extensión en América y se pueden localizar algunas especies gipsófilas endémicas como *Dyssodia gypsophila*, *Erigeron cuatrocienegenis*, *Euphorbia pinkavana* (Conabio, s.f.). También hay áreas con suelos extremadamente salinos que en algunas partes

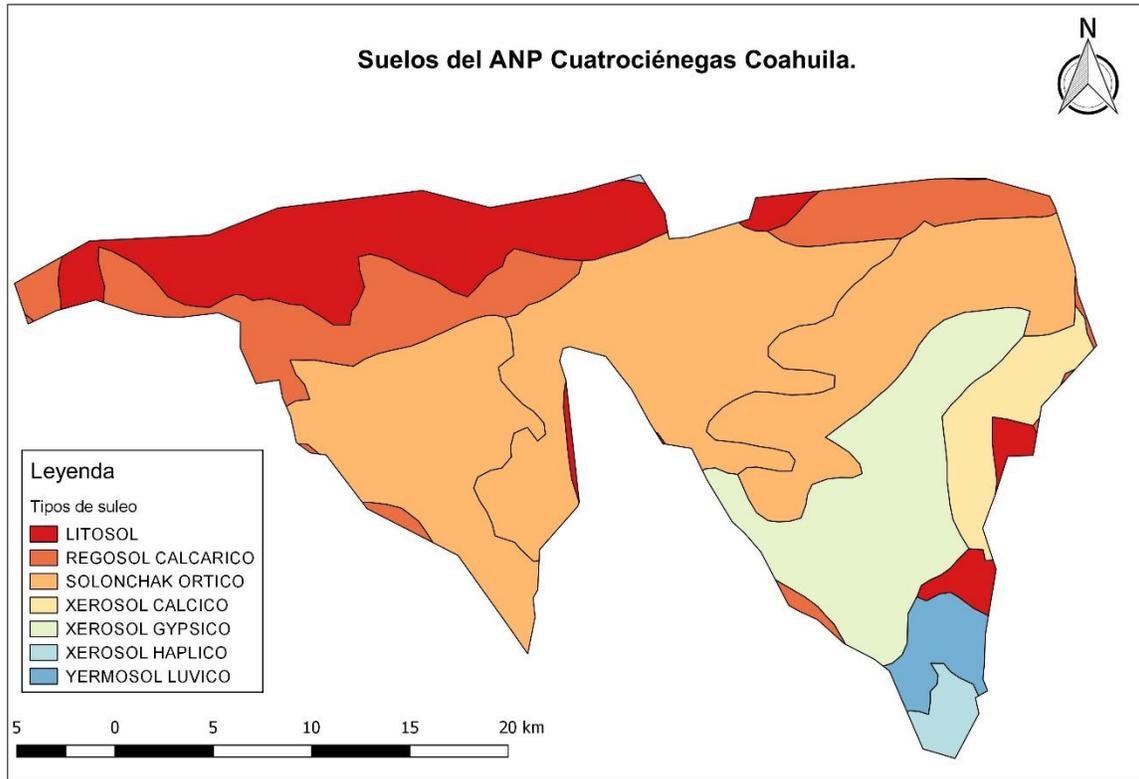


Figura 6. Tipos de suelo del ANP Cuatro Ciénegas.

están cubiertas por matorral o pastizal y otros sin vegetación aparente (CONANP, 2007).

Hidrología

Cuatrociénegas es parte de la Región Hidrológica Bravo-Conchos, dentro de la Cuenca Presa Falcón-Río Salado, de acuerdo con la disponibilidad media anual de las aguas superficiales nacionales publicada en el DOF (21/09/2020). La Cuenca donde se ubica la zona de estudio tiene una disponibilidad deficitaria de -265.964 millones de metros cúbicos (Mm³) en tanto que en para 2016 la disponibilidad media anual fue de -296.423 Mm³ (DOF, 2016), correspondiendo a la Subcuenca Río Salado-Nadadores. El Valle se encuentra dentro de la zona geohidrológica llamada Cuatro Ciénegas-San Miguel, en la cual se han identificado dos fuentes de agua subterráneas (INE, 1999; CONANP, 2002; CONABIO, 2015). En total, en la zona de Cuatro Ciénegas se utilizan 31.8 Mm³ por año en la agricultura: 14.0 de agua subterránea y 17.8 Mm³ de agua superficial (ver figura 7) (DOF, 2008). Aunque la

recarga es de 25 Mm³/año (ver gráfica 1), por lo que su condición en el acuífero superior es de sobreexplotación (INE, 1999; CONANP, 2002; CONABIO, 2015).

En la cuenca del valle el agua es muy abundante y conforman tres sistemas fluviales; el Río Churince, al sudoeste del valle; el Río Garabatal al Oeste de la Sierra de San Marcos y Pinos, y el Río San Marcos (Los Mezquites), al centro y al Este del valle. También se presentan algunos arroyos, la mayoría de los cuales son permanentes, sin embargo, la mayor parte del agua es subterránea (CONABIO, 2015).

La mayoría de los manantiales se ubican en las faldas de la Sierra de San Marcos y Pinos, formando alrededor de 200 pozas dentro del valle. Estos manantiales son alimentados por la lluvia que se infiltra en las sierras circundantes, generando las zonas de recarga. En particular, el agua de las pozas de VCC proviene de la precipitación sobre la sierra de La Fragua y la sierra San Marcos (Aldama, 2007).

La presencia de manantiales en la zona de VCC se debe al origen de arrecife de las rocas que subyacen al valle. Además, el plegamiento y falla de dichas rocas origina la surgencia del agua subterránea en zonas de debilidad geológico-estructural (Aldama, 2007).

También se encuentran algunos arroyos, como el río Mezquites, la mayoría de los cuales son permanentes, sin embargo, la mayor parte del agua es subterránea. Existen dos lagunas de mayor dimensión dentro del valle llamadas Playitas y Churince, la primera representa un sistema alterado al que llega agua procedente de un canal artificial y la segunda actualmente prácticamente desaparecida (CONANP, 2002).

Originalmente el valle formaba una cuenca cerrada, por lo que es posible que se formaran en la parte más baja pantanos y áreas inundadas someras. En las cartas topográficas de 1964 todavía es posible distinguir algunas de esas áreas. Es en 1887 cuando se exporta por primera vez agua del VCC con propósitos agrícolas, la canalización de algunos de los manantiales de mayor producción de agua ha

disminuido las áreas pantanosas y modificado el patrón de inundación del valle (CONANP, 2002).

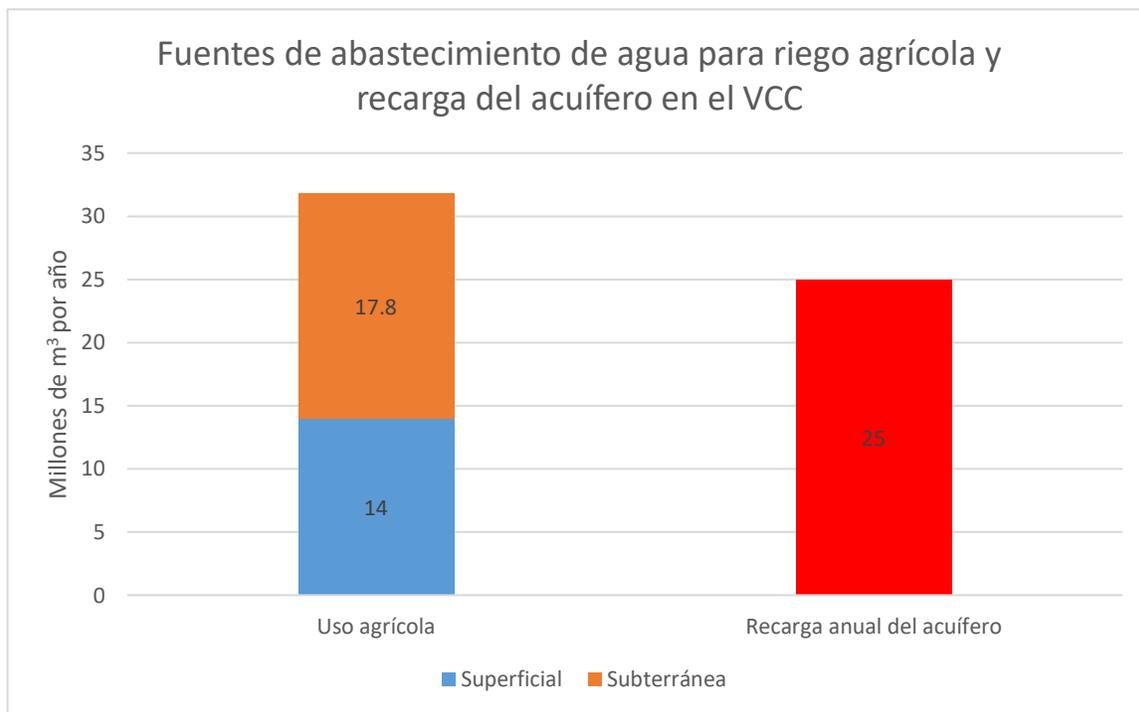


Figura 7. Fuentes de abastecimiento de agua en el VCC para uso agrícola y recarga anual del acuífero.

Fuente: DOF, 2008.

Caracterización ecológica

De acuerdo con las afinidades ecológicas de la flora de la región se definen las siguientes zonas ecológicas en Cuatro Ciénegas:

- Pastizales de zacatón en la base de la cuenca.
- Hábitats acuáticos y semiacuáticos.
- Dunas de yeso.
- Zonas de transición entre pastizales y bajadas.
- Matorral desértico.
- Chaparral.
- Bosques de encino y bosques compuestos (se localizan en las partes altas de las montañas que rodean al valle y en la zona de influencia de la ANP).

- Bosques de coníferas de montaña (ubicado en las partes altas de las sierras que rodean al valle).

La vegetación dominante en el fondo del valle es una pradera de *Sporobolus airoides* (CONANP, 2002).

Considerando estas zonas ecológicas y la clasificación del uso del suelo y vegetación del INEGI (Ver figura 8), Cuatro Ciénegas presenta nueve tipos de vegetación características del lugar: matorral halófito, pastizal halófito, vegetación de hábitats acuáticos y semiacuáticos, vegetación gypsófila, matorral desértico

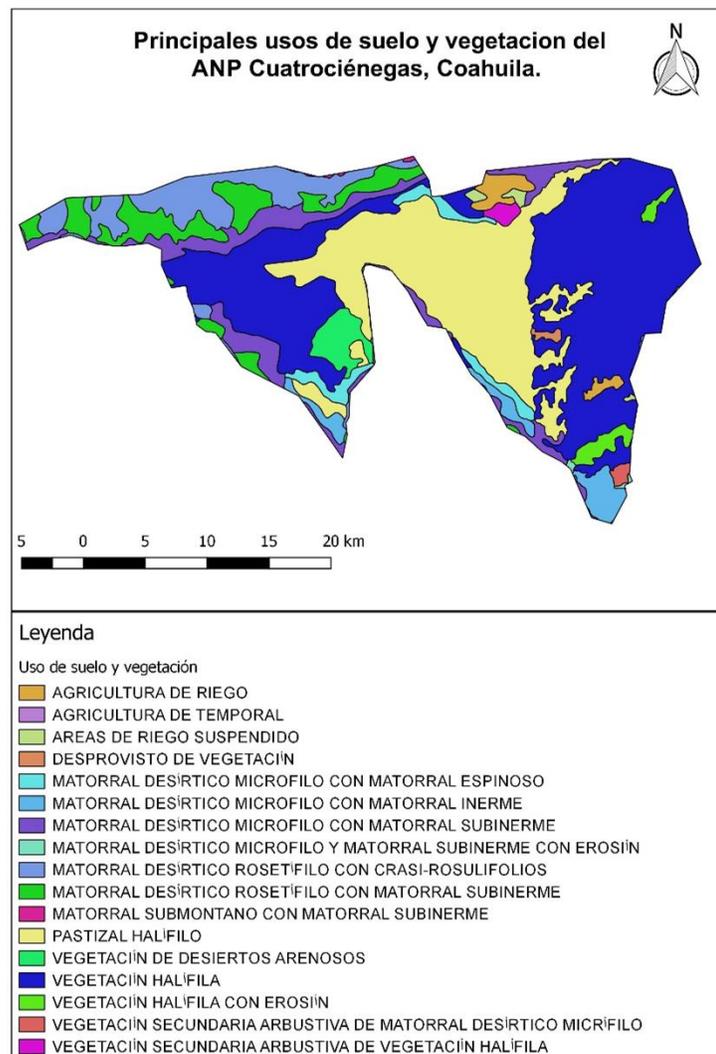


Figura 8. Usos de Suelo y vegetación del ANP Cuatro Ciénegas.

micrófilo, chaparral, matorral submontano, bosque de encino y bosque de pino encino (CONANP, 2002).

De acuerdo con Pinkava (1984), la flora fanerogámica de Cuatro Ciénegas está constituida por 879 taxa, agrupados en 860 especies, 456 géneros y 114 familias; en su mayor parte, éstas son propias de los matorrales xerófilos. Sin embargo, incluye también especies con afinidades en zonas templadas en la parte más elevada y húmedas en las montañas que rodean al valle. Uno de los atributos sobresalientes de la flora de esta región, es que presenta un gran número de endemismos (CONANP, 2002).

La fauna de la región de Cuatro Ciénegas es quizá de las más estudiadas en las zonas áridas de México, el interés surge del elevado número de taxas endémicas de la región. Los grupos más estudiados son: carcinofauna, malacofauna, ictiofauna, herpetofauna, ornitofauna y mastofauna (CONANP, 2002).

Contexto socioeconómico

En 2015 la población en Cuatro Ciénegas registró 13,546 habitantes; el 50.1% hombres y 49.9% mujeres. En comparación a 2010, la población creció 4.1% (Secretaría de Economía, S.f.). Su densidad de población es de 1.22 habitantes por kilómetro cuadrado (km²), lo cual contrasta con los 18.24 hab/Km² que corresponde a cada habitante del estado, uno de los de menor densidad demográfica en México. El 95 % de la población se concentra en la cabecera municipal de Cuatro Ciénegas (García y López, 2017).

El municipio de Cuatro Ciénegas se encuentra seis puntos por encima de la media estatal y 11 por encima de la media nacional en el rubro de población vulnerable por bajos ingresos. Entre los problemas más acuciantes destacan:

- a) la presencia de 5,090 personas en situación de pobreza (43.7% de la población total)
- b) 6,993 habitantes que perciben un ingreso inferior a la línea de bienestar (60.1% de la población total)
- c) 2,761 personas en la línea de bienestar mínimo (23.7% de la población total)

d) Más de la mitad de la población (7,438 personas que corresponde al 63.9% del total) tienen al menos una carencia social (García y López, 2017).

En 2014 los principales sectores industriales en Cuatrociénegas (basados en la producción bruta total) fueron industrias manufactureras (\$597k MX), comercio al por mayor (\$187k MX), comercio al por menor (\$55.6k MX), minería (\$33.2k MX) y servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (\$22.8k MX) (Secretaría de Economía, s.f.). Pese a que no se encontraron cifras oficiales del ingreso económico que genera la actividad agrícola en el VCC y los valles aledaños, esta actividad es determinante para la salud del ecosistema, misma que fue explotada principalmente para la producción de alfalfa, por el corporativo Lala, el cual, para producir un litro de leche, utilizó mil litros de agua durante el invierno y 10 mil en verano (La Jornada, 2006).

Actividades económicas dentro del ANP del VCC

Algunos de los manantiales han sido utilizados tradicionalmente, con fines recreativos por la población local, en algunos de los cuales se desarrollaron balnearios con instalaciones muy sencillas. Por otra parte, el agua que brota de diferentes manantiales es canalizada y utilizada en labores agrícolas, dentro y fuera del valle para el riego agrícola (INE, 1999). Uno de los principales cultivos del área es la alfalfa, debido a que la industria lechera en la Comarca Lagunera, una de las más importantes cuencas lecheras del país con una producción creciente de 900 mil litros diarios, promueve la producción de forrajes, que constituyen 80 % de la superficie cultivada (Ortiz y Romo, 2016). Aunque el desarrollo de la agricultura ha sido importante, la mayor parte del agua superficial es conducida hacia otras zonas agrícolas como Lamadrid, Sacramento, San Buenaventura y Nadadores ubicadas en otros valles, a través de los canales Santa Tecla y Saca Salada (DOF, 2008). De esta forma, la actividad agrícola dentro y fuera del valle, y el aprovechamiento del agua ha causado daños al ecosistema del VCC.

Las actividades más antiguas son la extracción de sal en diversas lagunas del VCC, que ocurren como concentraciones de cloruro de sodio, sodio y magnesio, y cuyo beneficio se realiza mediante un sistema de evaporación, en algunos casos de tipo

rústico, en donde el agua se desvía a zonas inundables y se deja secar. Otros cuentan con construcciones en forma de piletas, donde se almacenan el agua y los más tecnificados bombean el agua del subsuelo y lo llevan a las piletas de evaporación (INE, 1999; SGM, 2008; SGM, 2013). Así también, la explotación de fluorita para la industria metalúrgica, en la porción norte de la sierra de San Marcos y Pinos. Es importante señalar que las lagunas (salmueras) y localidades de yeso se ubican dentro del APFF VCC, normada y regulada por la SEMARNAT) y la CONANP, las cuales no impiden el aprovechamiento de manera sustentable de los recursos minerales (SGM, 2013).

El yeso ha sido también explotado tanto en los campos de dunas, que forma en la zona conocida como Los Arenales, como en puntos aislados donde hay yeso superficial de excelente calidad en cuanto a su pureza (SGM, 2008).

En el valle, se explota con fines comerciales la leña de mezquite, mientras que, en los alrededores del área de protección, se explota la hierba de candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*) (INE, 1999; SGM, 2008).

Problemática

Debido a la creciente demanda de agua en las zonas aledañas al VCC para el riego de alfalfa y a la demanda del recurso por los pobladores de la región, se ha presentado una sobreexplotación del acuífero. Las escasas lluvias han provocado en conjunto la disminución del nivel del agua de los manantiales, las lagunas y las pozas del VCC, llevando a la extinción a varios cuerpos de agua, que eran el hábitat de especies endémicas. En junio de 2006 hubo una alarma debido a que el cuerpo de agua más extendido, conocido como Laguna Churince, prácticamente desapareció en un intervalo de dos meses, coincidiendo con la apertura de una serie de pozos, en el Valle del Hundido. En febrero de 2007 la Laguna se había recuperado importantemente, aunque probablemente no del todo, por lo que su monitoreo es fundamental. El INE ha iniciado su monitoreo, pero es importante analizar diferentes épocas climáticas para tener certeza sobre si existe una disminución en el nivel de agua de la laguna o se trata de oscilaciones naturales a

lo largo del año (INECC, 2016). En los cuerpos de agua cuya explotación ha reducido su volumen, se concentran los contaminantes, y descende el oxígeno disponible, favoreciendo la aparición de especies químicas tóxicas para la mayoría de los organismos tales como el Cd y nitritos. Con la extinción de estos cuerpos de agua, se pierde la información de las condiciones sobre las cuales estos organismos endémicos se han desarrollado a lo largo de millones de años.

¿Por qué es importante estudiar de las pozas del VCC?

¿Qué metales pesados están presentes en las pozas del Valle de Cuatro Ciénegas?

Justificación

El VCC es considerado el humedal más importante dentro del Desierto Chihuahuense y uno de los humedales más importantes en México. A nivel internacional, está clasificado como un sitio RAMSAR, por lo que se lo considera como un humedal prioritario en el mundo (CONANP, 2002). La CONABIO lo incluye entre los sitios prioritarios para la conservación, también dentro de la regionalización de ecorregiones prioritarias para la conservación, elaboradas por el WWF (CONABIO, 2015). Con su alta biodiversidad y más de 70 especies endémicas, este valle se asemeja a las Islas Galápagos en términos de ecosistemas únicos y sumamente diversos (Souza, 2012). La mayor parte de los estudios científicos se han encaminado a conocer la fauna, la vegetación y la microbiota asociada a los ambientes acuáticos y subacuáticos del VCC (CONANP, 2007) dejando de lado la caracterización física y química de estos ambientes acuáticos.

Entender la dinámica, cómo y por qué cambian los ecosistemas en el tiempo es necesario para la conservación de su biodiversidad y es una condición fundamental para una gestión óptima de cualquier área protegida (Uribe, 2015). Los cambios en los ecosistemas pueden ser ocasionados de forma natural o por causas humanas y la intensidad puede variar. Para conocer cómo y por qué cambian los componentes en los ecosistemas es necesario contar con datos en el tiempo (Uribe, 2015). El registro continuo de datos en un área a largo plazo permitirá observar cómo funciona, por qué y qué tanto se transforman los ecosistemas. Sin embargo, para

lograr esto es esencial el establecimiento de la línea de base, ya que mostrará cómo eran las condiciones en el tiempo en la cual se compararon los datos obtenidos. El presente trabajo de investigación pretende incrementar el acervo de datos del VCC, a través del estudio de calidad del agua y los cambios que se han presentado con respecto a las características físicas y químicas del agua en el sistema, además de servir como referencia para estudios en el futuro, ya que no se cuenta con estudios recientes de calidad del agua de los más de 200 manantiales, pozas y lagunas del valle.

Hipótesis

El recurso hídrico del VCC se caracteriza por tener una salinidad elevada, por la evaporación del agua de mar que tuvo lugar en la región hace millones de años. Por lo que el análisis de la calidad del agua mostrará un alto contenido de iones como: sulfatos, magnesio, calcio y algunos metales pesados de presencia natural, así como de algunos elementos traza aportados por las zonas más alejadas del área núcleo del ANP VCC, ya que se encuentran más expuestas a los contaminantes de origen antrópico; así mismo los vientos predominantes del VCC que provienen del Valle del Hundido, mismo que cuenta con actividades industriales que podrían generar aporte de contaminantes a los manantiales, pozas y lagunas del VCC.

Objetivo general

- Realizar la caracterización física y química del agua de 10 manantiales del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila, conocer

Objetivos particulares

- Determinar la calidad del agua de los manantiales: Los Hundidos, el sistema Churince, Poza Azul, y Los Domos para definir si es apta para riego agrícola.
- Identificar variaciones estacionales de los parámetros de calidad del agua en Poza Azul y Manantial-Churince, para conocer su comportamiento de acuerdo con la temporada de estiaje o sequía.

-
- Conocer la época del año donde se presenta una mejor calidad del agua para riego agrícola de los manantiales del sistema Churince.
 - Conocer las variaciones de las características físicas y químicas de laguna Churince en el período 1965-2019, para determinar si hubo influencia del crecimiento poblacional del VCC sobre la calidad del agua.
 - Conocer las variaciones de las características físicas y químicas del manantial Poza Azul en el período 2003-2019, para determinar si hubo influencia del crecimiento poblacional del VCC sobre la calidad del agua.

Método

El presente proyecto de investigación se realizó en tres etapas: campo (ver tabla 2), laboratorio (marzo a noviembre 2019) y gabinete (este último dividido en trabajo preliminar que se realizó de febrero a marzo de 2019, y un trabajo posterior donde se realizó el análisis de bases de datos de noviembre 2019 a junio 2020).

Etapas de gabinete

Se realizó la consulta bibliográfica sistemática para establecer los puntos de muestreo (ver tabla 2 y figura 9), dando así continuidad a los trabajos previos, y atendiendo las zonas con menor cantidad de estudios relacionados con la calidad del agua de la ANP VCC (ver anexo fotográfico).

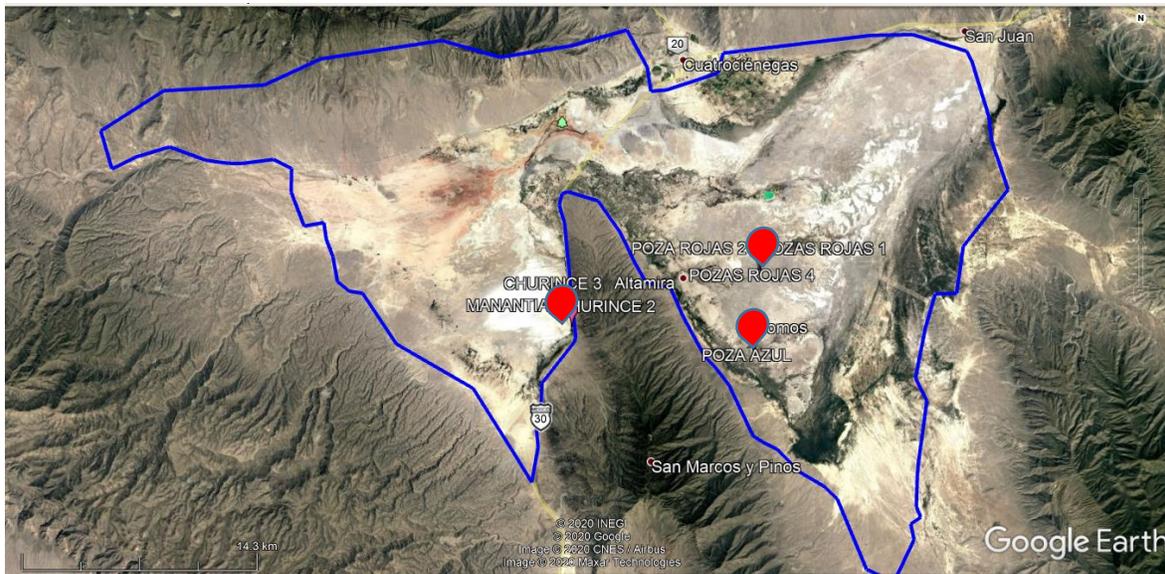


Figura 9. Localización de las zonas de muestreo dentro del ANP VCC.

Etapa de campo

Se realizó el muestreo de agua superficial de los manantiales del ANP VCC Coahuila seleccionados. El muestreo se llevó a cabo del 20 al 22 de marzo de 2019 (estiaje) y de tres manantiales el 18 y 19 de septiembre del 2019 (lluvias) (ver tabla 2).

Se midieron parámetros *in situ* con ayuda de un equipo multiparámetros marca “Thermo scientific” modelo “Star A121”: temperatura, OD, C.E. y pH.

Se colectaron muestras integradas en botellas de polietileno de un litro manteniéndose a una temperatura de entre 2 a 4°C hasta su análisis en el laboratorio adicionando en caso de ser necesario los conservadores respectivos (ver tabla 3).

Lugar	Coordenadas		Fechas de muestreo
	LN	LO	
Sistema Los Hundidos			
Los Hundidos I	26°52'16.30"	102° 1'10.09"	20/03/2019
Los Hundidos II	26°52'	102° 1'	20/03/20219

Los Hundidos III	26°52'18.22"	102° 1'12.34"	20/03/2019
Los Hundidos IV	26°52'16.09"	102° 1'14.75"	20/03/2019
Sistema Churince			
Churince I	21'0.39"	102° 8'38.56"	22/03/2019
Churince II	26°50'55.65"	102° 8'35.64"	22/03/2019
Churince III	26°50'47.94"	102° 8'21.33"	22/03/2019
Manantial Churince	26°50'25.07"	102° 8'3.85"	22/03/2019 y 18/09/2019
Sistema Poza Azul			
Poza Azul	29'39.66"	102° 1'27.72"	21/03/2019 y 19/09/2019
Domos	26°49'42.04"	102° 1'23.43"	19/09/2019

Tabla 2. Puntos de muestreo de los manantiales del VCC.

Tabla 3. Parámetros seleccionados para su análisis en laboratorio.

Prueba	Método	Conservador	Bibliografía empleada
Alcalinidad total	Indicadores	Sin conservador	NMX-AA-036-SCFI-2001
Cloruros totales	Mhor	Sin conservador	NMX-AA-073-SCFI-2001
Metales pesados totales	Digestión ácida	HNO ₃	NMX-AA-051-SCFI-2001
Nitratos	Ácido fenoldisulfónico	H ₂ SO ₄	Gómez et al., 2014
Nitritos	Griess	Sin conservador	NMX-AA-099-SCFI-2006
Ortofosfatos	Cloruro estanoso	Sin conservador	Gómez et al., 2014
Ion sulfato	Turbidimétrico	Sin conservador	NMX-AA-074-SCFI-2014

Etapa de laboratorio

El material de vidrio empleado fue diverso, el cual fue lavado con detergente especial para pruebas analíticas, y acidulado con H₂SO₄, HCL o HNO₃ al 10% de acuerdo con las pruebas realizadas (ver tabla 4) durante 24 h, y finalmente enjuagado con agua destilada.

Tabla 4. Limpieza del material de cristalería.

Prueba	Detergente	Acidificación (sol. 10%)
Alcalinidad total	Extrán 5%	H ₂ SO ₄
Metales pesados		HNO ₃
Cloruros		H ₂ SO ₄
Nitratos		HCl
Ortofosfatos		HCl
Sulfato		HCl

Se llevó a cabo la cuantificación de 14 metales totales (ver tabla 5) incluidos los mayoritarios (Na, Ca, K, Mg) en muestras filtradas y acidificadas por el método espectrofotométrico de absorción atómica.

En muestras a las que no se añadió ningún conservador, se llevó a cabo la determinación de seis aniones mayores (ver tabla 5).

Tabla 5. Pruebas, métodos y técnicas aplicables para la evaluación de los componentes del agua de los manantiales de VCC.

Prueba	Método	Filtración	Técnica	Bibliografía empleada	Anexo
Alcalinidad total: Carbonatos y bicarbonatos	Indicadores	No	Titrimetría	NMX-AA-036-SCFI-2001	F
Cd, Ca, Co, Cu, Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, K, Se, Na, Zn.	Digestión ácida	No	Absorción atómica	NMX-AA-051-SCFI-2001	G
Cloruros	Mhor	No	Titrimetría	NMX-AA-073-SCFI-2001	E
Nitratos	Ácido fenoldisulfónico	Si	Espectrofotometría UV	Gómez et al., 2014	B
Nitritos	Griess	Si	Espectrofotometría UV	NMX-AA-099-SCFI-2006	C
Ortofosfatos	Cloruro estano	Si	Espectrofotometría UV	Gómez et al., 2014	D
Sulfato	Turbidimétrico	No	Espectrofotometría UV	NMX-AA-074-SCFI-2014	A

El control de calidad se llevó a cabo con la cuantificación por triplicado de los diferentes parámetros enlistados en la tabla 5, empleando reactivos de grado analítico y siguiendo los procedimientos indicados por la bibliografía de cada método, requiriendo en algunos casos un filtrado previo a su análisis para evitar interferencias (ver tabla 5), se pueden consultar especificaciones de los procedimientos en los anexos de cada método (ver tabla 5).

Etapa de gabinete (procesamiento de datos)

Los resultados fueron capturados en una hoja de cálculo en Microsoft Office Excel, para ser analizados. Se contrastó la concentración obtenida contra la temporada en que se realizó la determinación en el caso de manantial Churince y Poza azul; asimismo, se compararon con los valores de la Ley Federal de Derechos (LFD) publicada el 31 de diciembre de 1981 (última reforma 09-12-2019) que establece los lineamientos para un el certificado de calidad del agua para el uso 2 o de riego agrícola. Con base en lo anterior se determinó la época del año en la cual la calidad del agua de los manantiales cumplía con la calidad para dicho uso.

El análisis de los resultados de cada manantial fue organizado de acuerdo con la calidad del agua, para ello, se asignó una puntuación a cada uno de los 12 sitios de muestreo para totalizar los siguientes parámetros: pH, O.D., C.E., ion sulfato, nitritos, nitratos, cloruros, ortofosfatos, bicarbonatos, carbonatos, TAC, Cu, Zn, Fe, Se, Ni, Pb, Cd, Mn, Cr, Co, K, Ca, Na y Mg. Los sitios de muestreo tuvieron un intervalo entre 1 a 12, es decir 1 para el de menor calidad y 12 para el mejor.

La clasificación de familias de agua se realizó mediante el diagrama de Piper, el cual consta de dos triángulos equiláteros ubicados lateralmente y un rombo al centro (ver figura 22): el triángulo izquierdo representa las concentraciones de los cationes, el derecho, las de los aniones y, el rombo representa la intersección de las concentraciones de los cationes y aniones, y definiendo la familia de agua a la que pertenece la muestra. Los diagramas de Piper se crearon mediante el software AquaChem 4.0, un programa diseñado por Waterloo Hydrogeologic inc.

Se realizó el diagrama de salinidad para la clasificación de las aguas de riego, empleando el programa/aplicación para Microsoft Excel “Easy quim 5.0 (2012)” creado por el Instituto de Diagnóstico Ambiental e Investigación del Agua (IDAEA) de Barcelona basado en los lineamientos que establece la USDA para la clasificación de las aguas con respecto a su salinidad (USDA, 1955).

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) empleando el software estadístico “Statgraphics Centurion XVII” ya que esta técnica multivariante permite el tratamiento conjunto de las variables observadas reduciendo así el número de datos, y consiguiendo identificar un grupo de variables ficticias formadas a partir de la combinación de las anteriores observadas. De esta manera se obtuvieron las zonas de muestreo estadísticamente similares empleando las 11 variables que presentaban una mayor variabilidad, reflejadas en un gráfico con las dos componentes principales (gráfica 2D). Así mismo, se obtuvieron los valores de ponderación de las variables para cada uno de los componentes y el gráfico de sedimentación de este.

Posteriormente se compararon los resultados obtenidos en el presente trabajo con los de los estudios previos para conocer el cambio de la Laguna Churince (1965-

2019) y Poza Azul (2003-2019) a lo largo del tiempo y de esta manera visualizar el cambio que ha tenido la sobreexplotación del acuífero por la actividad humana en la calidad del agua de las diferentes pozas y manantiales del VCC.

Resultados y análisis

En las tablas 6 y 7 se observan los resultados de calidad del agua en época de estiaje y en época de lluvias, respectivamente. Se compararon los resultados del presente estudio con los valores máximos permitidos que establece la LFD (Ley Federal de Derechos, 2019) con respecto al certificado de calidad del agua para el uso 2 o riego agrícola.

En la tabla 6 y 7 para los valores que sobrepasan el valor que establece la LFD se coloreó de color rojo la casilla, para los que quedan dentro del rango se coloreó de color verde y para los que se carece de valor de referencia se dejó en color blanco.

Tabla 6. Resultados de las pruebas de agua de los manantiales en época de estiaje.

Parámetro	Hundidos I	Hundidos II	Hundidos III	Hundidos IV	Poza azul	Churince I	Churince II	Churince III	Manantial
Fecha	20/03/19	20/03/19	20/03/19	20/03/19	21/03/19	22/03/19	22/03/19	22/03/19	22/03/19
Altitud (m)	713	712	712	712	716	765	766	775	770
Hora	11:03	10:55	10:55	11:09	11:20	09:25	09:55	10:15	10:45
pH	6.1	4.58	9.6	8.66	7.14	8.21	9.57	9.68	7.03
Temperatura (°C)	25	25.2	22.6	19.12	24.7	23	23.9	23.1	28.7
O.D. (ppm)	8.3	10.8	10.60	9.22	6.04	2.21	5.50	9.07	7.12
C.E. (µS)	59900	25200	19800	4230	1650	5390	8760	4870	2020
ión Sulfato mg/L	2388.889	2392.857	6051.587	1170.64	523.810	11071.43	3682.540	1376.984	503.968
Nitritos mg/L	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.030	0.001	0.001	0.000
Nitratos mg/L	0.096	0.120	0.301	0.0475	0.592	0.616	0.096	0.048	0.797
Cloruros mg/L	744.450	992.6	3275.580	446.67	198.52	5459.3	2282.980	397.04	198.52
Ortofosfatos mg/L	0.037	0.448	0.772	0.032	0.074	0.143	0.055	0.060	0.041
Bicarbonatos mg/L	10	20	50	10	10	70	10	5	10
Carbonatos mg/L	125	120	285	105	45	355	85	35	45
TAC mg/L	135	140	335	115	55	425	95	40	55
Cu mg/L	0.016	0.016	0.016	ND	0.016	0.033	0.016	0.016	0.016
Zn mg/L	0.017	0.017	ND	ND	ND	0.017	ND	ND	0.017
Fe mg/L	0.1	ND	ND	0.1	ND	0.1	0.1	0.1	0.1
Se mg/L	0.2	0.08	0.035	0.04	0.035	2.21	1.6	0.2	0.12
Ni mg/L	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05	0.1	0.05	ND	ND
Pb mg/L	ND	0.117	0.167	0.144	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1
Cd mg/L	0.05	0.05	0.1	0.075	0.05	0.075	0.1	0.5	0.1
Mn mg/L	ND	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	ND	ND	ND
Cr mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Co mg/L	0.4	0.4	0.733	0.04	0.2	0.2	0.467	0.4	0.4
K mg/L	50.695	21.171	78.085	10.435	2.609	79.863	41.176	8.913	1.957
Ca mg/L	424.67	279.48	626.08	238.46	176.92	655.07	421.91	261.53	831.88
Na mg/L	2980.27	870.76	4026.96	386.34	97.6	4074.9	3052.18	382.25	88
Mg mg/L	3477.855	2021.858	9440.285	1151.927	459.184	8204.397	3550.894	1090.703	594.104

C.E.: Conductividad Eléctrica; O.D.: Oxígeno disuelto.

En las muestras de la temporada de lluvias se obtuvieron los resultados siguientes:

Tabla 7. Resultados de las pruebas de agua de los manantiales en época de lluvias.

Parámetro	Manantial	Poza Azul	Domos	Valor referencia (mg/L)
Fecha	18/09/19	19/09/19	19/09/19	-
Altitud (m)	770	716	717	-
Hora	18:02	14:30	12:49	-
pH	7.190	6.620	8.720	6.0-9.0
Temperatura (°C)	31	31	31	-
Oxígeno (ppm)	5.3	6	1.7	-
C.E. (µS)	2420	1820	4460	-
Ión Sulfato mg/L	511.905	527.778	8452.381	250
Nitritos mg/L	0.0018	0.0008	0.0016	-
Nitratos mg/L	0.217	0.471	0.265	-
Cloruros mg/L	1985.200	694.820	1786.680	-
Ortofosfatos mg/L	0.069	0.037	0.092	-
Bicarbonatos mg/L	15	10	35	-
Carbonatos mg/L	30	75	80	-
TAC mg/L	45	85	115	-
Cu mg/L	0.016	0.016	0.016	0.2
Zn mg/L	0.017	0.017	0.017	2.0
Fe mg/L	0.150	0.100	0.200	5.0
Se mg/L	0.157	0.800	2.432	0.02 (selenato)
Ni mg/L	ND	ND	0.100	0.2
Pb mg/L	ND	ND	0.100	0.5
Cd mg/L	0.500	0.150	0.150	0.1
Mn mg/L	ND	ND	ND	0.2
Cr mg/L	ND	ND	0.050	0.1
Co mg/L	0.200	0.200	0.400	-
K mg/L	3.043	2.717	89.709	-
Ca mg/L	179.480	142.700	487.670	-
Na mg/L	239.590	124.800	4074.900	-
Mg mg/L	416.100	443.311	7184.789	-

C.E.: Conductividad Eléctrica; O.D.: Oxígeno disuelto.

Análisis de resultados

Los manantiales se clasificaron de acuerdo con la calidad de sus aguas y por temporada del año. Para la clasificación de calidad de agua se tomó como referencia Ley Federal de Derechos (LFD) publicada el 31 de diciembre de 1981, última reforma 09-12-2019, que establece los lineamientos para un el certificado de calidad del agua para el uso 2 o de riego agrícola:

Época de lluvia: Poza Azul presentó la mejor calidad seguido de Manantial-Churince y finalmente Los Domos.

Época de estiaje: Los sitios con mejor calidad fueron Poza Azul, seguido Manantial-Churince, Los Hundidos IV, Churince III, Los Hundidos I, Los Hundidos II, Churince II, Los Hundidos III y finalmente Churince I, con la menor calidad del agua.

Análisis de las características más sobresalientes de los manantiales del VCC durante la temporada de estiaje
Poza Azul



Figura 10. En Poza Azul, 21 de marzo 2019.

Este manantial se caracteriza por la presencia de agua cristalina de color azul turquesa donde se puede apreciar la presencia de estromatolitos (ver figuras 10, 11 y 12), forma parte de la zona núcleo del ANP, por lo que casi no tiene contacto con el hombre por lo que solo se pueden realizar actividades de investigación con la finalidad de la protección de los recursos naturales del VCC. El agua presentó un pH de 7.14, saturación de oxígeno de 72.8% a temperatura de 24.7°C. Registró la concentración más baja de cloruros (198.52 mg/L), nitritos (0.0002 mg/L), Cd (0.05 mg/L) y una C.E. (1650 μ S), no se detectó la presencia de Fe, Cr, Ni y Zn totales.



Figura 11. Poza Azul, 21 de marzo del 2019.

De acuerdo con el Departamento de Aguas de Iowa, el pH adecuado para los ambientes de agua dulce o continental varía de 6.5 a 8.5 por lo que el agua de la Poza Azul se encuentra dentro de estos valores óptimos (Iowa Department of Natural Resources, 2009), acercándose al pH del agua pura pese a la gran cantidad de sales disueltas. Presenta una saturación de oxígeno del 72.8% equivalente a 6.04 mg/L a 24.7°C, cuando el agua contiene todo el oxígeno disuelto a una temperatura dada, se dice que está 100 por cien saturada (California State Water Resources Control Board-b, s.f.). El agua puede estar sobresaturada de oxígeno bajo ciertas condiciones ("rápidos de agua blanca", o cuando las algas crecen y producen oxígeno más rápidamente del que puede ser usado o liberado a la atmósfera). De esta manera se puede ver que la producción/consumo de oxígeno se encuentra equilibrada (California State Water Resources Control Board-b, s.f.). La cantidad total de sustancias disueltas ionizadas cuantificadas como C.E. puede estar relacionada con la relativa baja concentración de Cl^- (198.52 mg/L), Ca (176.92 mg/L), Na (97.6 mg/L) y Mg (459.184 mg/L). Los nitritos (NO_2^-) registraron una concentración de 0.0002 mg/L, lo que refleja la ausencia de contaminación reciente ya que son sumamente inestables y en presencia de oxígeno tienden rápidamente

a transformarse en nitratos (NO_3^-), estos a su vez son más estables que los NO_2^- . Los NO_3^- provenientes de las actividades humanas incluyen: la escorrentía de terrenos cultivados, efluentes de lagunas y tanques sépticos, fertilización excesiva con nitrógeno, deforestación y el cambio en la materia orgánica del suelo como resultado de la rotación de cultivos (Heaton, 1985), al ubicarse en la zona núcleo de APFF del VCC, esta poza se encuentra alejada de las diferentes actividades del hombre, por lo que el origen de los NO_3^- y NO_2^- no es antrópico, sino es derivado de la descomposición de la materia orgánica y por los aportes de las bacterias nitrificantes.



Figura 12. Estromatolitos en Poza Azul, 21 de marzo del 2019.

El cadmio (Cd) es un elemento químico bastante móvil y soluble en agua a pH ácidos. Las principales rutas por las que el cadmio ingresa al cuerpo humano son ingestión de alimentos de origen vegetal e inhalación de polvos que contienen cadmio. El riñón es el órgano principal afectado por la exposición de este elemento. De acuerdo con la USEPA (2007) los criterios agudos y crónicos de Cd en aguas dulces son de 0.002 y 0.00025 mg/L respectivamente, y para agua dura de 100 mg/L. La dureza (cantidad de sales de Ca y Mg) del agua es el factor de mayor

influencia en la toxicidad del cadmio. Se ha observado que la toxicidad del Cd disminuye con el aumento en la dureza (Casares, 2012), aunque no se cuantificó el valor de la dureza en el agua de los manantiales del VCC, se sabe que tienen aguas duras puesto por la elevada concentración de sales de Mg y Ca (CONABIO, s.f.). En función del pH, los complejos de Cd con cloruros y sulfatos son importantes a pH ácidos o cercanos a la neutralidad y la complejación por carbonatos ocurre en condiciones de alcalinidad (pH de 9 a 10) (U.S. EPA, 2007). Se esperaría encontrar complejos de Cd con sulfatos y cloruros porque el pH en la Poza Azul es prácticamente neutro y una baja toxicidad por la presencia de abundantes sales de Ca y Mg. La presencia natural del Cd en la zona podría ser el principal aporte de este mineral al agua de las pozas, porque el SGM reporta yacimientos en las inmediaciones del ANP VCC particularmente en la Sierra de San Marcos y Pinos, que forma parte de la cuenca (SGM, 2013). Johannesson et al. 2004 y Wolaver et al. 2013, demostraron por medio de estudios isotópicos que la Sierra de San Marcos aporta minerales por medio del agua a los manantiales del VCC.

La movilidad del selenio (Se) depende de la diferente forma química en las que está presente (U.S. EPA, 2007). Información sobre la especiación química de este elemento en el agua subterránea proporciona parte del contexto para comprender los procesos que pueden controlar su atenuación dentro de los acuíferos. Las medidas que se pueden utilizar para evaluar la especiación química del Se incluyen la determinación de su concentración total disuelta junto con la cuantificación de especies químicas individuales (inorgánicos u orgánicos) (U.S. EPA, 2007). Los manantiales del VCC reciben aportes regionales de acuíferos carbonatados (mesogénico) con contribuciones de origen profundo (endógeno) del manto que asciende a lo largo de fallas en el lecho. En la mayoría de los suelos es más común encontrar (SeO_3^{2-}) y diversas formas de (SeO_4^{2-}) ya que estas formas aniónicas son altamente solubles, móviles, biodisponibles y potencialmente tóxicas. Las formas orgánicas proceden principalmente de la descomposición de plantas acumuladoras de Se (Lyons, 2007).

En los suelos alcalinos, como los del VCC se presenta una mayor concentración de Se que los suelos ácidos. En los suelos alcalinos, este elemento se encuentra como selenito (SeO_3^{2-}), el cual se oxida y se convierte en selenato (SeO_4^{2-}) que es soluble (Mehdi, 2013). Por el contrario, en los suelos ácidos, el (SeO_3^{2-}) está formando complejos insolubles con hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) y, por tanto, está poco disponible (Lyons, 2007). El Se puede encontrarse en el suelo en varias formas: como Se elemental, como sales de (SeO_4^{2-}) y (SeO_3^{2-}) férrico o en su forma orgánica.

En el presente trabajo, se realizó la cuantificación de Se, es difícil conocer la concentración de selenato (SeO_4^{2-}) que se encuentra en los manantiales, que es la forma química del Se que aparece en la LFD, y que es la que cuenta con un límite máximo permisible (LMP) en dicha ley. El criterio crónico para Se en aguas dulces es de 0.005 mg/L con recomendación para un criterio agudo pendiente de revisión (U.S. EPA, 2006, U.S. EPA, 2007). Un ejemplo de dónde puede aplicarse este criterio es un sitio donde descargan aguas subterráneas contaminadas en aguas superficiales. La concentración de Se en todas las muestras supera lo establecido por la U.S. EPA en diferentes órdenes de magnitud, lo que refuerza la idea de que estas aguas no son adecuadas para el riego agrícola y para la vida acuática (U.S. EPA, 2006).

Manantial Churince

El Manantial Churince se ubica al pie de la Sierra de San Marcos y Pinos, a un costado lado una carretera poco transitada y pese a esto se observó la presencia de una gran cantidad de animales como peces, reptiles e insectos (ver figura 13). E agua del manantial tuvo un pH prácticamente neutro (7.03), los valores más bajos de sulfatos con 503.96 mg/L, los valores más altos de registrados en el presente estudio NO_3^- con 0.78 mg/L, una concentración de NO_2^- fue de 0.0006 mg/L, posiblemente por su excelente concentración de oxígeno disuelto, presentando una saturación de 92.5% a una temperatura de 28.7°C. En comparación con los demás sitios analizados, El Manantial Churince registró los valores más bajos en Cl^- de 198.52 mg/L, Na 88 mg/L y K 1.957 mg/L. Además registró la concentración más

elevada de Ca (831.88 mg/L), Pb (0.1 mg/L), Cd (0.1 mg/L) y Se (0.12 mg/L). No se detectó la presencia de Cr, Ni y Mn.



Figura 13. Manantial Churince, 22 de marzo de 2019.

El pH del Manantia Churince (7.03) se encuentra dentro del rango adecuado para los ambientes de agua dulce o continental (Iowa Department of Natural Resources, 2009), pese a la gran cantidad de sales disueltas. Presenta una saturación de O.D. (92.5%) equivalente a 7.12 ppm a 28.7°C, por lo que la producción/consumo de oxígeno se encuentra equilibrada, posiblemente por la presencia de organismos fotosintéticos, que son el soporte de la cadena trófica. (California State Water Resources Control Board-b, s.f.). La baja C.E. está relacionada con la relativamente baja concentración de cloruros (198.52 mg/L), ion sulfato (503.968mg/L), Na (88 mg/L), K (1.957 mg/L) y Mg (594.104 mg/L) valores que se encuentran dentro de los más bajos registrados en este trabajo. La prácticamente ausente concentración de NO_2^- (0.0002 mg/L) refleja la ausencia de contaminación reciente porque son sumamente inestables y en presencia de oxígeno tienden a transformarse en nitratos, mismo que son más estables (Heaton, 1985), Sin embargo, se registraron los vaores más elevado de nitratos (0.797 mg/L), posiblemente por la ocurrencia natural/antrópica, producto de la descomposición de materia orgánica asociada a la presencia de peces, tortugas, aves y plantas. Debido a que se encuentra a pie de montaña y alejado de zonas de cultivo o poblaciones humanas, los aportes de compuestos nitrogenados y Pb (0.1 mg/L) por parte del hombre pueden estar relacionados con su cercanía a la carretera estatal No. 30 (San Pedro de las Colinas-Cuatro Ciénegas), ya que se observan desechos humanos como llantas, envases de PET y envoltorios de diversos productos.

El cadmio (Cd) es bastante móvil y soluble en agua a pH casi neutro. (U.S. EPA, 2007), y su toxicidad disminuye cuando aumenta la dureza del agua (Casares, 2012). La complejación por carbonatos es importante y se lleva a cabo a valores de pH entre 9 y 11 (U.S. EPA, 2007); por lo que se esperaría encontrar complejos de Cd con sulfatos y cloruros debido al pH prácticamente neutro misma condixión observada en la Poza Azul.

Los Hundidos IV

Los Hundidos IV es la poza más grande de la zona y se caracteriza por tener aguas transparentes, hogar de diferentes especies de peces, aves e insectos (ver figura

14 y 15). EL agua de esta poza presentó un pH de 8.66, una concentración de oxígeno disuelto de 9.44 mg/L, una C.E. de 4230 μ S, una concentración de 0.0002 mg/L de nitritos, 0.0475 mg/L de nitratos y 0.032 mg /L de ortofosfatos. Es importante mencionar que fue el único sitio en el que no se detectó Cu, Zn y Cr.

De acuerdo con el departamento de aguas de Iowa el pH adecuado para los ambientes de agua dulce o continental varía de 6.5 a 8.5; por lo que, el agua de esta poza se encuentra fuera del rango óptimo (8.66) (Iowa Department of Natural Resources, 2009), A pesar de lo anterior se observó la presencia de peces, larvas de diversos insectos, pastos, y algunos otros organismos lo que refleja el grado de adaptación de estos organismos a las condiciones de este sitio. La C.E. (4230 μ S) es del doble en comparación con el Manantial Churince en esta misma época, esto puede explicarse porque la concentración de iones es en algunos casos hasta tres veces superior; ion sulfato (1170.634 mg/L), cloruros (446.67 mg/L), Na (386.34 mg/L), Ca (238.46 mg/L), K (10.43 mg/L) y Mg (1151.92 mg/L). El agua de este sitio



Figura 14. Los Hundidos IV, 20 de marzo del 2019.

presentó una buena saturación de oxígeno (99.2%) que equivale a 9.22 ppm a 19.12°C; de esta manera se puede ver que la producción/consumo de oxígeno se encuentra equilibrada (California State Water Resources Control Board-b, s.f.). Se observó una ausencia de nitritos (0.0002 mg/L), nitratos (0.047 mg/L) y ortofosfatos (0.032 mg/L), lo que podría deberse a su aislamiento regional y a la ausencia de contaminación (Heaton, 1985), porque se encuentra cerca de la zona núcleo del APFF del VCC.



Figura 15. Los Hundidos IV, 20 de marzo del 2019.

Como se mencionó anteriormente la disminución de la toxicidad del Cd se debe a un aumento de la dureza del agua (Casares, 2012), por lo que el agua de este sitio puede considerarse como dura por la alta concentración de sales de Mg y Ca (CONABIO, s.f.). En función del pH los complejos de Cd con carbonatos ocurren a pH de 9 a 11 (U.S. EPA, 2007); por esta razón se esperaría encontrar este tipo de complejos producto del pH básico registrado en esta poza, y esta clase de complejos no representan un riesgo de toxicidad; sin embargo es importante mantener el monitoreo ya que es un elemento no esencial.

Churince III

Parte de la corriente de agua que alimenta al sitio Churince III (ver figura 16) está practicante extinta, en el monitoreo del muestreo, se observaron algunos remanentes (“charcos”). El agua de este sitio, presentó un pH alcalino (9.68), 9.07 mg/L de O.D., y una C.E. de 4870 μ S. En comparación con los demás sitios analizados, Churince III presentó las concentraciones más bajas de NO_3^- (0.048 mg/L), bicarbonatos (5 mg/L) y TAC (40 mg/L); así como la concentración más alta



Figura 16. Churince III, 22 de marzo de 2019.

registrada de Cd (0.5 mg /L). Sin embargo no se detectó Zn, Ni, Mn ni Cr.

El pH alcalino de este sitio, cercano a las 10 unidades (9.68), puede ser el resultado de la gran cantidad de sales disueltas en la matriz acuosa; por lo que hace que, su agua sea considerada como no adecuada para la vida en cuerpos de agua continentales según el departamento de aguas de Iowa (Iowa Department of Natural Resources, 2009).

El pH registrado en este punto de muestreo promueve la formación de complejos de Cd y carbonatos como ocurre en las diferentes pozas estudiadas, al igual que la baja probabilidad de riesgo de toxicidad por la gran cantidad de sales de Ca y Mg.

Los Hundidos I

Los Hundidos I, es una pequeña poza con escasos centímetros de profundidad, su fondo es de color beige/amarillo y presenta aguas claras (ver figura 17). Esta poza registró un pH de 6.1, una concentración de O.D. de 8.3 mg/L, y es el sitio con los valores más altos de: conductividad con 59900 μ S, 744.45 mg Cl⁻/L, 3477.85 mg/L de Mg, 2980.27 mg Na/L y 424.67 mg Ca/L, 0.1 mg Ni/L. No se detectó Pb, Mn y Cr totales. Las sales disueltas en el agua confieren la C.E. elevada dentro de las aguas naturales (USDA, 1955), en particular el VCC es rico en sales de cloruro de magnesio y de sodio, remanentes del antiguo mar del valle, las sales se encuentran distribuidas de manera heterogénea concentrándose, principalmente en las zonas bajas (SGM, 2013). En el valle se presenta una combinación de agua dulce y salada,



Figura 17. Los Hundidos I, 20 de marzo del 2019.

la primera proviene de las montañas; la segunda, ubicada en un lecho más

profundo, consiste en un mar conservado desde el Cretácico. Además, según la National Aeronautics and Space Administration (NASA), el agua de VCC podría ser un símil de la encontrada en Marte, profunda y salada (NASA, 2013, Gutiérrez, 2004, Souza, 2012). La salinidad del agua subterránea en el acuífero se debe a La disolución de rocas de origen marino (Aldama, 2007).

La profundidad de los Hundidos I ronda los 40 cm en la zona más profunda, y un tiene un diámetro de ~2.0 m estas características inciden en la diferencia de la cantidad de sales disueltas, entre esta poza y las que están en su zona inmediata, las cuales están separadas por escasos 30m, sin embargo, presentan diferencias marcadas en la concentración de sales disueltas, esto se ve reflejado en un aumento en la C.E. entre pozas (ver tabla 6 y 7). Debido a que en la temporada de estiaje algunas de las pozas de menor profundidad se secan, podría suponerse que esta poza tenía una mayor cantidad de agua y alcanzaba una profundidad y diámetro mayores en la temporada de lluvias, conforme el agua se evapora, la cantidad de sales comenzó a concentrarse hasta alcanzar los valores registrados en la presente investigación.

Los Hundidos II

Los Hundidos II es un sitio que se caracteriza por ser una pequeña poza rodeada de pasto espeso, su agua es de color rojizo con abundantes larvas de mosquitos y un ligero olor a agua estancada. Registró un pH de 4.58, el más bajo de los sitios estudiados, presentó la cantidad de O.D. más elevada con 10.8 mg/L, una C.E. de 25200 μ S; y una concentración de ortofosfatos de 0.448 mg/L, 0.117 mg/L de Pb y 0.4 mg/L de Co. No se detectó la presencia de Fe ni Cr.

El pH del agua de este sitio juega un papel importante en el control de la solubilidad del Pb. En general, la solubilidad acuosa de este elemento es baja a pH casi neutro o alcalino. Se espera que sea móvil en condiciones oxidantes de pH bajo (U.S. EPA, 2007). Hem y Durum (1973) encontraron que a pH>7, la solubilidad de Pb estaba por debajo de 0.05 mg/L. El carbonato de plomo ($PbCO_3$) es altamente insoluble a pH>8.0, pero puede ser muy soluble por debajo de pH 6.0. En consecuencia, la acidificación de un suelo o sedimento que contiene carbonato de plomo puede

resultar en la movilización de este metal. Las fases minerales importantes que contienen plomo incluyen: hidróxido de plomo ($\text{Pb}(\text{OH})_2$), cerusita (PbCO_3), hidrocerusita ($\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), anglesita (PbSO_4), galena (PbS) y óxido de plomo (PbO) (U.S. EPA, 2007). El plomo se retiene fuertemente en el suelo y en la mayoría de las situaciones no se transporta a las aguas superficiales o subterráneas. Excepciones a este comportamiento son sistemas de pH bajo y entornos con altas concentraciones de carbono orgánico disuelto, con respecto al pH que se obtuvo en el sitio de muestreo es probable la movilización del elemento, sin embargo, no hay presencia de concentraciones importantes de carbono orgánico disuelto, que potencialice su movilidad (U.S. EPA, 2007). Entre las principales fuentes de contaminación por Pb a las aguas superficiales están la precipitación de polvo atmosférico, efluentes de aguas residuales municipales, fertilizantes y pesticidas minerales, pinturas a base de plomo, desechos de la minería e industrias metalúrgica, química y petroquímica (U.S. EPA, 2007).

En ninguna de las muestras de este trabajo los valores de Pb total rebasaron los valores establecidos por la LFD (2010) para el riego agrícola, por lo que debido a que es un elemento no esencial y tóxico según la U.S. EPA (2007); sin embargo es importante mencionar su presencia en la poza Los Hundidos II, la cual registró un pH por debajo de 6 (4.58) por lo que se puede presuponer solubilización del Pb por la disolución del carbonato de plomo (PbCO_3), a pesar de la ausencia de carbón orgánico disuelto. La ocurrencia natural de este elemento en la zona está reportada por el SGM (SMG-2, 2013), y se relaciona con la presencia de una mina de Pb en las inmediaciones del ANP, conocida como "Orozco", lo que podría significar de una abundancia natural del elemento en la zona y debido a las altas concentraciones de sales y al pH alcalino predominante en las aguas y suelos del Valle, permanece inmóvil y no biodisponible en grandes concentraciones.

Churince II

El sitio denominado como Churince III forma parte de lo que se conoce como la Laguna intermedia del sistema Churince, actualmente se encuentra prácticamente seca y sólo permanecen pequeñas áreas con agua (figura 18). Este sitio registró un

pH de 9.57 y una concentración de O.D. de 5.5 mg/L, la C.E. fue de 8760 μ S, y se cuantificó 0.15 mg/L de Pb, 1.6 mg/L de Se, 0.467 mg/L de Co, no se detectó la presencia de Mn y Cr.



Figura 18. Churince II, 22 de marzo del 2019.

Los Hundidos III

Los Hundidos III es una poza de baja profundidad con agua de color rojo intenso, la mayor parte de la superficie del agua se encontraba cubierta por pastos, se observaron numerosas larvas de mosquitos en sus aguas (ver figura 19). Registró un pH de 9.6 y una concentración de O.D. de 10.6 mg/L, una C.E. de 19800 μ S, sulfatos de 6051.58 mg/L, 3275.58 mg/L de cloruros y ortofosfatos con 0.772 mg/L (la concentración más elevada de en las demás pozas estudiadas). 285 mg/L de carbonatos y 335 mg /L TAC; además registró la concentración más elevada de Pb



Figura 19. Los Hundidos I, 20 de marzo del 2019.

(0.168 mg/L), Co (0.733 mg/L) y Mg (9440.285 mg/L), sin embargo no se detectaron Zn, Fe y Cr.

Dado que el fósforo (P) es el nutriente que escasea en la mayoría de las aguas dulces, incluso un aumento modesto de fósforo puede, en las condiciones adecuadas, desencadenar toda una cadena de eventos indeseables, que incluyen el crecimiento acelerado de las plantas, la proliferación de algas, disminuir el O.D. y la muerte de ciertos peces, invertebrados y otros animales acuáticos escorrentía (Soltis-Muth, s.f.; García-Oliva y Elser, 2018).. Los ortofosfatos (PO_4^{3-}), también conocidos como fosfatos reactivos y en los ecosistemas acuáticos, típicamente es la fracción inorgánica, en condiciones naturales, su concentración es baja debido a la eliminación biológica. Son un componente principal de los fertilizantes utilizados con fines agrícolas y residenciales. Los ortofosfatos que se encuentran en el agua natural proporcionan una buena estimación de la cantidad de fósforo disponible para el crecimiento de algas y plantas. Esta es la forma de fósforo que la biota utiliza con mayor facilidad. Los ortofosfatos se pueden llevar a los arroyos y lagos por escorrentía (Soltis-Muth, s.f.; García-Oliva y Elser, 2018). Los niveles de referencia apropiados para el P total oscilan entre 0,01 y 0,075 mg/L, según la ecorregión (U.S. EPA, 2002). Considerando que se trata de solo una fracción del P total, es posible que esta poza sufra los estragos de la contaminación. En el VCC se utiliza una gran variedad de pesticidas para mantener los cultivos libres de organismos no deseados.

García-Oliva y Elser (2018) refieren que los herbicidas Select[®] (ciclohexadieno), Cedrus[®] (ciclohexadieno) y Pivot[®] (imazethapyr) se utilizan en las parcelas de alfalfa de VCC. Cuando los cultivos de alfalfa han sido reemplazados por cultivos de nopal (tuna), se utilizan herbicidas de glifosato (n-fosfonometilglicina), este es un compuesto químico que se caracteriza por su enlace fosfonato (C-P) y es uno de los herbicidas más utilizados en los últimos años a nivel mundial (García-Oliva y Elser, 2018). Hallazgos de Tapia-Torres et al. (2018) indican que, debido al bajo contenido de P natural presente en el VCC, las bacterias del suelo y los sedimentos

pueden descomponer y utilizar diferentes formas de P en varios estados de oxidación, y por lo tanto se cree que el glifosato puede contribuir al ciclo de P del ecosistema (Tapia-Torres et al., 2018). En el pasado, el glifosato no se consideraba un problema para las aguas subterráneas y superficiales porque tiene un potencial relativamente bajo de movilidad a través del suelo (Zirena et al., 2018). Sin embargo, a pesar de su adhesión a la arcilla y la materia orgánica, partes del glifosato terminan en fase disuelta en aguas subterráneas después de fuertes lluvias. La lluvia y la erosión también pueden transportar partículas de suelo con glifosato al agua superficial donde puede permanecer en la fase particulada o disolverse. La biodegradación del glifosato es mucho más lenta en los sedimentos que cuando se encuentra disuelto en agua (Zirena et al., 2018). La presencia de glifosato en cuerpos de agua de E. U. A. mostraron valores positivos a glifosato en todos los cuerpos de agua con valores de hasta 328 µg/L (Washington, Maryland, Iowa y Wyoming), y en Iowa, Indiana, Mississippi la mayoría de los ríos dieron positivo a este herbicida después de una tormenta, registrando valores de hasta 430 µg/L (Van Bruggen et al., 2018). De esta manera podría ser que, debido a la agricultura, puedan estar transportando por medio del viento partículas de suelo cargadas de glifosato y/o fertilizantes provenientes de los campos de cultivo hasta las pozas del VCC enriqueciéndose con P. Desde 2012 PRONATURA comenzó a promover la producción de nopal como alternativa a la siembra de alfalfa, y de esta manera ayudar a disminuir el consumo de agua (Inforural, 2013; Zócalo, 2013), sin embargo, el uso de este tipo de agroquímicos podría causar un daño ecológico al ecosistema del VCC.

Churince I

El sitio Churince I es una charca de escasa profundidad remanente de la Laguna Churince la cual registró 2.21 mg/L de O.D. y un pH de 8.21. Este sitio tuvo la mayor concentración de ion sulfato con 11071.42 mg/L de los diferentes sitios estudiados, por su parte los datos de los otros parámetros fueron: NO²⁻ 0.030 mg/L, Cl⁻ 5459.3 mg/L, bicarbonatos 70 mg/L, carbonatos 355 mg/L, TAC 425 mg/L, Cu 0.33 mg/L, Se 2.21 mg/L y Na 4079.9 mg/L. Es probable encontrar la presencia de complejos

de Cd con carbonatos por el pH del sitio (9 a 11) (U.S. EPA, 2007). Debido a esto se esperaría encontrar complejos de cadmio con carbonatos debido al pH registrado de 8.21 y una baja toxicidad por la presencia de abundantes sales de Ca y Mg en estas aguas.

Análisis de las características más sobresalientes de los manantiales del VCC durante la temporada de lluvias

Poza azul

Durante esta temporada se evidenció un ligero deterioro de la calidad del agua, debido, posiblemente a la disolución de sales que cubren la parte baja del VCC formando una costra de dos centímetros de espesor. Presentó un pH de 6.62, 6.0 mg/L de O.D., una C.E. de 1820 μ S, y una concentración de Cd de 0.15 mg/L, la concentración más baja de Ca de todos los sitios con 142.7 mg/L 443.31 mg/L de Mg y no se detectó Ni, Pb, Mn y Cr.

Manantial Churince

Al igual que Poza Azul, el Manantial Churince presentó una ligera disminución en la calidad del agua en comparación con la temporada de estiaje. Registró un pH de 7.19 y 5.3 mg/L oxígeno disuelto, una C.E. de 2430 μ S y la concentración de sulfatos fue la más baja con respecto al resto de los sitios (511.95 mg/L); mientras que la concentración de NO_2^- fue de 0.0018 mg/L y de NO_3^- 0.217 mg/L. La concentración de Fe con 0.15 mg/L y registró la concentración más elevada de Cd con 0.5 mg/L. No se detectó Ni, Pb, Mn y Cr.

Los Domos

Este sitio de captación de agua, durante la época de estiaje, estuvo totalmente seca y la superficie queda cubierta por una costra de sales, la cual se disuelve durante la temporada de lluvias, por lo que el agua adquiere un color rojo intenso y se observan abundantes copépodos (ver figura 20 y 21). Este sitio registró un pH de 8.72, 1.7 mg/L de oxígeno disuelto y una C.E. de 4460 μ S. De todos los sitios estudiados,

este registró las concentraciones más elevadas de K (89.709 mg/L) y Na (4074.9 mg/L), Mg (7184.78 mg/L). Fue el único sitio donde estuvo presente el Cr con 0.05 mg /L. No se detectó la presencia de Mn.



Figura 20. Los Domos en época de estiaje, se observan huellas de posible caballo sobre la costra de sales, 21 de marzo del 2019.

Los minerales que contienen Cr (VI) son raros, se han identificado en depósitos de evaporita; en sitios como el desierto de Atacama en América del Sur (U.S. EPA, 2007). Estos minerales evaporíticos incluyen cromato (CrO_4^{2-}) o dicromita ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) combinados con Na, K, Ca o Ba y, en algunos casos, con cantidades variables de sulfato u otros aniones

Se ha encontrado que el Cr (VI) se encuentra naturalmente en el suelo agua subyacente al árido Paradise Valley en Arizona (E. U. A.) en concentraciones tan altas que llega de los cientos a miles de microgramos por litro ($\mu\text{g/L}$). En este sitio el agua subterránea, tenía valores de pH alcalinos, concentraciones moderadas de sales disueltas y, probablemente, era muy antigua (como el agua presente en el VCC). Más recientemente, Cr (VI) se ha detectado en aguas subterráneas con características químicas similares a las cuencas áridas o semiáridas en California. El agua subterránea óxica posee las condiciones químicas que favorecen la persistencia del Cr (VI) y promueven su movilidad en valores de pH neutros a alcalinos (moderados) y altas concentraciones de otros aniones, como el sulfato (Robertson, 1975; U.S. EPA, 2007).



Figura 21. Los Domos secos, en temporada de estiaje, 21 de marzo del 2019.

Variaciones estacionales

Al comparar los valores obtenidos en Manantial Churince y en la Poza Azul en época de lluvias y de estiaje. Se observó en ambos sitios un incremento en la C. E. y las concentraciones de SO_4^{2-} , Cl^- , Cd, y Na; Sin embargo se observó una disminución en las concentraciones de Ca y Mg (Ver anexo H).

Las concentraciones de Cr y Cu se mantuvieron sin cambio durante las dos temporadas del año.

La formación de suelos salinos se debe a ciclos de movilización, redistribución y acumulación de cloruros, sulfatos, bicarbonatos y carbonato sódico: proceso que está condicionado por: el clima, el régimen de humedad, posición geomorfológica y tipo de drenaje (Porta, et al., 2003). En las regiones áridas, semiáridas y estepas, donde hay poca lluvia y temperatura elevada, existe una tendencia a la acumulación de sales solubles cerca de la superficie (Quintero, 2013). En época de lluvia, las sales pueden moverse hacia abajo hasta alcanzar las capas inferiores del suelo, aunque una vez pasada esa temporada debido a la evaporación intensa, las sales regresan a la capa superficial (Quintero, 2013).

Las aguas subterráneas de las regiones áridas generalmente contienen cantidades considerables de sales solubles, lo cual, si el nivel es alto, por efecto de la capilaridad se moverán hasta la superficie y se evaporan, acumulándose en la superficie, cada vez en mayor cantidad (Quintero, 2013).

Por lo que es posible que pese a que algunas costras de sales formadas en la época de estiaje se solubilizan sobre el suelo, algunos iones podrían estar migrando a capas inferiores del suelo, disminuyendo la concentración de estos en las aguas superficiales, eso explicaría la disminución en las concentraciones de Mg y Ca en el Manantial Churince y en la Poza Azul. De igual manera, un aumento en el volumen del agua podría diluir la concentración de sales, aunque no se aprecia una relación directa.

El aumento observado en la concentración de Cl^- y Na se debe a la alta solubilidad del NaCl durante la época de lluvia, a diferencia de otras sales menos solubles como

los sulfatos, carbonatos y bicarbonatos (West Analítica, s.f). Aunque la concentración de Na aumentó en época de lluvia, no es el catión dominante en la solución de las pozas.

Algunos complejos salinos se forman en función del pH, como los complejos de Cd con Cl⁻ y sulfatos (SO₄²⁻); que son de importancia en pH ácido, el carbonato de cadmio (CdCO₃) es estable en pH cercanos a la neutralidad (U.S. EPA, 2007). Johannesson et al. (2004) y Wolaver et al. (2013), demostraron que la Sierra de San Marcos aporta minerales por medio del agua, de las escorrentías e infiltración, a los manantiales del VCC. Posiblemente durante la época de lluvia estos aportes incrementan, lo que contribuye al enriquecimiento de las pozas con Cd a la par del aumento del nivel del agua.

En lo que respecta a la contaminación del agua, se puede observar un incremento en la concentración de ortofosfatos en la época de lluvias en el Manantial Churince. Estudios previos realizados por la UNAM en el Valle señalan que, al aumentar las concentraciones de fosfatos desaparecerían los estromatolitos ya que son muy sensibles a los cambios en la composición del agua (Tapia-Torres et al., 2018), más aún, un exceso de fertilizantes traería consigo problemas de eutrofización (enriquecimiento artificial del agua en materias nutritivas) y favorecen el ingreso de especies invasoras acuáticas (IMTA, 2005).

Clasificación química de las aguas de los sitios de estudio

De acuerdo con el sistema Schoukarev-Slavianov y Piper (Fernández, 2009) se obtuvo la siguiente clasificación de los sitios de estudio del VCC (ver figura 22 y tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de las aguas con base en el diagrama de Piper.

Muestra	Clase de agua
Los Hundidos I	Sulfatada- magnésica
Los Hundidos II	Sulfatada- magnésica
Los Hundidos III	Sulfatada- magnésica
Los Hundidos IV	Sulfatada- magnésica
Poza Azul	Clorurada- magnésica
Churince I	Sulfatada- sódica/potásica
Churince II	Sulfatada- magnésica
Churince III	Sulfatada- magnésica

El diagrama de salinidad de USDA (1955) para la clasificación de las aguas de riego mostró que existe un riesgo de salinización de los suelos agrícolas por el uso de las aguas de los manantiales estudiados, lo que puede contribuir al deterioro de este recurso edáfico, limitando su uso para cultivos altamente tolerantes a la salinidad (ver figura 23 y tabla 9).

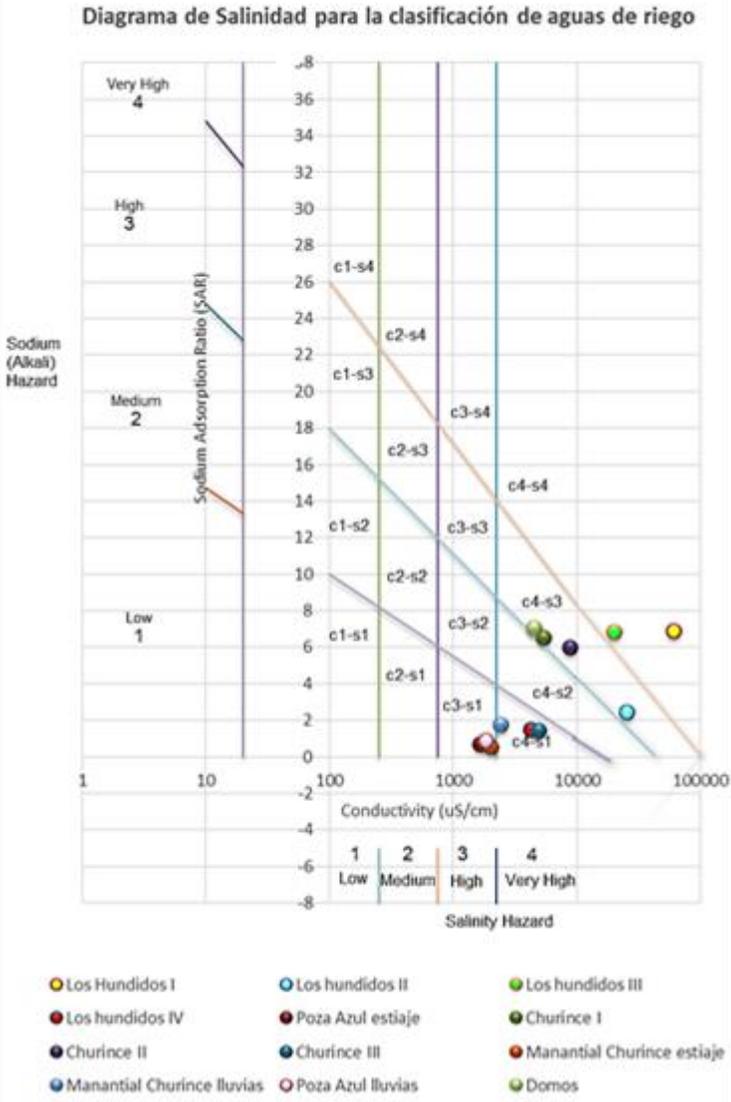


Figura 23. Diagrama de riesgo de salinización y sodificación de los manantiales del VCC. Fuente: de elaboración propia.

Tabla 9. Clasificación de las aguas de los manantiales del VCC, con respecto a su salinidad.

Fuente: De elaboración propia.

Muestra	Clasificación	Riesgo de salinización	Riesgo de sodificación
Los Hundidos I	C4-S4	Muy alto	Muy alto
Los Hundidos II	C4-S3	Muy alto	Alto
Los Hundidos III	C4-S4	Muy alto	Muy alto
Los Hundidos IV	C4-S1	Muy alto	Bajo
Poza Azul estiaje	C3-S1	Alto	Bajo
Poza Azul lluvias	C3-S1	Alto	Bajo
Churince I	C4-S3	Muy alto	Alto
Churince II	C4-S3	Muy alto	Alto
Churince III	C4-S1	Muy alto	Bajo
Manantial Churince estiaje	C3-S1	Alto	Bajo
Manantial Churince lluvias	C4-S1	Muy alto	Bajo
Domos	C4-S1	Muy alto	Bajo

Análisis de la relación de parámetros entre sitios estudiados por componentes principales (ACP)

El análisis se realizó a 11 variables: OD, C.E. , ion sulfato, ortofosfatos, TAC, Se, K, Ca, Na, Mg y Fe, seleccionadas por presentar una mayor variabilidad entre los puntos de muestreo. El ACP presentó un índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de 0.62, y un Valor-P = 3.2409E-9 en la prueba de esfericidad de Bartlett, por lo que es viable realizar el análisis factorial. Se generaron tres componentes principales que representan el 86.7% de los datos generados (ver la tabla 10 y la figura 12).

Tabla 10. Número de componentes su porcentaje de varianza y acumulado.

Componente Número	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	5.77289	52.481	52.481
2	2.75524	25.048	77.528
3	1.00839	9.167	86.696

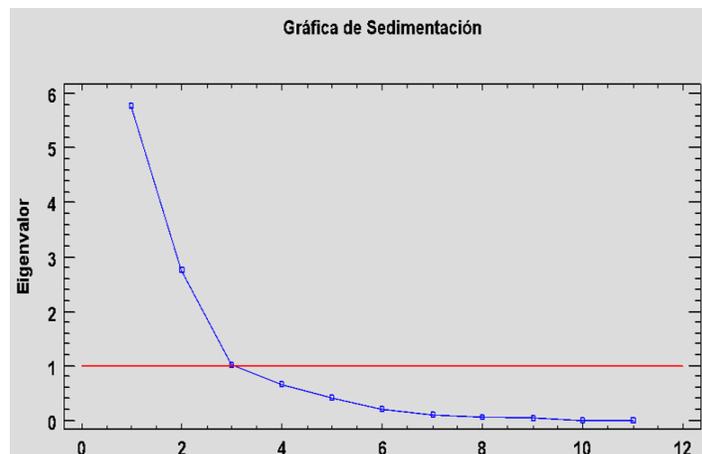


Figura 24. Gráfico de sedimentación del ACP generado con las variables significativas para los sitios de estudio del VCC.

Se obtuvo el peso de cada una de las 11 variables en cada uno de los tres componentes principales (ver tabla 11 y figura 24).

Tabla 11. Tabla del peso de cada variable en cada una de las tres principales componentes.

Componente 1		Componente 2		Componente 2	
Parámetro	Peso	Parámetro	Peso	Parámetro	Peso
Ion sulfato	0.404405	OD	0.509868	Cond.	0.787477
Mg	0.401602	Ortofosfatos	0.487218	Fe	0.362503
K	0.400597	Cond.	0.32128	Na	0.229341
Na	0.394624	TAC	0.180676	K	0.176149
TAC	0.348936	Mg	0.113425	OD	0.0713494
Se	0.322501	Ca	0.0527576	Ca	-0.0102847
Ca	0.260087	Na	0.0385219	Mg	-0.0206531
Ortofosfatos	0.162537	K	0.0330779	Ion sulfato	-0.0907647
Cond.	0.0651107	Ion sulfato	-0.0746565	Se	-0.148966
Fe	0.0565101	Se	-0.316435	TAC	-0.227079
OD	-0.178064	Fe	-0.492806	Ortofosfatos	-0.277901

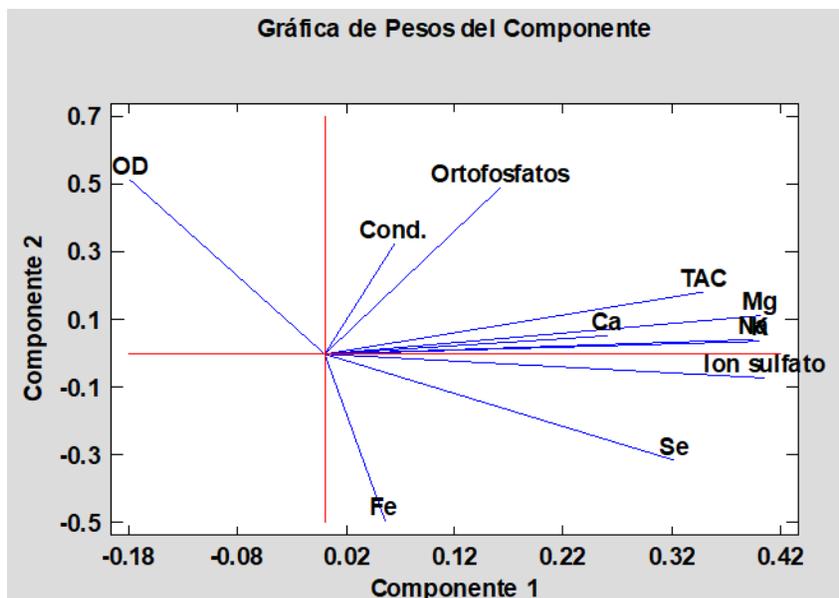


Figura 25. Gráfica por peso por componente.

Como se puede observar el primer componente representa 52.48% de los datos generados y, se observa que los iones sulfato, Mg, Ca y Na aportaron prácticamente

la misma información. Siendo estas las variables que aportan más información para describir las pozas analizadas. Mientras que en el segundo componente se encontró una dominancia del OD, ortofosfatos, C.E., Fe y Se. La tercera componente está representada casi en su totalidad por la conductividad eléctrica.

Al realizar un diagrama de dispersión para los componentes (Ver figura 26), se observaron similitudes entre los sitios de muestreo sin importar la temporada climática de muestreo, representando el 77% de los datos obtenidos.

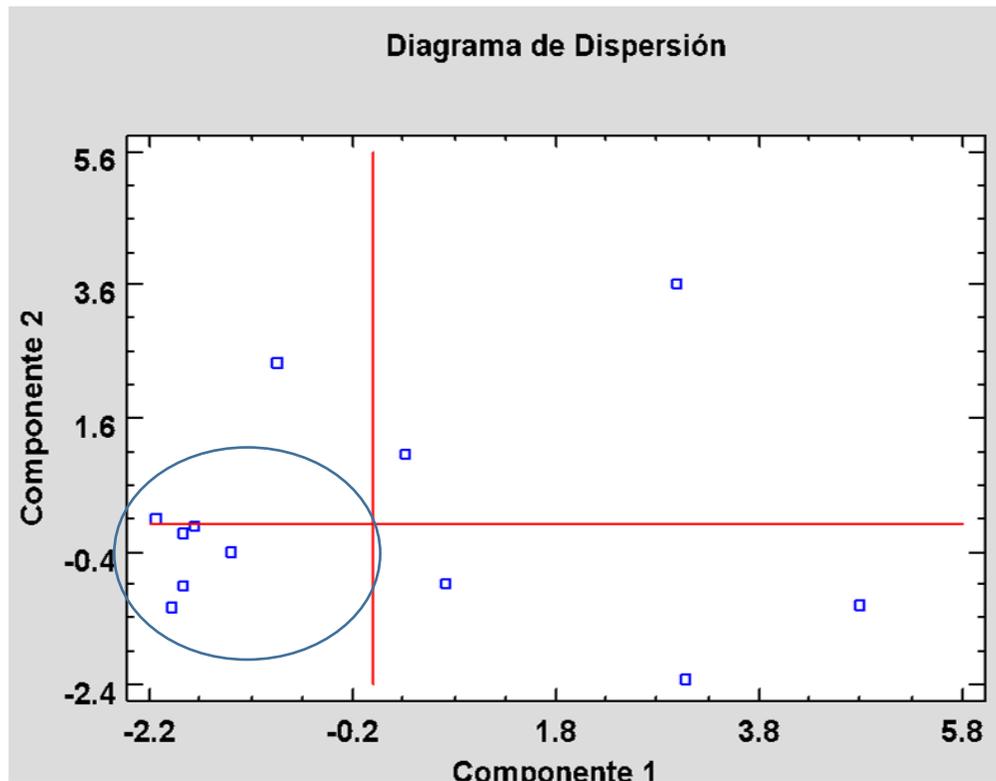


Figura 26. Diagrama de dispersión (2D), se aprecia un clúster en la parte inferior izquierda encerrado dentro de un círculo azul.

Asimismo, se puede observar la formación de un clúster en la parte inferior izquierda del diagrama de dispersión conformado por: Poza azul (estiaje y lluvias) y Manantial Churince (estiaje y lluvias); junto con Los Hundidos IV (estiaje), y Churince III (estiaje) que son los puntos de muestreo que presentan mayor similitud química entre sí.

De esta manera se puede observar que no se encontraron diferencias significativas en el Manantial Churince y la Poza Azul a pesar de la época de muestreo y a encontrarse separados por la sierra de San Marcos y Pinos.

Por otra parte, se puede apreciar que las pozas de la zona conocida como “Los Hundidos” a pesar de encontrarse a una distancia no mayor de 40 m, presentan características *in situ* muy diferentes entre ellas. Cada uno de los manantiales estudiados presentaba una coloración particular infiere una composición química heterogénea en sus aguas. De igual manera, pese a su proximidad geográfica a la en Poza Azul y los Domos (aproximadamente 100 m) también existen diferencias importantes en su composición química, lo cual puede deberse a la temporalidad del sitio denominado como “Los Domos”, mismo que desaparece en época de estiaje para nuevamente estar presente en época de lluvia con baja profundidad.

Cambios en la composición química de agua en la laguna Churince y Poza Azul a lo largo del tiempo

Estudios previos dentro del área de estudio se basan en la caracterización de la biota, estromatolitos y microbiología. Los datos hidrogeológicos en el VCC son limitados, información sobre la calidad del agua es prácticamente inexistente y solo están disponibles para eventos de muestreo discretos de duración limitada (Wolaver, 2008); lo que dificulta el seguimiento de las condiciones de la mayoría de los manantiales y su cambio a lo largo del tiempo y espacio (tabla 12).

Tabla 12. Parámetros reportados para Laguna Churince en diferentes publicaciones.

Laguna Churince					
Referencia	Minckley, 1968	García, 2003	García, 2003	Forti, 2005	Presente García, 2019 *
Año de muestreo	1965	2001	2002	2003	2019
Alcalinidad (mg/L)	-	218	256	-	425
Ca (mg/L)	440	536	620	323	655
C.E. (mg/L)	-	2113	2092	2025	5390
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	178	-	-	206.79	355
K (mg/L)	9.3	-	-	7.8	79.86
Mg (mg/L)	54	101	89	105.95	8204.397
Na (mg/L)	140	-	-	146.97	4074.9
Nitratos (mg/L)	-	2.77	2.77	-	0.616
O. D. (mg/L)	6.6-7.6	4.1	4.1	-	2.21
pH	7.5	-	-	7.4	8.21
SO ₄ ⁻² (mg/L)	1250	1571	1643	1292.07	11071.429
T (°C)	-	28.25	28.58	27	23

*Presente estudio

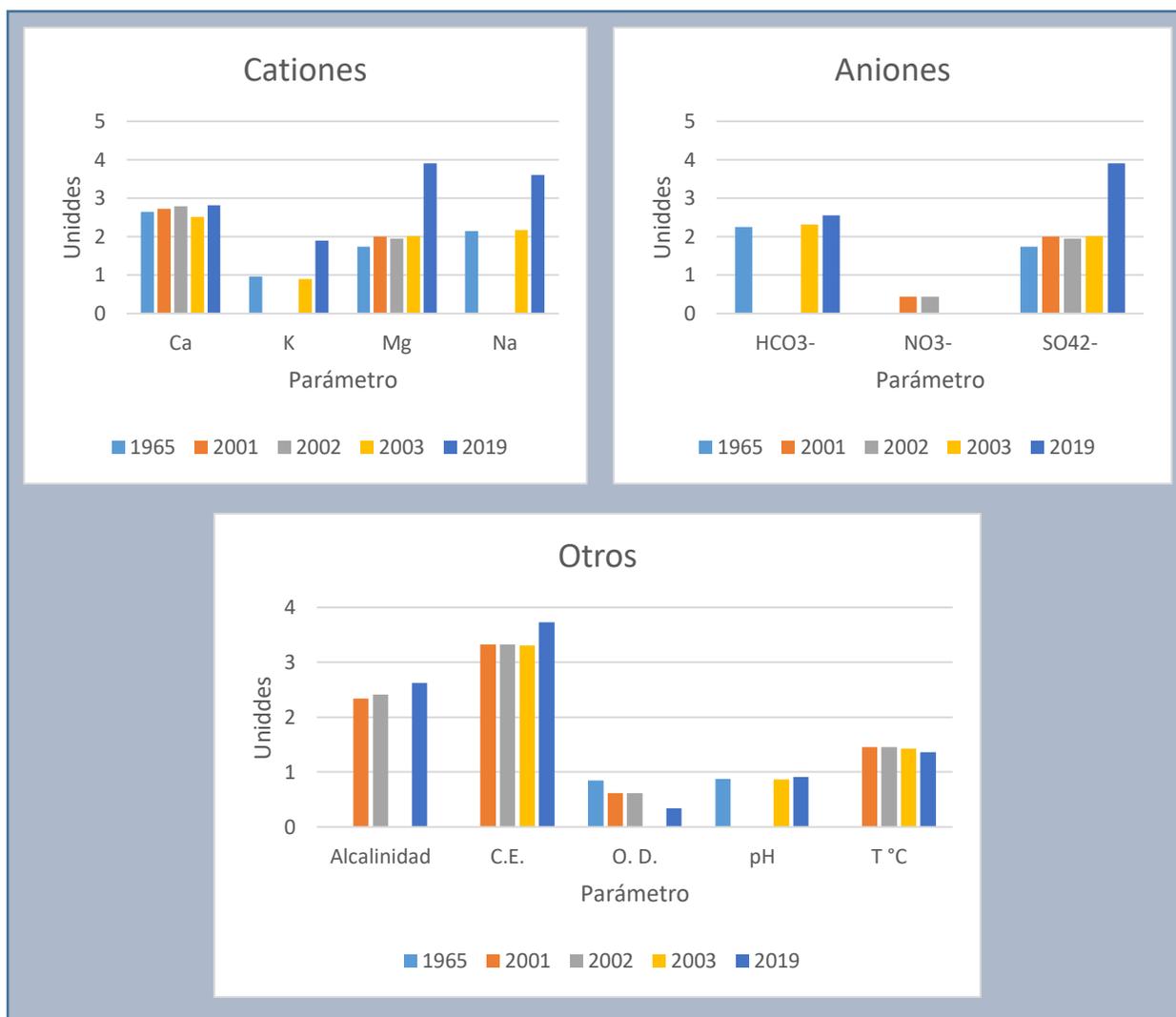


Figura 27. Cambio en los parámetros en Laguna Churince.

Históricamente el Sistema Churince o Laguna Churince es uno de los lugares más afectados por la sobreexplotación del acuífero del VCC. Debido a que es una de las pozas con mayor extensión algunos de los trabajos de caracterización de las aguas del VCC la incluyen, lo que ha permitido observar los cambios que ha presentado a lo largo del tiempo (ver tabla 12 y figura 27) que evidencian el deterioro que ha sufrido como consecuencia del manejo inadecuado del agua en el valle.

Se puede observar que los parámetros se mantienen relativamente constantes a lo largo de los años (ver anexo H para más información), exceptuando el presente trabajo, donde se nota un incremento pronunciado en las concentraciones de Mg,

Ca, SO_4^{2-} , Na, pH y por consiguiente la C.E.; con una disminución del O.D. Estos cambios pueden atribuirse a que el nivel de la laguna ha disminuido desde 2009 hasta prácticamente su extinción, concentrando en pequeños charcos de escasa profundidad los iones, además que al secarse los suelos en las regiones áridas las sales tienen a subir a las capas más superficiales por medio de la capilaridad, provocando que los cuerpos de agua superficial sean cada vez más salinos (Quintero, 2013).

El oxígeno disuelto presenta una relación inversa con respecto a las demás variables. Su papel biológico es fundamental, pues define la presencia o ausencia potencial de todas las especies acuáticas y el tipo aeróbico o anaeróbico prevaleciente en el ecosistema.

De igual manera los nitratos descendieron en Laguna Churince, lo que puede relacionarse con la baja concentración de oxígeno disuelto en el agua, propiciando la aparición de especies químicas tóxicas en un ambiente anóxico tal como los nitritos limitando la vida acuática.

Con respecto a la Poza azul solo se encontró reportado el estudio de Forti et al. 2003, dicha poza forma parte del área núcleo del ANP con acceso restringido y custodiada por PRONATURA, lo que dificulta que sea incluida en algunas investigaciones, pues se necesita un permiso especial para realizar un muestreo de sus aguas, y el número de muestras que se permite tomar es pequeño. La tabla 13 contiene los resultados reportados por Forti et al, 2003 y el promedio de los resultados encontrados en la presente investigación, en la época de estiaje y en época de lluvias en la Poza azul (ver figura 28).

Tabla 13. Cambios en los parámetros de Poza Azul 2003-2019.

Poza azul		
Referencia	(Forti et al, 2003)	Presente
Año de muestreo	2003	2019
Temperatura	25.1	26.93
SO ₄ ²⁻	1360.6899	804.09
pH	7.6	7.12
Na	149.96	124.12
Mg	109.9575	337.48
K	9.36	4.90
HCO ₃ ⁻	4.2	8.07
C. E.	2265	1911.67
Cl ⁻	107.45	333.60
Ca	710	343.21

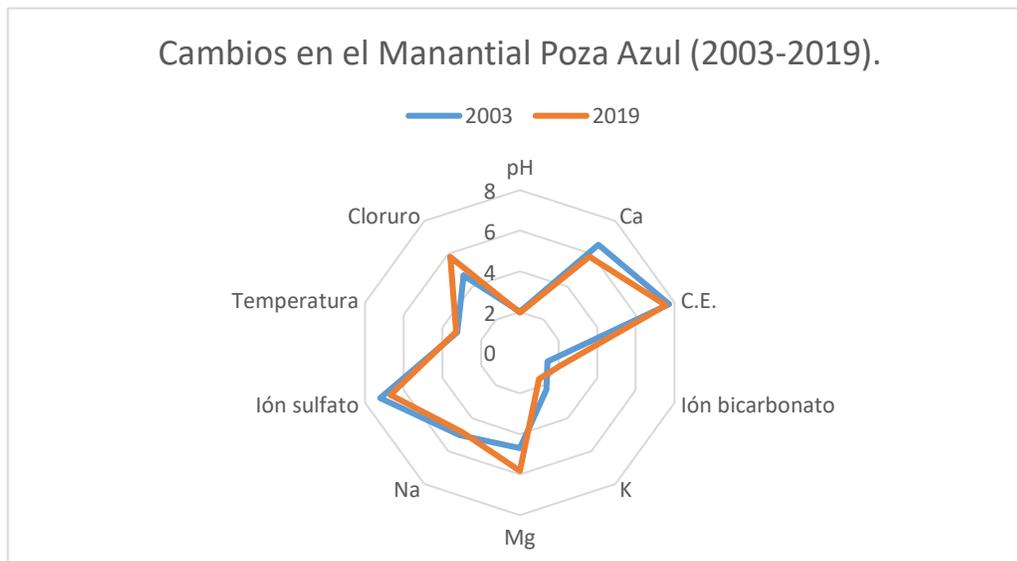


Figura 28. Cambios en el manantial Poza Azul 2003-2019

Aunque presenta cambios, estos no son significativos en temperatura, pH, Na, K, HCO₃⁻ y conductividad, manteniéndose prácticamente la misma composición a través de 16 años (figura 28). Los cambios más evidentes se encuentran en los sulfatos, magnesio, calcio y cloruros.

Conclusiones

La mayor parte de los manantiales estudiados en el presente trabajo presentan aguas que pueden clasificarse como sulfatadas-magnésicas, por la dominancia de los iones principales, aunque las concentraciones de dichos iones son muy variadas. Al presentar una alta salinidad se limita el empleo de estas aguas, por lo que solamente deben emplearse en cultivos extremadamente tolerantes. La calidad de las aguas del VCC es heterogénea, tanto así que la proximidad geográfica no es un factor que influya directamente en la calidad del agua de los sitios analizados. Lo anterior podría significar que la desecación de alguna de las pozas puede inducir la extinción de especies micro-endémicas que no podrían adaptarse a las condiciones que presenta alguna otra poza.

Los metales Pb, Ni, Cr, Cu, Zn, Fe y Mn se encuentran en concentraciones adecuadas para el riego agrícola sin embargo el elevado contenido en Se y Cd hacen las aguas poco adecuadas para este fin, ya que dichos metales pueden entrar en la cadena trófica del ser humano, especialmente el Se, que en suelos alcalinos se transforma en ion selenato y es extremadamente móvil y biodisponible.

No se encontraron diferencias significativas entre la época de estiaje y la época de sequía en los puntos Manantial Churince y Poza Azul, lo que puede significar que la mayor parte de los aportes de agua proviene del acuífero y no por medio de las precipitaciones esporádicas de la región, lo que enfatiza la importancia de un manejo adecuado del recurso hídrico ya que actualmente el acuífero del VCC se encuentra sobreexplotado.

La Laguna Churince ha presentado cambios drásticos en su composición química en los últimos 15 años, se puede evidenciar en sus aguas los estragos que ha tenido la agricultura intensiva realizada en el VCC y quizá en el Valle del Hundido, haciendo que las pequeñas charcas, que han permanecido como remanente de lo que fue

una de las pozas con mayor extensión dentro del valle, se conviertan en salmueras anóxicas poco aptas para la vida del valle.

La Poza azul, ha permanecido casi sin cambios en la composición de sus aguas en los últimos 15 años, esto es en parte a la protección que ha mantenido Pronatura y a su presencia en el área núcleo del ANP, lo que dificulta su estudio, y por lo tanto no existen estudios suficientes para contrastar los cambios.

Es necesario realizar el seguimiento de la calidad del agua en las pozas que se encuentran dentro del área núcleo del ANP.

Referencias bibliográficas

- ALARCÓN-CORREDOR, O.** (2009). Elementos traza (Versión electrónica).
Revista Médica de la Extensión Portuguesa - ULA. Vol. 4. No. 3, (pp. 107-124).
Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Oscar_Alarcon-Corredor/publication/268274720_Los_elementos_traza/links/59664c590f7e9b80917fe96a/Los-elementos-traza.pdf.
- ALDAMA, A.**, et al. (2007) Comportamiento hidrogeológico de los acuíferos Cuatro Ciénegas y El Hundido, Coahuila, México [Versión electrónica].
Ingeniería hidráulica en México Vol. 23. No. 3, (pp. 37-59).
- ALLOWAY, B.** (ed.). (2013). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (3.^a ed.). Springer. DOI 10.1007/978-94-007-4470-7.
- ASADOLLAHFARDI, G.** (2015) Water Quality Management Assessment and Interpretation [versión electrónica]. Iran: Springer.
- ASRARI, E.** (ed.). (2014). Heavy metal contamination of water and soil [Versión electrónica]. Canadá, Apple Academic Press. ISBN: 13: 978-1-4822-3965-2
- BARZEGAR, R., et al.** (2019). Natural and anthropogenic origins of selected trace elements in the surface waters of Tabriz area, Iran [Versión electrónica]. Revista Environmental Earth Sciences. Vol. 78. No.8, (pp. 254).
- BOYD, C.** (2015). Water quality an introduction [versión electronica]. Suiza: Springer.
- BRADL, H.** (Ed.). (2005). Heavy metals in the environment: origin, interaction and remediation [Versión electrónica]. Reino Unido, Elsevier Academic Press. Interface science and technology, Vol. 6.
- CALIFORNIA STATE WATER RESOURCES CONTROL BOARD** (s.f.) Folleto Informativo pH. Folleto Informativo 3.1.4.0. California. Disponible en: https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf

CALIFORNIA STATE WATER RESOURCES CONTROL BOARD-B (s.f.) Folleto Informativo Oxígeno disuelto. Folleto Informativo 3.1.1.0. California. Disponible en:

https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3110sp.pdf

CANTLE, J. (ed.) (1982). Atomic absorption spectrometry [versión electrónica].

Reino unido: Elsevier scientific publishing Company. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect-com.pbidi.unam.mx:2443/bookseries/techniques-and-instrumentation-in-analytical-chemistry/vol/5/suppl/C>

CASARES, M. (2012). Biodisponibilidad y toxicidad de metales pesados en aguas naturales con características físico-químicas extremas. Bases para su monitoreo y remediación [tesis de doctorado]. Universidad de Buenos Aires.

Disponible en:

https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5334_Casares.pdf.

CASTRO-GONZÁLEZ, N. (2018). Metales pesados en leche de vacas alimentadas con alfalfa producida en suelos irrigados con aguas residuales en Puebla y Tlaxcala, México [versión electrónica]. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias. Vol. 9. No. 3, (pp. 466-485). Disponible en:

<http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcp/v9n3/2448-6698-rmcp-9-03-466.pdf>.

CHAVEZ H. Y ALIPAZ S. (2007). An Integrated Indicator for Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index [versión electrónica]. Water Resources Management Vol. 21. No. 5, (pp. 883-895).

CONABIO (2015). Evaluación del conocimiento actual del APFF de Cuatro Ciénegas, Coahuila: FASE1 [Versión electrónica]. Disponible en:

<http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfJN002.pdf>.

CONABIO (s.f.). Cuatro ciénegas. Disponible en:

http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_048.html.

-
- CONAGUA** (2018). Estadísticas del agua en México: Edición 2018 [Versión electrónica]. Disponible en:
http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.
- CONANP** (2002). Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar; Área de Protección de Flora y Fauna Cuatrociénegas [Versión electrónica]. Ciudad de México: Comisión Nacional de Áreas Nacionales Protegidas. Recuperado de:
http://www.conanp.gob.mx/conanp/dominios/ramsar/docs/sitios/FIR_RAMSAR/Coahuila/APFF%20Cuatroci%C3%A9negas/Actualizacion_2013/FIR_CUATROCI%C3%89NEGAS.pdf.
- CONANP** (2007). Estudio sobre el cambio de uso de suelos en el Valle de Cuatro Ciénegas periodo 2002-2006 [Versión electrónica]. Michoacán, México: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- COONAGUA, SEMARNAT** (2018). Estadísticas del agua en México, edición 2018 [versión electrónica]. Ciudad de México.
- DOF** (2008). Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos del Acuífero 0528 Cuatrociénegas y se modifican los límites y planos de localización que respecto del mismo se dieron a conocer en el Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización [Versión electrónica]. Ciudad de México. Disponible en:
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5044616.
- DOF** (2020). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos [versión electrónica]. Ciudad de México. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020.

-
- FAO (2000).** Gestión de la calidad del agua y Control de la Contaminación en América Latina y el Caribe. Oficina regional de la FAO para américa latina y el caribe. Santiago de Chile.
- FAO (2002).** La sal de la tierra: peligro para la producción de alimentos. Disponible en: <http://www.fao.org/worldfoodsummit/spanish/newsroom/focus/focus1.htm>
- FERNÁNDEZ, E.** (2009). Los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo de las aguas. Madrid: Grfinat. (pp. 32).
- FORTI, P., GIULIVO, I., PICCINI, L., Y TEDESCHI, R. (2003)** The karst aquifer feeding the Cuatro Ciénegas pools (Coahuila, Mexico): its vulnerability and safeguard. In Proceedings of the First International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk. Salamanca, México. Vol. 2. (pp. 287–299).
- GARCÍA, Y. (2015).** Calidad del agua con fines de riego. Revista digital de Medio Ambiente “Ojeando la agenda”. No.35, Mayo 2015. ISSN 1989-6794.
- GARCÍA, I. Y LÓPEZ, Á.** (2017). Cuatrociénegas: conflictos asociados al turismo en un área natural protegida [versión electrónica]. Cuadernos de Turismo. No. 40. (pp. 295-314). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.6018/turismo.40.309711>.
- GARCÍA, M.** (2005). Ecología y distribución de peces en áreas selectas del valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- GARCÍA-OLIVA, F. Y ELSER, J.** (2018). Ecosystem Ecology and Geochemistry of Cuatro Ciénegas: How to Survive in an Extremely Oligotrophic Site (V. Souza, ed.) [versión electrónica]. Springer, México. Disponible en: <https://www.springer.com/gp/book/9783319958545>.
- GOBIERNO DE MÉXICO,** (s/f). Cuatrociénegas, área de protección de flora y fauna. Consultado el 2 de enero del 2020. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/cuatrociénegas-area-de-proteccion-de-flora-y-fauna>

-
- GUTIÉRREZ, G.** (2004). Cuatrociénegas: Oasis en el desierto de Coahuila. Escenario de una gran diversidad biológica. Revista Ciencia y Desarrollo, nueva época Vol. 30. No. 176, México.
- HEATON, T.** (1985). Isotopic and chemical aspects of nitrate in the ground water of the Springbok Flats [versión electrónica]. Water, SA. Vol. 11. No. 4, (pp. 1199-208). Disponible en: <https://journals.co.za/docserver/fulltext/waters/11/4/2424.pdf?expires=1603566391&id=id&accname=guest&checksum=D7F2ED52E56F8CFDF537FC3D0EEB8778>.
- HEM, J. Y DURUM.H.** (1973). Solubility and occurrence of lead in surface water. Journal of the American Water Works Association Vol. 65. No. 8, (pp. 562-568). Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/41267396>.
- IMTA** (2005). Estudio hidrogeológico de los acuíferos El Hundido y Cuatrociénegas, Coah. [Versión Electrónica]. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INE** (1999). Programa de manejo del área de protección de flora y fauna Cuatrociénegas [Versión electrónica]. Ciudad de México, México: Instituto Nacional de Ecología.
- INECC** (2016). Análisis de la variación del nivel del agua y temperatura de los principales cuerpos de agua de Cuatrociénegas. Consultado el 2 de enero de 2020. Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/analisis-de-la-variacion-del-nivel-de-los-principales-cuerpos-de-agua-de-cuatrociénegas>
- INEGI** (2020). Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE), población de 15 años y más. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/enoe/15ymas/>
- INFORURAL** (2013, 24 de enero). Impulsa CONANP cultivo de nopal en Cuatro Ciénegas. Disponible en: <https://www.inforural.com.mx/impulsa-conanp-cultivo-de-nopal-en-cuatrociénegas/>.

-
- IOWA DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES** (2009) Water Quality Standards Review: Chloride, Sulfate and Total Dissolved Solids [versión electrónica]. Consultation Package. Disponible en: http://www.iowadnr.gov/portals/idnr/uploads/water/standards/ws_review.pdf.
- IUPAC** (2002). "Heavy metals" a meaningless term? [Versión electrónica]. Pure Appl. Chem., Vol. 74. No. 5, (pp. 793–807). Disponible en: <http://publications.iupac.org/pac/2002/pdf/7405x0793.pdf>.
- JOHANNESSON, K. et al.** (2004). Reconnaissance isotopic and hydrochemical study of Cuatro Ciénegas groundwater, Coahuila, México [version electronica]. Journal of South American Earth Sciences. Vol.17. (pp. 171-180). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0895981104000355>.
- KABATA-PENDIAS, A. Y PENDIAS H.** (2001). Trace Metals in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, Fla, USA, 2nd edition. ISBN: 0-8493-1575-1.
- LA JORNADA** (2006) Agota industria lechera el agua de la zona protegida Cuatro Ciénegas. Sábado 12 de agosto de 2006. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/2006/08/12/index.php?section=ciencias&article=a03n1cie>
- LEY FEDERAL DE DERECHOS** (1981). Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de diciembre de 1981. Últimas Reformas DOF 18-11-2010.
- LYONS, M. et al.** (2007). Selenium in Food Chain and Animal Nutrition: Lessons from Nature -Review- [version electronica]. Asian-Australasian J Anim Sci. Vol. 20. No. 7, (pp. 1135 – 1155). Disponible en: <https://www.ajas.info/upload/pdf/20-159.pdf>
- MARTÍNEZ, G.** (2018). Barreras geoquímicas y estabilización físico-química para el manejo ambientalmente seguro de residuos metalúrgicos y suelos contaminados con arsénico y metales pesados en San Luis Potosí (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de geología, Ciudad de México.

-
- MEHDI, Y. et al.** (2013). Selenium in the Environment, Metabolism and Involvement in Body Functions [versión electrónica]. *Molecules*. Vol. 18 pp. 3292-3311. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1420-3049/18/3/3292#cite>
- MERCADO-CAMARGO, J.** (2017). Validación de la metodología analítica para la determinación de fosfato en agua potable por espectrofotometría ultravioleta-visible- método del azul de molibdeno con ácido ascórbico [versión electrónica]. Cartagena, Colombia: Universidad de Cartagena. Disponible en: <https://repositorio.unicartagena.edu.co/handle/11227/5415>.
- MINCKLEY, W. Y COLE, G.A.** (1968) Preliminary limnological information on waters of the Cuatro Ciénegas Basin, Coahuila, México. *Southwest Nat.* Vol. 13. (pp. 421–431).
- NASA**, (2013). Gypsum on Earth and Mars. Earth observatory. Consultado el 2 de enero del 2020. Disponible en: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/80502/gypsum-on-earth-and-mars>
- NEIRA, M.** (2006). Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación [Tesis de ingeniería]. Estudio de caso: Chile. Universidad de Chile. Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2006/neira_m/sources/neira_m.pdf
- NMX-AA-036-SCFI-2001**. Análisis de agua - determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Secretaría de economía.
- NMX-AA-051-SCFI-2001**. Análisis de agua - determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Secretaría de Economía.
- NMX-AA-073-SCFI-2001**. Análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. Secretaría de economía.

-
- NMX-AA-074-SCFI-2014.** Análisis de agua – medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba. Secretaría de economía.
- NMX-AA-099-SCFI-2006.** Análisis de agua – determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales y residuales – métodos de prueba. Secretaría de Economía.
- ODOBASIC, A.** (2012). Determination and Speciation of Trace Heavy Metals in Natural Water by DPASV, Water Quality Monitoring and Assessment [Versión electrónica]. Voudouris (Ed.), InTech. ISBN: 978-953-51-0486-5.
- ORTIZ, S. Y ROMO, M.** (2016). Impactos socioambientales de la gestión del agua en el área natural protegida de Cuatro Ciénegas, Coahuila. Región y sociedad. Vol. 28. No. 66. Hermosillo. Disponible en:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252016000200195.
- PELAYO, N.** (2006). Comportamiento químico del arsénico en sedimentos de sistemas acuáticos contaminados (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- PINKAVA, D.** (1984). Vegetation and flora of the bolson of cuatro cienegas region, Coahuila, Mexico: IV. summary, endemism and corrected catalogue [Versión electrónica]. Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science Vol.19 (pp. 23-47). Recuperado de: <http://www.nativefishlab.net/library/textpdf/11097.pdf>
- PORTA, J. et al.** (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente (versión electrónica). Editorial MP, Madrid. Disponible en:
<https://www.iec.cat/mapasols/DocuInteres/PDF/Libre03.pdf>.
- QUINTERO, M.** (2013). Condiciones actuales de salinidad del área de influencia de la Poza de Escobedo, Cuatrociénegas Coah. [Tesis de grado]. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Disponible en:
<http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5675/T1992>

[8%20QUINTERO%20GONZALEZ%2c%20MARCOS%20MANUEL%20%20TE
SIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y.](#)

ROBERTSON, F. (1975) Hexavalent chromium in the ground water in Paradise Valley, Arizona. Ground Water. Vol.13. (pp. 516-527).

SANABRIA, J., et al. (2009). Proceso ANAMMOX una aplicación en ingeniería: revisión general de los aspectos microbianos. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, (8), 83-92. Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116390010>

SECRETARÍA DE ECONOMÍA (s.f.). Data México: Cuatro ciénegas. Consultado el 3 de octubre del 2020. <https://datamexico.org/es/profile/geo/cuatro-cienegas>

SGM (2008). Carta geológico-minera Cuatro Ciénegas G13-B59 Coahuila. Disponible en: http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1244_G13-B59_GM.pdf.

SGM (2013). Inventario físico de los recursos minerales de la carta Cuatrociénegas G13-B59 municipio Cuatrociénegas de Carranza, estado de Coahuila [Versión electrónica]. Servicio Geológico Mexicano. Disponible en: https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T0513VEBJ0001_01.PDF.

SGM-2 (2013). Anexo 1: Fichas de campo, carta inventario físico de los recursos minerales cuatro ciénegas G13-B59 escala 1:50,000, estado de Coahuila [Versión electrónica]. Servicio Geológico Mexicano. Disponible en: https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/A0513VEBJ0001_01.PDF.

SINGH, V., et al. (2018). Water quality management [versión electrónica]. Singapore: Springer.

SKOOG, D. (2008). Principios de análisis instrumental, 6ta edición. México, Cengage Learning.

-
- SOLTIS-MUTH, C.** (s.f.). TP- It stands for total Phosphorus, Methods of analysis and its effects on nature and wastewater treatment. Northeast Ohio Sewer District. Disponible en:
http://www.ohiowea.org/docs/OWEA_Phosphorus_CSM.pdf.
- SONG, Y.** (1999). Sediment-Water Interactions in Anoxic Freshwater Sediments [Versión electrónica]. Alemania: Springer-Verlag.
- SOUZA, V. et al.** (2012). The Cuatrociénegas basin in Coahuila, Mexico: An Astrobiological Precambrian Park. *Astrobiology*. Vol. 12. No. 7, (pp. 641-647).
- STOEPPLER, M.** (ed.) (1994). Hazardous metals in the environment [version electronica]. Amsterdam: Elsevier scientific publishing Company.
- TABOADA-CASTRO, M.** (2002). Effect of soil use and agricultural practices on heavy metal levels in surface waters [versión electrónica]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Vol.33. Nos. 15-18, (pp. 2833-2849).
Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1081/CSS-120014485>.
- TAPIA-TORRES, Y. et al.** (2018). How Do Agricultural Practices Modify Soil Nutrient Dynamics in CCB? En F. García-Oliva y J. Elser, *Ecosystem Ecology and Geochemistry of Cuatro Ciénegas: How to Survive in an Extremely Oligotrophic Site* (V. Souza, ed.) [versión electrónica]. Springer, México.
Disponible en: <https://www.springer.com/gp/book/9783319958545>.
- Uribe, E.** (2015). Estudios del cambio climático en América Latina: El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Organización de las Naciones Unidas. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Disponible en:
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295_en.pdf?sequence=1
- U.S. EPA** (2006). National Recommended Water Quality Criteria (4304T).
Disponible en: <https://nepis.epa.gov/>.

-
- U.S. EPA.** (2002). Summary table for the nutrient criteria documents [versión electrónica]. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/criteria-nutrient-ecoregions-sumtable.pdf>.
- USDA** (1955). Classification and Use of Irrigation Waters [versión electrónica]. Circular no. 969. Washington, D.C. USA.
- U. S. EPA** (2008). Monitored Attenuation of Inorganic Contaminants in Ground Water Volume 2 – Assessment for Non-Radionuclides Including Arsenic, Cadmium, Chromium, Copper, Lead, Nickel, Nitrate, Perchlorate, and Selenium. Disponible en: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=187248.
- VAN BRUGGEN, A. et al.** (2018). Environmental and health effects of the herbicide glyphosate [versión electrónica]. Science of the Total Environment. Vols. 616–617. (pp. 255–268). Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717330279>.
- WEST ANALÍTICA Y SERVICIOS.** (s.f). Salinidad y sales solubles en suelo. Serie: fertilidad de suelos. Disponible en: <https://westanalitica.com.mx/wp-content/uploads/2018/04/Salinidad-y-Sales-Solubles-en-Suelo.pdf>.
- WILCOX L. V.** (1955). Classification and use of irrigation waters. United States Department of Agriculture, Circular 969. (pp. 19).
- WOLAVER et al.** (2013). Identifying origins of and pathways for spring waters in a semiarid basin using He, Sr, and C isotopes: Cuatrociénegas Basin, Mexico.
- WOLAVER, B. et al.** (2008). An integrative approach to sustainable groundwater and associated groundwater-dependent system management in arid karst aquifers: Cuatrociénegas Basin, Mexico [versión electrónica]. International Association Hydrogeologists. Disponible en: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/17827>

-
- WOLAVER, B. et al.** (2012). Identifying origins of and pathways for spring waters in a semiarid basin using He, Sr, and C isotopes: Cuatrociénegas Basin, Mexico. *Gesphere*. Vol. 1. No. 9, (pp. 113-125). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/261507373_Identifying_origins_of_and_pathways_for_spring_waters_in_a_semiarid_basin_using_He_Sr_and_C_isotopes_Cuatrociénegas_Basin_Mexico
- WORSFOLD, P. et al.** (2016). Determination of phosphorus in natural waters: A historical review [versión electrónica]. *Analytica Chimica Acta*. Vol. 918. pp. 8-20. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003267016302860>.
- YANG, W. et al.** (1996). Effect of metal pollution on the water quality in Taihu Lake [versión electrónica]. *Geojournal*. Vol. 40. Nos. 1-2, (pp. 197-200). Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00222545>
- ZABLUDOVSKY, K.** (2012). Learning About Life on Mars, via a Detour to Mexico. *The New York times*. Consultado el 2 de enero del 2020. Disponible en: https://www.nytimes.com/2012/06/27/world/americas/learning-about-life-on-mars-by-studying-mexico-desert.html?_r=0
- ZIRENA, F. ETA L.** (2018). Glifosato en cuerpos hídricos: problema ambiental [versión electrónica]. *Revista de Investigaciones Altoandinas*. Vol. 20. No. 3, (pp. 325-332). Disponible en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/ria/v20n3/a06v20n3.pdf>.
- ZÓCALO** (2013). Resurgen campesinos del ejido Cuatro Ciénegas con siembra de Nopal. Disponible en: https://www.zocalo.com.mx/new_site/articulo/resurgen-campesinos-del-ejido-cuatro-cienegas-con-siembra-de-nopal.

Anexos

Anexo A

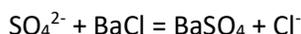
Determinación de ion sulfato

Método turbidimétrico.

Tomado de la norma NMX-AA-074-SCFI-2014.

Principio del método.

El ion sulfato precipita con cloruro de bario, en un medio ácido, formando cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. La concentración de masa del ion sulfato se mide por comparación de la lectura con una curva de calibración analítica.

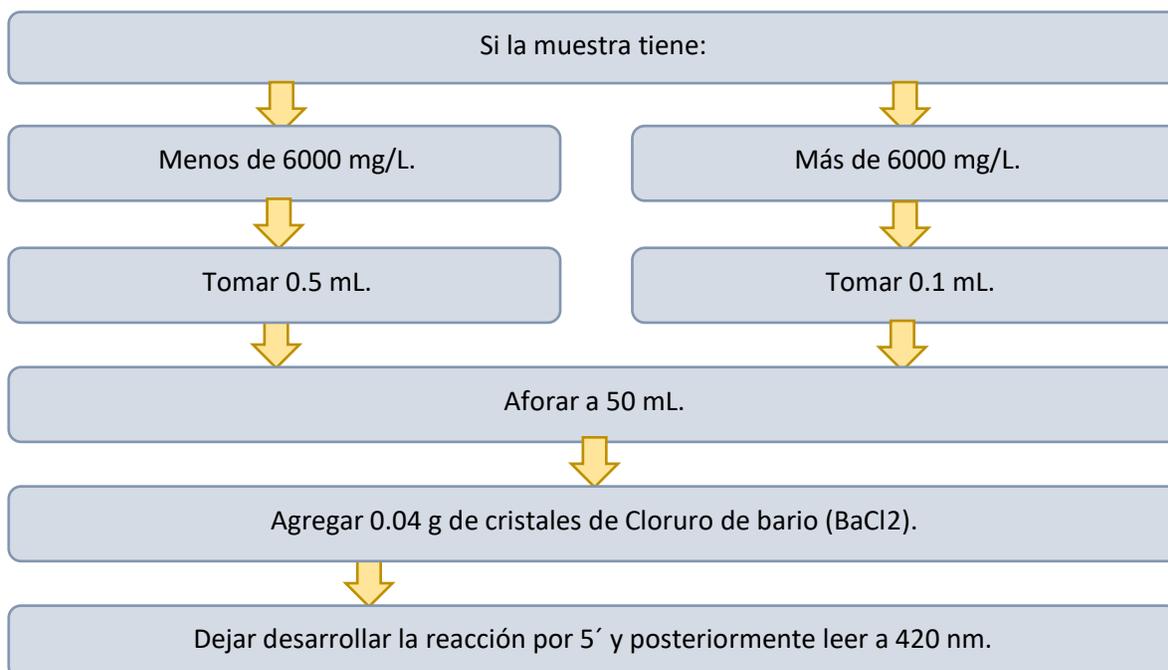


Interferencias

La materia en suspensión en grandes cantidades, el color, la sílice en concentraciones de 500 mg/L y la materia orgánica en concentraciones altas, están considerados como interferencias. La materia suspendida puede eliminarse parcialmente por filtración. La materia orgánica en concentraciones altas imposibilita la precipitación satisfactoria del sulfato de bario. En aguas naturales no existen otros aniones además del sulfato que formen compuestos insolubles con el bario bajo condiciones fuertemente ácidas.

Procedimiento

Debido a que el precipitado de cloruro de bario se vuelve inestable a concentraciones mayores a 40 mg/L, se emplean diferentes volúmenes de muestra dependiendo de la concentración presumible de ion sulfato presente.



Anexo B

Determinación de nitratos

Método del ácido fenoldisulfónico.

Tomado de (Gómez, et al., 2014).

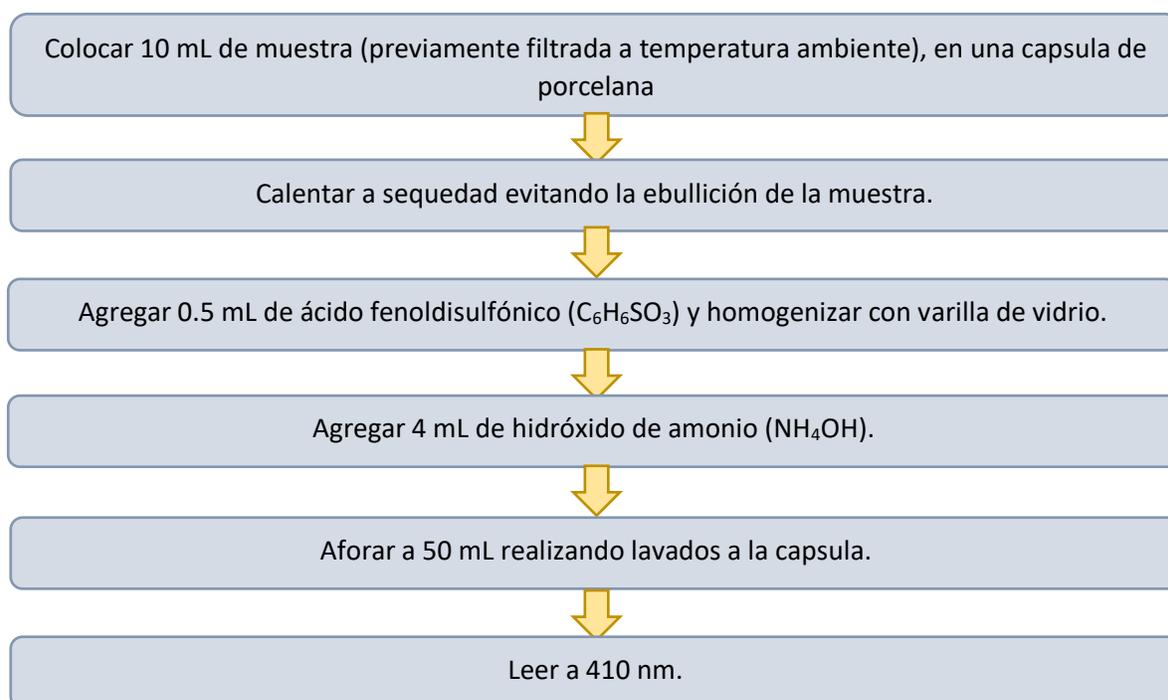
Principio del método

Este método tiene un principio colorimétrico, en el cual, el ácido fenoldisulfónico reacciona con el nitrato en ausencia de agua para formar un nitro-derivado que en medio alcalino es alterado ligeramente para producir un compuesto de color amarillo. La intensidad del color que se produce es proporcional a la concentración de nitrato presente en la muestra, permitiendo su análisis por espectrofotometría UV-VIS, calculando la concentración de nitratos en la muestra por comparación relativa con soluciones de concentración conocida.

Interferencias

Todos los agentes fuertemente oxidantes o reductores y altas concentraciones de materia orgánica y materia suspendida interfieren con esta prueba.

Procedimiento*



*Nota: preparar la solución blanco a la par y siguiendo el mismo procedimiento.

Anexo C

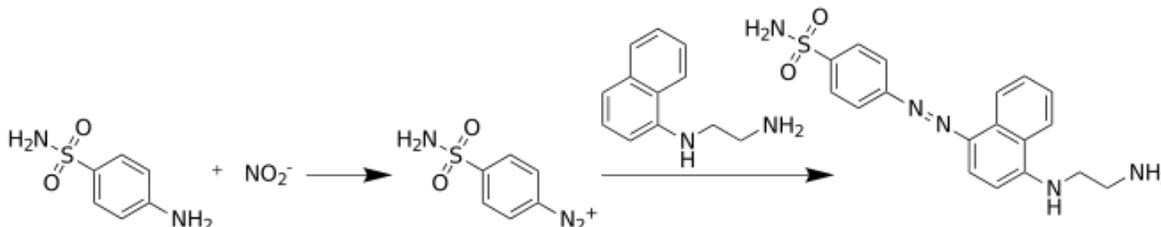
Determinación de nitritos

Método de Griess.

Tomado de (Gómez, et al., 2014).

Principio del método

La prueba se basa en la reacción de Griess en la que el ion nitrito reacciona con la sulfanilamida a un pH ácido (entre 1.5 y 2.0) produciendo un compuesto "azo" que reacciona con el NNED (N-alfanaftilendiamina dihidrocloro) para formar un tinte rosa intenso a púrpura en función de la cantidad de nitrito presente en la muestra como se muestra a continuación:



Interferencias

Por su propiedad de precipitación en las condiciones de la prueba interfieren los iones siguientes: férrico (Fe³⁺), mercuroso (Hg⁺), plata (Ag⁺), bismuto (Bi⁺), antimonioso (Sb³⁺), plomo (Pb²⁺), aúrico (Au³⁺), hexacoroplatino (PtCl₆²⁺) y metavanadato (VO₃²⁺). Asimismo, interfieren con el método ciertas sustancias frecuentemente encontradas en muestras de agua, principalmente: cloraminas, tiosulfatos, polifosfatos de sodio, entre otras.

Procedimiento

Colocar 10 mL de muestra (previamente filtrada a temperatura ambiente).

Aforar a 50 mL.

Agregar 0.3 g de reactivo seco*.

Dejar desarrollar la reacción por 5 minutos y posteriormente leer a 540 nm.

*Reactivo seco: Se prepara mezclando 0.1 g de alfa-naftalamina, 1 g de ácido sulfanílico (C₆H₇NO₃S) y 8.9 g de ácido tartárico (C₄H₆O₆) en un mortero. Conservarse en frasco ámbar.

Anexo D

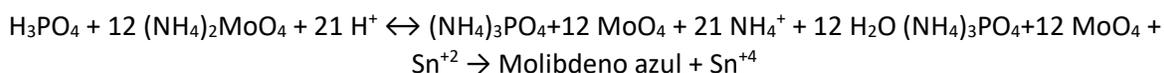
Determinación de Ortofosfatos (Fósforo Reactivo Soluble)

Método del cloruro estanoso.

Tomado de (Gómez, et al., 2014).

Principio del método

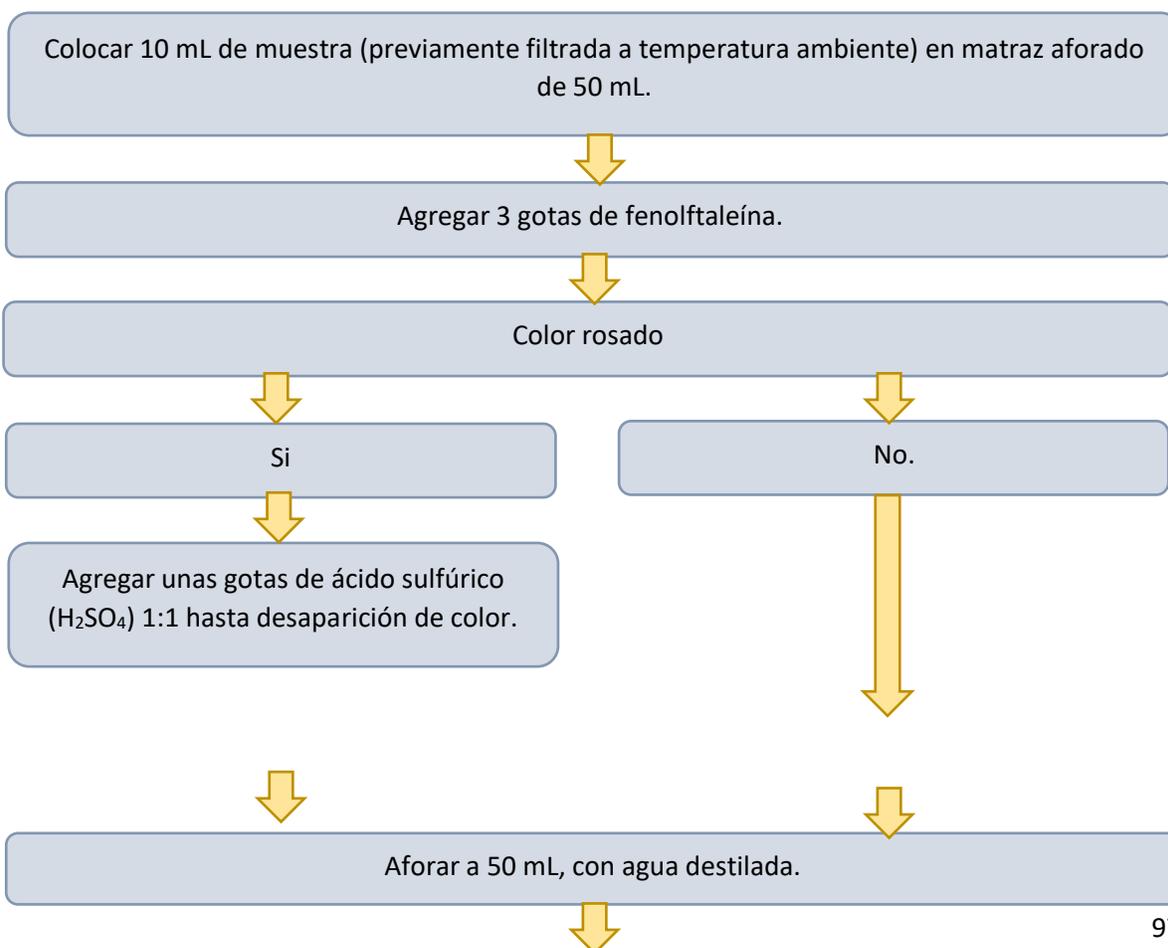
Las especies iónicas de ortofosfatos solubles presentes en una muestra de agua reaccionan con el heptamolibdato de amonio en un medio ácido para formar inicialmente, un complejo de color amarillo de ácido fosfomolibdico y posteriormente, en presencia de un agente reductor SnCl_2 el complejo se reduce a azul de molibdeno que se incrementa en forma proporcional a la cantidad de ortofosfatos presentes en la muestra.



Interferencias

Este método no debe de ser utilizado en aguas que contienen más de 0.2 mg/L de arsenatos o arsenitos, ya que estos iones dan un color azul similar al ion fosfato.

Procedimiento*



Agregar 4 mL de solución de heptamolibdato de amonio tetra hidratado
 $((\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O})$.



Agregar una gota de solución de cloruro estanoso (SnCl_2) y agitar.



Dejar desarrollar la reacción por 10-12 minutos y posteriormente leer a 690 nm.

***Nota:** preparar la solución blanco a la par y siguiendo el mismo procedimiento.

Anexo E

Determinación de Cloruros

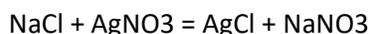
Método de Mhor.

Modificado de NMX-AA-073-SCFI-2001.

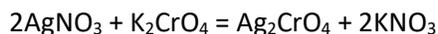
Principio del método

La determinación de cloruros por este método se basa en una valoración con nitrato de plata utilizando como indicador cromato de potasio. La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco. En las inmediaciones del punto de equivalencia al agotarse el ion cloruro, empieza la precipitación del cromato. La formación de cromato de plata puede identificarse por el cambio de color de la disolución a anaranjado-rojizo así como en la forma del precipitado. En este momento se da por terminada la valoración.

Reacción y fórmula



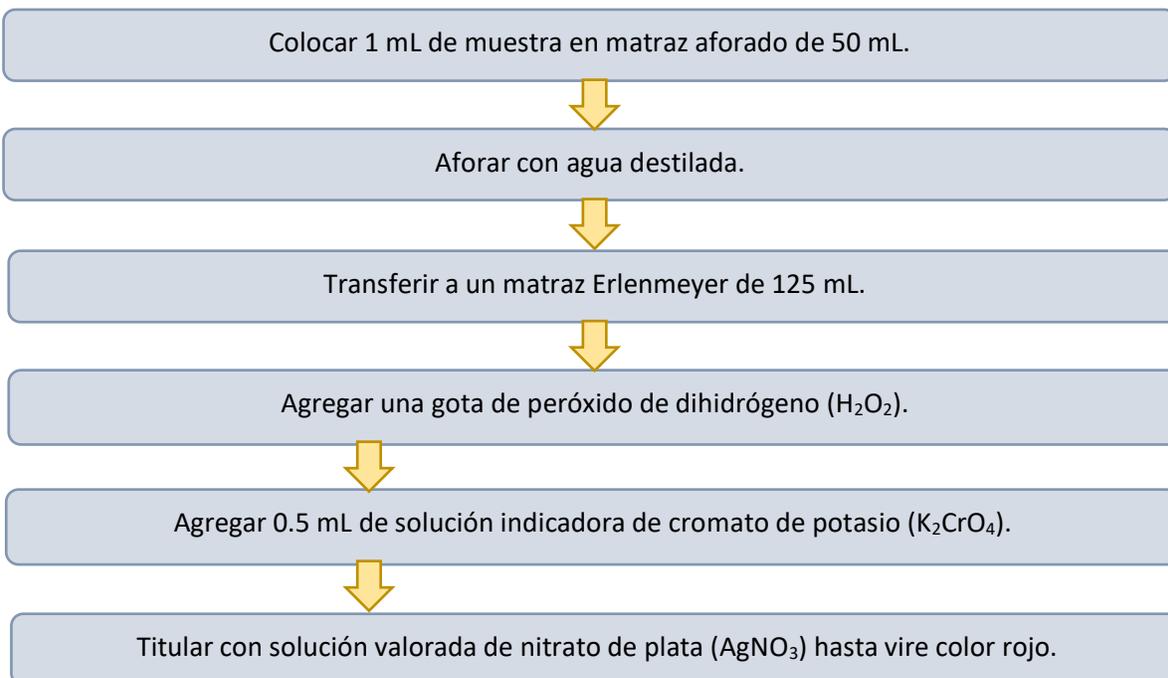
Reacción indicadora



Interferencias

Los iones bromuro, yoduro y cianuro se registran como concentraciones equivalentes de cloruro. Los iones sulfuro, tiosulfato y sulfito interfieren. El ortofosfato en concentraciones mayores de 25 mg/L interfiere ya que precipita como fosfato de plata. El hierro con concentraciones arriba de 10 mg/L interfiere porque enmascara el punto final de la valoración.

Procedimiento*



*Nota: preparar la solución blanco a la par y siguiendo el mismo procedimiento.

Anexo F

Determinación de Alcalinidad

Método de indicadores.

Tomado de (Gómez, et al., 2014).

Principio del método

Este método se basa en el manejo de pH utiliza la fenolftaleína y el anaranjado de metilo como indicadores. Si las muestras se tornan rosadas al agregarles fenolftaleína (pH sobre 8.3) estas contienen cantidades considerables de iones carbonato. La valoración de la alcalinidad se realiza en dos etapas: la muestra es primeramente valorada con H_2SO_4 hasta el punto de conversión de la fenolftaleína (vire rojizo a incoloro). Durante este paso los carbonatos se transforman en bicarbonatos y al punto de vire todos los carbonatos han sido valorados, además ningún bicarbonato originalmente presente en la muestra ha sido destruido de manera que la muestra ahora contiene más bicarbonatos que al principio de la titulación, ver la figura siguiente:

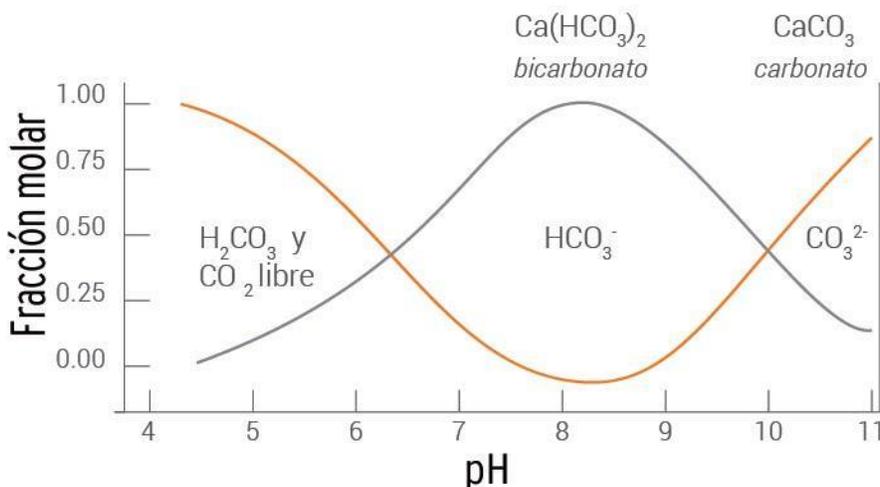


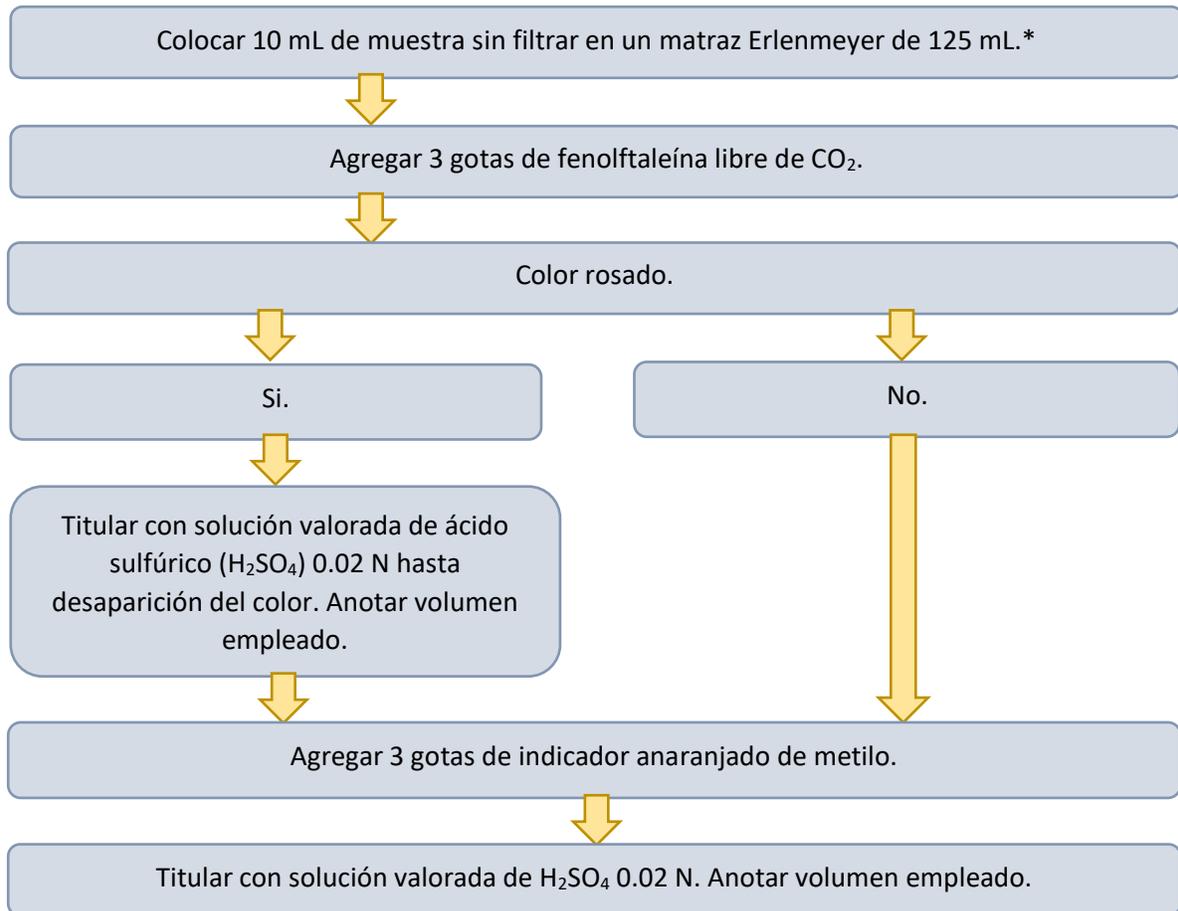
Diagrama de transformación del carbono con respecto al pH en solución.

La segunda etapa consiste en valorar la muestra, también con H_2SO_4 , para determinar la alcalinidad total (bicarbonatos de la primera reacción más los bicarbonatos de la muestra) utilizar el anaranjado de metilo como indicador (pH sobre 4.5) hasta que todo el bicarbonato se convierta en CO_2 y el agua en el punto de conversión.

Interferencias

No debe eliminarse los sólidos suspendidos de la muestra ya que pueden contribuir a su alcalinidad. Las muestras que contienen iones oxidables o hidrolizables como: hierro (ferroso y férrico), aluminio y manganeso en concentraciones altas causan desviaciones en los puntos finales.

Procedimiento



***Nota:** preparar la solución blanca a la par y siguiendo el mismo procedimiento.

Anexo G

Determinación de metales por espectroscopia de absorción y emisión atómica en llama.

Método digestión ácida

Modificado a partir de (NMX-AA-051-SCFI-2001).

Principio de la técnica

La técnica para la determinación de metales por espectrofotometría de absorción y emisión atómica se basa en la generación de átomos en estado basal y en la medición de la cantidad de energía absorbida o emitida por estos, la cual es directamente proporcional a la concentración de ese elemento en la muestra analizada.

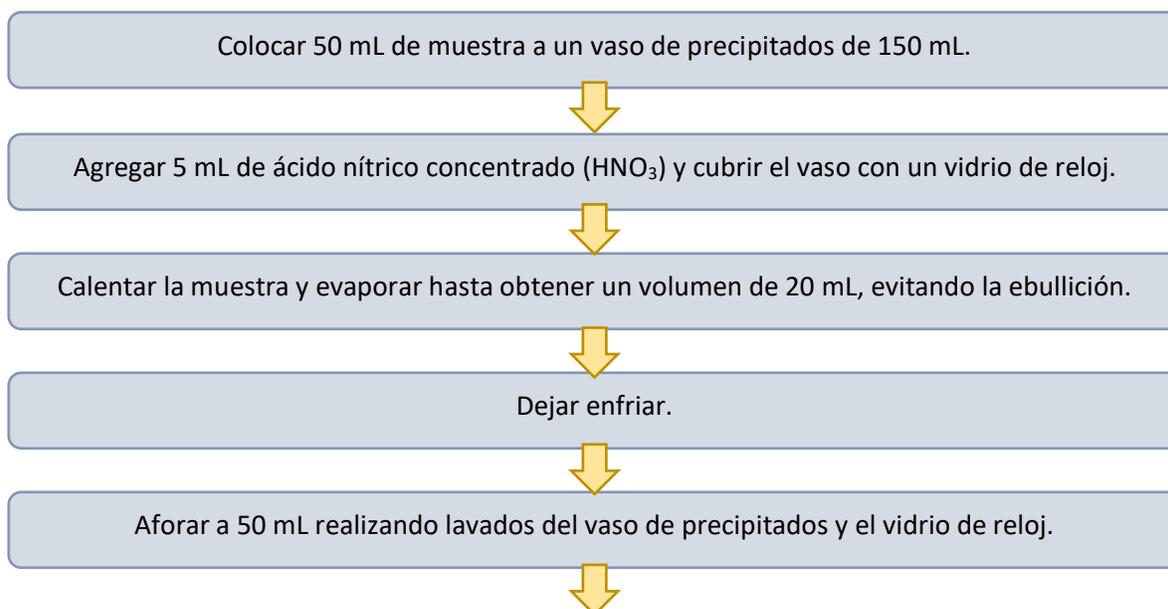
Interferencias

La absorción molecular y la dispersión de la luz causadas por partículas sólidas en la flama pueden causar errores positivos. Cuando la flama no está lo suficientemente caliente para disociar la molécula se pueden generar errores en la lectura.

Interferencia física. Están relacionadas con las diferentes propiedades existentes entre las muestras y los estándares. Las cuales pueden afectar a la aspiración y eficiencia de nebulización en el sistema de atomización. Si las soluciones presentan diferencias de viscosidad y/o tensión superficial, la eficiencia de nebulización no será igual y los resultados analíticos se ven afectados. La presencia de otros compuestos además del elemento de interés puede afectar a los resultados analíticos.

Principio del método

Procedimiento*





Filtrar la muestra y vaciar en un frasco de polipropileno.



Leer la muestra en el espectrofotómetro de absorción atómica.

***Nota:** preparar la solución blanco a la par y siguiendo el mismo procedimiento.

Anexo H

Variaciones estacionales

Se compararon las variaciones estacionales entre los parámetros medidos, obteniéndose las tablas 14 y 15, donde se marca en color rojo la diferencia con la magnitud del decremento, en verde la diferencia con la magnitud del aumento y en negro los parámetros que se mantuvieron sin cambios entre la estación de estiaje y lluvias y/o no aplica una diferencia (NA).

Manantial Churince

Se observó un incremento en los valores de 13 parámetros en época de lluvia con respecto a la época de estiaje (pH, temperatura, conductividad, ion sulfato, nitritos, cloruros, ortofosfatos, bicarbonatos, Fe, Se, Cd, K y Na) un decremento en 8 (oxígeno disuelto, nitratos, carbonatos, TAC, Pb, Co, Ca y Mg) y 5 se mantuvieron constantes (Cu, Zn, Ni, Mn y Cr) (ver tabla 14).

Tabla 14. Diferencia entre la temporada de lluvia y la temporada de estiaje en Manantial Churince.

Parámetro	Estiaje	Lluvias	Diferencia
pH	7.03	7.19	+0.16
Temp. (°C)	28.7	31	+2.3
O. D. (ppm)	7.12	5.3	-1.82
C. E. μ S	2020	2420	+400*
Ion Sulfato mg/L	503.968	511.905	+7.937
Nitritos mg/L	ND	0.0018	NA
Nitratos mg/L	0.797	0.217	-0.58
Cloruros mg/L	198.52	1985.2	+1786.68
Ortofosfatos mg/L	0.041	0.069	+0.028
HCO ₃ ⁻ mg/L	10	15	+5
CO ₃ mg/L	45	30	-15
TAC mg/L	55	45	-10
Cu mg/L	0.016	0.016	0
Zn mg/L	0.017	0.017	0
Fe mg/L	0.1	0.15	+0.05
Se mg/L	0.12	0.157	+0.037
Ni mg/L	ND	ND	NA
Pb mg/L	0.1	ND	NA
Cd mg/L	0.1	0.5	+0.4
Mn mg/L	ND	ND	NA
Cr mg/L	ND	ND	NA
Co mg/L	0.4	0.2	-0.2
K mg/L	1.957	3.043	+1.086
Ca mg/L	831.88	179.48	-652.4
Na mg/L	88	239.59	+151.59
Mg mg/L	594.104	416.1	-178.004

Poza Azul

Se observó un incremento en los valores de 13 parámetros en época de lluvia con respecto a la época de estiaje (temperatura, conductividad, ion sulfato, nitritos, cloruros totales, carbonatos, TAC Zn, Fe, Se, Cd, K y Na) un decremento en 9 (pH, oxígeno, nitratos, ortofosfatos, Ni, Pb, Mn, Ca y Mg) y 4 se mantuvieron constantes (Bicarbonatos, Cu, Cr y Co) (ver tabla 15).

Tabla 15. Diferencias entre la temporada de lluvias y la temporada de estiaje en Poza Azul.

Parámetro	Estiaje	Lluvias	Diferencia
pH	7.14	6.620	-0.52
Temp. (°C)	24.7	31	+6.3
O. D. (ppm)	6.04	6	-0.04
C. E. μ S	1650	1820	+170
Ion Sulfato mg/L	523.810	527.778	+3.968
Nitritos mg/L	0.000	0.0008	+0.0008
Nitratos mg/L	0.592	0.471	-0.121
Cloruros mg/L	198.52	694.820	+496.3
Ortofosfatos mg/L	0.074	0.037	-0.037
HCO ₃ ⁻ mg/L	10	10	0
CO ₃ mg/L	45	75	+30
TAC mg/L	55	85	+30
Cu mg/L	0.016	0.016	0
Zn mg/L	ND	0.017	NA
Fe mg/L	ND	0.100	NA
Se mg/L	0.035	0.800	+0.765
Ni mg/L	0.05	ND	NA
Pb mg/L	0.1	ND	NA
Cd mg/L	0.05	0.150	+0.1
Mn mg/L	0.05	ND	NA
Cr mg/L	ND	ND	NA
Co mg/L	0.2	0.2	0
K mg/L	2.609	2.717	+0.108
Ca mg/L	176.92	142.700	-34.22
Na mg/L	97.6	124.800	+27.2
Mg mg/L	459.184	443.311	-15.873

Anexo fotográfico
Los Hundidos



Fotografía. Los Hundidos I, 20 de marzo del 2019.



Fotografía. Los Hundidos III, 20 de marzo del 2019.



Fotografía. Los Hundidos IV, 20 de marzo del 2019.



Fotografía. Los Hundidos IV, 20 de marzo del 2019.

Poza Azul



Fotografía. Poza Azul, 21 de marzo del 2019.



Fotografía. Estromatolitos en Poza Azul, 20 de marzo del 2019.



Fotografía. Poza Azul, 20 de marzo del 2019.



Fotografía. En Poza Azul.

Los Domos



Fotografía. Los Domos en época de estiaje, se observan huellas de posible caballo sobre la costra de sales, 21 de marzo del 2019.



Fotografía. Segmento transversal de un tapete microbiano tomado del suelo de Los Domos, se puede apreciar la diferencia en tonalidades que corresponden a diferentes colonias de bacterias. 21/03/20219.



Fotografía. Los Domos secos, en temporada de estiaje, 21 de marzo del 2019.

Laguna Churince y Manantial Churince



Fotografía. Churince I, 22 de marzo del 2019.



Fotografía. Churince II, 22 de marzo del 2019.



Fotografía. Churince III, 22 de marzo de 2019.



Fotografía. Manantial Churince, 22 de marzo de 2019.

