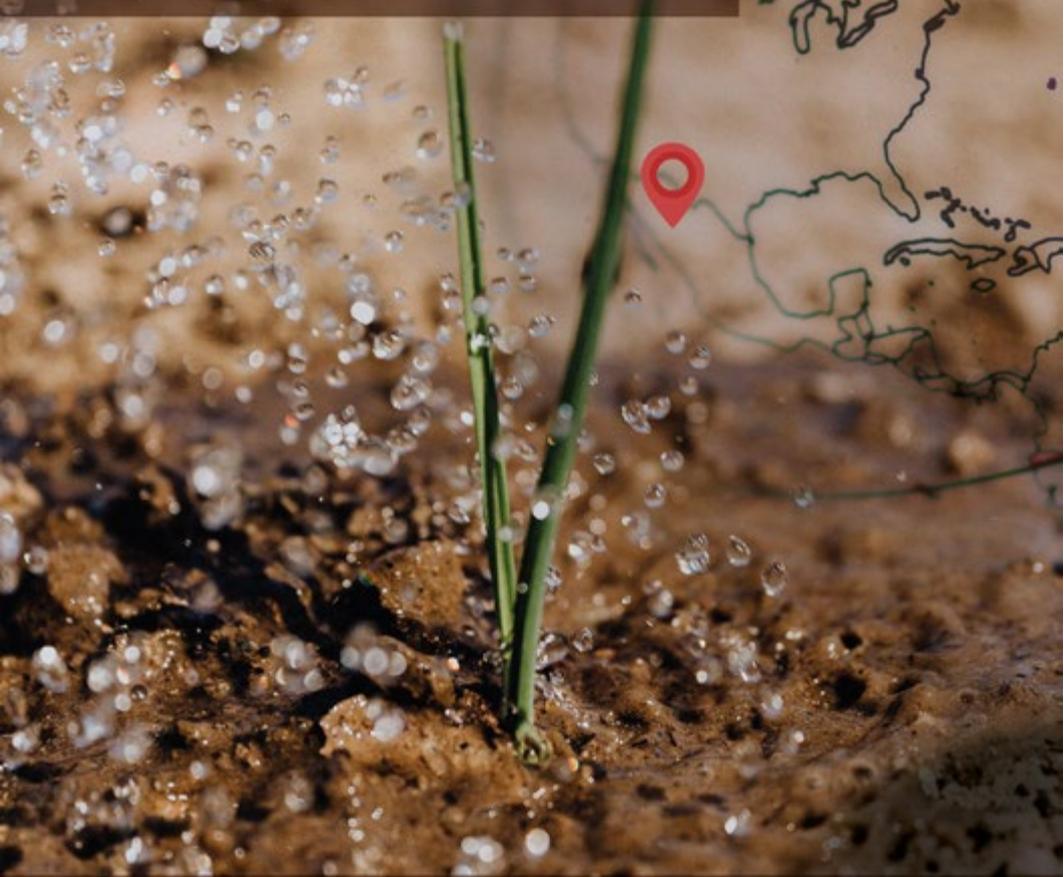


PROBLEMÁTICAS DEL AGUA

Y MEDIDAS SUSTENTABLES EN DOS ESTADOS
DESÉRTICOS DE MÉXICO, CASO SONORA



Coordinadores:

Esmeralda Cervantes Rendón y
Germán Eduardo Dévora Isiordia

PROBLEMÁTICAS DEL AGUA
Y MEDIDAS SUSTENTABLES
EN DOS ESTADOS
DESÉRTICOS DE MÉXICO,
CASO SONORA

Coordinadores:

Esmeralda Cervantes Rendón y
Germán Eduardo Dévora Isiordia

Problemáticas del agua y medidas sustentables en dos estados desérticos de México, caso Sonora.

D.R. © El Colegio de Chihuahua
Calle Partido Díaz 4723
Colonia Progresista, C.P.32310
Ciudad Juárez, Chihuahua, México
Tel. +52 656 639 0397
www.colech.edu.mx

© Esmeralda Cervantes Rendón y Germán Eduardo Dévora Isiordia por la coordinación.

Este texto fue sometido a doble proceso ciego por pares académicos externos a esta institución.



Primera edición 2020.
ISBN: 978-607-8214-59-4

Coordinación editorial y cuidado: E. Liliana Chaparro Vielma
Diseño de cubierta y diagramación: Karla María Rascón González
Corrección: Jazmín Sujey Cano Frías

PUBLICACIÓN EN ACCESO ABIERTO: Se autoriza cualquier reproducción total o parcial de esta obra, siempre y cuando sea sin fines de lucro o para usos estrictamente académicos, citando invariablemente la fuente sin alteración del contenido y dando los créditos autorales.

Hecho en México / Made in Mexico

PROBLEMÁTICAS DEL AGUA Y MEDIDAS SUSTENTABLES EN DOS ESTADOS DESÉRTICOS DE MÉXICO, CASO SONORA

Coordinadores:

Esmeralda Cervantes Rendón y
Germán Eduardo Dévora Isiordia

Coordinadores:

Esmeralda Cervantes Rendón y
Germán Eduardo Dévora Isiordia

ÍNDICE

Prólogo	
<i>Germán Eduardo Dévora Isiordia</i>	7

Introducción	
<i>Esmeralda Cervantes Rendón</i> <i>y Germán Eduardo Dévora Isiordia</i>	11

PARTE I

Problemáticas sociales, ambientales y económicas del recurso hídrico

Capítulo I. La división oficial de regiones y cuencas hidrológicas, y los derechos de agua otorgados en el estado de Sonora	
<i>Nicolás Pineda Pablos</i>	35

Capítulo II. Descarga de Aguas Residuales en Bahía de Lobos: Impacto ambiental y socioeconómico	
<i>Edna Rosalba Meza Escalante, Ruth Gabriela Ulloa Mercado, Denisse Serrano Palacios, Luis Alonso Leyva Soto, Ana María Rentería Mexía, Lourdes Mariana Díaz Tenorio, Pablo Gortáres Moroyoqui</i>	67

Parte II

Tratamiento y uso sustentable del agua

Capítulo III. Alternativa de tratamiento terciario de aguas ácidas de minas utilizando microalgas

María del Rosario Martínez Macías, Germán Eduardo Dévora Isiordia, Jesús Álvarez Sánchez95

Capítulo IV. Quitosano como alternativa para eliminar contaminantes acuosos

Ma. Araceli Correa Murrieta, Reyna Guadalupe Sánchez Duarte¹ y Germán Eduardo Dévora Isiordia.....113

Capítulo V. Preparación, caracterización y evaluación de membranas de nanofiltración modificadas con nanopartículas de plata y extracto de chiltepín para su aplicación en desalación de agua salobre

Patricia Guadalupe Torres Valenzuela, Jesús Álvarez Sánchez, Sergio Pérez Sicairos, Germán Eduardo Dévora Isiordia, Jorge Saldívar Cabrales, y Rodrigo González Enríquez..... 137

A manera de reflexiones finales

Esmeralda Cervantes Rendón y Germán Eduardo Dévora Isiordia159

PRÓLOGO

Germán Eduardo Dévora Isiordia¹

El Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) y El Colegio de Chihuahua (El Colech) colaboran para presentar problemáticas referentes al agua, con el objeto de dar a conocer las dificultades que se presentan hoy en día en el ámbito ambiental, social y económico a causa del mal uso que se la ha dado a este recurso tan indispensable. Las problemáticas alusivas al agua se reflejan principalmente en la distribución global desigual y en la contaminación en diferentes áreas del mundo.

Alrededor del planeta se han presentado situaciones de escasez y de contaminación, haciendo imposible el consumo humano, que han contribuido a la disminución en la calidad de vida de estos. Los desechos de las industrias, principalmente, han generado la contaminación de grandes cuerpos de agua debido a un seguimiento inadecuado de los protocolos de seguridad.

En el caso de Sonora, este recurso ha sido motivo de conflictos gubernamentales y de la sociedad. Tal es el caso que ocurrió en Hermosillo, Sonora, cuando, en contra de la vo-

1 Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

luntad de los productores agrícolas en el sur del estado, hubo que construir un acueducto con el agua de la presa del Novillo para derivarla a la población y satisfacer la necesidad de este líquido en la época de estiaje. Esto provocó la incomformidad de los agricultores en el sur, quienes reclaman que el agua en el sistema de presas se verá disminuida notoriamente y que afectará la producción actual y futura.

Se ha insistido, ante el gobierno del estado, sobre la necesidad de establecer equipos de desalinización, sobre todo, en los municipios de Guaymas y Empalme que confrontan, al igual que en el caso de Hermosillo, una escasez significativa de agua desde hace algunas décadas. Fuera de las ciudades de mayor número de habitantes en el estado, las regiones con menos población cuentan con plantas tratadoras de agua; por esto, el agua que consumen no es potable y existe mayor riesgo de enfermedades a causa de lo anterior.

En el caso de agua para uso agrícola, en la zona central y norte de Sonora, está sujeta a los volúmenes que existan en los mantos acuíferos; por lo que la sobreexplotación de estos ha provocado la intrusión salina en los pozos originalmente establecidos. Esto genera la reducción de estos y, consecuentemente, de las áreas de producción respectivas al tener suelos salinos por constantes bombeos. No obstante, los valores actuales de producción se han incrementado notablemente por el cambio de cultivos tradicionales a otros más rentables como son: el nogal, la vid y cítricos.

Los intentos por resolver el problema de la escasez de agua, sobre todo en terrenos desérticos en el sur de Sonora, datan del año 1964 cuando se tenía proyectado el Plan Hidráulico del Noroeste (PHLINO) que no ha podido concretarse por diferentes razones; la principal es la que involucra el entendimiento y negociación en tres estados de la República Mexicana como

lo son Sonora, Sinaloa y Nayarit, lo cual ha sido infructuoso hasta el día de hoy. El futuro no se ve alentador.

Se busca encontrar otras opciones que den solución a la falta de este recurso para el desarrollo agropecuario y de la población misma. Se espera que este libro otorgue herramientas de acción y corrección en las problemáticas referentes al agua, además de concientizar a la población sobre el uso y el cuidado de esta.

INTRODUCCIÓN

Esmeralda Cervantes Rendón¹ y Germán Eduardo Dévora Isiordia²

En México se encuentran dos grandes desiertos: el de Sonora y Chihuahua, que reciben sus nombres debido a que su mayor extensión territorial se encuentra en esos estados, los cuales comparten características similares. Aunque en este tomo se presentarán trabajos del estado de Sonora, es importante describir las similitudes que tienen estos dos territorios como lo son sus condiciones climáticas (que van de secas a muy secas), parte de sus actividades económicas (la agricultura, ganadería y minería), así como la industria manufacturera que se ve incrementada por ser frontera con Estados Unidos. Por otra parte, respecto a los diferentes escenarios de cambio climático, presentan vulnerabilidades que van de media a muy alta. Por esto la importancia que tiene para ambos el recurso hídrico, desde una perspectiva de análisis y estrategias de sustentabilidad y tratamiento.

En cuanto a la relación internacional con Estados Unidos, por sus aguas y cuencas, se han generado principalmente dos acuerdos que impactan a los estados de Sonora y Chihuahua.

¹ El Colegio de Chihuahua (El Colech).

² Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

El primero es el Tratado de 1906 para la equitativa distribución de las aguas del Río Grande, siendo este de principal interés para el estado de Chihuahua ya que involucra al área denominada como Valle de Juárez. El segundo es el Tratado de 1944, sobre la distribución de las aguas internacionales de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo, desde Fort Quitman, Texas hasta el Golfo de México. Este, por mencionar al Río Colorado, presenta mayor interés para Sonora y Chihuahua por la sección del Río Bravo. Esta relación internacional por el recurso hídrico ha derivado en conflictos, pero también ha generado colaboración entre ambos países (Samaniego, 2012).

Respecto a las aguas subterráneas, entre estos dos estados se encuentra el 23% de los acuíferos sobreexplotados de México (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018a), lo que confirma que la disponibilidad y demanda de agua es uno de sus grandes problemas.

TABLA 1. Disponibilidad de agua de los acuíferos sobreexplotados de los estados de Sonora y Chihuahua.

Clave	Nombre	Volumen conce- sionado REPGA	Disponibili- dad de agua subterr- nea (hm ³)	Extracción (hm ³)	Recarga media (hm ³)	Disponibili- dad media anual de agua del subsuelo (déficit)*
SONORA						
2601	Valle de San Luis Río Colorado	162.8	41.5	263.5	236.8	0
2603	Sonoyta-Puerto Peñasco	107.4	0	46.3	41.4	-81.93
2605	Caborca	303.8	0	321.2	212.9	-90.87
2606	Los Chirriones	28.7	0	54.2	30	-0.67
2609	Busani	17.8	0	20	15.5	-2.3

Continúa...

Clave	Nombre	Volumen conce- sionado REPDA	Disponibili- dad de agua subterrá- nea (hm ³)	Extracción (hm ³)	Recarga media (hm ³)	Disponibili- dad media anual de agua del subsuelo (déficit)*
2619	Costa de Hermosillo	347	0	430.4	250	-97.01
2621	Mesa del Seri- La Victoria	106.4	0	120	73	-49.41
2624	Río Sonora	61.6	5.1	74.6	66.7	0
2626	Río Zanjón	101.1	0	115.6	94.8	-14.11
2635	Valle de Guaymas	110.2	0	117.4	100	-10.19
2636	San José de Guaymas	18.4	0	8.1	4.5	-13.89
TOTAL		1,365.2	46.6	1,571.3	1,125.6	-360.38
CHIHUAHUA						
801	Ascensión	239.5	0	191.5	132.2	-107.28
803	Baja Babicora	185	0	132	90.6	-94.39
804	Buenaventura	183.2	0	132	66.5	-116.68
805	Cuauhtémoc	310.9	0	497.9	299.4	-11.5
806	Casas Grandes	200.1	0	200.5	180	-20.1
807	El Sauz- Encinillas	117.1	0	127.2	62.4	-54.65
812	Palomas- Guadalupe Victoria	16.3	0	28.8	15.6	-2.96
819	Laguna la Vieja	227.8	0	153.8	61.5	-166.29
821	Flores Magón- Villa Ahumada	253.8	0	208.1	137.5	-116.32
830	Chihuahua- Sacramento	114.3	0	67.2	56.6	-57.66
831	Meoqui-Delicias	381.8	0	329.2	211.2	-170.64
832	Jiménez-Ca- margo	329.3	0	303.1	173.3	-161.5
833	Valle de Juárez	212.1	0	171.8	125.9	-86.24

Continúa...

Clave	Nombre	Volumen conce- sionado REPDA	Disponibili- dad de agua subterrá- nea (hm ³)	Extracción (hm ³)	Recarga media (hm ³)	Disponibili- dad media anual de agua del subsuelo (déficit)*
847	Los Juncos	604.2	0	404.2	133.6	-470.71
848	Laguna de Palomas	15.7	7.6	63.3	23.3	0
TOTAL		3,391.1	7.6	3,010.6	1,769.6	-1,636.92

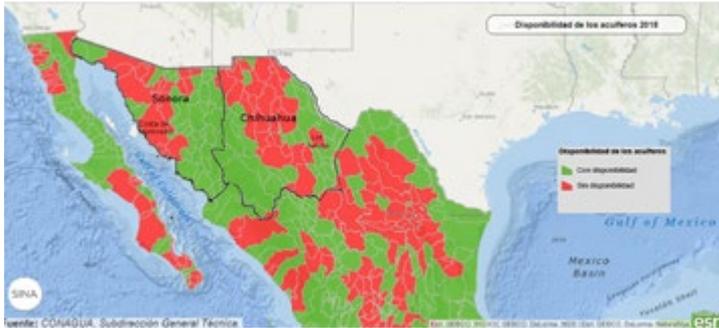
FUENTE: Secretaría de Gobernación, (2018).

En el estado de Sonora se tienen acuíferos con un déficit de hasta -97.01 como el Costa de Hermosillo (Figura 1). Por otro lado, el total de volumen concesionado por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), para este estado, corresponde a 3002.00 hm³ (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018b) de los cuales 1,365.2 hm³ (Tabla 1) pertenecen a acuíferos clasificados como sobreexplotados. Es decir, el 45.5% del volumen concesionado es de zonas en las que se debe de tener un especial cuidado para garantizar el uso sustentable del recurso hídrico que, principalmente, se encuentra en la región noreste del estado (Figura 1).

Mientras que en el estado de Chihuahua el acuífero, que cruza de norte a sur por la región central, con un mayor déficit corresponde a Los Juncos (Figura 1) con un valor de -470.71 hm³. En este caso el acumulativo del déficit estatal es de -1,636.92 hm³ (Tabla 1). Para este estado, el volumen concesionado REPDA total es del orden de 5,229.20 hm³ (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018c), de los cuales 3,391.1 hm³, que corresponden a 15 acuíferos, están sobreexplotados. Es importante hacer énfasis en que el 64.8% de sus concesiones son en acuíferos que requieren una especial

atención con el fin de que se brinde este recurso sin comprometer su equilibrio hidrológico.

FIGURA 1. Mapa de disponibilidad de agua de los acuíferos del norte de México.



FUENTE: CONAGUA, (2018a).

La importancia del análisis de la situación hídrica de estos dos estados no solamente radica en las problemáticas actuales, sino también en los diversos escenarios del cambio climático en donde se identifican diferentes grados de vulnerabilidad. En el caso de Sonora se presenta una mayor exposición debido a la brecha hídrica. Esta se refiere a la diferencia entre la oferta sustentable actual y la demanda al 2030 con regiones en el norte que van de media a muy alta. Mientras que en el caso de Chihuahua su debilidad más alta la representan las sequías y el grado de sobreexplotación de sus acuíferos, puesto que en la zona centro-sur se manifiesta un alto grado de sequedad. Lo anterior genera que, por ejemplo, la cuenca del Río Conchos, en Chihuahua, sea considerada con una vulnerabilidad muy alta y, para el estado de Sonora, el Río Concepción presente una vulnerabilidad global alta (Rivas, 2015).

Por otro lado, el manejo del agua no solamente se relaciona con el abastecimiento y acceso a la misma, sino también a que sea de calidad para consumo humano. Sin embargo, procesos industriales, agropecuarios y de extracción pueden generar contaminación en fuentes subterráneas y superficiales. Asimismo, las condiciones naturales del suelo pueden originar que el agua subterránea contenga altas cantidades de metales. Por ello, la importancia que se le ha dado a la identificación y mejoramiento de los tratamientos de remoción de aguas residuales que, de acuerdo con Caviedes, Muñoz, Pedormo & Sandoval (2015), se pueden clasificar en convencionales y no convencionales; los primeros son los que se han implementado habitualmente y que incluyen la filtración por membrana (electrodialisis, ósmosis inversa, nanofiltración y ultrafiltración), el intercambio iónico, la adsorción por materiales convencionales (el carbón activado y los nanotubos de carbono), la precipitación química, la electrocoagulación, la coagulación-floculación, electrofloculación, la flotación y la fotocatalisis en la degradación de metales pesados. Por otro lado, en los tratamientos con técnicas no convencionales se busca principalmente el uso de materiales naturales o de desechos de productos que puedan tener un segundo uso. Por ejemplo los adsorbentes de bajo costo y nuevos adsorbentes, la adsorción de metales pesados por materiales naturales agrícolas e industriales, la fitorremediación, los biopolímeros, los hidrogeles y la ceniza volante (Caviedes et al., 2015).

Reconociendo el conflicto actual, investigadores y docentes del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) y El Colegio de Chihuahua (El Colech) han colaborado para la publicación de dos tomos que describen las problemáticas hídricas que se viven por estado, con ejemplos específicos de soluciones

relacionadas con el tratamiento del agua. Cada tomo fue preparado por grupos regionales de cada estado, pero con la coordinación conjunta de investigadores de ambas regiones. Por ello, aun cuando este tomo sea sobre el estado de Sonora, se presentan también las dinámicas de trabajo de Chihuahua con el fin de observar las dos formas de abordaje teniendo como objetivo, para ambos tomos, el generar un panorama sobre la situación de los dos estados desde una perspectiva ambiental, social y económica, relacionada a su calidad y manejo con proyectos de aplicación local.

Análisis del estado de Chihuahua

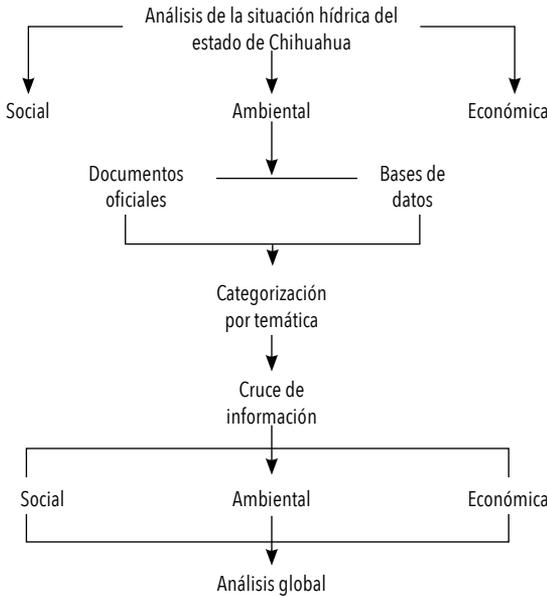
Para el caso de Chihuahua, el CA COLCHI 01 Ciencias de la Tierra y Sustentabilidad trabajó el proyecto “Geografía del Agua en el Programa de Ordenamiento Territorial”, aprobado en la convocatoria Fortalecimiento de Cuerpos Académicos 2017 de la Secretaría de Educación Pública (SEP), que, dentro de sus distintas actividades, realizó un análisis económico, social y ambiental de la situación del agua en el estado de Chihuahua. Además, se identificó la necesidad de crear un producto que, desde una perspectiva multidisciplinaria, analice el recurso hídrico, pero además presente opciones de medidas sustentables que se encuentren en proceso de aplicación.

Dentro de las preguntas de investigación del proyecto se pueden mencionar dos: ¿Cuál es la situación hídrica del estado de Chihuahua desde las perspectivas económicas, ambientales y sociales que impactan en la relación agua-sociedad? y ¿qué tipo de proyectos se han desarrollado en el estado de Chihuahua para el tratamiento del agua? Al analizar la importancia de estas dos preguntas, se consideró que estas fueran la base para el desarrollo y diseño de este libro.

Para contestar el primer cuestionamiento se realizó un análisis en cuatro etapas:

- » Etapa 1: se recopiló información de dos tipos: 1) documentos y publicaciones oficiales de distintos entes de gobierno y 2) bases de datos académicas y de sitios oficiales para cada tipo de análisis (social, ambiental y económico).
- » Etapa 2: se categorizó la información por temática desde cada tipo de análisis.
- » Etapa 3: se realizó un cruce con la información de cada enfoque (ambiental, económico y social) para poder identificar los puntos de mayor interés en ciertas regiones del estado. Por ejemplo, para el caso del enfoque social, se elaboró un análisis de la región Paso del Norte por la repercusión social que tiene el Río Bravo y las legislaciones internacionales que han impactado en una dinámica binacional. En el caso del análisis ambiental, se seleccionaron dos municipios con actividad agrícola, que su población fuera mayor a 50,000 habitantes, y en donde la mayor demanda de agua correspondiera a esta actividad económica. Mientras que el análisis económico se enfocó en los seis municipios que tienen una población mayor a 50,000 habitantes.
- » En el tomo Chihuahua se presenta la investigación realizada hasta la etapa 3 (Figura 2).

FIGURA 2. Etapas para el análisis de la situación hídrica del estado de Chihuahua desde una perspectiva social, ambiental y económica.



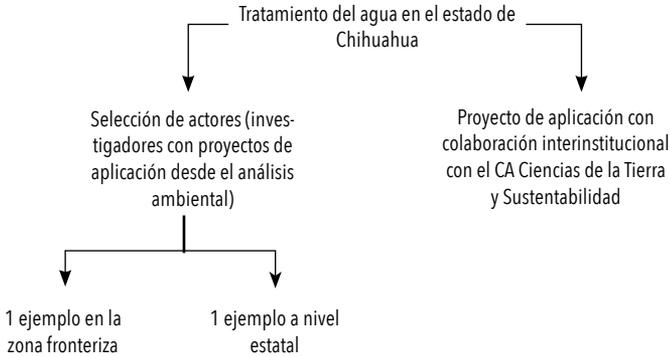
FUENTE: Elaboración propia.

Mientras que para dar respuesta a la segunda pregunta sobre los tipos de tratamiento de agua se recurrió principalmente a dos rutas. La primera fue la identificación de proyectos enfocados en el tratamiento de agua, de los cuales se tomó un ejemplo que tuviera una cobertura estatal y otro una cobertura fronteriza.

Por otro lado, es de relevancia mencionar que el CA COLCHI 01 Ciencias de la Tierra y Sustentabilidad, en la búsqueda de colaboración multiinstitucional, participa activamente en la Red Temática CONACYT Sustentabilidad Energética, Medioambiente y Sociedad, con quien desarrolla un proyecto de desalinización en el área de Samalayuca. Por lo anterior se

consideró importante su aplicación al presente documento para que, además de presentar los avances, también se viera reflejado el trabajo de colaboración con instituciones de otros estados de México (Figura 3).

FIGURA 3. Mecanismo de selección de ejemplos de aplicación del tratamiento de agua en el estado de Chihuahua.



FUENTE: Elaboración propia.

Con este análisis del estado de Chihuahua se logró conjuntar los capítulos del tomo, del mencionado estado, que fueron sometidos a un riguroso trabajo de arbitraje por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

Análisis del estado de Sonora

Mientras que, para el estado de Sonora, el CA-036 Tratamiento de Aguas y Tecnología de Materiales del ITSON se dio a la tarea de reunir trabajos de revisión y aplicación relacionados con el tratamiento del agua. En dichos trabajos, que se presentan en este tomo, se consideraron como guía general las preguntas de investigación: ¿Cuáles son las principales problemáticas hídricas del estado de Sonora relacionadas

con su calidad y manejo? y ¿qué tipo de proyectos se pueden implementar para el tratamiento de agua con presencia de metales pesados en el estado de Sonora?

La diferencia entre las preguntas de investigación que dieron guía a los dos tomos radica en que para el estado de Sonora se dio mayor énfasis a las problemáticas relacionadas con la calidad del agua, que a la interacción ambiente-sociedad, debido a que en este tomo se busca un mayor acercamiento al tema de calidad y opciones de tratamiento por la relevancia que corresponde a la contaminación por metales y a los niveles altos de salinidad proveniente de algunos acuíferos.

Para la primera pregunta se trabajó en colaboración con los miembros de un cuerpo académico del estado enfocado a los temas hídricos de la región para hacer una descripción de estas problemáticas marcando algunas similitudes con el estado de Chihuahua. Después, la segunda pregunta se contestó por medio de la ejemplificación de dos proyectos desarrollados para eliminar contaminantes del agua, en especial metales, con elementos naturales presentes en Sonora como es el uso del chiltepín y microalgas.

La situación hídrica del estado de Sonora se da por dos elementos principales: el primero es el almacenamiento de agua a través del sistema de presas hídricas; y el segundo lo conforman los diversos mantos acuíferos cuya explotación se realiza a través de sistemas de bombeo mediante pozos de diversas profundidades según la zona agrícola o ganadera de la que se trate (Moreno & González, 2018).

El aprovechamiento de este recurso en Sonora es de vital importancia para la producción de alimentos, en los que destacan productos como el trigo, maíz, aceites como soya, ajonjolí, cártamo, así como hortalizas y cítricos. En las zonas de

bombeo se cuenta con cultivos de más alta rentabilidad como son la nuez, vid, olivo, etcétera (Moreno & González, 2018).

La ganadería, por otra parte, depende fundamentalmente del agua de lluvia para los pastizales en los agostaderos. Los ganaderos realizan represas para el depósito de estas aguas y su posterior aprovechamiento en la época de estiaje.

Se destaca que, sin embargo, a falta de precipitación (la cual en promedio anual es de 450mm, muy por debajo de la media nacional) el desarrollo del estado se limita de manera importante. Otra razón es la sobreexplotación de mantos acuíferos e intrusión salina. Esto repercute en la instalación de nuevas empresas en la entidad donde la premisa primaria y fundamental es que se garantice el suministro en cantidad y calidad. Actualmente se cuenta ya con un proyecto para la desalinización de agua de mar en la región de Guaymas de 200 L/s, cuya instalación se prevé inicie a mediados de junio de 2019 y que daría el suministro de este líquido a las poblaciones de Guaymas y Empalme, con un posible incremento de capacidad a 400 L/s en el siguiente periodo del gobernador de Sonora. Esto recuperará los niveles de acuíferos del Valle del Yaqui, que se agotan por el constante bombeo desde el año 1992, y del acueducto Yaqui-Guaymas que actualmente es de 450 L/s.

En el ámbito social, el agua en estos estados es un factor que sobrelleva la creación de innumerables empleos ligados a las actividades agropecuarias, pesqueras y acuícolas. En cuanto al sistema de tratamiento de aguas residuales es en general una tarea pendiente en la actualidad, pues solo cuentan con este importante sistema las principales ciudades del estado como Hermosillo y Ciudad Obregón.

Estructura y contenido del libro

Derivado de todo lo anterior y de la similitud de problemáticas relacionadas con la calidad y manejo del agua, tanto para el estado de Sonora como de Chihuahua, reditúa en la publicación de dos tomos que, aunque se encuentran separados, se diseñaron con una misma estructura ordenando los capítulos de cada uno en dos partes.

Estas partes se relacionan con las dos preguntas que guían cada tomo. En la Parte I se incluyeron los trabajos que otorgan una descripción de las problemáticas del estado relacionadas con el agua desde un análisis ambiental, social y económico para con ello poder identificar lo que sucede con el recurso hídrico de cada estado. Mientras que en la Parte II se incluyeron tanto trabajos aplicados para el tratamiento de agua, como opciones de tratamiento que se pudieran aplicar en cada estado, con lo que quedó una estructura con seis capítulos para Chihuahua y cinco capítulos para Sonora. El orden es el siguiente:

Tomo 1. Chihuahua

Parte I. Problemáticas sociales, ambientales y económicas del recurso hídrico

Esta parte del libro está conformada por cuatro capítulos que abordan problemas a nivel estatal, regional y municipal desde diferentes visiones multidisciplinarias. Los primeros tres capítulos tienen un abordaje desde cada disciplina y es parte de los resultados del proyecto “Geografía del Agua en el Programa de Ordenamiento Territorial”, de El Colegio de Chihuahua. Mientras que el cuarto capítulo tiene una visión multidisciplinar y holística de la relación agua-energía-ali-

mentación y es parte del proyecto “La sustentabilidad de los recursos de agua para la agricultura de riego en una cuenca que enfrenta el cambio climático y diversas demandas en competencia: de la caracterización a las soluciones” en donde participan diversas instituciones educativas que están bajo el liderazgo de la Universidad de Texas en El Paso (UTEP) e integran un consorcio con la Universidad Estatal de Nuevo México (NMSU), la Universidad de Nuevo México (UNM), la Universidad de Texas A&M AgriLife de El Paso, la Universidad Tecnológica de Michigan (MTU) por parte de Estados Unidos; la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) y la Universidad Agropecuaria Dual “Hermanos Escobar” (UADHE), por parte de México.

En el Capítulo I titulado *Revisión de los Tratados entre México y Estados Unidos que han influido en el deterioro del Río Bravo y su paso por las localidades de Ciudad Juárez, El Valle de Juárez y El Paso, Texas*, la autora retoma decisiones internacionales que afectaron el cauce, la calidad y la dinámica social que se tenía del Río Bravo, desde la perspectiva mexicana, en especial los efectos sobre la agricultura del Valle de Juárez con la implementación del Tratado de Libre Comercio, que generó un incremento de la industria maquiladora, y los tratados internacionales sobre el Río Bravo, como el de 1906 que cambió la distribución del agua y generó la construcción de la Presa del Elefante en Estados Unidos, así como los Tratados de Guadalupe Hidalgo de 1848 y el Tratado del Chamizal que cambiaron su cauce.

En el Capítulo II que tiene por nombre *Revisión del panorama hídrico de los municipios de Cuauhtémoc y Delicias del estado de Chihuahua relacionado con el cambio climático*, se abordan las problemáticas del agua para los dos municipios considerando 1) la disponibilidad y demanda, 2) la calidad y 3)

los riesgos hidrológicos. Dentro de los hallazgos para el municipio de Cuauhtémoc se identificó que se debe de tener una especial atención en el incremento de los periodos de sequía y los cambios de patrones de lluvia por los tipos de cultivos que generan; por otro lado, se debe de considerar la contaminación de sus fuentes superficiales, en especial la Laguna Bustillos. Mientras que en Delicias se debe de enfocar al cuidado y la calidad del agua de las fuentes subterráneas y los riesgos por sequías y heladas.

Por su parte en el Capítulo III, titulado *Análisis del Manejo del Agua desde una Perspectiva Económica para los Seis Municipios más Poblados del Estado de Chihuahua*, la autora realiza un análisis de las actividades económicas y efectos sobre el uso del agua de los seis municipios del estado con una población mayor a 50,000 habitantes. Uno de sus hallazgos es que el agua es extraída principalmente para uso productivo (la agricultura con casi el 90%). La autora enfatiza en la importancia del cambio de paradigma, de la búsqueda de soluciones a corto plazo, del cambio a estrategias que generen una solución a largo plazo para lograr un desarrollo sustentable.

Mientras que en el capítulo IV, titulado *Las oportunidades para la sustentabilidad hídrica en las cuencas de Chihuahua: Estrategias para compensar las demandas socioeconómicas y ambientales ante los retos del cambio climático (Agua-Energía-Alimentación)*, los autores muestran estrategias que deben ser consideradas para un desarrollo sustentable del recurso hídrico del estado, recalcando la importancia del abordaje holístico desde los enfoques sociales, ambientales y económicos. Destacan, también, los retos en los elementos agua, energía y alimentación en el estado, y consideran al sector agropecuario como uno de los ejes principales en la búsqueda de una sustentabilidad hídrica y energética, así como el

aprovechamiento de las particularidades, consideradas como ventajas, de las cuencas hidrológicas del estado. Todo esto aterrizado en la llamada cuenca transfronteriza Paso del Norte que, además, presenta el reto binacional.

Parte II. Tratamiento y uso sustentable del agua

La segunda parte del libro se compone de dos capítulos con proyectos de aplicación. Uno a nivel local en la zona fronteriza, en Samalayuca, Chihuahua, que es parte de la Red de Sustentabilidad Energética de Medioambiente y Sociedad, bajo el liderazgo de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) y con la participación de integrantes de las instituciones académicas de El Colegio de Chihuahua (El Colech), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Mientras que el trabajo de análisis a nivel estatal corresponde a una investigadora de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH).

En el Capítulo V titulado *Sistemas de nanofiltración para tratamiento de agua salobre con energía solar en Samalayuca, Chihuahua, México*, el equipo multidisciplinario e interinstitucional presenta el diseño de un sistema de tratamiento de agua salobre para usuarios en el poblado de Samalayuca, Chihuahua, que actualmente cuentan con agua de pozo que contiene niveles altos de salinidad y que, por lo tanto, no puede ser utilizada ni para consumo humano, riego o doméstico. En este estudio de caso se presentan los resultados de la calidad de agua del lugar, así como el diseño y dimensionamiento del sistema de nanofiltración fotovoltaico.

Para finalizar, en el Capítulo VI, que tiene por título *Calidad del agua subterránea en el estado de Chihuahua: Retos y logros en la búsqueda de soluciones sustentables para el agua*

de consumo, la autora nos presenta un recorrido a partir de 1999 sobre la implementación de plantas de tratamiento de Ósmosis Inversa (OI) para la purificación de agua en más de 320 localidades de Chihuahua. La autora resalta, principalmente, los problemas de calidad como la contaminación por flúor, arsénico y compuestos como nitratos, sulfatos y solidos disueltos, entre otros. Reconoce el beneficio que se ha logrado, pero también detecta el trabajo por hacer en la atención a comunidades alejadas y el manejo sustentable del agua de rechazo.

Tomo 2. Sonora

Parte I. Problemáticas sociales, ambientales y económicas del recurso hídrico

Con el fin de conocer diferentes situaciones sociales y ambientales relacionadas con el recurso hídrico en el estado de Sonora, se realizó una revisión bibliográfica de las cuencas de los ríos del estado, así como la descripción de una problemática específica como es la descarga de aguas residuales en Bahía de Lobos, lo que dio como resultado dos capítulos en esta primera parte del libro.

En el Capítulo I, titulado *Las cuencas de los ríos, una división alternativa del territorio de Sonora*, se aborda el impacto ambiental que ha generado la explotación de ríos con fines de ingeniería. Este capítulo busca acercarse a la división por cuencas del estado de Sonora con el objetivo de conocer las asignaciones de derechos en cada una de ellas.

Por su parte, en el Capítulo II, titulado *Descarga de aguas residuales en la Bahía de Lobos: Impactos ambientales y socioeconómicos*, los autores tratan los principales riesgos ambientales a causa de las aguas residuales en la Bahía de Lobos. Se

maneja información que data de los años noventa sobre la evaluación de la calidad de agua residual, la instalación de plantas de tratamiento en Ciudad Obregón en 1997, y una evaluación actual de las condiciones de descarga en el Valle del Yaqui.

Parte II. Tratamiento y uso sustentable del agua

En la segunda parte del libro se presentan dos ejemplos de aplicación de procesos de desalinización y de tratamiento de aguas contaminadas con metales utilizando recursos de la región como son el chiltepín y las microalgas, así como una revisión sobre los beneficios de aplicar quitosano para eliminar contaminantes.

En el Capítulo III, Alternativa de tratamiento terciario de aguas ácidas de minas utilizando microalgas, los autores hablan acerca de los millones de toneladas que se generan de residuos sólidos y líquidos a causa de la extracción de metales, en el cual México se encuentra en los primeros lugares, y sus consecuencias en las poblaciones próximas a las minas, en la flora y en la fauna del estado de Sonora. Se propone el uso de microalgas que, a través de pruebas experimentales, resultaron ser efectivas en la remoción de contaminantes para el tratamiento de estas aguas ácidas.

Mientras que en el Capítulo IV, titulado *Quitosano como alternativa para eliminar contaminantes acuáticos*, los autores comparten la alternativa de remover contaminantes en los principales cuerpos de agua, en Sonora, con el uso de quitosano, el cual se propone como un sustituto del carbón activado en el proceso de adsorción. Se busca aprovechar los residuos que se generan de la cáscara de camarón, debido a la gran producción acuícola de este, habiendo comprobado

su eficacia en la remoción de contaminantes como metales pesados y colorantes.

Por su parte los autores del Capítulo V, titulado *Preparación, caracterización y evaluación de membranas de nanofiltración, modificadas con nanopartículas de plata y extracto de chiltepín para su aplicación en desalación de agua salobre*, explican que la nanofiltración se muestra más asequible, en cuanto a la inversión, que la Ósmosis Inversa que es el método mayormente usado en la actualidad como alternativa para la escasez de agua. Además, se busca un mayor rendimiento en las membranas con la adición de nanomateriales.

Autores participantes

En esta gama de capítulos de los dos tomos, los autores participantes fueron por institución académica. Del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON): Germán Eduardo Dévora Isiordia, Jesús Álvarez Sánchez, Reyna Guadalupe Sánchez Duarte, Araceli Correa Murrieta, María del Rosario Martínez Macías, Pablo Gortáres Moroyoqui, Ruth Gabriela Ulloa Mercado, Denisse Serrano Palacios, Luis Alonso Leyva Soto, Edna Rosalba Meza Escalante, Ana María Rentería Mexía, Lourdes Mariana Díaz Tenorio, Patricia Guadalupe Torres Valenzuela, Jorge Saldívar Cabrales y Rodrigo González Enríquez.

De El Colegio de Sonora (COLSON): Nicolás Pineda Pablos. Del Instituto Tecnológico de Tijuana (ITT): Sergio Pérez Sicairos. Autores de El Colegio de Chihuahua (El Colech) como: Esmeralda Cervantes Rendón, Sarahi Sánchez León, Gabriela Montano Armendáriz y Luis Ernesto Cervera Gómez.

De la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ): Alfredo Granados Olivas, Luis Carlos Alatorre Cejudo, Arturo Soto Ontiveros, Sergio Saúl Solís, Hugo Luis Rojas Villalo-

bos, Adrián Vázquez Gálvez, María Elena Torres Olave, Luis Carlos Bravo Peña y Oscar Ibáñez.

De la Universidad de Texas en El Paso (UTEP): Josiah M. Heyman y William L. Hargrove.

Universidad Tecnológica de Michigan (MTU): Shuping Sheng. International Boundary and Water Commission (IBWC): Ed. Drusina.

De la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH): María del Socorro Espino Valdés y Adán Pinales Munguía. De la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM): Antonio Rodríguez Martínez, Alejandra Santamaría Islas, Rosenberg J. Romero Domínguez y Jesús Cerezo Román.

Del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA): Ulises Dehesa Carrasco.

Así como del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM): Jonathan Ibarra Bahena.

Estos dos tomos descritos brevemente en los párrafos anteriores brindan un análisis sobre el recurso hídrico de dos estado desérticos de México con un conjunto de visiones, con diversos ángulos sobre la problemática, y que como tal es un eje central a considerar con los efectos del cambio climático en donde ya no es suficiente solamente la perspectiva técnica de una solución para problemas de calidad de agua o sobreexplotación de acuíferos, sino que los factores ambientales, sociales y económicos tienen un peso mayor para el desarrollo de diagnósticos y proyectos que busquen la sustentabilidad, considerando la mitigación y adaptación ante estos cambios.

En estos capítulos los autores, desde su experiencia, brindan herramientas, avances y estrategias de abordaje multi e interdisciplinariamente para tomadores de decisiones, in-

investigadores, estudiantes e interesados en el recurso hídrico en zonas semiáridas con actividad agrícola y problemáticas sociales que van desde las dinámicas por el uso compartido de aguas transfronterizas, el acceso a agua de calidad para los pobladores y el consumo de este recurso por actividades agropecuarias y de minería, considerando su demanda, tratamiento y manejo.

Bibliografía

- Caviedes, D., Muñoz, R. A., Perdomo, A., Rodríguez, D. & Sandoval, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 73-90.
- Secretaría de Gobernación. (2018). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican. Recuperado de: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018a). Subdirección General Técnica. Sistema Nacional de Información del agua. Condición de Acuíferos (estatal). Recuperado de: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuíferos&n=estatal>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018b). Subdirección General Técnica. Sistema Nacional de Información del agua. Acuíferos estatales (Sonora). Recuperado de: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuíferos&n=estatal>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018c). Subdirección General Técnica. Sistema Nacional de Información del agua. Acuíferos estatales (Chihuahua). Recuperado de: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuíferos&n=estatal>
- Moreno, S. & González, A. (20 de noviembre de 2018). Hay poca agua en Sonora: Conagua. *El Imparcial*. Recuperado de:

<http://intrabecc.cocef.org/programs/intranetnotasperiodico/uploadedFiles/haypocaaguaensonoraaconaguaa.pdf>

Rivas, I. (2015). Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México (agua superficial). En Arreguín, F., López, M., Rodríguez, O. & Montero, M. (coord.). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático* (págs. 89-99). México: Instituto Mexicano de Tecnología del agua.

Samaniego, M. (2012). Cuencas internacionales y usos sociales del agua. Formación de espacios de cooperación y conflicto: norte de México y oeste de Estados Unidos. *Secuencia*, 83,145-177.

PARTE I
PROBLEMÁTICAS SOCIALES, AMBIENTALES
Y ECONÓMICAS DEL RECURSO HÍDRICO

CAPÍTULO I. LA DIVISIÓN OFICIAL DE REGIONES Y CUENCAS HIDROLÓGICAS, Y LOS DERECHOS DE AGUA OTORGADOS EN EL ESTADO DE SONORA

Nicolás Pineda Pablos¹

Resumen:

El objetivo general de este capítulo es hacer un acercamiento a la división por cuencas oficiales en el territorio de Sonora y Chihuahua, administrado por el Organismo de Cuenca del Noroeste (OCNO), y determinar las asignaciones de derechos de agua. Para ello, se presenta la división de este territorio correspondiente a tres regiones hidrológico- administrativas I, II y III, así como a las Regiones Hidrológicas y la lista de cuencas oficiales comprendidas dentro del estado de Sonora. Además, se revisa cómo se ha dado la expedición de derechos y los volúmenes de agua otorgados en estos territorios, así como los usos a los que está destinada. El trabajo concluye señalando las principales di-

¹ Profesor Investigador de El Colegio de Sonora.

ferencias entre el concepto teórico de cuenca y las cuencas definidas oficialmente.

Palabras clave: Cuenca hidrológica, gestión integrada de recursos hídricos, derechos de agua, Organismo de Cuenca del Noroeste, Sonora y Chihuahua.

En Sonora, durante la mayor parte del siglo XX, la gestión del agua estuvo enfocada en la construcción de presas y en el desarrollo de distritos de riego de los valles y costas. Fue una etapa en la que todas las decisiones se tomaban en la capital del país y la gestión del agua tenía un fuerte enfoque de ingeniería. La misión era dominar la naturaleza y ponerla al servicio del ser humano; almacenar el agua y conducirla a donde se requería y cuando se necesitaba. En el caso de Sonora, estas obras trajeron productividad y prosperidad, se crearon vergeles agrícolas, las poblaciones crecieron y el nivel de vida mejoró.

Sin embargo, esa etapa de ingeniería y cemento cerró su ciclo. La naturaleza comenzó a reclamar su espacio y a cobrar su precio. Los ríos antes perenes se volvieron intermitentes, y los intermitentes comenzaron a desaparecer o morir antes de llegar a su destino. La tendencia era controlar totalmente los ríos alterando su curso natural. Asimismo, la naturaleza, como usuaria primordial del agua, comenzó a reaccionar y a cobrar con escasez de agua, con sequías, tormentas, eventos extremos, extinción de plantas y especies, y con el deterioro generalizado del medio ambiente.

El objetivo general de este capítulo es brindar un acercamiento a la división formal de cuencas en el estado de Sonora y de Chihuahua para conocer cómo se corresponde esta división con las asignaciones de agua hechas en los títulos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). Este capítulo revisa la división por cuencas establecida en 2016 por la Co-

misión Nacional del Agua (CONAGUA) para el Organismo de Cuenca del Noroeste (OCNO). Esta división del territorio por cuencas difiere y contrasta con la división política que es la oficial y predominante para el resto de los asuntos públicos.

Las preguntas que se plantean son dos: ¿Cuáles son las cuencas reconocidas oficialmente por la CONAGUA en el estado de Sonora y la porción de Chihuahua que corresponde al OCNO? y ¿cuánta agua tienen asignadas estas cuencas y para qué usos?

Para responder estas preguntas, primero se repasa el concepto y definición teórica de lo que es una cuenca y de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH); segundo, se revisan las cuencas oficiales definidas en el acuerdo de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) publicadas en el Diario Oficial del 27 de mayo de 2016, donde se dan a conocer los límites de las 757 cuencas que comprenden a las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido Estados Unidos Mexicanos, y se comentan las diferencias de estas con el concepto fisiográfico de cuenca; tercero, se estudian los derechos de agua otorgados en estas regiones y los volúmenes totales asignados para las cuencas y para los diferentes usos en el territorio del OCNO, de acuerdo con la información contenida en el REPD. Finalmente se concluye con un resumen y reflexión general.

Concepto de cuenca hidrológica

El enfoque de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) propone que la administración y planeación de los usos del agua se haga al nivel de cuencas hidrológicas. Esto hace que la cuenca sea un elemento básico en el manejo del agua. Sin embargo, aunque en teoría el concepto de cuenca

es sencillo y se define como “el área que contribuye al escurrimiento directo y que proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal y sus tributarios” (Springall, s.f., pág. 7) (Pérez & Rodríguez, 2009, pág. 7), en la práctica presenta complicaciones para dividir y organizar el territorio de un país. De acuerdo con lo que señalan Blomquist & Schlager (2005), la definición de cuencas no es clara en todos los casos e implica tomar decisiones y por ello se vuelve un asunto político. La definición de los límites tampoco es sencilla ni es totalmente objetiva. La delimitación implica precisar qué es lo que queda fuera y qué queda dentro de una cuenca; esos límites definen comunidades de interés, identidades y lugares. Hay una tensión política en la administración de cuencas, sobre todo cuando dichas decisiones están orientadas a la participación social y la acción colectiva. Para empezar, existe la diferenciación entre cuencas superficiales y subterráneas. Aparicio (1992) define a la cuenca como “una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida” (pág. 19). Esta última definición hace explícito que se refiere a una cuenca superficial ya que, asociada a cada una de estas, existe también una cuenca subterránea cuya forma en planta es semejante a la superficial.

Otra complicación en la aplicación del concepto de cuencas es en las planicies y regiones costeras, sobre todo en regiones áridas, donde el área de la cuenca puede ser muy variable o referirse a corrientes efímeras y sin un cauce permanente. Incluso puede pensarse que, en el caso extremo de que la precipitación sea mínima o inexistente, no se formen corrientes de agua y no exista, por lo tanto, una cuenca física. Este es el

caso de muchas corrientes menores y afluentes de los ríos del desierto en la esquina noroeste del estado de Sonora.

Un obstáculo adicional es que, con frecuencia, las cuencas son cruzadas y divididas por las fronteras políticas (tanto municipales, estatales y, sobre todo, internacionales) que hacen que la gestión de estas sea impedida o complicada por la existencia de diferentes autoridades y gobiernos en cada lado de la frontera. Incluso, dentro de un país o región es común que se modifique la división formal o convencional de la cuenca a fin de que coincida con el de alguna división municipal.

Teniendo en cuenta estas complicadas prácticas de la división fisiográfica, revisemos ahora la definición que se propone en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2004) sobre la cuenca hidrológica como:

La unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parte aguas [sic] o divisoria de las aguas —aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad—, en donde ocurre el agua en distintas formas, y esta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos [sic] y el medio ambiente. La cuenca hidro-

lógica, juntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica está a su vez integrada por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas. (Art. 3, fracc. XVI)

Como puede verse, el concepto de cuenca que propone la LAN coincide con las definiciones teóricas. Sin embargo, esta definición enfrenta en la práctica las complicaciones señaladas. El concepto de cuenca es sencillo y directo en la teoría, pero puede tener complicaciones y variantes en su aplicación concreta en el territorio. Revisemos ahora cómo se ha hecho la división por cuencas en el territorio del estado de Sonora.

El enfoque de la gestión integrada de recursos hídricos

Desde la década de los ochenta del siglo XX comenzó a cambiar la percepción sobre el agua; se comenzó a aprender la lección de que ya no se trataba de trabajar contra la naturaleza para dominarla, sino de trabajar con ella y como parte de ella. Los ríos y sus cuencas juegan un papel central en el ciclo del agua, en su rotación entre el mar, el aire y la tierra. Ahora se trata de convivir con los procesos naturales de dicho ciclo, extraer el agua de sus cuerpos y depósitos naturales sin agotarla y sin eliminar a los otros usuarios naturales (flora, fauna, clima, paisaje y ciclos de vida).

Si no se modifica la manera en cómo anteriormente se buscaba controlar y dominar el líquido con obras de cemento y varilla, acueductos y tuberías, podemos fácilmente contaminarla, acabar con el entorno natural y con la viabilidad misma de las sociedades que hemos construido en la región. Superar el reto de satisfacer las necesidades humanas y, al

mismo tiempo, proteger la salud de los ríos y su medio ambiente requiere un cambio fundamental en la manera en cómo la sociedad usa y valora el agua de los ríos. Se requiere un cambio de ideas que coloque a la preservación de la salud de los ecosistemas como un objetivo explícito de la planeación y gestión del líquido. La nueva manera de concebir este recurso hídrico reconoce que la economía humana del agua es un subconjunto de la economía natural y que las sociedades humanas dependen y reciben valiosos beneficios de los ríos y ecosistemas saludables. Para preservar estos beneficios, la sociedad precisa tomar en cuenta las necesidades de agua que los ríos tienen para subsistir. Conocido también como caudal ecológico, este concepto se refiere a la cantidad, calidad y temporalidad de los flujos del agua para salvaguardar la salud y el funcionamiento de los sistemas hídricos (Postel, 2003).

Pero ¿cuáles son esos cambios que hay que hacer? Los antecedentes se remontan a la década de los noventa con la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) como una manera más adecuada de manejar el agua. La definición más conocida de este nuevo enfoque es la de la Global Water Partnership & International Network of Basin Organizations (2009) que define a la GIRH como “un proceso que promueve el desarrollo y el manejo coordinado del agua, el suelo y los recursos relacionados a fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de una manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales” (pág. 18).

Para Gregersen, Ffolliott & Brooks (2007), Huitema & Meijerink (2014), Ibisch, Bogardi & Borchardt (2016) la GIRH implica un modelo de gobernanza del agua que se resume en tres principios:

1. El *principio ecológico* que implica integrar la gestión de los diferentes usos del agua (agrícola, urbano, industrial y otros) por razones ambientales.
2. El *principio institucional* que plantea que el manejo de los recursos se haga con base en la participación de todos los involucrados por medio instituciones transparentes y que rindan cuentas gobernadas por el principio de subsidiariedad. Es decir, que los asuntos deben de resolverse por las autoridades más próximas teniendo como base a los grupos de usuarios de la cuenca, los gobiernos locales y las organizaciones de cuenca.
3. El *principio económico* que propone el uso de los incentivos y los mecanismos del mercado para mejorar la eficiencia en el manejo del agua como un recurso cada vez más escaso (Gregersen, Ffolliott, & Brooks, 2007).

Estos principios de la GIRH se derivan de los acuerdos de la Conferencia Internacional del Agua de Dublín en 1992 y atienden aspectos relevantes que deben de ser impulsados y que responden a la problemática de la gestión de los ríos y sus cuencas. Los dos primeros principios tocan aspectos críticos de la gestión del agua, como que esta debe de hacerse por cuencas, a nivel local y con la participación de todos los involucrados. Por otra parte, el principio económico puede considerarse como una influencia de las ideas del liberalismo económico prevaleciente en los años noventa del siglo XX.

Por otra parte, la GIRH ha sido objeto también de críticas. Una crítica es que la definición de la Global Water Partnership es demasiado vaga e internamente inconsistente, a pesar de que utiliza palabras de moda, no aporta elementos

concretos para que los profesionales del agua puedan llevar a cabo la planeación, la gestión y la toma de decisiones de una manera más racional, eficiente y equitativa. Por ejemplo, esta definición no menciona la cuenca, ni la participación social, ni está claro a qué se refiere cuando habla de “recursos relacionados” o de “maximizar el bienestar” (Biswas, 2004).

Otra crítica es que la propuesta de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) sobre planear y administrar el agua con base en los territorios de las cuencas no es políticamente viable. La GIRH, al poner al territorio de la cuenca como unidad básica de planeación y gestión, implícitamente propone cambiar las divisiones políticas tradicionales de los gobiernos locales y nacionales que se traduce en un reto político monumental (Blomquist & Schlager, 2005; Indij, Donin & Leone, 2011).

A pesar de estas críticas, en México, la Ley de Aguas Nacionales (LAN) de 2004 (SEMARNAT, 2004) adoptó la GIRH como el nuevo modelo de gestión del recurso hídrico. En su artículo VII declara que es de utilidad pública “la gestión integrada de los recursos, superficiales y del subsuelo, a partir de cuencas hidrológicas en el territorio nacional, como prioridad y asunto de seguridad nacional”. Además, en la definición que da en su artículo III retoma la descripción de la Global Water Partnership y agrega que dicha gestión está vinculada con el desarrollo sustentable y que para esa ley se toman en cuenta principalmente el agua y el bosque (SEMARNAT, 2004). Se infiere entonces que la división y gestión por cuencas es una política oficial y formal del gobierno mexicano.

Regiones Hidrológicas y cuencas

El territorio del estado de Sonora comprende porciones de tres Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA) de la CONAGUA que son: la RHA I Península de Baja California, la RHA II Noroeste, y la RHA III Pacífico Norte. Describiremos someramente cada una de ellas.

La primera es la RHA I Península de Baja California que comprende tres Regiones Hidrológicas separadas entre sí que están ubicadas en Sonora y que son las siguientes:

1. El municipio de San Luis Río Colorado, en la esquina noroeste del estado, ubicado en un delta o desembocadura del río anteriormente mencionado.
2. La región correspondiente a la cuenca del Río Santa Cruz que entra y sale del territorio y su afluente mexicano, el Arroyo Los Nogales, en los municipios de Santa Cruz y Nogales ubicados en el centro-norte del estado.
3. La región correspondiente a la cuenca del Río San Pedro en los municipios de Naco y Cananea.

Estas tres microrregiones o microcuencas tienen la característica general de que son parte de la gran cuenca del Río Colorado, la mayor parte de la cual se ubica en el territorio de Estados Unidos. Además, las tres regiones colindan con la línea fronteriza; por lo tanto, se trata de cuencas y ríos transfronterizos. Los últimos dos ríos corren hacia el norte y cruzan la frontera hacia el estado de Arizona (en Estados Unidos) y son afluentes del Río Gila, el cual, a su vez, es afluente del Colorado.

La segunda es la RHA II Noroeste que comprende la mayor parte del territorio de Sonora y, además, una parte del estado de Chihuahua que corresponde a la cuenca del Río Yaqui. Esta RHA, a su vez, está subdividida en dos Regiones Hidrológicas (RH) que son:

1. La RH 8 Sonora Norte en la que se ubican los ríos intermitentes de la región del desierto de este estado que se originan en las planicies bajas y que solo corren durante las épocas de lluvia (Dunbier, 1968). Estos ríos intermitentes son el Sonoyta, el Concepción, el Altar y el Magdalena. Además, en el territorio formal de estas cuencas se incluyó amplias regiones desérticas en las que la precipitación es muy reducida y donde no existen propiamente cauces de corrientes establecidos. Se le da la categoría de cuencas a territorios en los que no existen corrientes físicas de agua. Darles la categoría de cuencas a territorios en los que no se dan las condiciones de definición física de cuenca se trata, entonces, de una decisión político-administrativa.
2. La otra es la RH 9 Sonora Sur en la que se ubican los ríos perenes que provienen de la Sierra Madre Occidental y que por lo mismo corren la mayor parte del año, aunque pueden interrumpirse en tramos. Estos ríos son: el Sonora, el Yaqui y el Mayo, y los afluentes de cada uno; aunque entre ellos también hay corrientes menores intermitentes, como el Mátape y el arroyo Cocoraque. Bajo condiciones normales estas corrientes desembocarían en el mar; sin embargo, al dejar las sierras y llegar a las planicies costeras, debido a la evaporación, pierden volumen o son consumidos y se vuelven subterráneos. Además, desde el

siglo XX, sus caudales están drásticamente modificados por las extracciones y aprovechamientos hechos por las comunidades humanas (Dunbier, 1968).

TABLA 1. Regiones Hidrológicas y cuencas del estado de Sonora.

Región Hidrológica Administrativa I Península de Baja California. Región Hidrológica Número 7 Río Colorado. LXXXV.- Región Hidrológica Río Colorado. LXXXVI.- Cuenca Hidrológica Río Santa Cruz. LXXXVII.- Cuenca Hidrológica Río San Pedro. LXXXVIII.- Cuenca Hidrológica Arroyo Los Nogales.	Región Hidrológica Administrativa II Noroeste. Región Hidrológica Número 8 Sonora Norte. LXXXIX.- Cuenca Hidrológica Río Sonoyta 1. XC.- Cuenca Hidrológica Río Sonoyta 2. XCI.- Cuenca Hidrológica Arroyo Cocóspera. XCII.- Cuenca Hidrológica Río Magdalena. XCIII.- Cuenca Hidrológica Río Concepción. Región Hidrológica Número 9 Sonora Sur. XCIV.- Cuenca Hidrológica Río Sonora 1. XCV.- Cuenca Hidrológica Río San Miguel. XCVI.- Cuenca Hidrológica Río Sonora 2. XCVII.- Cuenca Hidrológica Río Sonora 3. XCVIII.- Cuenca Hidrológica Río Bavispe. XCIX.- Cuenca Hidrológica Río Yaqui 1. C.- Cuenca Hidrológica Río Yaqui 2. CI.- Cuenca Hidrológica Río Yaqui 3. CII.- Cuenca Hidrológica Río Mayo 1. CIII.- Cuenca Hidrológica Arroyo Quiriego. CIV.- Cuenca Hidrológica Río Mayo 2. CV.- Cuenca Hidrológica Río Mayo 3. CVI.- Cuenca Hidrológica Río Mátape 1. CVII.- Cuenca Hidrológica Río Mátape 2. CVIII.- Cuenca Hidrológica Arroyo Cocoraque 1. CIX.- Cuenca Hidrológica Arroyo Cocoraque 2.
Región Hidrológica Administrativa III Pacífico Norte. Región Hidrológica Número 10 Sinaloa. CXXIII.- Cuenca Hidrológica Arroyo Álamos.	

FUENTE: SEMARNAT, (2016).

De acuerdo con el Reglamento Interior de la CONAGUA de 2006 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2006), la RH-II comprende los territorios de los siguientes municipios:

- » En Chihuahua los municipios de Guerrero, Madera, Matachí, Temósachi, Ocampo, Uruachi y Álamos.

- » En Sonora los municipios de Puerto Peñasco, San Luis Río Colorado, Álamos, General Plutarco Elías Calles, Altar, Caborca, Nogales, Pitiquito, Santa Cruz, Sáric, Hermosillo, Agua Prieta, Bacerac, Bácum, Bavispe, Cajeme, Empalme, Guaymas, Huachinera, Naco, Nácori Chico, San Ignacio Río Muerto, Etchojoa, Huatabampo y Benito Juárez.

La tercera es la RHA III Pacífico Norte a la que pertenece el Arroyo Álamos, ubicado en la esquina sureste del territorio, en el municipio de Álamos y que es afluente del Río Fuerte que es el más caudaloso de la región y cuya corriente es superior a la del Yaqui y a la de los demás ríos de Sinaloa. La razón del gran caudal de este río es que capta la lluvia de una región montañosa en la que la precipitación es superior a los 500mm (Dunbier, 1968).

FIGURA 1. Mapa de las cuencas del estado de Sonora.



FUENTE: Mapa elaborado por Alejandro Navarro con datos de CONAGUA, (2016).

De este modo en Sonora, de acuerdo con la división por cuencas establecida por la CONAGUA, la RHA I cuenta con cuatro que llevan los números del 85 al 88 y son las siguientes:

- » *Cuenca 85* Río Colorado: desde los límites internacionales con Estados Unidos hasta su desembocadura en el Mar de Cortés.
- » *Cuenca 86* Río Santa Cruz: desde su entrada al territorio mexicano, hasta su reingreso al territorio de Estados Unidos.
- » *Cuenca 87* Río San Pedro: desde su nacimiento hasta su ingreso a Estados Unidos.
- » *Cuenca 88* Arroyo Los Nogales: desde su nacimiento hasta su ingreso a Estados Unidos.

La RHA II Noroeste cuenta con 21 cuencas que están numeradas del 89 al 109. De estas, cinco corresponden a la RH 8 Sonora Norte y son los ríos y arroyos:

- » *Cuenca 89* Sonoyta 1: desde su nacimiento, hasta su unión a la cuenca Sonoyta 2.
- » *Cuenca 90* Sonoyta 2: desde donde se localiza la Estación Hidrométrica Sonoyta 2, hasta su desembocadura en el Mar de Cortés.
- » *Cuenca 9* Cocóspera: Desde su nacimiento, hasta la Estación Hidrométrica de Ímuris.
- » *Cuenca 92* Magdalena: desde la Estación Hidrométrica Ímuris, hasta la Estación Hidrométrica Pitiquito.
- » *Cuenca 93* Concepción: desde Pitiquito, hasta su desembocadura en el Mar de Cortés.

Por su parte, la RH 9 Sonora Sur cuenta con 16 cuencas que son:

- » 94 *Río Sonora 1*: que va desde su nacimiento, hasta la Estación Hidrométrica El Orégano II.
- » 95 *Río San Miguel*: que va desde su nacimiento, hasta la Estación Hidrométrica El Cajón.
- » 96 *Río Sonora 2*: desde donde se localizan las Estaciones Hidrométricas El Orégano II y El Cajón, hasta la presa Abelardo Rodríguez Luján.
- » 97 *Río Sonora 3*: desde donde se localiza la presa Abelardo Rodríguez Luján, hasta su desembocadura en el Mar de Cortés.
- » 98 *Río Bavispe*: desde su nacimiento, hasta la presa Lázaro Cárdenas (La Angostura).
- » 99 *Río Yaqui 1*: desde donde se localiza la presa Lázaro Cárdenas (La Angostura), hasta la presa Plutarco Elías Calles (El Novillo). En esta cuenca están incluidos los afluentes provenientes de Chihuahua.
- » 100 *Río Yaqui 2*: desde la presa Plutarco Elías Calles (El Novillo), hasta la presa Álvaro Obregón (El Oviáchic).
- » 101 *Yaqui 3*: desde donde se localiza la presa Álvaro Obregón (El Oviáchic), hasta su desembocadura en el Mar de Cortés.
- » 102 *Río Mayo 1*: desde su nacimiento, hasta la Estación Hidrométrica San Bernardo.
- » 103 *arroyo Quiriego*: desde su nacimiento, hasta la Estación Hidrométrica Tesocoma.
- » 104 *Río Mayo 2*: desde donde se localizan las Estaciones Hidrométricas de San Bernardo y de Tesocoma, hasta la presa Adolfo Ruíz Cortines (El Mocúzari).

- » 105 *Río Mayo 3*: desde donde se localiza la presa Adolfo Ruíz Cortines (El Mocúzari), hasta su desembocadura en el Mar de Cortés.
- » 106 *Río Mátape 1*: desde su nacimiento, hasta la Presa Ignacio R. Alatorre (Punta de Agua).
- » 107 *Río Mátape 2*: desde la Presa Ignacio R. Alatorre (Punta de Agua), hasta su desembocadura en el Mar de Cortés.
- » 108 *arroyo Cocoraque 1*: desde su nacimiento, hasta la Estación Hidrométrica Cocoraque.
- » 109 *arroyo Cocoraque 2*: desde la Estación Hidrométrica Cocoraque, hasta su desembocadura en el Mar de Cortés.

Por último, la RHA III Pacífico Norte tiene una sola cuenca en Sonora que es la número 123 Arroyo Álamos que va desde su nacimiento hasta la Estación Hidrométrica Cazante. Esta se encuentra ubicada en la esquina sureste del territorio sonorense, en los límites con el estado de Sinaloa.

Al comparar la definición teórica de cuenca con la división establecida por la CONAGUA se observa que, en general, no se trata propiamente de cuencas que comprendan todo el escurrimiento de un solo río, sino más bien de subcuencas o porciones de los ríos. Con esto, se busca aparentemente evitar las grandes variaciones en el tamaño de las cuencas físicas y que, a su vez, las oficiales tengan tamaños más reducidos y equiparables entre ellas.

En resumen, de acuerdo con la división propuesta por la CONAGUA, y publicada en el Acuerdo del 27 de mayo de 2016 (SEMARNAT, 2016), el territorio de Sonora y la porción de Chihuahua, que incluye el OCNO, tiene 26 cuencas hidrológicas distribuidas en tres RHA. En este trabajo se revisan y

presentan exclusivamente los derechos de agua correspondientes a la RHA-II del OCNO.

La expedición de derechos de agua

Con la creación del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), a partir de 1994 se comenzaron a expedir y regularizar los derechos de agua en las Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA) II (Noroeste) correspondiente al Organismo de Cuenca del Noroeste (OCNO). La información que contienen estos registros es valiosa y puede ser un instrumento primordial para la planeación y gestión del recurso hídrico de las cuencas. En este apartado se hace una revisión general a la expedición de títulos en el OCNO y los datos que estos contienen.

La base de datos de títulos de derechos de agua del OCNO que se utilizó para este trabajo inicia en el mes de mayo de 1994 y concluye en el mes de junio de 2014 (REPDa, 2014). Este periodo corresponde, por lo tanto, a veinte años que es la vigencia legal que tienen los títulos otorgados. Por ello, los datos presentados aquí refieren solamente al registro y expedición de derechos de agua hechos por primera vez en el REPDa y no se refieren a las renovaciones que se dieron posteriormente.

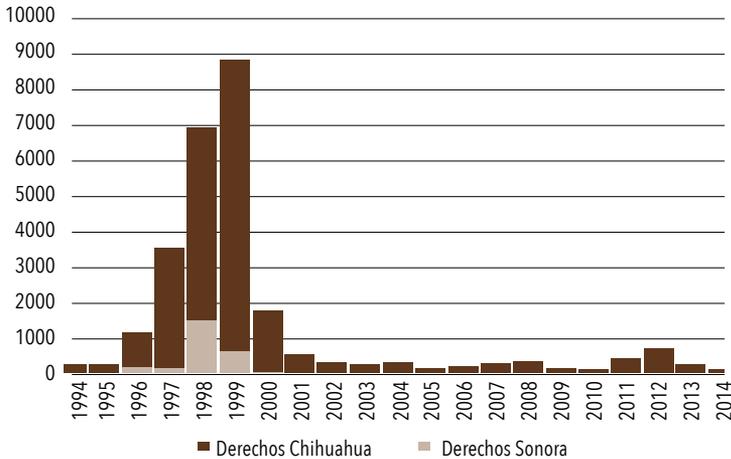
El total de derechos registrados en el OCNO del Noroeste en este periodo es de 26,588 de los cuales 2,856 corresponden a la porción del estado de Chihuahua y 23,732 corresponden a los derechos ubicados en el territorio del estado de Sonora. La mayor parte de los registros se llevaron a cabo en los años noventa y a partir del año 2000 el número disminuye considerablemente.

TABLA 2. Títulos de derechos de agua expedidos en el OCNO Noroeste de 1994 a 2014.

Año	No. de Títulos		
	Porción Chihuahua	Porción Sonora	Total
1994	30	54	84
1995	22	267	289
1996	97	1028	1125
1997	131	3376	3507
1998	1514	5444	6958
1999	540	8298	8838
2000	168	1584	1752
2001	74	480	554
2002	0	300	300
2003	33	245	278
2004	25	316	341
2005	50	105	155
2006	57	160	217
2007	28	244	272
2008	5	342	347
2009	31	67	98
2010	0	38	38
2011	0	396	396
2012	29	663	692
2013	22	273	295
2014	0	52	52
Total	2,856	23,732	26,588

FUENTE: Elaboración propia con datos proporcionados por el REPDA, (2014).

GRÁFICA 1. Títulos de derechos de agua expedidos en el OCNO Noroeste 1994-2014.



FUENTE: Elaboración propia con datos proporcionados por el REPDA, (2014).

El ordenamiento cronológico de la expedición de títulos de derechos de agua nos muestra que después de la creación del REPDA en 1994, el registro fue en aumento en los años posteriores, incrementándose el número cada año, hasta llegar a un pico máximo de expedición de 8,298 títulos en el año 1999 cuando aparentemente se cumplió el objetivo de registrar a la mayor parte de los usos de agua de la región. Después de ese año, y a partir del año 2000, el registro de títulos desciende considerablemente. En el año 2000 el número de títulos registrados fue de solo 1,752 y continúa descendiendo en los años posteriores hasta llegar a la cifra de 38 registrados en el año 2010. Después de esto, el número se mantiene variable en los años posteriores.

El periodo de veinte años que comprende este estudio de los derechos nos da la oportunidad para observar cómo ha

funcionado la gestión de las aguas nacionales en Sonora y los alcances que ha tenido para la gestión por cuencas.

Derechos de agua por cuencas

Más allá del número de derechos otorgados durante el periodo de 1994 a 2014, lo que realmente importa es el volumen de agua que estos derechos significan. Para revisar qué tanta agua se ha otorgado en los títulos, la dividimos primeramente por cuencas, tal como aparecen en la base de datos obtenida del REPDA con datos hasta junio de 2014 (REPDA, 2014).

TABLA 3. Volumen superficial y subterráneo de los derechos de agua expedidos.

Cuenca Hidrológica	Volumen Superficial (m ³ /año)	Volumen Subterráneo (m ³ /año)	Volumen Total Concesionado (m ³ /año)	%
Río Sonoyta	-	115,245,022	115,245,022	2.3%
Río Concepción	50,871,375	235,905,535	286,776,911	5.8%
Río Santa Cruz	-	7,428,215	7,428,215	0.2%
Río San Pedro	-	3,201,932	3,201,932	0.1%
Río Bacoachi	3,009,673	-	3,009,673	0.1%
Río Sonora	167,688,579	462,388,394	630,076,973	12.8%
Río Mátape	23,077,348	203,396,855	226,474,203	4.6%
Río Yaqui	2,812,635,900	509,281,721	3,321,917,621	67.5%
Río Mayo	14,853,078	312,308,111	327,161,189	6.6%
Total	3,072,135,953	1,849,155,785	4,921,291,739	100%
	62%	38%	100%	

FUENTE: REPDA, (2014).

NOTA: Para el cálculo de estos volúmenes no se consideraron los usos no consuntivos asignados a generación de energía eléctrica.

Primeramente, tenemos que el volumen total de aguas asignadas en derechos del REPDA en junio de 2014 asciende a 4,921 millones de metros cúbicos de agua. Es decir, en Sonora, o más exactos en la RHA Noroeste, está autorizada la extracción de casi 5,000 millones de metros cúbicos de agua. Este es el capital hídrico de la región. Habrá que analizar de dónde proviene y cómo está distribuido en las cuencas.

Una consideración importante es que en este volumen no se toman en cuenta los derechos otorgados para usos no consuntivos de generación de energía eléctrica, ya que este uso no retira el agua de la corriente ni disminuye el volumen otorgado a los demás usos. El volumen de agua para generación de energía eléctrica asciende a 2,156 millones de metros cúbicos en el Río Yaqui (en las plantas hidroeléctricas de las presas del Novillo y Oviáchic) y a 1,034 millones de metros cúbicos en el Río Mayo (planta hidroeléctrica de la presa de El Mocúzari).

Con base en la información que proporcionan los títulos para usos consuntivos tenemos que el 62% de las extracciones de agua, autorizada por el REPDA, corresponde a líquidos superficiales, mientras que el 38% proviene de subterráneos. Entonces, más de la tercera parte de las aguas nacionales otorgadas en los títulos de derechos corresponde a aguas subterráneas que se extraen de los acuíferos por medio de pozos y, con mucha frecuencia, utilizando bombas que consumen energía eléctrica.

Por otra parte, al revisar los volúmenes correspondientes a las diferentes cuencas se observa que la mayor proporción corresponde a la cuenca del Río Yaqui que es de donde proviene el 68% del recurso hídrico. A la cuenca Río Yaqui, de acuerdo con los datos del REPDA, se le extraen 3,321 millones de metros cúbicos, la mayor parte de ella (el 85%) es agua superficial.

Después le sigue el Río Sonora al que corresponden el 13% de las aguas nacionales otorgadas en los títulos de derecho. Sin embargo, en este caso la mayor parte (73%) que se extrae es subterránea y solo una cuarta parte (27%) es superficial.

En tercer lugar, de importancia por el volumen otorgado, están los ríos Mayo, Concepción y Mátape. En todos ellos predomina la extracción de las aguas subterráneas sobre las superficiales. Después, como un río con menor volumen de agua autorizado, está el Sonoyta el cual, como río del desierto, es intermitente y solo tiene autorizado el uso de aguas subterráneas que, en este caso, ascienden a 115 millones de metros cúbicos anuales.

Por último, están los ríos cuyo volumen de agua es pequeño. Dos de estos son los ríos transfronterizos Santa Cruz y San Pedro en los que la porción de cuenca ubicada en México es pequeña. El río de esta lista con menos agua otorgada en derechos es el Bacoachi, ubicado en la Costa de Hermosillo (municipios de Hermosillo y Pitiquito), que corresponde a una región desértica con ríos efímeros. En esta cuenca están otorgados tres millones de metros cúbicos de agua. Hay que aclarar que en esta base de datos no se incluye al Arroyo Álamos o Cuchujaqui (ubicado en el municipio de Álamos, en el extremo sureste de Sonora), ya que la información de sus derechos corresponde a la RH de Sinaloa. Tampoco se incluyó al Río Colorado, ubicado en el noroeste de Sonora, cuya administración es llevada por las autoridades hídricas de Baja California.

Con la información aquí proporcionada tenemos una visión panorámica de cómo está distribuido el recurso hídrico en el estado de Sonora y en parte del estado de Chihuahua en donde se han autorizado la extracción de diferentes volúme-

nes de aguas nacionales. La siguiente cuestión es revisar en qué se usa o cuál es el destino de dicho líquido.

Los usos del agua

Los títulos de derechos proporcionan también información sobre los usos o destinos que tiene el agua concesionada. Para analizar, primero es necesario distinguir que hay dos tipos de usos que no se pueden agregar: usos consuntivos y los no consuntivos. Los consuntivos son aquellos en las que el agua “se consume”; es decir, que se aprovecha en alguna actividad humana y después se desecha como agua residual en un estado que ya no es aprovechable nuevamente, sino que requiere algún tipo de tratamiento. Los consuntivos se distinguen principalmente por las actividades económicas donde son aprovechados. Las principales son la agricultura, la industria y lo que se denomina el uso público urbano que es el líquido para los sistemas de agua potable y alcantarillado de las ciudades y asentamientos humanos. Además, en la lista de usos utilizados por el REPGA aparecen otros combinados o de menor cuantía que se muestran en la Tabla 5. El otro tipo de uso principal es el no consuntivo; es decir, aquel en el que el agua utilizada no se consume. Esto es, que no sufre una transformación y puede ser aprovechada nuevamente. El principal uso de este tipo en Sonora es la generación de energía eléctrica que se lleva a cabo en las presas por medio de plantas hidroeléctricas. El consuntivo, incluso, se puede repetir varias veces en el curso de un mismo río, como es el caso del Río Yaqui que tiene plantas hidroeléctricas: una en la presa del Novillo y otra más abajo en la presa Oviáchic.

La base de datos de derechos de agua del REPGA nos muestra que en Sonora se han expedido siete títulos para la

generación de energía eléctrica que utilizan en total 5,213 millones de aguas superficiales. De estos siete, cinco títulos autorizan extracción de volúmenes de aguas superficiales, mientras que los otros dos solo autorizan el uso de superficies de zonas federales.

TABLA 4. Usos no consuntivos en generación de energía eléctrica en Sonora.

Título de derecho de agua	Titular	Volumen de extracción	Fecha de expedición	Superficies de zona federal
1SON100201/09JBSG94	Comisión Federal de Electricidad.	1,099,410,000	13/12/94	0.00
1SON100203/10JBSG94	Comisión Federal de Electricidad.	2,607,597,000	02/06/94	0.00
02SON125480/09JBDA10	Comisión Federal de Electricidad.	640,000,000	04/04/11	0.00
02SON125496/09JADA12	Hidroeléctrica Titán.	0.0	19/04/12	3,080
02SON125497/09JADA12	Hidroeléctrica Titán.	0.0	19/04/12	3,530
02SON125479/09JBDA12	Comisión Federal de Electricidad.	450,000,000	12/03/13	0.00
02SON100288/09JBDA10	México Generadora de Energía.	416,669,000	07/02/02	0.00
Total		5,213,676,000		

FUENTE: Elaboración propia con datos del REPDA, (2014).

Por otra parte, están los usos consuntivos del agua. En este caso, la información contenida en los títulos de derechos de agua autoriza el uso de un total de 3,126 millones de metros cúbicos. De este total, 1,169 millones (37%) corresponden a aguas superficiales y los restantes 1,956 millones (63%) a subterráneas.

El principal uso al que se destina es al agrícola que consume el 50%. Es decir, la mitad de toda el agua consumida en Sonora. A este uso hay que agregar los que aparecen como

“múltiples” a los que se destina el 26%, así como al pecuario que consume el 1%. Si consideramos que el uso múltiple se refiere al empleado en la agricultura y otros, por ejemplo: ejidos que la usan para riego y para domicilios, y que el pecuario es una actividad primaria muy cercana a la agricultura, tenemos que las actividades agropecuarias emplean el 77% del agua que se consume en el OCNO Noroeste. Por otra parte, tenemos que las actividades industriales consumen el 3% y los servicios el 1%. Es decir, que las actividades del sector secundario y terciario utilizan en conjunto solo el 4% del agua del estado. Hay que señalar que, aunque su volumen no es significativo en términos porcentuales, aparece un derecho otorgado para uso “agroindustrial” que corresponde a la Empresa Bachoco que es una de las principales del estado.

Por último, pero no menos importante, están los usos domésticos y del público urbano que es el destinado para la casa habitación y otros usos municipales como, por ejemplo, riego de parques y jardines. Estos, de acuerdo con las concesiones otorgadas por el REPDA, consumen el 19% del agua.

TABLA 5. Usos consuntivos del agua concesionada en Sonora en 2014.

Usos del agua	Número de títulos	Volumen agua superficial (m ³ /año)	Volumen agua subterránea (m ³ /año)	Volumen total de asignaciones de agua (m ³ /año)	%
Agrícola	6,440	232,918,945	1,336,385,269	1,569,304,214	50%
Agroindustrial	1	-	50,000	50,000	0%
Doméstico	941	55,363	420,611	475,974	0%
Acuicultura	55	8,435,404	1,734,982	10,170,386	0%
Servicios	362	1,095,360	22,224,632	23,319,992	1%
Industrial	278	9,859,295	95,206,079	105,065,374	3%
Pecuario	8,667	4,700,876	22,830,398	27,531,274	1%

Continúa...

Usos del agua	Número de títulos	Volumen agua superficial (m ³ /año)	Volumen agua subterránea (m ³ /año)	Volumen total de asignaciones de agua (m ³ /año)	%
Público urbano	6,646	289,275,676	291,527,515	580,803,191	19%
Múltiples	3,194	623,067,996	186,525,485	809,593,481	26%
Total general	26,584	1,169,408,915	1,956,904,971	3,126,313,886	100%
Porcentaje		37%	63%	100%	

FUENTE: Elaboración propia con datos del REPDA, (2014).

Con la presentación de datos de los derechos de agua en el OCNO solo estamos haciendo un primer acercamiento al estudio de la información contenida en los títulos de derechos registrados en el REPDA con miras a conocer mejor cómo se están administrando nuestras cuencas y observar si se está haciendo algún tipo de planeación.

A manera de conclusión

Al inicio de este trabajo, planteamos el objetivo de revisar el concepto de cuencas y contrastarlo con la división de estas realizada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 2016, así como definir los volúmenes asignados para las cuencas de acuerdo con la información contenida en los títulos de derechos registrados en el REPDA y cuáles son los usos a los que está destinada el agua concesionada. Nos preguntamos ¿Cuáles son las cuencas reconocidas oficialmente por la CONAGUA en el estado de Sonora y la porción de Chihuahua que corresponde al OCNO? y ¿cuánta agua tienen asignadas estas cuencas y para qué usos?

A manera de conclusión, destacaremos los siguientes puntos. Primeramente, que hay grandes diferencias entre la división política del estado de Sonora y la división hidrológi-

ca propuesta por la CONAGUA. De este modo, el territorio del estado de Sonora comprende porciones de tres Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA). Aunque la mayor parte del territorio de Sonora está comprendida en la RHA II llamada Noroeste, también comprende pequeños territorios de la RHA I denominada Península de Baja California y un territorio aún más reducido de la RHA III llamada Pacífico Norte. La división se complica al considerar que la RHA en la que está la mayor parte del estado de Sonora comprende, además, los territorios del estado de Chihuahua que corresponden a las cuencas de los ríos Yaqui y Mayo. La división hidrológica resulta entonces muy diferente de la división política.

Segundo, las Regiones Hidrológicas (RH) en las que se subdividen las RHA tienen la característica de que, aunque toman en cuenta las cuencas fisiográficas, están delimitadas con base en los territorios de los municipios. Entonces, las RH no están hechas estrictamente con base en la fisiografía y las corrientes de las aguas. Podemos decir que la base de estas subdivisiones es mixta: parte hidrológica y parte política.

Tercero, la RH 7 Río Colorado que comprende subcuencas o municipios fronterizos del estado de Sonora que están separados y distantes entre sí (San Luis Río Colorado, Nogales, Naco y Cananea), pero que tienen la característica de ser cruzados por afluentes del Río Colorado, solo tiene sentido en cuanto se puedan coordinar y trabajar juntamente con los usuarios del agua de la misma cuenca del otro lado de la frontera. Podemos decir que se explican por el enfoque de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), suponiendo que se puedan añadir a la planeación transfronteriza.

Cuarto, el territorio de las cuencas comprendidas en la RH 8 Sonora Norte abarca territorios en los que la precipitación es muy escasa y en los que no existen corrientes es-

tablecidas de agua. Se trata de cuencas oficiales en donde no hay fisiográficas.

Quinto, podemos considerar que esta división hidrológica no cancela la segmentación política existente, sino que busca convivir con ella. Lo que podría significar que la división hidrológica es una nueva fragmentación territorial destinada exclusivamente para la gestión del agua, mientras que la gestión de los demás asuntos públicos se hace con base en las jurisdicciones de la división política tradicional.

Sexto, los títulos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) proporcionan información que permite estimar los volúmenes asignados por cuenca y por uso, tanto de agua superficial como de subterráneas. Sin embargo, estos títulos fueron expedidos antes de la definición oficial de cuencas de 2016; por lo tanto, no hacen referencia a las cuencas oficiales sino a las fisiográficas en su sentido más amplio.

Séptimo, y último, la identificación y división del territorio por cuencas oficiales no toma en cuenta a las aguas subterráneas. Además, en las regiones desérticas en donde el aprovechamiento de las aguas subterráneas es más frecuente, las cuencas superficiales no necesariamente coinciden con la delimitación superficial de los acuíferos. Tenemos, entonces, un comportamiento territorial de las aguas superficiales y otro de las subterráneas que pueden o no coincidir con las superficiales. Esto significa que los perímetros superficiales de los acuíferos no coinciden ni respetan las divisiones políticas, pero tampoco coinciden con las cuencas oficiales aquí presentadas.

En general, la respuesta a la pregunta planteada es que en México se ha definido y hecho oficial una división territorial por cuencas.

Esta nueva división por cuenca no cancela la manera tradicional de llevar a cabo la planeación y gestión de los recur-

sos hídricos con base en las divisiones políticas existentes; es decir, por municipios, estados o países que generalmente no corresponden a la delimitación de los sistemas hidrológicos. El gobierno de cada división política sea presidente municipal, gobernador de un estado o presidente de la república, busca tomar decisiones respecto al agua exclusivamente dentro de la jurisdicción de su territorio. Por ejemplo, un gobierno estatal recopila la información y emprende obras hidráulicas solo dentro del territorio de su jurisdicción. El problema es que los ríos y las cuencas reclaman territorios y drenan cuencas que no se ajustan a las divisiones políticas existentes. Es necesario, para poder tomar decisiones, conocer qué pasa con el agua antes de entrar al territorio. Por lo tanto, la buena gestión y planeación no puede hacerse solo por segmentos y requiere, asimismo, conocer qué pasa río arriba e informar a los usuarios río abajo para tomar decisiones de manera conjunta.

Agradecimientos:

Este trabajo de investigación fue posible gracias al apoyo brindado por el CONACYT (Proyecto CB-2013/223780 “Vulnerabilidad hídrica y formulación de políticas adaptativas para la sustentabilidad urbana y la gestión por cuencas”. Así como a la Lloyd’s Register Foundation [CE-12-1051/ CE-12-0801] y al Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) [SGP-CRA #005], el cual es apoyado por la National Science Foundation (NSF) [GEO-1138881 y DEB-1010495]. Se reconoce y agradece también al trabajo de las asistentes de investigación Daniela Noreña, Melisa Aguirre Loreto, Alejandra Gallardo Urrea y Miryam Fernanda Ramírez Ruiz.

Bibliografía

- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: LIMUSA.
- Biswas, A. (2004). Integrated Water Resources Management: A Re-assessment. *Water International*, 29(2), 248-256.
- Blomquist, W. & Schlager, E. (2005). Political Pitfalls of Integrated Watershed Management. *Society and Natural Resources*, 18, 101-117.
- CONAGUA. (2016). Shapefile Disponibilidad. Recuperado de: <https://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?p=7>
- Dunbier, R. (1968). *The Sonoran Desert: Its Geography, Economy, and People*. Arizona: The University of Arizona Press.
- Global Water Partnership & International Network of Basin Organizations. (2009). *A Handbook for Integrated Water Resources Management*. Suecia: Global Water Partnership & International Network of Basin Organizations.
- Gregersen, H., Ffolliott, P. & Brooks, K. (2007). *Integrated Watershed Management. Connecting People to Their Land and Water*. Wallingford: CAB International.
- Pérez, G. & Rodríguez, A. (2009). *Apuntes de Hidrología Superficial*. México: Universidad Michoacana San Nicolás Hidalgo.
- Postel, S. & Richter, B. (2003). *Rivers for Life. Managing Water for People and Nature*. Washington: Island Press.
- REPDA. (30 de junio de 2014). Base de datos de derechos de agua correspondientes al OCNO hasta 30 junio 2014. México, D.F., México.
- SARH. (12 de enero de 1994). Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. (S. d. Hidráulicos, Ed.). *Diario Oficial de la Federación*.
- SEMARNAT. (29 de abril de 2004). Decreto por el que se reforma y adiciona y deroga diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales. (S. d. Naturales, Ed.). *Diario Oficial de la Federación*.
- SEMARNAT. (30 de noviembre de 2006). Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua. (S. d. Naturales, Ed.). *Diario Oficial de la Federación*.

SEMARNAT. (27 de mayo de 2016). ACUERDO por el que se dan a conocer los límites de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos. *Diario Oficial de la Federación*, pág. 2a. sección.

Springall, R. (s.f.). *Hidrología Primera Parte*. México: UNAM Facultad de Ingeniería.

CAPÍTULO II

DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES EN BAHÍA DE LOBOS: IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIOECONÓMICO

*Edna Rosalba Meza Escalante, Ruth Gabriela Ulloa Mercado,¹ Denisse Serrano Palacios,¹ Luis Alonso Leyva Soto,^{1,2} Ana María Rentería Mexía,¹ Lourdes Mariana Díaz Tenorio,¹ Pablo Gortáres Moroyoqui^{1*3}*

Resumen

Bahía de Lobos se localiza al suroeste del estado de Sonora, aproximadamente en el primer tercio sur de la costa, siendo parte importante del sistema de Lagunas Costeras del Golfo de California o Mar de Cortés. En esa localidad se descargan las aguas residuales de Ciudad Obregón, a través del dren colector No. 2 del Valle del Yaqui. Actualmente estas aguas son tratadas, por lo cual se ha disminuido, en gran medida, la aportación de materia orgánica y otros contaminantes en su destino final. Los principales riesgos de la descarga de estas aguas en Bahía de Lobos, las cuales

1 Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

2 Cátedra CONACYT asignado al ITSON.

3 Autor de correspondencia: pablo.gortares@itson.edu.mx

cuentan con aporte de otros afluentes en su trayecto al mar, son la contaminación microbiana, presencia de microcontaminantes y compuestos tóxicos, así como modificaciones de las características físicas de la zona de descarga, la cual cuenta con una importancia no solo desde el punto de vista económico, debido a su riqueza pesquera, sino también desde el punto de vista ecológico donde se destaca la presencia de una gran cantidad de especies, flora y fauna de importancia biológica. El objetivo de este capítulo es presentar un análisis general de la problemática ambiental de Bahía de Lobos provocada por la descarga de aguas residuales tanto agrícolas (municipales o urbanas) como pecuarias (porcícolas y acuícolas principalmente), así como los cambios que se han presentado durante los últimos 25 a 30 años en cuanto al aporte de contaminantes a la bahía.

Palabras Clave: Valle del Yaqui, aguas residuales, microcontaminantes, materia orgánica, Mar de Cortés.

Introducción

En el presente capítulo se hace una descripción general en cuanto a la descarga de aguas residuales a Bahía de Lobos. También se mencionan algunos datos relacionados con el establecimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de Ciudad Obregón, mismas que fueron instaladas en 1997, lo que de entrada eliminó una cantidad considerable de contaminantes que descargaban en Bahía de Lobos a través del dren colector No. 2 del Valle del Yaqui. Finalmente, se hace un análisis de la situación actual en cuanto a la calidad de las aguas residuales vertidas, a través del colector mencionado anteriormente, con énfasis en compuestos de reciente interés, como es el caso de los denomina-

dos contaminantes emergentes o microcontaminantes, los cuales por lo general se encuentran en concentraciones del orden de micro e incluso nanogramos por litro.

Asimismo, se presenta un análisis general de la problemática ambiental de Bahía de Lobos provocada por la descarga de aguas residuales tanto agrícolas (municipales o urbanas) como pecuarias (porcícolas y acuícolas principalmente), así como los cambios que se han presentado durante los últimos 25 a 30 años en cuanto al aporte de contaminantes a la bahía.

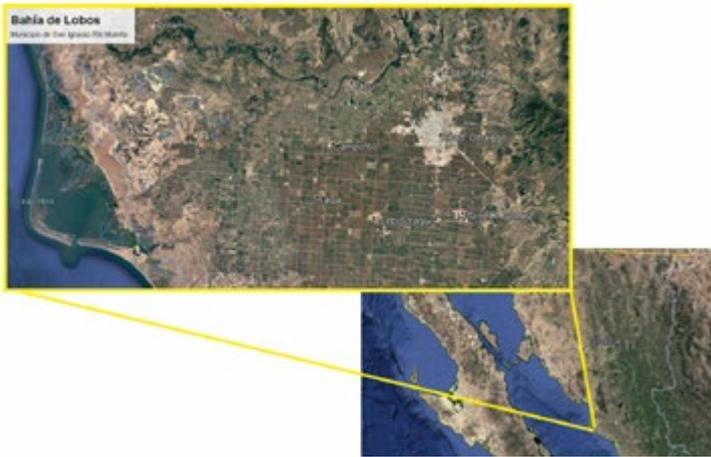
El capítulo se estructuró en los siguientes apartados: 1) contextualización de Bahía de Lobos, 2) riesgos e impactos ambientales por descarga de aguas residuales en Bahía de Lobos, 3) condiciones actuales de la descarga de Aguas Residuales Agrícolas y agroindustriales en el Valle del Yaqui y 4) conclusiones.

Contextualización de Bahía de Lobos

Localización

Bahía de Lobos, considerada una localidad suburbana, se localiza a los 27°20'58.8" N y 110°27'12.1" W a una altitud de 5 msnm en el municipio de San Ignacio Río Muerto al suroeste del estado de Sonora (Figura 1). Al sur y oeste colinda con el Golfo de California, al este con el municipio de Bácum y al norte con el municipio de Guaymas.

FIGURA 1. Localización, relieve, vegetación y zonas agrícolas de Bahía de Lobos, San Ignacio Río Muerto, Sonora.



FUENTE: Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], (2016).

Parte del territorio de la tribu Yaqui

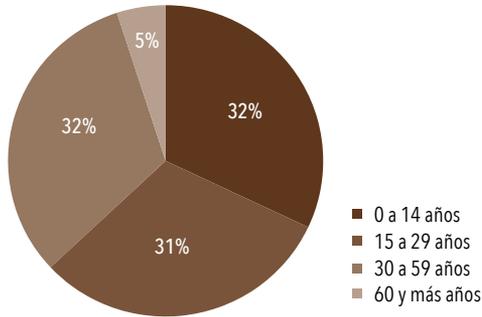
Los Yaquis son un pueblo indígena del estado de Sonora, México. Su territorio está localizado en el suroeste del estado. La mayoría de los pueblos del grupo étnico se localizan en los municipios de Guaymas, Bácum, Cajeme y Empalme. Existen ocho pueblos Yaquis: Cócorit, Loma de Bácum, Tórim, Vícam, Pótam, Belem, Ráhum y Huirivis, la mayoría ubicados en las inmediaciones del Río Yaqui (Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], 2016) y cuentan con tradiciones y sistema de gobierno propios y bien definidos. El territorio Yaqui incluye una zona serrana, la Sierra del Bacatete; zona pesquera, Las Guásimas y Bahía de Lobos; y tierras de cultivo, el Valle del Yaqui.

Aspectos sociodemográficos

La comunidad de Bahía de Lobos cuenta con una población total de 3,786 habitantes, según el censo del 2015. En la Gráfica 1 se muestra la distribución por edades de la población, donde se observa que más de la mitad de la población está entre los 15 y 59 años. Cuenta con 893 viviendas, de las cuales el 90% se encuentran habitadas (INEGI, 2016). De la población ocupada, más de la mitad se emplea en actividades del sector primario (58%) como pesca, agricultura y acuicultura (Serrano, 2006).

La vivienda tradicional se fabrica principalmente de carrizo y adobe, con piso de tierra y techo de carrizo o palma, aunque actualmente se construyen de ladrillo, cemento y lámina. Cuentan con servicios básicos de electricidad, agua potable, correo, telégrafo, teléfono e internet. Los niveles de educación que se ofrecen en la comunidad son preescolar, primaria, secundaria (telesecundaria) y bachillerato, lo que aumenta la posibilidad de preparación académica de la población infantil y joven. Para estudiar el nivel licenciatura existen opciones cercanas a su comunidad, como el Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui (ITVY) a 40 km de Bahía de Lobos y las universidades ubicadas en Ciudad Obregón a 67.5 km (INEGI, 2016).

GRÁFICA 1. Distribución por edades de la población de Bahía de Lobos, San Ignacio Río Muerto, Sonora.



FUENTE: Gráfica propia creada con datos del INEGI, (2016).

Actividades económicas

La cercanía con la costa se aprovecha para las actividades acuícolas. La comunidad de Bahía de Lobos se organiza en cooperativas para el cultivo de camarón, principalmente. La tenencia de la tierra se presenta en tres formas: ejido, propiedad comunal y pequeña propiedad. Asimismo, la pesca es una actividad económica importante en Bahía de Lobos (UNAM, 2016).

Esta bahía se considera parte importante del territorio de la tribu Yaqui, ya que en ella existe la pesca no solo de parte de las personas que habitan en el pueblo, conocido como Líliba, sino también de gente de otros pueblos cercanos, tanto Yaquis como ajenos a la tribu. La importancia de la bahía, desde el punto de vista económico, deriva de su riqueza pesquera, pero también tiene una importancia desde el punto de vista ecológico.

Recursos naturales

Bahía de Lobos cuenta con un clima que puede considerarse seco, con una precipitación media anual de 188 mm, regis-

trándose la máxima precipitación en los meses de julio, agosto y septiembre con hasta 50 mm. Estos meses coinciden con los de las mayores temperaturas registradas, con una media de 33°C y máximas de 38°C. En el invierno la temperatura media registrada es de 18°C con mínimas de hasta 10.7°C (Climate-data.org, 2019).

Predomina la vegetación de suelo salino y vegetación acuática por su cercanía al mar. La flora abundante es el mezquite, palo verde, brea, palo fierro y el huisache. La fauna está compuesta principalmente de aves como la paloma y la codorniz, reptiles y algunos mamíferos como el coyote, zorra y rata (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal [INAFED], 2004). Cuenta con tierras de cultivo de riego y su relieve es llanura costera (Figura 1). Los suelos son aptos para la agricultura y se utilizan intensivamente para los cultivos de algodón y cereales. Bahía de Lobos pertenece al sistema de Riego del Río Yaqui, por lo que el agua para los cultivos se abastece de esa fuente. La mayor parte del recurso hídrico potable se extrae de pozos.

También, la bahía, posee una gran extensión de costa, por lo que cuenta con los recursos hídricos y extensión de tierra suficientes para desarrollar la pesca y acuicultura de camarón.

Existen muy pocas referencias respecto a la flora y fauna particular de Bahía de Lobos, sin embargo, algunos autores mencionan que en términos generales puede aplicarse un criterio similar al resto de los humedales costeros del estado de Sonora. En el trabajo realizado por Díaz, Arreguín, Lecari, Cruz, Zetina, Del Monte & Martínez (2012) para la Costa centro-este del Golfo de California, incluida la Bahía de Lobos, se destaca la presencia de una gran cantidad de especies de fauna de importancia económica y ecológica. Solo por mencionar algunos tenemos desde rayas y tiburones, pargos de

diversas especies, lisa, robalo, mojarra, sierra, pelágicos menores, jureles, aves marinas, lobos marinos, medusas, moluscos en general, hasta camarón y otros crustáceos.

De acuerdo con Fleischner & River (2005), la Bahía de Lobos es sitio importante de veraneo (alimentación y descanso) para diversas aves, tanto marinas como terrestres (o costeras), algunas de las cuales están de paso hacia el sur y otras para las que es su destino final. Esto sin contar la gran cantidad de aves residentes durante todo el año.

Riesgo e impactos ambientales por descarga de aguas residuales en Bahía de Lobos

Aunque se ha estudiado poco el problema ambiental de Bahía de Lobos, existen registros desde 1993 sobre la calidad y contaminantes de aguas residuales descargadas en la bahía (Gortáres & Castro, 1993; Arreola, 1995). El dren colector general número 2 transporta aguas residuales, tanto urbanas como de riego agrícola, y su descarga final se ubica en la Bahía de Lobos. Hasta antes de 1997, las aguas residuales urbanas generadas en Ciudad Obregón eran concentradas y transportadas por el dren colector número 2. En su recorrido, eran diluidas con Aguas Residuales Agrícolas (Gortáres & Castro, 1993) y descargadas en tierras y litoral Yaqui, provocando la concentración de residuales y sus contaminantes en una zona costera con baja capacidad de difusión. Para evitar o disminuir el impacto ambiental de las descargas se debió proyectar la liberación del dren colector número 2 por fuera de la punta sur de la bahía.

Desde 1997 las aguas residuales urbanas de Ciudad Obregón han sido tratadas en 2 plantas, por lo que la contaminación con materia orgánica y otros contaminantes ha dismi-

nuido en la actualidad en el sitio de liberación final en Bahía de Lobos. Aunque aún sigue afectando directamente al patrimonio ambiental de la tribu Yaqui (Luna, 2007).

En el Valle del Yaqui se han establecido dos grandes actividades productivas primarias: la agricultura y la acuicultura, además de la pesca en la zona marítima correspondiente. Estas actividades han ido desarrollándose de forma prácticamente independiente. La pesca ya se practicaba muchos años antes de que el valle tuviera sistemas de irrigación. Por siglos la gente se ha establecido en las costas haciendo de la pesca su mayor actividad para el sustento. Con la llegada de la Revolución Verde, el Valle del Yaqui fue transformándose rápidamente y empezó a establecerse una conexión entre la agricultura y la pesca debido a que el agua de riego llevaba los nutrientes agrícolas hasta el mar. Aunado a lo anterior, el surgimiento de las plantas acuícolas en la zona, en la década de los noventas del siglo pasado, generó una interconexión mucho mayor entre la agricultura y la pesca (Beman & Luers, 2012).

Los principales riesgos y problemas que se tienen al descargar aguas residuales sin tratamiento, es el deterioro ambiental manifestado por signos de eutrofización, contaminación microbiana, presencia de compuestos tóxicos y modificaciones de las características físicas de la zona de descarga (Wanda, Nyoni, Mamba & Msagati, 2017). Además, en los últimos años se ha detectado la presencia de productos farmacéuticos y de uso en el control de la salud pública, entre ellos antibióticos y hormonas que son ampliamente utilizados para fines veterinarios en las industrias porcinas y de la acuicultura.

Los principales problemas ambientales asociados con el uso de antibióticos se relacionan con el desarrollo de resistencia bacteriana, uso de cantidades excesivas, el metabolis-

mo parcial por los organismos a los que se suministran, por lo que parte de ellos van como contaminantes en las aguas residuales, sistemas de tratamiento poco eficientes en su remoción, y la persistencia y bioacumulación en el medio ambiente a bajas concentraciones (ng/L). Además, las hormonas en aguas residuales causan trastornos a la fauna acuática tales como disrupción endócrina, la feminización de la población, la pérdida de la vida silvestre (Wanda et al., 2017), la resistencia microbiana, pero también representan un riesgo para la salud humana pues pueden ocasionar nacimiento prematuro, malformaciones de los genitales, entre otros (Daughton, 2004; Kiril-Mert, Ozengin, Can-Dogan & Aydiner, 2018).

La pérdida de manglares

Los manglares cubren alrededor de 75% de las líneas costeras tropicales y subtropicales, y ocupan un área de 181,000 km² a nivel mundial (Azman, Othman, Velu, Chan & Lee, 2015). El estuario de Bahía de Lobos es considerado de gran importancia biológica por albergar los cuatro tipos de manglares, especies consideradas en riesgo de extinción y protegidas por la legislación mexicana (NOM-059-SEMARNAT, 2010). La bahía sirve como lugar de anidación y reproducción de especies endémicas, y de resguardo de especies migrantes y de paso. Asimismo, tiene una media anual de producción pesquera de 37,500 dólares por hectárea de manglar (Aburto, Ezcurra, Danemann, Valdez, Murray & Sala, 2008; Acosta & Vázquez, 2009).

Es un hecho que la cantidad de manglares ha disminuido de forma constante en sitios puntuales, incluso, de forma alarmante (Berlanga, Ruiz, Bocco & Vekerdy, 2011; Alatorre, Miramontes, Medina, Torres, Bravo, Wiebe, Granados, Adams, Sánchez & Uc, 2016). Aunque no es un problema ex-

clusivo de la región, ni siquiera del país, los trabajos antes mencionados consideran que la mayor causa de la pérdida de manglares en la costa este del Golfo de California (desde el centro de Sinaloa hasta el centro de Sonora) se debe principalmente a la construcción de granjas para producción de camarón. Sin embargo, de acuerdo con Berlanga et al. (2011), las zonas salinas intermareales son por sí mismas las que mayor impacto han recibido de dicha actividad. Se considera que la creación de estanques y canales ha tenido un impacto muy grave sobre dichas regiones.

Se sabe que la pérdida de manglar tiene un grave impacto sobre las poblaciones pesqueras locales y la distribución de alimentos en la región aledaña (Aburto et al., 2008). Estos autores realizaron una investigación mediante análisis de imágenes satelitales conocido como “Índice Normalizado de Diferenciación Vegetal” (NDVI, por sus siglas en inglés) con el que concluyeron que gran parte del daño se debe a las granjas de camarón. El estudio, que fue realizado en las cuencas de los ríos Fuerte, Mayo y Yaqui, analizó datos del periodo de 1990-2010 y se encontró un aparente incremento en la cobertura del manglar. Lo anterior podría parecer una señal positiva de recuperación, pero no lo es tanto si se considera que el verdadero indicador, de acuerdo con los autores, debería ser la “verdosidad” (greenness), ya que la cobertura espacial no indica rasgos cualitativos sobre la salud fenológica. Como ya se mencionó, el manglar es un hábitat de gran importancia que impacta positivamente a la pesca en su zona de influencia.

Flujos de nutrientes en manglares

El Golfo de California, en general, presenta un flujo de nutrientes muy característico. Medido en la zona conocida

como “la boca”, es decir, la parte sur del Golfo, los flujos presentan un comportamiento de exportación respecto al nitrato y al fosfato; mientras que respecto al amonio el comportamiento, entre importación y exportación, es más o menos nivelado (Bustos & Castro, 2006). En términos de balances de masa, los manglares con aporte directo de aguas residuales municipales, agrícolas o de otro tipo de industrias, presentan variaciones estacionales muy marcadas de acuerdo con los volúmenes recibidos y la composición del agua. En un trabajo realizado en Japón por Akamatsu, Ikeda & Toda (2009), se encontró que gran parte de la materia orgánica generada por la hojarasca del manglar era arrastrada hacia los canales influentes cuando la marea era alta y otra parte permanecía en el manglar como sólidos disueltos.

Dentro de un ecosistema de manglar existe una gran cantidad de microorganismos implicados en los diferentes procesos de mineralización y desmineralización (degradación y producción de materia orgánica) tales como: bacterias desnitrificantes, fijadoras de nitrógeno, solubilizadoras de fosfato, reductoras de sulfato, bacterias fotosintéticas anaerobias, bacterias metanogénicas y hongos (Holguín, Vázquez & Baschan, 2001; Andreote, Jiménez, Chaves, Cavalcante, Mazzer, Dini-Andreote, Cipola, Varon, Baena, Gouvêa & Soares, 2012).

Para un manglar sin perturbaciones externas de origen antropogénico, los diferentes metabolismos están en equilibrio recirculando los nutrientes dentro del sistema. Cuando existe un aporte externo, como en el caso de fósforo y nitrógeno en Bahía de Lobos, el equilibrio tiende a cambiar. Por ejemplo, como caso particular, se ha elevado la tasa de desnitrificación cuando aumentan los niveles de nitrato por aporte externo. Los manglares suelen funcionar como sumideros de nutrientes (Holguín et al., 2001).

El aporte de nutrientes, por parte de los diversos tipos de aguas residuales, tiene un impacto en las zonas de descarga y se ha modificado en las últimas décadas. Para el año de 1998 el aporte de nitrógeno y fósforo en Sonora se distribuyó de la siguiente forma: los ríos aportaron un 50% del total de fósforo, seguido por la agricultura con un 34%; las descargas de aguas municipales aportaron un 11% y, finalmente, la acuicultura aportó poco más del 4%. En el caso del nitrógeno, la agricultura aportó la mayor cantidad superando el 80%, seguido de los ríos con 12% y las aguas municipales y la acuicultura con un 3% y 2% respectivamente (Páez, Guerrero & Ruiz, 1999).

En el trabajo publicado por Valenzuela, Arreola, Sánchez & Padilla (2007) se analizaron los flujos de nitrógeno y fósforo en la Bahía de Lobos. Los resultados muestran un comportamiento estacional, ya que durante el verano se presenta una dominancia de la desnitrificación y metabolismo neto heterótrofo, mientras que en el invierno predomina la fijación de nitrógeno y un metabolismo neto autótrofo. Estudios más recientes, como el publicado por Serrano, Sánchez, Angeler, Sánchez & Álvarez (2011), concluyen que el gran aumento de los volúmenes de agua de las granjas acuícolas genera, entre otros problemas, una disminución de la diversidad. También plantean que, para que el problema no avance, la solución es el tratamiento de las aguas residuales de dicho sector productivo.

Algunas de las ventajas de la Bahía de Lobos es que es del tipo restringida con una comunicación permanente al mar a través de dos bocas; además, presenta una circulación de mareas bien definida, está influenciada fuertemente por vientos y es bien mezclada verticalmente (Valenzuela et al., 2007).

De acuerdo con lo descrito anteriormente, se considera que la Bahía de Lobos presenta, por sus características fisi-

coquímicas, una gran capacidad de autopurificación, pero el constante aumento de aporte de nutrientes puede ser un problema cada vez mayor por lo que se recomienda que los influentes, es decir las aguas residuales que se descargan a la bahía, sean tratados previamente.

Condiciones actuales de las descargas de Aguas Residuales Agrícolas y agroindustriales en el Valle del Yaqui

El Valle del Yaqui es conocido actualmente por ser uno de los centros con mayor explotación agrícola y de industrias pecuarias, como la porcícola, en México (Escalante, Catalán & Basurto, 2013). Tal situación tiene como consecuencia la generación anual aproximada de 500 millones de m³ de aguas residuales, las cuales son descargadas a drenes y conducidas a través de canales a cielo abierto, durante 40 a 60 km de distancia, hasta llegar a los cuerpos receptores finales como pueden ser esteros, bahías y playas del Mar de Cortés (Gortáres & Castro, 1993).

De acuerdo a lo anterior, en los últimos años, investigadores del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) han realizado estudios con el objetivo de obtener datos actualizados de caracterización de agua de riego y de aguas residuales provenientes de los sectores económicos más explotados en el Valle del Yaqui, (Díaz, Hernández, Ulloa, Gortáres, Martínez, Meza & Serrano, 2018; Gortáres, Castro, Naranjo, Karpiscak, Freitas & Gerba, 2011; Quintana, Gortáres, Drogui, Estrada & Villa, 2010; Quintana, Gortáres, Drogui & Estrada, 2012; Seyhi, Drogui, Gortáres, Estrada & Buelna, 2014; Solorzano, Meza, Mondaca, Gortáres, Vega & Balderas, 2018), como son los agrícolas y pecuarios, así como los posibles efectos de

autopurificación de dichas descargas durante su transporte hasta su disposición en los cuerpos receptores finales.

Datos recientes de Navarro, Coronado, Domínguez, Ulloa, Gortáres, Meza & Serrano (2014) muestran que la descarga de aguas residuales en la zona costera del Valle del Yaqui, provenientes de industrias pecuarias, pueden presentar un problema de contaminación ambiental, ya que, aunque muchas de estas industrias cuentan con sistemas básicos del tratamiento de sus efluentes (lagunas anaerobias en el caso de la industria porcícola), esto no es suficiente para cumplir con los límites máximos permisibles de descargas establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996. Por otro lado, se ha demostrado que puede existir un efecto de dilución de los efluentes pecuarios con las Aguas Residuales Agrícolas (las cuales están por debajo de los límites máximos permisibles de descargas en bienes nacionales en cuanto a materia orgánica) dando lugar a aguas residuales mixtas. No obstante, aún con el efecto de dilución, estas siguen superando los límites permisibles en algunos parámetros regulados en las descargas (Solorzano et al., 2018).

Los estudios realizados por diversos autores en el Valle del Yaqui hacen consistentes algunos parámetros, lo cual demuestra que no ha habido cambios significativos en los efluentes descargados en los drenes.

A continuación, se describe un análisis de los parámetros más característicos para estos efluentes.

La zona de muestreo utilizada por Navarro et al. (2014) se fijó al sur de Ciudad Obregón, Sonora, donde podemos ubicar al Valle del Yaqui y del cual se tomó un área de estudio de 288 km² (Figura 2). El área para evaluar fue dividida en tres zonas de muestreo: la primera zona se centró en muestras de Aguas Residuales Mixtas (ARM), es decir, donde convergen

Aguas Residuales Agrícolas (ARA) y pecuarias; la segunda, ARA; y la tercera Aguas Residuales Pecuarias (ARP). Se tomaron por cada zona cuatro muestras de los canales de distribución de agua, esto es, antes de entrar a cada actividad productiva, y otras cuatro muestras se tomaron en puntos aleatorios después de que las aguas son explotadas en los diversos sectores. Dichas muestras fueron consideradas como afluentes y efluentes, respectivamente. Las muestras se realizaron de forma integrada, es decir, la muestra se formó por la mezcla de volúmenes tomados de diferentes puntos cercanos entre sí y en una misma proporción para obtener una final de ese punto.

FIGURA 2. Área de muestreo de las aguas residuales: Mixtas; 2)

Bajo) representan los canales de distribución de agua de riego.



FUENTE: Modificada de Google Maps, (2019).

Los resultados promedio de los parámetros convencionales provenientes de los canales de distribución o afluentes muestran concentraciones muy por debajo de los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (10 ± 8 mg

DQOs/L, 0.1 ± 0.1 mg N-NH_4^+ /L y 0.1 ± 0.2 mg $\text{N-NO}_2^- + \text{N-NO}_3^-$ /L), los cuales se consideran poco relevantes para las concentraciones obtenidas en las muestras de las descargas de cada sector. Sin embargo, se logra apreciar una diferencia entre los efluentes de los tres sectores (Tabla 1), lo que indica claramente que el agua residual agrícola presenta concentraciones muy bajas comparadas con las otras dos descargas, siendo muy similares con las de los afluentes. Por otro lado, la pecuaria es la más contaminada, ya que algunos parámetros (DQO, P-PO_4^{3-} y ST) presentan las más altas concentraciones que con base en esto, y observando el incremento en las concentraciones de los puntos de efluentes mixtos, se logra inferir que es relevante sobre la composición de los efluentes mixtos.

TABLA 1. Valor promedio de los parámetros fisicoquímicos de cada sector comparado con la NOM-001 y datos de referencia.

Tipo de muestra/ Parámetro	Valor medio ARM	Valor medio ARA	Valor medio ARP	¹ Referencia ARA	² Referencia ARP	³ NOM-001-SE- MANART-1996
*DQO	$z.2 \pm 446$	20.9 ± 15	452.4 ± 346	-	797.0	405.4
* N-NH_4^+	76.2 ± 130	1.0 ± 1	276.7 ± 165	-	-	N/A
* P-PO_4^{3-}	1.9 ± 3	0.0	31.1 ± 17	0.8-20.8	-	10.0
* $\text{N-NO}_2^- + \text{N-NO}_3^-$	8.6 ± 6	4.5 ± 6	5.6 ± 8	-	-	25.0
**ST	3.6 ± 6	0.7 ± 0	4.2 ± 2	0.4-6.7	0.2	0.1
**STV	1.7 ± 3	0.1 ± 0	1.4 ± 2	-	0.0	N/A

Las unidades son en *mg/L y **g/L; 1. Cámara, (1993), 2. Garzón & Buelna, (2014), 3 Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], (1996).

Al comparar los datos de los efluentes pecuarios con los establecidos en la norma, se observó que estos se encuentran por encima de los Límites Máximos Permitidos (LMP) por lo que se deben de tomar medidas correctivas en este tipo de

efluentes para evitar posibles efectos nocivos sobre el medio en el que se realiza la descarga.

Algunos compuestos detectados en aguas residuales, generados del sector pecuario, son los antibióticos: tetraciclina, oxitetraciclina, clortetraciclina, doxiciclina, sulfadiazina; y hormonas: 17 β -estradiol, estriol, estrona, y testosterona (Chen, Zhang, Luo & Song, 2012; García, Garzón, Buelna, Moeller, Noyola, Avilez & Estrada, 2013).

Estudios realizados en el Valle del Yaqui por Cantú, Meza, Valenzuela, Félix, Grajeda, Balderas, Osorio, Acuña & Aguilar (2011) detectaron plaguicidas como el endosulfán, DDE y DDT (3-30 $\mu\text{g}/\text{kg}$) en suelos residenciales que fueron campos de cultivos de algodón principalmente. Además, se encontraron residuos de α -HCH, DDE, endrín, DDT y DDD en un rango de 197-292 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en suelos agrícolas con cultivos de granos y hortalizas. Estos hallazgos demuestran la movilidad de dichos compuestos en distintas matrices ambientales (Solorzano et al., 2018).

De igual manera, los últimos años se han llevado a cabo estudios tanto para la detección de contaminantes emergentes como para su eliminación mediante sistemas de tratamientos avanzados o no convencionales (Balderrama, Gortáres, Álvarez, Ulloa, Leyva & Díaz, 2017; García, Drogui, Seyhi, Gortáres, Buelna, Estrada & Álvarez, 2016a; García et al., 2016b; García et al., 2014; Leyva, Balderrama, Moran, Díaz & Gortáres, 2018; Romero, Dia, Leyva, Drogui, Buelna, Díaz, Ulloa & Gortáres, 2018).

Conclusiones

Bahía de Lobos presenta, por sus características fisicoquímicas, una gran capacidad de autopurificación, pero el constan-

te aumento en el aporte de nutrientes puede ser un problema cada vez mayor por lo que se recomienda que los influentes, es decir las aguas residuales que se descargan a la bahía, sean tratados previamente.

Los principales riesgos de la descarga de estas aguas en Bahía de Lobos, las cuales cuentan con aporte de otros afluentes en su trayecto al mar, son la contaminación microbiana, presencia de microcontaminantes y compuestos tóxicos, así como modificaciones de las características físicas de la zona de descarga.

Las aguas residuales municipales generadas en uno de los principales asentamientos del Valle del Yaqui, el municipio de Cajeme, son tratadas en casi un cien por ciento. Sin embargo, persiste el riesgo de la descarga de las aguas residuales urbanas tratadas de Ciudad Obregón en Bahía de Lobos, mismas que cuentan con microcontaminantes, por lo que se presenta el problema de persistencia y bioacumulación de contaminantes en el medio ambiente aún a bajas concentraciones.

Conocer las características y origen de las aguas residuales permite proponer y diseñar trenes de tratamiento adecuados para la depuración de estas, buscando minimizar la cantidad de macro y microcontaminantes emergentes en los cuerpos receptores de agua.

Sonora es uno de los principales estados productores del sector agropecuario en nuestro país, el incremento de esta explotación agropecuaria conlleva a una demanda de grandes cantidades de agua lo que, a su vez, genera mayores volúmenes de descarga de estos líquidos con desechos agrícolas y pecuarios, además de los de origen urbano.

Bibliografía

- Aburto, O., Ezcurra, E., Danemann, G., Valdez, V., Murray, J. & Sala, E. (Julio de 2008). Mangroves in the Gulf of California increase fishery yields. *National Academy of Sciences*, 105(30), 10456-10459.
- Acosta, J. & Vázquez, A. (2009). *Caracterización del sitio de manglar Estero Los Lobos, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica*. Recuperado de: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/manglares/doctos/caracterizacion/PN05_Los_Lobos_caracterizacion.pdf
- Akamatsu, Y., Ikeda, S. & Toda, Y. (2009). Transport of nutrients and organic matter in a mangrove swamp. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82(2), 233-242.
- Alatorre, L., Sánchez, S., Miramontes, S., Medina, R., Torres, M., Bravo, L., Wiebe, L., Granados, A., Adams, D., Sánchez, E. & Uc, M. (2016). Temporal changes of NDVI for qualitative environmental assessment of mangroves: Shrimp farming impact on the health decline of the arid mangroves in the Gulf of California (1990-2010). *Journal of Arid Environments*, 125, 98-109.
- Andreote, F., Jiménez, D., Chaves, D., Cavalcante, A., Mazzer, D., Dini-Andreote, F., Cipola, C., Varon, M., Baena, S., Gouvêa, R. & Soares, I. (2012). The microbiome of Brazilian mangrove sediments as revealed by metagenomics. *Plos One*, 185, 1-14.
- Arreola-Lizárraga, J.A. (1995). *Diagnóstico ecológico de Bahía de Lobos, Sonora, México*. (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz, B. C. S., México.
- Azman, A., Othman, I., Velu, S., Chan, K. & Lee, L.H. (2015). Mangrove rare actinobacteria: taxonomy, natural compound, and discovery of bioactivity. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1-15.

- Balderrama, A., Gortáres, P., Álvarez, H., Ulloa, R., Leyva, L. & Díaz, L. (2017). Perspectives of Quantitative Risk Assessment Studies for Giardia and Cryptosporidium in Water Samples. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(5), 185.
- Beman, M. & Luers, A. (2012). From Wheat to Waves and Back Again: Connections between the Yaqui Valley and the Gulf of California. En: Matson, P. A. (ed). *Seeds of sustainability. Lessons from the birthplace of the green revolution in agriculture*. (págs. 93-104). Washington: Islander Press.
- Berlanga, C., Ruiz, A., Bocco, G. & Vekerdy, Z. (2011). Spatial analysis of the impact of shrimp culture on the coastal wetlands on the Northern coast of Sinaloa, Mexico. *Ocean & Coastal Management*, 54(7), 535-543.
- Bustos, H. & Castro, R. (2006). Flux of nutrients in the Gulf of California: Geostrophic approach. *Marine Chemistry*, 99(1), 210-219.
- Cámara, O. (1993). Impacto de la agricultura bajo riego sobre la calidad del agua: caso del Valle del Yaqui, Sonora. Calidad ambiental para el desarrollo sustentable. *Ingeniería Hidráulica en México*, 4(3), 56-63.
- Cantú, E., Meza, M., Valenzuela, A., Félix, A., Grajeda, P., Balderas, J., Osorio, C., Acuña G. & Aguilar, M. (2011). Residues of Organochlorine pesticides in soils from the southern Sonora, Mexico. *The Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 87(5), 556-560.
- Climate-data.org. (2019). Clima Bahía de Lobos. Recuperado de: <https://es.climate-data.org/americas-del-norte/mexico/sonora/bahia-de-lobos-227979/>
- Chen, Y., Zhang, H., Luo, Y. & Song, J. (2012). Occurrence and dissipation of veterinary antibiotics in two typical swine wastewater treatment systems in east China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(4), 2205-2217.
- Daughton, C. (2004). Non-regulated water contaminants: emerging research. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(7,8), 711-732.

- Díaz, J., Arreguín, F., Lercari, D., Cruz, V., Zetina, M., Del Monte, P. & Martínez, S. (2012). An integrated ecosystem trophic model for the North and Central Gulf of California: An alternative view for endemic species conservation. *Ecological Modelling*, 230(10), 73-91.
- Díaz, C., Hernández, J., Ulloa, G., Gortáres, P., Martínez, R., Meza, E. & Serrano, D. (2018). Simultaneous quantification of antibiotics in wastewater from pig farms by capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography B.*, (1092), 386-393.
- Escalante, R., Catalán, H. & Basurto, S. (2013). Determinantes del crédito en el sector agropecuario mexicano: un análisis mediante un modelo Probit. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 10(71), 101-124.
- Fleischner, T. & River, H. (2005). Shorebird Use of Estero Santa Cruz, Sonora, México: Abundance, Diversity and Conservation Implications. *Waterbirds*, 32(1), 36-43.
- García, C., Drogui, P., Seyhi, B., Gortáres, P., Buelna, G., Estrada, M. & Álvarez, L. (2016a). Combined membrane bioreactor and electrochemical oxidation using Ti/PbO₂ anode for the removal of carbamazepine. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 64, 211-219.
- García, C., Vidales, J., Nápoles, J. & Gortáres, P. (2016b). Optimization of Phenol Removal Using Anode with Response Surface Methodology. *Journal of Environmental Engineering*, 142(4), 1-7.
- García, C., Drogui, P., Zaviska, F., Seyhi, B., Gortáres, P., Buelna, G., Neira, C., Estrada, M. & Ulloa, R. (2014). Experimental design methodology applied to electrochemical oxidation of carbamazepine using Ti/PbO₂ and Ti/BDD electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 732, 1-10.
- García, L., Garzón, M., Buelna, G., Moeller, G., Noyola, A., Avilez, M. & Estrada, E. (2013). Occurrence of tylosin in swine wastewater in Mexico. *Water Science & Technology. Water Sci Technol*, 68(4), 894-900.

- Garzón, M. A. & Buelna, G. (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(1), 65-79.
- Google Maps. (2019). Recuperado de: <https://www.google.com/maps/@27.3469602,-110.0455187,33774m/data=!3m1!1e3>.
- Gortáres, P., Castro, L., Naranjo, J., Karpiscak, M., Freitas, R. & Gerba, C. (2011). Microbiological water quality in a large irrigation system: El Valle del Yaqui, Sonora México. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46(14), 1708-1712.
- Gortáres, P. & Castro, L. (1993). Determinación de la calidad de las principales aguas residuales del Valle del Yaqui. Calidad ambiental para el desarrollo sustentable. En *Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental y I Congreso Internacional AIDIS de Norteamérica y el Caribe II'26-II'27*). México.
- Holguín, G., Vázquez, P. & Bashan, Y. (2001). The role of sediment microorganisms in the productivity, conservation, and rehabilitation of mangrove ecosystems: an overview. *Biology and Fertility of Soils*, 33, 265-278.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). Censo general de Población y Vivienda 2010. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Kiril, B., Ozengin, N., Can, E. & Aydiner, C. (2018). Efficient removal approach of micropollutants wastewater using membrane bioreactor. *Wastewater and water quality, InTech Open Access*. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75183>.
- Leyva, L., Balderrama, A., Moran, E., Diaz, L. & Gortáres, P. (2018). Glyphosate and amino methylphosphonic acid in population of agricultural fields: health risk assessment overview. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(4), 5127-5140.
- Luna, E. (2007). Derechos, uso y gestión del agua en el territorio Yaqui. Hermosillo, Sonora. Recuperado de: <https://agua.org>.

- mx/wp-content/uploads/2007/07/Derechos-Uso-y-Gestion-del-Agua-en-el-Territorio-Yaqui_Marzo_20007.pdf
- Navarro, M., Coronado, K., Domínguez, D., Ulloa, R., Gortáres, P., Meza, E. & Serrano, D. (2014). Caracterización de aguas residuales agropecuarias del Valle del Yaqui. *La Sociedad Académica*, 43,15-19.
- NOM-059-SEMARNAT-2010. (2010). Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Recuperado de: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5173091&fecha=30/12/2010
- Páez, F., Guerrero, S. & Ruiz, A. C. (1999). Discharge of nutrients from shrimp farming to coastal waters of the Gulf of California. *Marine Pollution Bulletin*, 38, 585-592.
- Quintana, D., Gortáres, P., Drogui, P., Estrada, M. & Villa, M. (2010). Tecnologías Electroquímicas como Alternativas en el Tratamiento de Aguas Contaminadas: Adsorción por Carbón Activado. *Ide@s CONCYTEG*, 5(60), 570-581.
- Quintana, D., Gortáres, P., Drogui, P., Alvarado, M. (2012). *Contaminantes emergentes: su importancia, retos y perspectivas sobre la medición, el tratamiento y la reglamentación*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Romero, I., Dia, O., Leyva, L., Drogui, P., Buelna, G., Díaz, L., Ulloa, R. & Gortáres, P. (2018). Degradation of Chloramphenicol in Synthetic and Aquaculture Wastewater Using Electrooxidation. *Journal of Environmental Quality-Organic Compounds in the Environment*, 47(4), 805-811.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1996). Norma Oficial Mexicana NOM- 001-SEMARNAT-1996. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de: <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf>

- Serrano, C. (2006). Regiones indígenas de México. Recuperado de: http://www.cdi.gob.mx/regiones/regiones_indigenas_cdi.pdf
- Serrano, L., Sánchez, S., Angeler, D., Sánchez, A. & Álvarez, M. (2011). Effects of shrimp-farm effluents on the food web structure in subtropical coastal lagoons. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 402(1), 65-74.
- Seyhi, B., Drogui, P., Gortáres, P., Estrada, M. & Buelna, G. (2014). Adsorption of an organochlorine pesticide on activated carbon produced from an agro-waste material. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 89(12), 1811-1816.
- Solórzano, J., Meza, M., Mondaca, I., Gortáres, P., Vega, C. & Balderas, J. (2018). Trace element concentrations in sediments and water from Bahía de Lobos, Sonora, Mexico. *Journal of Aquaculture, Fisheries & Fish Science*, 2(1), 118-129.
- Valenzuela, M., Arreola, J., Sánchez, S. & Padilla, G. (2007). Flujos de nutrientes y metabolismo neto de la laguna costera Lobos, México. *Hidrobiológica*, 17(3), 193-202.
- Wanda, E., Nyoni, H., Mamba, B. & Msagati, T. (2017). Occurrence of emerging micropollutants in water systems in Gauteng, Mpumalanga, and North West provinces, South Africa. *Environmental Research and Public Health*, 14(1), 1-28.

PARTE II
TRATAMIENTO
Y USO SUSTENTABLE DEL AGUA

CAPÍTULO III

ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINAS UTILIZANDO MICROALGAS

*María del Rosario Martínez Macías¹, Germán Eduardo Dévora
Isiordia¹, Jesús Álvarez Sánchez¹*

Resumen

México es considerado una potencia en la explotación minera. Ocupa el primer lugar en la producción de plata a nivel mundial. Se ubica entre los diez principales productores de 16 diferentes minerales: plata, bismuto, fluorita, celestita, wollastonita, cadmio, molibdeno, plomo, zinc, diatomita, sal, barita, grafito, yeso, oro y cobre. Sin embargo, durante el proceso de extracción de estos metales preciosos, se tiene como resultado una constante generación de residuos sólidos y líquidos a niveles de cientos de millones de toneladas. Las aguas residuales procedentes de estas minas (jales) muchas veces se dispersan en los sitios aledaños al lugar de extracción del metal. Los jales

¹ Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

mineros son el producto que queda después de la trituración y molienda del mineral. Una vez que se han recuperado los metales comerciales, mediante procesos físicos y químicos, tienen altas concentraciones de minerales y un pH ácido. Estas aguas ácidas de minas ocasionan grandes afectaciones en el medio ambiente: pérdida de biodiversidad, efectos tóxicos y dañinos en las poblaciones aledañas a los sitios de explotación minera.

Este capítulo tiene como objetivo evaluar la capacidad de adsorción de la microalga inmovilizada no viva, *Nannochloropsis Oculata*, como una alternativa de tratamiento para las descargas de aguas ácidas, de minas, con altos contenidos de metales pesados y pH ácidos. Para lograr esto, se efectuó un diseño factorial de 2^3 en el que las variables de estudio seleccionadas fueron la cantidad de biomasa 0.1 y 0.2 g, pH en niveles de 4 y 5, y tiempo de contacto de 0.5 y 1 h. Los resultados mostraron que la biomasa de la microalga *N. Oculata* tiene una alta capacidad de adsorción del metal cobre en solución logrando remover el 63.04% de una concentración de 600 mgL^{-1} de cobre, a un pH=5, con 0.2 g de biomasa, en un tiempo de 30 minutos. Se identificó que, de los tres factores estudiados, la cantidad de biomasa y el pH fueron los más importantes para lograr una mayor cantidad de remoción del contaminante. Se concluye que la biomasa de microalgas proporciona una alternativa viable y económica en el tratamiento en aguas residuales contaminadas con cobre utilizándose como biosorbente.

Palabras clave: Microalgas, adsorción, metales pesados, aguas ácidas.

Introducción

México es el primer productor mundial de plata, undécimo de oro y duodécimo de cobre. También es el segundo productor de fluorita, el tercero más grande de bismuto y el quinto más grande de plomo. La producción minera de México se divide en 21% oro, 20% plata, 14% cobre, 8% zinc y el resto en otros minerales (Camacho, Vani, Carrizales, Flores, Verduzco, León & Díaz, 2016). Los estados principales en minería son: Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Jalisco, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Guerrero (Mexicano, 2014).

Sonora es el estado líder en producción minera en la República Mexicana. Cerca del 50% de la producción nacional de minerales se genera en este estado. Es el principal productor de cobre, grafito, wollastonita, carbón antracítico y el único productor de molibdeno. Además de producir 24% del oro del país, es importante productor de plata, fierro y minerales no metálicos como: barita, sílica, yeso, sal y zeolitas. Cuenta con más de 5,000 concesiones mineras que representan más de 43,000 km,² el 23% de superficie (Rodríguez, 2011).

La extracción de estos metales, como todo proceso, genera grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos. La industria minera durante su operación genera grandes cantidades de aguas ácidas que, por su elevado contenido en iones metálicos y bajo pH, constituye uno de los problemas de mayor impacto en el medio ambiente. En algunos casos es imposible evitarlo, durante los procesos de lixiviación se presentan escurrimientos de agua, sobre todo, cuando hay precipitaciones pluviales llegando a difundirse los contaminantes a mayores masas de agua. En ocasiones, por un bajo control dentro de sus procesos, se presentan pérdidas o derrames de estos minerales con sustancias tóxicas (García, Barradas,

Ponce, Esperón, Rosas & Ballinas, 2019). Este tipo de aguas se caracterizan por concentraciones altas de hierro, sulfatos y metales pesados de distinta composición (Gabarrón, Zornoza, Acosta, Faz & Martínez, 2019).

Las aguas ácidas también se generan de forma natural. Este proceso se origina en depósitos no explotados y que están expuestos a la superficie en forma natural y cuya mineralogía se caracteriza por la presencia de sulfuros (como piritita y la arsenopiritita) que entran en contacto con el aire y el agua, en forma de lluvia o deshielos, y terminan produciendo la acidificación del recurso hídrico. Esto genera un vertido autopropetuido de material tóxico ácido que puede continuar durante años o incluso décadas dependiendo de la vida de la mina.

La continua descarga de estos minerales y metales pesados como el fierro, oro, cobre y níquel, a mantos acuíferos como lagos o ríos, tiene un efecto tóxico en la salud humana y el medio ambiente (Yuan, Wu, Ge, Nie, Wang, Zou & Chen, 2019). Los metales pesados no pueden ser biológicamente biodegradados y pueden permanecer por mucho tiempo dentro de los microorganismos y seres vivos de la región. Se mantienen presentes bioacumulados (Li & Chen, 2018).

La toxicidad de los metales pesados tiene diferentes características; una de ellas es su efecto a largo plazo que, en ocasiones, se convierte dentro del organismo en formas más tóxicas, biomagnificándose a través de la cadena trófica (Yang, Zhu, Zhao, Wei, Chen, Yao, Meng & Zhao, R., 2019). Estas formas no se pueden eliminar por ningún medio y pueden causar toxicidad a bajas concentraciones de 1.0 a 10 mgL⁻¹ (Sutherland & Ralph, 2019).

Metales pesados como el plomo, mercurio, cromo, arsénico, cadmio, zinc, cobre y níquel son los contaminantes que,

en concentraciones superiores a las permitidas en el agua, se precipitan como hidróxidos cuando se combinan con el recurso hídrico dulce de los ríos o lagos. La oxidación de estos metales causa deficiencia de oxígeno disuelto en el agua superficial, lo que afecta a los ecosistemas, que se traduce en pérdida generalizada del hábitat en el lugar de las descargas (Baki, Hossain, Akter, Quraishi, Haque, Atique & Khan, 2018).

Uno de los principales problemas de todos estos contaminantes radica en que ninguna planta de tratamiento de aguas residuales logra eliminarlos. Estas plantas de tratamiento están diseñadas para eliminar materia orgánica y partículas suspendidas en concentraciones altas (gL^{-1}). Es por ello que estos contaminantes pasan esta barrera y llegan a estar presentes en aguas superficiales, aguas subterráneas y de consumo humano. Además, la degradación primaria de algunos de estos compuestos, en las plantas de tratamiento o en el propio ambiente, generan productos más persistentes y de mayor peligrosidad.

Por ser una problemática grave, y como estos contaminantes no son biodegradables, eliminarlos de los cuerpos de agua y suelo es un reto. Se han aplicado diversas tecnologías que incluyen la precipitación, intercambio iónico, filtración, galvanoplastia y adsorción, las cuales son a menudo ineficaces y muy caras (Yang, Cao, Xing & Yuan, 2015).

Las primeras investigaciones que se han llevado a cabo han demostrado que la biosorción es una tecnología prometedora y rentable para la eliminación de metales pesados en soluciones acuosas (en comparación con los métodos convencionales), ya que posee varias ventajas: bajo costo de operación y alta eficiencia de remoción en concentraciones bajas (Patil, Chavan & Oubagaranadin, 2016).

Una amplia variedad de organismos activos e inactivos han sido empleados como biosorbentes para secuestrar iones metálicos de soluciones acuosas, puesto que muchos cuentan con grupos funcionales y ligaduras orgánicas que desempeñan un papel importante en la eliminación de contaminantes con metales pesados. Los grupos funcionales de más importancia son carboxilo, hidroxilo, sulfato, fosfato y la amina.

Las algas verdes están principalmente formadas de celulosa y un alto contenido de proteínas que se unen a los polisacáridos. Estos compuestos tienen grupos funcionales como amino, carboxilo, sulfato e hidroxilo (He & Chen, 2014). Muchas especies de microalgas se utilizan en el tratamiento de aguas residuales (Jiang, Luo, Fan, Yang & Guo, 2011). Son conocidas como potenciales en la absorción de metales (bioacumulación) y pueden lograr eliminar los presentes en aguas residuales (Özkoc & Taylan, 2010). Muchas son sensibles a la toxicidad de contaminantes lixiviados; sin embargo, las microalgas marinas comúnmente muestran una mayor resistencia y robustez que las especies de agua dulce cuando se expone a condiciones adversas (Bernaerts, Ghysen, Foubert, Hendrickx & Van, 2019). Lo que indica que estas pueden ser más adecuadas, que las especies de agua dulce, en el tratamiento de lixiviados.

Las microalgas son organismos fotosintéticos microscópicos que se encuentran en ambientes dulces, salobres y marinos. En términos de biomasa, forman el grupo más grande del mundo de los productores primarios, y son responsables de al menos 32% de la fotosíntesis global en el planeta (Priyadarshani, Mesthri & Rakshit, 2011). Estos organismos acuáticos poseen mecanismos moleculares que les permiten discriminar los metales pesados no esenciales de los esenciales para su crecimiento (Suresh, Dahms, Won, Lee & Shin, 2015).

Tienen afinidad para metales polivalentes lo que ayuda a establecer su posible aplicación en la limpieza de las aguas residuales que contienen iones metálicos disueltos (De-Bashan & Bashan, 2010).

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al evaluar la capacidad de adsorción de la microalga inmovilizada no viva *Nannochloropsis Oculata* utilizada como biosorbente del metal cobre presente en una solución.

Método

Obtención de biomasa

La microalga *Nannochloropsis Oculata* se obtuvo de la colección de cepas del Departamento de Acuicultura del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. (CICESE). Los cultivos se llevaron a cabo por triplicado, en fotobiorreactores alimentados, a temperatura controlada de 25°C, iniciándose con el 10% de volumen de inóculo. Asimismo, fueron mantenidos mediante la adición de medio Algal (Fabregas, Herrero, Cabezas & Abalde, 1985). El pH se mantuvo a 8.5, ajustándose mediante la adición de CO₂. Se utilizó luz artificial continua por 24 horas, se mantuvo un flujo de aire en 5.2 L min⁻¹ (0.26 vvm) y una intensidad de luz de 166 μE·m⁻²·s⁻¹. Después de un periodo de cultivo de 21 días, la microalga fue separada del medio utilizando centrifugación a 3000 g por un tiempo de 20 minutos. Después fue secada con un liofilizador Labconco a -52°C y 0.025 mbar. La biomasa seca se guardó para pruebas de adsorción.

Curva de calibración

Los reactivos utilizados para preparar la curva de calibración fueron sulfato de cobre (Fermont), ácido clorhídrico (Merck)

0.1 M, solución de hidróxido de sodio (Fermont) 0.1 M y agua amoniacal al 25% (Fermont). Para determinar la cantidad de cobre adsorbido por la microalga se utilizó la metodología de Harris (2010), con modificaciones, determinándose la concentración de cobre por método espectrofotométrico, mediante la formación de un complejo amoniacal color azul intenso. Fue preparada una curva de calibración a partir de una solución stock de 0.1 M de CuSO_4 , con las siguientes concentraciones medidas en mgCuSO_4/L y mgCu/L (Tabla 1).

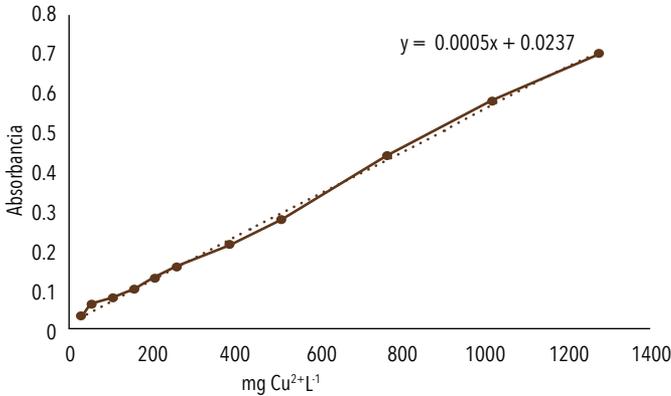
TABLA 1. Curvas de calibración.

Solución	mgCuSO_4/L	mgCu/L
1	63.96	25.44
2	127.93	50.89
3	255.86	101.78
4	383.79	152.67
5	511.72	203.56
6	639.65	254.45
7	959.48	381.68
8	1279.30	508.90
9	1918.96	763.363
10	2558.61	1017.81
11	3198.27	1272.27

FUENTE: Elaboración propia.

En la Gráfica 1 se muestra la curva de calibración obtenida y utilizada para el cálculo de la cantidad de cobre en todas las pruebas después de los ensayos de adsorción. La correlación de la ecuación fue de 0.9983, lo que indica una predicción confiable de los resultados.

GRÁFICA 1. Curva de Calibración de $\text{Cu}^{+2} \text{L}^{-1}$.



FUENTE: Elaboración propia.

Para medir la concentración de cobre fue utilizado un espectrofotómetro UV visible GENESYS 50 ajustado a una longitud de onda de 510 nm. El complejo se logró agregando a 2.5 mL, de la muestra, 2.5 mL de agua amoniacal al 25%. Se agitó y se midió la absorbancia. Se utilizó Excel para graficar los datos.

Ensayos de adsorción

Para determinar las condiciones óptimas en las cuales la biomasa de la microalga logra adsorber la mayor cantidad de cobre presente en la solución, se propuso un diseño experimental factorial de 2^3 . Las variables por probar fueron tiempo de contacto (min) (X_1), pH (X_2) y cantidad de biomasa (g) (X_3), para lo que se utilizó el software Design Expert. El software arrojó ocho combinaciones posibles para las tres variables. Los niveles y parámetros del diseño se encuentran en la Tabla 2.

TABLA 2. Diseño experimental 2^3 .

Variables	Nivel (-1)	Nivel (1)
X_1 , Tiempo (min)	30	60
X_2 , pH	4.0	5.0
X_3 , Biomasa (g)	0.1	0.2

FUENTE: Elaboración propia.

Con estos niveles ya establecidos las combinaciones que dio el software se observan en la Tabla 3.

TABLA 3. Diseño experimental 2^3 .

Corridas	Variable (X_1) Tiempo (min)	Variable (X_2) pH	Variable (X_3) Biomasa (g)
1	30	4	0.10
2	30	4	0.20
3	60	5	0.10
4	30	5	0.20
5	60	4	0.10
6	30	5	0.10
7	60	4	0.20
8	60	5	0.20

FUENTE: Elaboración propia.

Para los ensayos de adsorción fue utilizada una solución de 600 mgL^{-1} de CuSO_4 ; se tomaron 0 mL y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 125 mL, se ajustó el pH utilizando NaOH 0.1M y se adicionó la cantidad de biomasa inmovilizada no viva de la microalga *N. Oculata*, en las cantidades solicitadas por el diseño experimental. Se mantuvo la temperatura a 25°C con una agitación en 200 rpm. Después de transcurrido el tiempo de la prueba, la biomasa fue separada del líquido sobrenadante mediante filtración, para lo que se utilizó un filtro millipore. Se midió la cantidad de cobre residual en las

muestras tomando 2.5 mL del líquido sobrenadante y adicionándoles 2.5 mL de agua amoniacal al 25%. Finalmente se leyó la muestra de la absorbancia de 510 nm en un espectrofotómetro GENESYS 20. Todas las pruebas se llevaron a cabo por triplicado. El porcentaje de remoción (%R) fue calculado con la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} * 100$$

Donde C_o y C_f son la concentración inicial y final de la solución respectivamente.

Resultados

Para cumplir con el objetivo planteado, se presentan los resultados más relevantes obtenidos en las pruebas efectuadas para evaluar la capacidad de adsorción de la microalga inmovilizada no viva *Nannochloropsis Oculata* en la remoción del cobre presente en una solución.

Ensayos de adsorción

Las microalgas particularmente poseen la ventaja de multiplicarse con más rapidez que las plantas terrestres, debido a que no dedican recursos para generar una estructura compleja. Su capacidad como adsorbentes de diferentes metales pesados se ha adjudicado a su alto contenido de iones catiónicos bioadsorbentes: calcio, magnesio, potasio, sodio, fósforo, hierro, manganeso, zinc y cobre; además de la presencia de ciertos grupos funcionales con gran afinidad por los metales: amidas ($-\text{NH}_2$), los fosfatos ($-\text{PO}_4^{3-}$), los tioles ($-\text{SH}$), los hidróxidos ($-\text{OH}^-$), carboxilatos ($-\text{COO}^-$) (Doshi, Ray, Kothari & Gami, 2006); (Rangabhashiyam & Balasubramanian, 2019). En la Tabla 4 se presentan los resultados de las pruebas efectuadas.

TABLA 4. Resultados de remoción de cobre por biomasa de microalgas.

Experimento	1	2	3	4	5	6	7	8
pH	5	4	5	5	4	5	4	4
Biomasa (g)	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.20	0.20	0.10
Tiempo (min)	30	30	60	60	60	30	30	60
Remoción (%)	53.669	44.616	45.263	58.195	51.406	63.045	53.669	39.443

FUENTE: Elaboración propia.

En la Tabla 4 se indica que los porcentajes de remoción oscilaron entre 39.443% (el más bajo) y hasta 63.045% (el más alto). Comparando los experimentos 1 y 2, donde permanecen constantes la cantidad de biomasa (0.10 g) y el tiempo (30 min.), se puede observar que una modificación en el pH, de 4 a 5, incrementa la remoción de cobre en un 9.053%. Similares resultados fueron encontrados en el experimento 6 y 7 con un incremento 9.376%, y en los experimentos 4 y 5; 3 y 8 con diferencias de 6.789% y 5.82% respectivamente. Se encontró que para una mayor remoción el pH debe ser 5.

En cuanto al efecto que tiene la cantidad de biomasa en la remoción del metal cobre, se pueden comparar los experimentos 3 y 4, a pH 5 y tiempo de agitación 60 minutos, en donde se modifica solamente la cantidad de biomasa. Se observa que al duplicar la cantidad de biomasa se obtiene un incremento en la remoción de hasta un 28% más, con lo que crece de 45.61% a 58.19% al utilizar 0.10 g y 0.20 g de biomasa. El mismo comportamiento se presenta a pH 4 y tiempo 60 minutos. Al comparar los resultados de los experimentos 5 y 8 se obtiene un aumento en el porcentaje de remoción de 39.44% a 51.40%, y un desarrollo de por lo menos un 30% cuando aumenta la cantidad de biomasa al doble. En cuanto al tiempo de contacto, se encontró que el de 30 minutos es

suficiente para lograr la mayor remoción del metal presente en el medio en todas las pruebas.

Discusiones

En este estudio fue investigada la capacidad de adsorción de cobre por la biomasa no viva de la microalga *N. Oculata*, en la que se encontró una remoción máxima de 63.04% a pH 5, 0.2 g de biomasa, en un tiempo de 30 minutos. Esto indicó que los factores que afectan significativamente la remoción de cobre son la cantidad de biomasa y pH. Lo que concuerda con diversos estudios recientes. Por ejemplo los hechos por Pradhan, Sukla, Mishra & Devi (2019) donde muestran que la superficie de la biomasa de las microalgas es irregular y porosa lo que potencia la gran interfaz para la adsorción heterogénea. Indican que la superficie de la biomasa se vuelve lisa después de la adsorción de Cr (VI). Por lo que la esta es directamente proporcional a la porosidad de la biomasa de estos organismos acuáticos.

Mencionan Sun, Huang, Zhu, Du, Jiang & Gao (2019) que las tasas de adsorción, tanto de Cd^{2+} como de Pb^{2+} , aumentan a medida que crece la concentración del adsorbente. La razón de este comportamiento es que conforme la concentración aumenta también lo hacía el área de superficie, lo que generó un mayor número de sitios de asimilación para metales pesados (Anwar, Shafique, Waheed, Salman, Dar & Anwar, S., 2010). Sin embargo, existe un límite para la capacidad de adsorción en la microalga, una posible razón de este fenómeno puede ser que el adsorbente es capaz de producir un efecto de caparazón para proteger sus propios sitios activos del contacto de iones de metales pesados alcanzando la saturación (Bhattacharyya & Sen 2006). Por lo anterior, a

mayor cantidad de biomasa, se encuentran más sitios activos para la remoción del cobre en solución de este estudio.

Por otra parte, el pH se identificó como uno de los factores importantes que afectan la adsorción de iones metálicos. Se estudió el efecto en el rango 4-5, y los resultados indicaron una adsorción máxima de cobre a un pH 5. Se requieren condiciones ácidas para los metales pesados que, como el cobre, se encuentren en la solución. Fuera de este pH óptimo, la adsorción disminuye. A pH más bajo, H^+ compite con los cationes metálicos por el sitio de adsorción disponible. Mientras que a un pH más alto del óptimo los sitios de adsorción no se activan y los cationes metálicos reaccionan con iones hidróxido, y se precipitan como hidróxido metálico. Esto hará que el verdadero estudio de adsorción sea incierto.

Si se incrementa la cantidad de biomasa de la microalga, se aumentará el porcentaje de remoción y el pH deberá de mantenerse en 5 para evitar precipitaciones o una desactivación de los sitios de adsorción.

El presente estudio puede usarse para concluir que, en lugar de productos químicos, los bioadsorbentes como la biomasa de las microalgas pueden usarse como removedores de metales pesados de aguas residuales y efluentes industriales para evitar la contaminación del líquido y daños al medioambiente. Por lo que es factible el tratamiento de aguas ácidas de minas con biomasa de la microalga inmovilizada no viva de *N. Oculata*, la cual puede implementarse como un proceso de adsorción en el área de tratamiento de aguas.

Conclusiones

Basado en los resultados se encontró que la cantidad de biomasa es un factor significativo para la remoción del cobre

en aguas contaminadas y que el pH debe mantenerse a 5. Se concluye que es factible, para el tratamiento en aguas residuales contaminadas con cobre, utilizar biomasa de la microalga inmovilizada no viva de *N. Oculata* como adsorbente. Los resultados obtenidos en esta investigación pueden servir de base para investigaciones futuras en la obtención de modelos de adsorción.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) a través de los proyectos de fomento a la investigación (PROFAPI, 2017).

Bibliografía

- Anwar, J., Shafique, U., Waheed, Z., Salman, M., Dar, A. & Anwar, S. (2010). Removal of Pb(II) and Cd(II) from water by adsorption on peels of banana. *Bioresource Technology*, 101(6), 1752-1755.
- Baki, M., Hossain, M., Akter, J., Quraishi, S., Haque, M., Atique, A. & Khan, M. (2018). Concentration of heavy metals in seafood (fishes, shrimp, lobster and crabs) and human health assessment in Saint Martin Island, Bangladesh. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 159, 153-163.
- Bernaerts, T., Gheysen, L., Foubert, I., Hendrickx, M. & Van, A. (2019). The potential of microalgae and their biopolymers as structuring ingredients in food: A review. *Biotechnology Advances*, 37(8), 107419.
- Bhattacharyya, K. & Sen, S. (2006). Pb(II) uptake by kaolinite and montmorillonite in aqueous medium: Influence of acid activation of the clays. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 277(1-3), 191-200.
- Camacho, A., Van, E., Carrizales, L., Flores, R., Verduzco, B., Huerta, A., Leon, M. & Díaz, F. (2016). Mercury Mining in Mexico: I.

- Community Engagement to Improve Health Outcomes from Artisanal Mining. *Annals of Global Health*, 82(1), 149-155.
- De Bashan, L. & Bashan, Y. (2010). Immobilized microalgae for removing pollutants: review of practical aspects. *Bioresource technology*, 101(6), 1611-1627.
- Doshi, H., Ray, A., Kothari, I. & Gami, B. (2006). Spectroscopic and Scanning Electron Microscopy Studies of Bioaccumulation of Pollutants by Algae. *Current Microbiology*, 53(2), 148-157.
- Fabregas, J., Herrero, C., Cabezas, B. & Abalde, J. (1985). Mass culture and biochemical variability of the marine microalga *Tetraselmis suecica* Kylin (Butch) with high nutrient concentrations. *Aquaculture*, 49(3-4), 231-244.
- Gabarrón, M., Zornoza, R., Acosta, J., Faz, A. & Martínez, S. (2019). Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection. Recuperado de: <https://www.science-direct.com/bookseries/advances-in-chemical-pollution-environmental-management-and-protection/vol/4/suppl/C>
- García, I., Barradas, V., Ponce de León, C., Esperón, M., Rosas, I. & Ballinas, M. (2019). Effect of heavy metals and environmental variables on the assimilation of CO₂ and stomatal conductance of *Ligustrum lucidum*, an urban tree from Mexico City. *Urban Forestry & Urban Greening*, 42, 72-81.
- Harris, A. (2010). *Metodología del diseño*. España: Parramon.
- He, J. & Chen, J. (2014). A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresource Technology*, 160, 67-78.
- Jiang, L., Luo, S., Fan, X., Yang, Z. & Guo, R. (2011). Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO₂. *Applied Energy*, 88(10), 3336-3341.
- Li, J., Chen, J. & Chen, S. (2018). Supercritical water treatment of heavy metal and arsenic metalloids-bioaccumulating-biomass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 157, 102-110.

- Özkoc, H. & Taylan, Z. (2010). Assessment of various parameters of metal biology in marine microalgae *Phaeodactylum Tricornutum* and *Dunaliella Tertiolecta*. *Fresenius Environmental Bulletin*, 19(12a), 2981-2986.
- Patil, D. S., Chavan, S. & Oubagaranadin, J. (2016). A review of technologies for manganese removal from wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 468-487.
- Pradhan, D., Sukla, L., Mishra, B. & Devi, N. (2019). Biosorption for removal of hexavalent chromium using microalgae *Scenedesmus* sp. *Journal of Cleaner Production*, 209(1), 617-629.
- Priyadarshani, D., Mesthri, W. & Rakshit, S. (2011). Screening selected strains of probiotic lactic acid bacteria for their ability to produce biogenic amines (histamine and tyramine). *International Journal of Food Science & Technology*, 46, 2062-2069.
- Rangabhashiyam, S. & Balasubramanian, P. (2019). Characteristics, performances, equilibrium and kinetic modeling aspects of heavy metal removal using algae. *Bioresource Technology Reports*, 5, 261-279.
- Rodríguez, J. (2011). La minería mexicana: el ocaso de un modelo nacionalista. *Apuntes: Revista de Ciencias Sociales*, 38, 137-165.
- Sun, X., Huang, H., Zhu, Y., Du, Y., Yao, L., Jiang, X. & Gao, P. (2019). Adsorption of Pb²⁺ and Cd²⁺ onto *Spirulina platensis* harvested by polyacrylamide in single and binary solution systems. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 583, 123926.
- Suresh, K., Dahms, H., Won, E., Lee, J. & Shin, K. (2015). Microalgae -A promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113, 329-352.
- Sutherland, D. & Ralph, P. (2019). Microalgal bioremediation of emerging contaminants -Opportunities and challenges. *Water Research*, 164, 114921.
- Yang, J., Cao, J., Xing, G. & Yuan, H. (2015). Lipid production combined with biosorption and bioaccumulation of cadmium, copper, manganese and zinc by oleaginous microalgae *Chlo-*

- rella minutissima UTEX2341. *Bioresource Technology*, 175, 537-544.
- Yang, K., Zhu, L., Zhao, Y., Wei, Z., Chen, X., Yao, C., Meng, Q. & Zhao, R. (2019). A novel method for removing heavy metals from composting system: The combination of functional bacteria and adsorbent materials. *Bioresource Technology*, 293, 122095.
- Yuan, Y., Wu, Y., Ge, X., Nie, D., Wang, M., Zhou, H. & Chen, M. (2019). In vitro toxicity evaluation of heavy metals in urban air particulate matter on human lung epithelial cells. *Science of The Total Environment*, 678, 301-308.

CAPÍTULO IV

QUITOSANO COMO ALTERNATIVA PARA ELIMINAR CONTAMINANTES ACUOSOS

*Ma. Araceli Correa Murrieta¹, Reyna Guadalupe Sánchez Duarte¹
y Germán Eduardo Dévora Isiordia¹*

Resumen

El agua es un recurso indispensable para todas las formas de vida. Actualmente se tiene el problema de su escasez y su contaminación por diversas fuentes. En este capítulo se hace referencia a la contaminación por metales pesados y otros contaminantes recalcitrantes, como los colorantes azoicos, que representan una problemática en los estados de Sonora y Chihuahua, México. Para dar solución al problema de la contaminación se dispone de diversas tecnologías, en este caso se profundiza en el uso del proceso de adsorción. Finalmente, se describe y se propone al quitosano como una alternativa de remediación atractiva para la eliminación de contaminantes presentes en los cuerpos de agua.

Palabras clave: Quitosano, recursos hídricos, metales pesados, colorantes.

¹ Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON)

Introducción

La preocupación por los recursos hídricos, en términos de cantidad y calidad, ha aumentado en la última década en todo el mundo. La República Mexicana no ha escapado a este problema, agravándose especialmente en ambientes áridos y semiáridos predominantes en el estado de Chihuahua. Por esta razón, el recurso hídrico es considerado como primordial. Aunado a esto, la industria forestal y la actividad minera contribuyen con más del 80% en la economía de la región.

El agua que fluye en el Río Conchos es el recurso natural más importante del norte de México y representa la principal corriente superficial del estado de Chihuahua. Estudios realizados han indicado diversos niveles de contaminación del agua con metales pesados, superando los límites permisibles de la normatividad mexicana. Reyes, Alarcón, Gutiérrez & López (2013) encontraron arsénico en acuíferos aluviales en el centro de Chihuahua; Chumacero, Ozuky, Pinedo & Rentería (2016) determinaron la existencia de cobre, níquel y zinc en muestras de agua de ríos en el distrito de Ocampo; Arias, Rivero, Delgado, Quintana, Terán & Villalba (2017) hallaron arsénico, cromo, manganeso, fierro, plomo y mercurio en el Río Conchos. Por lo anterior, es de vital importancia identificar los potenciales efectos antropológicos que la contaminan, así como la concentración de metales pesados o algún otro elemento (contaminantes emergentes, colorantes, materia orgánica y otros) que pudiesen afectar al medio ambiente, a su flora y fauna.

Mientras tanto, en el estado de Sonora se han detectado problemas de contaminación en algunos de los principales cuerpos de agua como lo son la Bahía de Guaymas, Bahía de Yavaros, Esteros la Atanasia, Tóbari y Mélagos, y algu-

nos ríos como el San Pedro y el Mayo, entre otros (Atondo, Del Castillo, Álvarez, Villalba, Ortiz & Esquer, 2013). En Chihuahua se han detectado contaminantes en el Río San Pedro y Río Conchos.

La contaminación por metales pesados se ha encontrado en fuentes de agua de Sonora y Chihuahua. A través de la caracterización realizada por diversos investigadores, se ha identificado contaminación por arsénico, cadmio, cobre, manganeso, entre otros, en el Río Conchos, en Chihuahua (Arias, et al., 2017), así como de riego en la región nogalera del sur de este estado (Valles, Ojeda, Guerrero, Prieto & Sánchez, 2017). Asimismo, en los suelos del Valle del Yaqui y del Río Mayo en Sonora (Meza, Gandolfi, Santana, Klimecki, Aguilar, Del Río, De la O Villanueva, Gómez, Mendivil, Valencia & Meza, D., 2012).

El desarrollo marcado de las regulaciones ambientales en las últimas décadas ha impulsado tratamientos alternativos para aguas residuales. Los procesos para el manejo de efluentes urbanos o industriales (que contienen sustancias minerales y orgánicas) involucran diversas estrategias dependiendo de la naturaleza de los contaminantes (iones metálicos, colorantes, compuestos farmacéuticos, etcétera), el interés en reciclar (o valorizar productos del tratamiento) y su toxicidad. Los procesos de precipitación se usan con mucha frecuencia, pero regularmente encuentran limitaciones técnicas y también producen grandes cantidades de lodo contaminado. Estas técnicas alternativas deberían alcanzar niveles de descarga, ser competitivas y, en la medida de lo posible, ser coherentes con los requisitos para un crecimiento sostenible (Desbrières & Guibal, 2018).

Existen diferentes tecnologías para eliminar contaminantes de los medios acuáticos, dentro de las cuales se en-

cuenta la adsorción. Se pueden usar muchos materiales (quelantes o intercambio iónico, resinas, soportes minerales, carbón activado y residuos de la industria química, agrícola o de pesca). En el caso de los procesos de biosorción, el solvente se produce a partir de un material de origen biológico; por ejemplo, el quitosano, el cual ha sido utilizado en muchos proyectos de investigación para la eliminación de contaminantes en solución.

El estado de Sonora, México, cuenta con una gran producción acuícola de camarón, lo que genera enormes cantidades de residuos que pueden contaminar el medio ambiente y, a su vez, ser de aprovechamiento para la producción de quitosano.

Chihuahua colinda al oeste con el estado de Sonora. Grandes ríos como el Yaqui y Mayo constituyen las fuentes principales de agua en Sonora.

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo de este capítulo es hacer referencia a la contaminación por metales pesados y otros contaminantes recalcitrantes, como los colorantes azoicos en cuerpos de agua, en los estados de Sonora y Chihuahua y proponer al quitosano como un bioadsorbente alternativo de remediación.

Problemática del agua en Sonora y Chihuahua

El agua es uno de los elementos esenciales que sostienen el equilibrio natural y es considerada irremplazable en el planeta. A pesar de ser identificada como un elemento primordial en la vida diaria del hombre, desde la antigüedad fue también considerada como un recurso ilimitado que permitiría al hombre utilizarla de la manera que mejor conviniera pensando que siempre estaría disponible. Sin embargo, las

distintas actividades humanas ejercen una presión importante, directa e indirectamente, sobre el ciclo hidrológico, lo que ha tenido consecuencias negativas en muchas regiones, no solo en la calidad de vida de la población sino también en los ecosistemas naturales y su biodiversidad. La producción y consumo de bienes y servicios, además de traer consigo una mayor demanda del líquido, ocasiona mayor generación de aguas residuales de las cuales una proporción importante (sobre todo en los países en desarrollo) se vierte sin tratamiento en los cuerpos de agua superficiales. Como resultado de su contaminación, muchos ecosistemas dulceacuícolas y marinos muestran signos evidentes de degradación, con lo cual se han reducido en cantidad y calidad sus servicios ambientales y se ha perdido, en algunos casos de manera irremediable, su biodiversidad. Ante este escenario el manejo de agua en el mundo y en México representa uno de los más importantes retos ambientales para el futuro (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016).

En México, la mayor parte de los ríos y lagos se encuentran seriamente contaminados por una gran cantidad de sustancias tóxicas de naturaleza diversa (plaguicidas, metales pesados, materia orgánica, etcétera). Asimismo, en los últimos años, las actividades mineras, industriales y urbanas han experimentado un desarrollo muy notorio, lo cual ha causado que, en numerosos casos, se afecte la calidad del agua y sedimentación de algunos sistemas acuáticos. En el estado de Sonora se han identificado problemas de contaminación por metales pesados en algunos de los principales cuerpos de agua, como es el caso de la Bahía de Guaymas, Bahía de Yavaros, Esteros la Atanasia, Tóbari y Mélagos, y algunos ríos como el San Pedro y el Mayo, entre otros (Anto & Annadurai, 2012).

Chihuahua presenta escasez de agua, por esta razón este recurso es considerado como primordial. El Río Conchos genera la principal corriente superficial de este estado y es el recurso natural más importante del norte de México. Estudios previos han indicado diversos niveles de contaminación que incluyen concentraciones de diversos metales como Fe, Ni y Pb (Arias et al., 2017). Por lo anterior, es de vital importancia reconocer los potenciales efectos antropológicos que contaminan el agua, así como la concentración de metales pesados o algún otro elemento que pudiese afectar al medio ambiente, a su flora y fauna.

Contaminantes en cuerpos de agua de Sonora y Chihuahua

Con el constante crecimiento poblacional, el volumen de agua con el que los mexicanos deben satisfacer sus necesidades de forma sostenible ha ido mermando debido a la contaminación de esta.

Uno de los problemas de los ríos, cuerpos de agua, aguas subterráneas y zonas costeras del país es la contaminación por descargas de efluentes industriales, de plantas de tratamiento, aguas residuales urbanas, escorrentías superficiales, lixiviado de suelos, desechos de la industria minera, otros residuos que demandan oxígeno (en su mayor parte materia orgánica), productos químicos de moléculas complejas, los pesticidas utilizados en la agricultura, y desechos provenientes de la industria textil y curtiduría (Universidad Autónoma Nacional de México [UNAM], 2018).

En México existen reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, cultivos, suelos y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros y marinos donde la minería es una de las principales causas de la contaminación ambien-

tal por metales pesados debido, principalmente, al manejo inadecuado de sus residuos denominados “jales mineros”. Lo anterior ocasiona problemas de contaminación en estados como Zacatecas, San Luis Potosí, Guerrero, Chihuahua y Sonora (Covarrubias & Cabriales, 2017).

Gómez, Valenzuela, Villalba, Meza, Almendariz, Whittaker, Martínez, Valenzuela & Ochoa (2011a) estudiaron el sedimento superficial de la presa Abelardo L. Rodríguez, del estado de Sonora, México, y encontraron que los niveles de metales pesados totales fueron: Cu ($1.0-3.5 \text{ mg kg}^{-1}$), Fe ($0.5-12.0 \text{ mg kg}^{-1}$), Mn ($5.5-32.5 \text{ mg kg}^{-1}$) y Zn ($0.5-4.0 \text{ mg kg}^{-1}$). De la O Villanueva, Meza, Maier, Moreno, Gómez, Río, Mendivil & Montijo (2013) detectaron la presencia de cobre en suelos residenciales y polvo suspendido provenientes de jales de la Presa I de Nacozari de García, Sonora. Por otro lado, en un estudio realizado en el Río San Pedro, ubicado en una región semiárida en Sonora, México, se detectaron altas concentraciones de metales en el siguiente orden: Fe > Cu > Mn > Zn > Pb > Cd (Gómez, Valenzuela, Meza, De la O Villanueva, Ramírez, Almendariz & Pérez, 2011b). También, se detectó que varios pueblos y ciudades en el Valle del Yaqui y Mayo, en Sonora, están de moderadamente a altamente contaminados por el suelo que contiene Be, Co, Hg, P, S, V, Zn, Se, Cr y Pb, y que representa un riesgo potencial en la salud de los residentes en especial si hay cuerpos de agua expuestos o en contacto con estas áreas (Meza et al., 2012).

Por otro lado, en Chihuahua, México, predominan los ecosistemas áridos y semiáridos. Por esta razón, el recurso es considerado como primordial por lo que diversas investigaciones se han enfocado en determinar la presencia de contaminantes en las diferentes fuentes de agua, como ríos y acuíferos aluviales. Arias et al. (2017) investigaron sobre

la calidad del agua del Río Conchos. Estudiaron las características fisicoquímicas y el contenido de metales pesados y metaloides (Al, As, B, Cd, Pb, Se, Ca, Cr, Cu, Co, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Si y Zn.). Como resultado se encontró que los niveles de arsénico, cromo, manganeso, fierro, plomo y mercurio superaban los límites máximos permisibles de la normatividad mexicana (NOM-127-SSA1-1994). Chumacero et al. (2016) analizaron elementos (Ca y Mg) y traza (Li, Ni, Sb, Se, Cu y Zn) en muestras de agua de ríos y manantiales (que son las principales fuentes de suministro para uso y consumo humano) en el ambiente circundante del corredor minero de oro y plata en el distrito de Ocampo, localizado en el centro oeste de Chihuahua, encontrando concentraciones más altas de elementos traza en un área altamente impactada por actividades relacionadas con la minería. La mayoría de las concentraciones de elementos traza estuvieron por debajo de los límites permisibles establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (Environmental Protection Agency [EPA]) y la normatividad mexicana. Sin embargo, las concentraciones de Cu, Ni y Zn obtenidas en agua de río fueron más altas que las marcadas por las directrices vigentes. Reyes et al. (2013) realizaron un estudio en el sistema de acuíferos aluviales en el centro de Chihuahua. Muestrearon 34 pozos para analizar el contenido de arsénico y de fluoruros, y encontraron que un 20.6% tenía niveles de arsénico por arriba de 0.025 mg/L y un 38.2% tenía niveles superiores a 1.5 mg/L de fluoruro, superando los límites máximos permisibles que establece la NOM-127-SSA1-1994.

Quitosano como alternativa para eliminar contaminantes acuosos

El desarrollo marcado de las regulaciones ambientales, en las últimas décadas, ha impulsado tratamientos alternativos para aguas residuales. Los procesos para el manejo de efluentes urbanos o industriales (que contienen sustancias minerales y orgánicas) involucran diversas estrategias dependiendo de la naturaleza de los contaminantes (iones metálicos, colorantes, compuestos farmacéuticos, etcétera), el interés en reciclar (o valorizar productos del tratamiento) y su toxicidad. La técnica de precipitación se usa con mucha frecuencia, pero regularmente encuentra limitaciones técnicas y también produce grandes cantidades de lodo contaminado. Estos procesos alternativos deberían alcanzar niveles de descarga, ser competitivos y, en la medida de lo posible, ser coherentes con los requisitos para un crecimiento sostenible (Desbrières & Guibal, 2018). El carbón activado es un adsorbente convencional que, en ocasiones, resulta costoso. Por esto, es que surgen los biosorbentes que son producidos a partir de un material biológico como es el caso del quitosano. Este es un polímero no tóxico, biocompatible y biodegradable. Proviene de la quitina, y esta es obtenida a través del tratamiento de residuos (caparazones de diversos crustáceos) originados en la industria pesquera.

México es un país de gran producción pesquera, a la cual el camarón contribuye en gran medida. Aproximadamente un 55% en peso del camarón es la parte comestible y el resto (cabeza, cola y caparazón) se descarta como basura. Estos desechos contienen componentes muy valiosos que pueden ser utilizados como materia prima en diversas industrias. Se

calcula que entre un 20% a un 58% del peso seco de estos es quitina (López, Adán & Sánchez, 2010).

Obtención de quitosano

La quitina (poli (β -(1 \rightarrow 4)-*N*-acetil-D-glucosamina)) es el polisacárido más abundante en la naturaleza, después de la celulosa. Su degradación en los caparazones de los crustáceos es muy lenta, por lo que la acumulación de grandes cantidades de estos residuos es una preocupación para el medio ambiente (Desbrières & Guibal, 2018).

El quitosano (poli (β -(1 \rightarrow 4)-2-amino-2-desoxi-D-glucopiranososa)) se puede obtener por medios químicos o biológicos. La quitina es sometida a tres etapas sucesivas. Primeramente, se realiza la desmineralización: donde es eliminada la materia inorgánica (carbonato de calcio) aplicando ácido diluido, normalmente HCl. Posteriormente, se lleva a cabo la desproteínización: donde se extraen las proteínas en medio alcalino usando soluciones de NaOH o KOH. Finalmente es sometida a la desacetilación, la cual se realiza por hidrólisis de los grupos de acetamida, en medio fuertemente alcalino y a altas temperaturas. Generalmente, la reacción se realiza en fase heterogénea empleando soluciones concentradas de NaOH o KOH (40%-50%) a temperaturas superiores de 100°C (Younes & Rinaudo, 2015).

Características del quitosano

La composición y tamaño de las cadenas que forman el quitosano varían dependiendo de la materia prima y el método de su obtención. Los parámetros indispensables para caracterizar al quitosano son el grado de desacetilación, el peso molecular y la solubilidad.

El grado de desacetilación representa la fracción molar de las unidades N-desacetiladas en la cadena del polímero. La quitina con valores altos de N-desacetilación (de 70% a 90%) es usualmente llamada quitosano (Corazzari, Nisticò, Turci, Faga, Franzoso, Tabasso & Magnacca, 2015). Este parámetro influye en las propiedades fisicoquímicas del quitosano, tales como solubilidad, viscosidad, capacidad de intercambio iónico, habilidad de floculación y reacción con los grupos aminos.

El peso molecular del quitosano es una variable clave en las propiedades de adsorción, ya que influye en la solubilidad del polímero y en la viscosidad cuando está en solución (Yaghobi, 2012).

El quitosano es insoluble en agua, en soluciones alcalinas y en solventes orgánicos. Es soluble en soluciones ácidas diluidas por debajo de pH 6.5. A pH bajo, los grupos amino se protonan y adquieren carga positiva, lo que hace al quitosano un polielectrolito catiónico. Por otro lado, cuando el pH aumenta por encima de 6, las aminas del quitosano se desprotonan, el polímero pierde su carga y se vuelve insoluble. La solubilidad del quitosano depende de su grado de desacetilación, y ofrece una amplia gama de aplicaciones en muchos campos incluidos biotecnología, industria alimentaria y medicina. Es ampliamente utilizado en la industria química, textiles, membranas y tratamiento de aguas residuales debido a la naturaleza policatiónica (Al-Manhel, Al-Hilphy & Niamah, 2018; El Knidri, Belaabed, Addaou, Laajeb & Lahsini, 2018).

Metales pesados eliminados con quitosano y sus derivados

La contaminación de los recursos hídricos debido a la eliminación indiscriminada de metales pesados ha sido motivo de preocupación en todo el mundo. Los metales pesados son elementos naturales que han sido extraídos de la tierra y aprovechados por el hombre durante milenios, por lo que su origen es de fuentes naturales y antropogénicas (Khlifi & Hamza, 2010).

Son un conjunto de metales y metaloides que se identifican por tener una densidad superior a 4 g/mL o 5 g/mL veces mayor a la densidad del agua. Se caracterizan por encontrarse dispersos en el medio ambiente, por su tendencia a acumularse en ciertos tejidos del cuerpo humano, y porque tienden a ser tóxicos incluso a bajo nivel de exposición (Hashim, Mukhopadyay, Sahu & Segupta, 2011). Algunos metales, como el cobre y el hierro, son esenciales para la vida y desempeñan un papel insustituible.

Existen diversas tecnologías para la eliminación de estos contaminantes, dentro de las cuales se encuentran la precipitación química, intercambio iónico, coagulación-floculación, flotación, filtración por membranas, tratamientos electroquímicos, y adsorción (Barakat, 2011; Li, Wang, Li, Y., Zhou & Jia, 2011).

El uso de quitosano, como adsorbente, se considera una opción viable en el tratamiento de aguas residuales con baja concentración de iones metálicos pesados. Este adsorbente presenta grupos hidroxilos y aminos libres en su cadena polimérica, lo cual le confiere una gran capacidad para atrapar estos contaminantes.

La protonación de los grupos amino provoca la disolución total o parcial del quitosano en soluciones ácidas (excepto

en disoluciones de ácido sulfúrico), por lo que es necesario el refuerzo de su estabilidad mediante modificaciones a su estructura química.

El quitosano es susceptible a una gran variedad de modificaciones químicas gracias a los grupos hidroxilo y amino presentes en su unidad estructural. Dentro de estas modificaciones se encuentran el entrecruzamiento y el injerto de copolímeros. El entrecruzamiento consiste en la unión de dos cadenas de polímeros que aumenta la fuerza de la red de estos. Ocurre cuando un reactivo (agente entrecruzante) introduce puentes intermoleculares, o enlaces cruzados, entre las macromoléculas de polisacáridos (Lizardi, Monal & Valencia, 2016). Un copolímero injertado es una cadena macromolecular con uno o más grupos de especies conectados a la cadena principal (Vaidya, Hussain, Gaugler & Smith, 2019). Las modificaciones químicas al quitosano han contribuido a mejorar su rendimiento y su capacidad de adsorción de iones metálicos.

Se han realizado diversas investigaciones sobre la aplicación del quitosano y sus derivados en la eliminación de metales pesados. A continuación, se mencionan algunas de ellas indicando la máxima capacidad de adsorción lograda en sus experimentos.

Arsénico

Gerente, Andrés, Mckay & Le (2010) eliminaron iones acuosos de arsénico utilizando hojuelas de quitosano puro, alcanzando una capacidad de adsorción de 0.730 mg de As (V)/g de quitosano. Anto & Annadurai (2012) usaron nanopartículas de quitosano modificado con tripolifosfato de sodio para remover As (III) (222.22 mg As (III)/g de adsorbente). Qi, Zhang & Li (2015) sintetizaron perlas de quitosano impregnadas con

óxido binario Fe-Mn para remover arsénico, alcanzando una capacidad de adsorción de 39.1 mg/g y 54.2 mg/g para As (V) y As (III) respectivamente. Elwakeel & Guibal (2015) prepararon dos encapsulamientos de quitosano, uno con $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y otro con CuO (ambos entrecruzados con epíclorhidrina), logrando una capacidad de adsorción de 39.0 mg As (V)/g quitosano- $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y de 28.1 mg As (V)/g quitosano- CuO . Finalmente, Gerard, Krishnan, Ponnusamy, Cabana & Vaidynathan (2016) elaboraron nanocompuestos de óxido de hierro recubiertos de quitosano para remover As (III), alcanzando una capacidad de adsorción de 267 mg/g de adsorbente.

Cromo

Hena (2010) usó quitosano recubierto con poli 3-metil tiofeno para eliminar iones de cromo (VI), obteniendo una capacidad de adsorción de 134.13 mg/g. Kousalya, Gandhi & Meenakshi (2010) sintetizaron perlas de quitosano con diferentes modificaciones químicas: quitosano entrecruzado con glutaraldehído (CB), perlas CB protonadas (PCB), perlas de CB carboxiladas (CCB) y perlas de CCB injertadas con etilendiamina y protonadas (GCB). La capacidad de adsorción de Cr (VI) fue de 3.239 mg/g PCB, 3.647 mg/g CCB, 4.057 mg/g GCB y 1.298 mg/g CB. Ba, Alagui & Hajjaji (2018) eliminaron Cr (III) y Cr (VI) usando quitosano puro y quitosano-carbón activado de hueso de aceituna, obteniendo capacidades de adsorción para el cromo (III) de 7.71 mg/g quitosano y 32.58 mg/g quitosano-CA; para el cromo (VI) 49.17 mg/g quitosano y 146.33 mg/g quitosano-CA.

Manganeso

Suguna, Reddy, Kumar & Krishnaiah (2010) removieron manganeso acuoso usando quitosano entrecruzado con glu-

taraldehído, alcanzando una capacidad de adsorción de 278 mg/g. Reiad, Salam, Abadir & Harraz (2012) eliminaron manganeso utilizando membranas de quitosano-polietilenglicol, y lograron una capacidad de adsorción de 21.7 mg/g. Al-Wakeel, El Monem & Khalil (2015) sintetizaron resina de quitosano modificada con glicina, con lo que obtuvieron una capacidad de adsorción de 92.5 mg Mn (II)/g de resina.

Hierro

Gandhi, Kousalya & Meenakshi (2012) realizaron ensayos de adsorción de Fe (III) en perlas de quitosano puro y en perlas de quitosano modificado, encontrando una capacidad de adsorción de 2.913 mg/g para quitosano puro, 3.533 mg/g para quitosano protonado, 3.905 mg/g para quitosano carboxilado y 4.203 mg/g para quitosano injertado. Reiad et al. (2012) usaron membranas de quitosano/polietilenglicol para eliminar Fe (II) acuoso, con lo que obtuvieron una capacidad de adsorción de 71.4 mg/g. Radnia, Ghoreyshi, Younesi & Najafpour (2012) eliminaron Fe (II) acuoso usando quitosano, y lograron una capacidad de adsorción de 28.7 mg/g. Correa, López, Sánchez, Sánchez, Duarte, Rodríguez & Núñez (2012) sintetizaron perlas de quitosano modificado con tripolifosfato de sodio para remover iones acuosos de Fe (II) y Fe (III) para obtener una capacidad de adsorción de 11.65 mg/g para el Fe (II) y 13.72 mg/g para Fe (III). También, Correa, López, Sánchez & Sánchez, R. (2014) removieron los mismos iones, pero con perlas de quitosano puro y quitosano modificado con glutaraldehído obteniendo capacidades de adsorción de 90.49 mg Fe (III)/g quitosano-glutaraldehído, 59.85 mg Fe (II)/g quitosano, y 56.99 mg Fe (II)/g quitosano-glutaraldehído.

Colorantes eliminados con quitosano y sus derivados

Además de los metales pesados y otros contaminantes presentes en cuerpos de agua, los colorantes también representan un fuerte problema medioambiental. La industria textil es caracterizada por el uso de grandes cantidades de químicos y enormes volúmenes de agua. Detergentes y sosa cáustica son usados para remover suciedad, polvo, aceites y ceras. Colorantes, agentes fijadores y otros inorgánicos tienen la función de proporcionar los tonos y colores que demande el mercado. Otros muchos reactivos químicos específicos se utilizan como agentes suavizantes, secuestrantes, antiespumantes, penetrantes y humectantes. Muchos de estos químicos forman parte del producto final y tienen una función específica en el proceso. Sin embargo, buena parte de estos son removidos del producto en las descargas de agua al término de cada una de las operaciones o en lavados posteriores. Todos estos químicos suelen ser muy variados dependiendo del textil que funja como materia prima principal y métodos de producción. La mayoría de estos químicos provienen de las etapas conocidas como acabado, donde típicamente se realizan las operaciones de blanqueo, teñido y lavado de la tela (Solís, Gil, Solís, A., Pérez, Manjarrez & Perdomo, 2013). Por lo anterior, es de vital importancia remover estos contaminantes de las descargas de agua residual que pudieran contenerlos.

Los efluentes generados por la industria que contienen colorantes y que son descargados en cuerpos de agua son capaces de alterar sus características físicas y biológicas. Es conocido que las aguas residuales que contienen colorantes son muy difíciles de tratar, debido a que están constituidos por moléculas recalcitrantes (particularmente los colorantes sintéticos azoicos). Debido a la toxicidad de los colorantes

azoicos y a sus productos de degradación carcinógenos, la remoción del color de efluentes de aguas residuales representa hoy en día un reto importante de resolver. Varios métodos de tratamientos químicos y biológicos están disponibles para remover colorantes de aguas residuales. Todos estos métodos tienen limitaciones e involucran procedimientos complicados que son económicamente inviables (Sánchez, R., Sánchez, López & Correa 2012; Singh, Singh, P. & Singh R.L., 2017). Por lo anterior, y en la búsqueda de nuevos métodos, han surgido varias investigaciones de remoción de colorantes en las que usan adsorbentes naturales como el quitosano. Algunos ejemplos de esto son la remoción de negro reactivo 5 con perlas de quitosano-glutaraldehído (Lazaridis & Keenan, 2010), de colorante índigo con quitosano-cianoguanidina (Gonçalves, Dotto & Pinto, 2015), de naranja reactivo 16 con quitosano-sepiolita (Marrakchi, Khanday, Asif & Hameed, 2016), de verde de malaquita, rojo reactivo y amarillo directo con quitosano puro obtenido de cáscaras de gamba (Subramani & Thinakaran, 2017), de rojo reactivo 195 con partículas de quitosano coacervado (Pérez, Santos & Zaritzky, 2018), de rojo Congo con quitosano injertado de etilendiamina y metacrilato (Tahira, Aslam, Abbas, Monim-ul, Ali & Asghar, 2019), entre otros.

Conclusiones

Entre los contaminantes identificados en los cuerpos de agua de los estados de Sonora y Chihuahua se encuentran metales pesados como arsénico, cromo, cobre, plomo, hierro y manganeso. También se tiene la contaminación por colorantes, aunque no se ha documentado al respecto, pues se sabe de la existencia de industrias que la generan.

Una alternativa para la eliminación de metales pesados y colorantes es usar el quitosano como adsorbente. La ventaja de este material es que puede ser obtenido a partir de residuos acuícolas, los cuales son abundantes en el estado de Sonora.

Por lo anterior, el uso de quitosano como adsorbente no solo contribuye al aprovechamiento de los residuos acuícolas, sino que también se utiliza para eliminar contaminantes acuosos.

Bibliografía

- Al-Manhel, A., Al-Hilphy, A. & Niamah, A. (2018). Extraction of chitosan, characterisation and its use for water purification. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(2), 186-190.
- Al-Wakeel, K., El Monem, H. & Khalil, M. (2015). Removal of divalent manganese from aqueous solution using glycine modified chitosan resin. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 179-186.
- Anto, S. & Annadurai, G. (2012). Arsenic adsorption from aqueous solution using chitosan nanoparticle. *Research Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2(2), 31-45.
- Arias, H., Rivero, J., Delgado, R., Quintana, R., Terán, R. & Villalba, M. (2017). Calidad de agua en términos fisicoquímico-metales en tres sitios contrastantes del río Conchos en Chihuahua, México. *Investigación y Ciencia*, 25(70), 13-22.
- Atondo, A., Del Castillo Alarcón, J., Álvarez, A., Villalba, A., Ortiz, G. & Esquer, A. (2013). Contaminación del agua y suelo en el ecosistema río Agua Prieta, Sonora, México. *Biotecnía*, 15(1), 3-11.
- Ba, S., Alagui, A. & Hajjaji, M. (2018). Retention and release of hexavalent and trivalent chromium by chitosan, olive stone ac-

- tivated carbon, and their blend. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 1-20.
- Barakat, M. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 4(4), 361-377.
- Chumacero, C., Ozuky, K., Pinedo, C. & Rentería, M. (2016). Evaluación de elementos traza en agua de río y manantial del área minera de Ocampo, Chihuahua, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(4), 375-384.
- Corazzari, I., Nisticò, R., Turci, F., Faga, M., Franzoso, F., Tabasso, S. & Magnacca, G. (2015). Advanced physico-chemical characterization of chitosan by means of TGA coupled on-line with FTIR and GCMS: Thermal degradation and water adsorption capacity. *Polymer Degradation and Stability*, 112, 1-9.
- Correa, M., López, J., Sánchez, D., Sánchez, R., Rodríguez, J. & Núñez, J. (2012). Fe (II) and Fe (III) adsorption by chitosan-tripolyphosphate beads: kinetic and equilibrium studies. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 61(6), 331-341.
- Correa, M., López, J., Sánchez, D. & Sánchez, R. (2014). Synthesis and application of modified chitosan beads for iron removal: kinetic and isotherm models. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 9(6), 895-904.
- Covarrubias, S. & Cabriales, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33, 7-21.
- De la O Villanueva, M., Meza, D., Maier, R., Moreno, D., Gómez, A., Río, D., Mendivil, H. & Montijo, A. (2013). Procesos erosivos en jales de la Presa I de Nacozari de García, Sonora y su efecto en la dispersión de contaminantes. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 27-38.
- Desbrières, J. & Guibal, E. (2018). Chitosan for wastewater treatment. *Polymer International*, 67(1), 7-14.

- El Knidri, H., Belaabed, R., Addaou, A., Laajeb, A. & Lahsini, A. (2018). Extraction, chemical modification and characterization of chitin and chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 120, 1181-1189.
- Elwakeel, K. & Guibal, E. (2015). Arsenic(V) sorption using chitosan/Cu (OH)₂ and chitosan/CuO composite sorbents. *Carbohydrate Polymers*, 134, 190-204.
- Gandhi, M., Kousalya, G. & Meenakshi, S. (2012). Selective sorption of Fe (III) using modified forms of chitosan beads. *Journal of Applied Polymer Science*, 124(3), 1858-1865.
- Gerard, N., Krishnan, R., Ponnusamy, S., Cabana, H. & Vaidyanathan, V. (2016). Adsorptive potential of dispersible chitosan coated iron-oxide nanocomposites toward the elimination of arsenic from aqueous solution. *Process Safety and Environmental Protection*, 104, 185-195.
- Gerente, C., Andres, Y., McKay, G. & Le Cloirec, P. (2010). Removal of arsenic(V) onto chitosan: From sorption mechanism explanation to dynamic water treatment process. *Chemical Engineering Journal*, 158(3), 593-598.
- Gómez, A., Valenzuela, J., Villalba, A., Meza, D., Almendariz, F., Whitaker, T., Martínez, F., Valenzuela, M. & Ochoa, L. (2011a). Distribution of heavy metals and their chemical speciation in sediments from the Abelardo L. Rodríguez Dam, Sonora, México. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 23(4), 201-212.
- Gómez, A., Valenzuela, J., Meza, D., De la O Villanueva, M., Ramírez, J., Almendariz, J. & Pérez, E. (2011b). Impact of mining activities on sediments in a semi-arid environment: San Pedro River, Sonora, Mexico. *Applied Geochemistry*, 26(12), 2101-2112.
- Gonçalves, J., Dotto, G. & Pinto, L. (2015). Cyanoguanidine-cross-linked chitosan to adsorption of food dyes in the aqueous binary system. *Journal of Molecular Liquids*, 211, 425-430.
- Hashim, M., Mukhopadhyay, S., Sahu, J. & Sengupta, B. (2011). Remediation technologies for heavy metal contaminated

- groundwater. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2355-2388.
- Hena, S. (2010). Removal of chromium hexavalent ion from aqueous solutions using biopolymer chitosan coated with poly 3-methyl thiophene polymer. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 474-479.
- Khelifi, R. & Hamza, A. (2010). Head and neck cancer due to heavy metal exposure via tobacco smoking and professional exposure. A review. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 248(2), 71-88.
- Kousalya, G., Gandhi, M. & Meenakshi, S. (2010). Sorption of chromium (VI) using modified forms of chitosan beads. *International Journal of Biological Macromolecules*, 47(2), 308-315.
- Lazaridis, N. & Keenan, H. (2010). Chitosan beads as barriers to the transport of azo dye in soil column. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 144-150.
- Li, X., Wang, Y., Li, Y., Zhou, L. & Jia, X. (2011). Biosorption behaviors of biosorbents based on microorganisms immobilized by Ca-alginate for removing lead (II) from aqueous solution. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 16, 808-820.
- Lizardi, J., Monal, W. & Valencia, F. (2016). *Chemical characteristics and functional properties of chitosan. And Chitosan in the preservation of agricultural commodities*. Estados Unidos: Academic Press.
- López, J., Adán, N. & Sánchez, D. (2010). *Separation and biochemical characterization of the products from fermented shrimp wastes. Sea by-products as real material: New ways of application*. India: Transworld Research Network.
- Marrakchi, F., Khanday, W., Asif, M. & Hameed, B. (2016). Cross-linked chitosan/sepiolite composite for the adsorption of methylene blue and reactive orange 16. *International Journal of Biological Macromolecules*, 93, 1231-1239.
- Meza, M., Gandolfi, A., Santana, M., Klimecki, W., Aguilar, M., Del Río, R., De la O Villanueva, M., Gómez, A., Mendivil, H., Valencia, M. & Meza, D. (2012). Metals in residential soils and

- cumulative risk assessment in Yaqui and Mayo agricultural valleys, northern Mexico. *Science of the Total Environment*, 433, 472-481.
- Pérez, J., Santos, M. & Zaritzky, N. (2018). Reactive RED 195 dye removal using chitosan coacervated particles as bio-sorbent: Analysis of kinetics, equilibrium and adsorption mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6749-6760.
- Qi, J., Zhang, G. & Li, H. (2015). Efficient removal of arsenic from water using a granular adsorbent: Fe-Mn binary oxide impregnated chitosan bead. *Bioresource Technology*, 193, 243-249.
- Radnia, H., Ghoreyshi, A., Younesi, H. & Najafpour, G. (2012). Adsorption of Fe (II) ions from aqueous phase by chitosan adsorbent: equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, 50(1-3), 348-359.
- Reiad, N., Salam, O., Abadir, E. & Harraz, F. (2012). Adsorptive removal of iron and manganese ions from aqueous solutions with microporous chitosan/polyethylene glycol blend membrane. *Journal of Environmental Sciences*, 24(8), 1425-1432.
- Reyes, V., Alarcón, M., Gutiérrez, M. & López, D. (2013). Fluoride and arsenic in an alluvial aquifer system in Chihuahua, Mexico: contaminant levels, potential sources, and co-occurrence. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(2), 1433.
- Sánchez, R., Sánchez, D., López, J. & Correa, M. (2012). Adsorption of allura red dye by cross-linked chitosan from shrimp waste. *Water Science and Technology*, 65(4), 618-623.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Recuperado de: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf

- Singh, R., Singh, P. & Singh, R. (2017). Present status of biodegradation of textile dyes. *Current Trends in Biomedical Engineering & Biosciences*, 3(4), 555-618.
- Solís, M., Gil, J., Solís, A., Pérez, H., Manjarrez, N. & Perdomo, M. (2013). El proceso de sedimentación como una aplicación sencilla para reducir contaminantes en efluentes textiles. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(3), 585-594.
- Subramani, S. & Thinakaran, N. (2017). Isotherm, kinetic and thermodynamic studies on the adsorption behaviour of textile dyes onto chitosan. *Process Safety and Environmental Protection*, 106, 1-10.
- Suguna, M., Reddy, A., Kumar, N. & Krishnaiah, A. (2010). Biosorption of manganese (II) ions from aqueous solution by glutaraldehyde cross-linked chitosan beads: Equilibrium and kinetic studies. *Adsorption Science & Technology*, 28(3), 213-228.
- Tahira, I., Aslam, Z., Abbas, A., Monim-ul, M., Ali, S. & Asghar, A. (2019). Adsorptive removal of acidic dye onto grafted chitosan: A plausible grafting and adsorption mechanism. *International Journal of Biological Macromolecules*, 136, 1209-1218.
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2018). Estudio sobre protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos. Recuperado de: http://aguaparatodos.org.mx/wpcontent/uploads/ESTUDIO_RIOS_LAGOS_ACUIFEROS-y-DH-completo.pdf.
- Vaidya, A., Hussain, I., Gaugler, M. & Smith, D. (2019). Synthesis of graft copolymers of chitosan-poly (caprolactone) by lipase catalysed reactive extrusion. *Carbohydrate Polymers*, 217, 98-109.
- Valles, M., Ojeda, D., Guerrero, V., Prieto, J. & Sánchez, E. (2017). Calidad del agua para riego en una zona nogalera del estado de Chihuahua. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 85-97.

- Yaghoobi, N. (2012). Controlling chitosan's molecular weight via multistage deacetylation. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 17(4), 812-817.
- Younes, I. & Rinaudo, M. (2015). Chitin and chitosan preparation from marine sources. Structure, properties and applications. *Marine Drugs*, 13(3), 1133-1174.

CAPÍTULO V.
PREPARACIÓN, CARACTERIZACIÓN
Y EVALUACIÓN DE MEMBRANAS DE
NANOFILTRACIÓN MODIFICADAS CON
NANOPARTÍCULAS DE PLATA Y EXTRACTO
DE CHILTEPÍN PARA SU APLICACIÓN EN
DESALACIÓN DE AGUA SALOBRE

Patricia Guadalupe Torres Valenzuela,¹ Jesús Álvarez Sánchez,^{1}
Sergio Pérez Sicairos,² Germán Eduardo Dévora Isirdia,¹ Jorge Saldívar
Cabral,¹ y Rodrigo González Enríquez¹*

Resumen

Extracto de Capsaicina y nanopartículas de plata se utilizaron para dopar membranas sobre la capa superficial de la KC-7 End. En este trabajo de investigación se prepararon tres tipos de muestras de nanofiltración por polimerización en interfase: la NF Control (esta no contie-

1 Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

2 Instituto Tecnológico de Tijuana.

* Autor de correspondencia.

ne Capsaicina y nanopartículas de plata); la NF Capsaicina en la que se colocó extracto de esta, y en la NF AgNPs en la que se colocó nanopartículas de plata. Se utilizaron dos sales modelos Na_2SO_4 y MgSO_4 en diferentes concentraciones como 1000 ppm, 3000 ppm y 5000 ppm para probar el desempeño de las muestras preparadas. La NF AgNPs obtuvo el mayor ángulo de contacto que fue de 73.98 y el menor flujo de permeado en todas las sales. La NF dopada con Capsaicina mantuvo un alto flujo y un buen porcentaje de remoción de sulfato de sodio. Las NF preparadas con Capsaicina y nanopartículas de plata se utilizarán para ver si son resistentes al bioensuciamiento de microorganismos de aguas marinas.

Palabras clave: Membranas de nanofiltración, polimerización en interfase, microscopia de fuerza atómica, ángulo de contacto, espectroscopia de infrarrojo con ATR.

Introducción

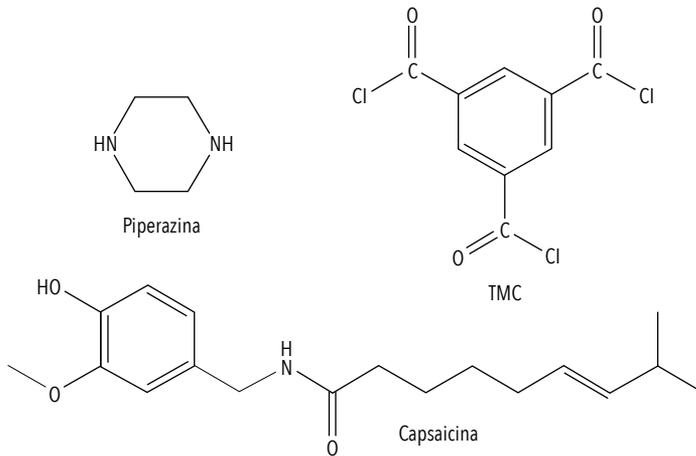
A pesar de que 70% de nuestro planeta está cubierto de agua, hoy en día hay escasez. El Instituto Internacional de Gestión del Agua (IWMI) estimó que aproximadamente 1,200 millones de personas viven en lugares donde el agua es escasa, es decir, casi el 20% de la población mundial (Gleick, 2014). Este problema afecta directamente el desarrollo sostenible de la sociedad (Mekonnen & Hoekstra, 2016). El aumento de la población mundial, el cambio climático y el uso del agua en la agricultura son algunos de los factores que aceleran la escasez, y se espera que sea más difícil mantener un consumo sostenible en el futuro (Kummu, Guillaume, De Moel, Eisner, Flörke, Porkka, Siebert, Veldkamp & Ward, 2016; Dévora, Martínez, Correa, Álvarez & Fimbres, 2018) {Kummu, 2016 #43}. {Kummu, 2016 #43}

Existen métodos que buscan la posibilidad de obtener agua dulce mediante agua de mar o salobre (Hilal, Kochkodan, Abdulgader, Mandale & Al-Jil, 2015). Algunos de estos métodos son el tratamiento de aguas residuales y la desalinización, donde esta última se utiliza como una de las alternativas más viables para minimizar la escasez, produciendo agua dulce a partir de agua de mar, así como de aguas subterráneas, de drenaje y residuales tratadas (Goh, Matsura, Ismail & Hilal, 2016). Actualmente, la Ósmosis Inversa (OI) es la principal tecnología utilizada en esta área, donde las membranas densas semipermeables se utilizan para el rechazo de sales (Cay & Lind, 2018). Sin embargo, la nanofiltración (en comparación con la OI) opera con presiones operativas más bajas, flujos más altos, requiere de una menor inversión, y de altas tasas de rechazo de iones bivalentes de formación de incrustaciones, especialmente aniones (Zhou, Zhu, Fu, Zhu, M. & Xue, 2015; Mohammad, Teow, Ang, Chung, Oatley & Hilal, 2015). Las membranas utilizadas para este proceso se componen de una película delgada, que consiste en una primera capa fina de un polímero colocado sobre una capa de un soporte poroso (Pinnau & Freeman, 1999). La capa delgada de polímero puede ser una combinación de acuerdo con el tipo de flujo de disolvente y rechazo de solutos requerido, mientras que la otra capa ayudará a la membrana a resistir la compresión combinada con una fuerza mínima al flujo permeado (Pertesen, 1993).

En la actualidad, se han propuesto varios métodos para la modificación de la superficie de la membrana con el fin de que exista un mayor porcentaje de rechazo de sales, mayores flujos de permeado, tolerancia al cloro y resistencia al ensuciamiento (Dong, Zhao, Zhang, Chen, Gao & Ho, 2015). Hay dos tipos de modificaciones: físicas (uso de membranas

compuestas, recubrimiento y mezcla) y químicas (tratamiento con plasma, polimerización de injertos y funcionalización de polímeros) (Ayyavoo, Nguyen, Jun, Kim & Kwon, 2016). La polimerización en interfase es una técnica donde las membranas de Ósmosis Inversa y de nanofiltración son las más utilizadas, aquella se da a través de la reacción de dos monómeros reactivos en la interfase, entre dos disolventes inmiscibles (Lau, Ismail, Misdan & Kassin, 2012). La Piperazina (PIP) y M-Fenilendiamina (MPD) son de los monómeros más utilizados para la preparación de la solución acuosa de esta técnica, principalmente en las membranas de NF (Xiao, Wang, Hu, Nair & Chen, 2018). Por otra parte, se ha estudiado la reacción entre el Cloruro de Trimesoílo (TMC) en contacto con MPD debido a que la membrana presenta mejores propiedades, tales como mayor rechazo de sales y alta permeabilidad (Wei, Liu, Qiu, Wang & Tang, 2011) (Figura 1).

FIGURA 1. Estructura química de monómeros para la preparación de membranas de nanofiltración (Capsaicina, Piperazina y Cloruro de Trimesoilo, TMC).



FUENTE: Elaboración propia.

Además, se ha trabajado en la adición de nanomateriales a fin de conseguir que las membranas sean más eficientes en cuanto a rendimiento (Xiao et al., 2018). Las nanopartículas de plata son reconocidas por sus propiedades antibacteriales, además de tener afinidad al agua (Lee, Kim, Patel, Im & Kim, 2007). La Capsaicina (8-metil-N-vanilil-6-nonenamida), por su parte, también tiene acción antibacterial, sobre todo en la inhibición y crecimiento de microorganismos (Zhou, Guan, Zhu, Wang, Yu & Wang, 2014).

Tanto la Capsaicina como las nanopartículas de plata tienen efectos antibacteriales (Figura 1). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo de investigación es preparar membranas dopadas con Capsaicina y nanopartículas de plata para probar su desempeño en cuanto a flux de permeado, rechazo de sales, medición del ángulo de contacto y rugosidad mediante el equipo de flujo cruzado, ángulo de contacto y microscopio

de fuerza atómica. En este trabajo, se prepararon membranas compuestas de nanofiltración con nanopartículas de plata y otras con Capsaicina, con el fin de conocer su comportamiento. El rendimiento se evaluó mediante el uso de equipos de flujo cruzado, midiendo el flujo de permeado, la conductividad y el rechazo de sal, utilizando sulfato de sodio y sulfato de magnesio (NaSO_4 y MgSO_4) como sales modelo. Las membranas se caracterizaron en el espectrofotómetro de infrarrojo por ATR, microscopio de fuerza atómica (AFM) y ángulo de contacto.

Método

Materiales y reactivos

El material utilizado en este estudio incluyó cristal, matraz volumétrico, vasos de precipitado, cinta adhesiva, jeringa, recipiente, cepillos, rodillo, ultrasónica, sistema de atmósfera inerte, ganchos y un horno. Los reactivos usados para la elaboración de las membranas de nanofiltración fueron los siguientes: tricloruro de 1, 3, 5-benzenotricarbonilo (TMC, 98%), Piperazina (PIP, 99%) y nanopartículas de plata (<100 nm de tamaño de partícula, 99.5% de base de metales traza), sulfato de sodio (Na_2SO_4 , 99.0%, anhidro, granular) y sulfato de magnesio (MgSO_4 , 99.5%, anhidro) fueron comprados en Sigma-Aldrich; se agregó hidróxido sódico (NaOH, 97.0%) de Jalmek; Poli (alcohol vinílico) (PVA, Selvol grado 205, hidrólisis, mol: 88.00%). Se extrajo 10 g de chiltepín (Capsaicina) según la metodología de Rodríguez, Troncosos, Sánchez, González, Ruiz, Zamora, Ceceña, Grimaldo & Avilés (2015); el hexano se secó durante un periodo de 24 horas con una malla molecular.

Preparación de soluciones

Se escogió la membrana KC-7 End preparada con 12% de PS, 6% de PES/SPEES y 82% de NMP, por ser de un alto número de permeado de agua pura (lo cual nos indica si la membrana tiene poros o no) en comparación con otras probadas (1631.23×10^{-9} kg/s m² Pa). La KC-7 End se recortó en dos partes, una para ser modificada con nanopartículas de plata, y la otra con extracto de chiltepín.

Una vez lista, se prepararon las siguientes soluciones siguiendo las metodologías de Pérez, Miranda, Lin, Álvarez, Pérez, J., Corrales & Morales (2016), Lin, Pérez & Félix (2007) y Álvarez, Romero, Péres, Dévora, Sánchez & Fimbres (2018). Para la solución blanco se tomaron 0.50 g de TMC y se disolvieron en 50 mL de hexano seco. Después, para la solución acuosa se tomaron 0.25% w/v de PVA, 0.50% w/v de NaOH y 0.25% w/v de PIP aforados en 100 mL de agua desionizada. Consecutivamente se prepararon las dos soluciones orgánicas; la primera constituida por 0.50 g de TMC y 25 mg de Capsaicina en 50 mL de hexano seco. Mientras que la solución orgánica 2 se preparó con 0.50 g de TMC y 25 mg de nanopartículas de plata en 50 mL de hexano seco.

Para la solución orgánica 1, se colocó primero con una jeringa los 0.50 g de TMC en un matraz volumétrico y se aforó a 50 mL con hexano seco. Se agitó por 20 minutos y después, para agregar la Capsaicina, se pesaron los 25 mg en un vaso de precipitado y se hicieron enjuagues con la solución de TMC y hexano seco. Se propuso el mismo método de preparación anterior para la solución orgánica 2, donde se elaboró primero la solución de TMC y hexano seco, después se agitó por 20 minutos y luego se pesaron los 25 mg de nanopartículas de plata en un vaso de precipitado de 100 mL. La solución con TMC se vació en el vaso con nanopartículas

para su dilución, después se regresó la solución completa a un matraz volumétrico limpio. Para una mejor dilución de la solución, se metió 15 segundos a ultrasonido justo antes de vaciar la solución orgánica en el proceso de polimerización en interfase.

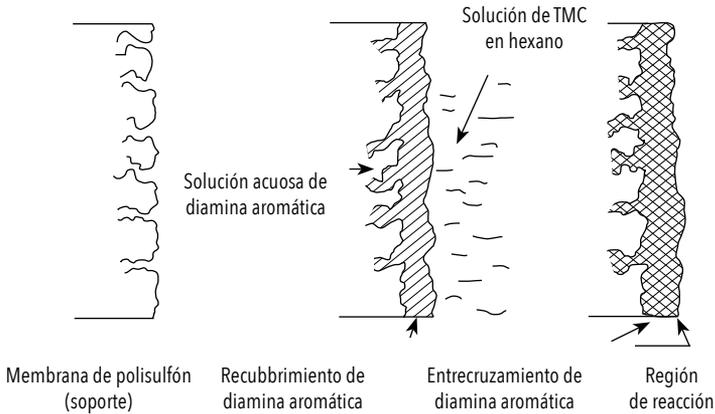
Polimerización en interfase

Primero se recortó la membrana KC-7 End a una longitud de 14 pulgadas (in) de largo. Después se colocó en un cristal de 12 in por 8 in y, por el lado de atrás del cristal, se pegó la membrana con cinta masking tape. Luego se realizó un semi-lavado de la cara del polímero con agua desionizada, y para remover el exceso de líquido se utilizó papel.

Una vez preparadas, se colocó la solución acuosa en un recipiente y con la ayuda de una brocha, empapada en esta solución, se mojó la membrana por un tiempo de reacción de 10 seg. Después se retiró el exceso pasando un rodillo limpio por encima de esta. Posteriormente, se colocó el cristal con la membrana en el sistema de atmosfera inerte donde, antes del secado, se colocó un marco sobre esta y se vació la solución orgánica 1 dejándola reaccionar por 1 minuto (el recipiente se movió de lado a lado para un mayor contacto de la solución). Después se quitó el cuadro y se escurrió el excedente. Luego la membrana se sometió a un secado con nitrógeno a 7.5 L/min, por un tiempo de 2 minutos. A continuación, se sacó la membrana del recipiente del nitrógeno y se colocaron los ganchos para colgarla dentro de la estufa, con una temperatura entre 60°C y 70°C, durante 10 minutos (Figura 2). Una vez seca, se procedió a guardarla en un lugar seco evitando cualquier contacto posible con la cara del polímero. Se realizó el mismo procedimiento para la preparación de la membrana blanco, utilizando la solución blanco, al igual que la prepa-

ración con nanopartículas de plata mediante la adición de la solución orgánica 2.

FIGURA 2. Esquema de la polimerización en interfase para preparar una membrana de NF.



FUENTE: Baker, Cussler, EyKamp, Koros, Riley & Strathmann, (1991).

Evaluación de las membranas

Valor de A

Se realizó el cálculo del valor de A (PWP, Permeado de Agua Pura) en el equipo de flujo cruzado para conocer si la membrana contenía poros. Se recortaron las membranas a 1 ¼ in por 3 ½ in. Después se colocó cada una de ellas en la celda del equipo de flujo cruzado con la cara del polímero hacia abajo, acompañada por papel filtro recortado en las mismas dimensiones. Una vez colocada la membrana, se prosiguió a llenar el tanque del equipo con agua desionizada y luego se abrieron las 3 válvulas por completo, y se encendió el equipo. Se ajustó la presión a 40 psi y, con ayuda de una probeta y un cronómetro, se tomaron los mililitros por minuto del permeado revisando la temperatura (entre 20°C y 30°C).

Se tomaron las constantes de área efectiva de la membrana ($2.202 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) y la presión utilizada en pascales (275,790 Pa) para realizar el cálculo.

Equipo de flujo cruzado (Flux y rechazo de sales)

El rendimiento de las membranas preparadas también se analizó en el equipo de flujo cruzado (se siguió el procedimiento anterior para cada membrana). Las sales utilizadas fueron sulfato de sodio y sulfato de magnesio en concentraciones de 1000, 3000 y 5000 ppm. La presión utilizada fue de 80 psi. Las medidas se iniciaron después de esperar 5 minutos para asegurar que se logró el estado estacionario. El flujo de permeado se calculó mediante el uso de un cronómetro y una probeta de 10 mL. Se midió la conductividad en el tanque de alimentación y en el flujo de permeado. El porcentaje de remoción de sales se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{C_f - C_p}{C_f} \times 100, \quad (1)$$

Donde C_f y C_p son las concentraciones de sal en las corrientes de alimentación y permeado ($\text{m}\Omega$), respectivamente.

Resultados

Permeado de agua pura

La Tabla 1 presenta los valores de A de las membranas de nanofiltración utilizando 40 psi de presión. El valor de A nos indica la porosidad de la membrana.

TABLA 1. Valor de A de las membranas compuestas.

Membrana	Valor de A (kg/s m ² Pa)
NF	20.67 x10 ⁹
NF Capsaicina	39.31 x10 ⁹
NF AgNPs	11.52x10 ⁹

FUENTE: Elaboración propia.

Rechazo de sales de Na₂SO₄

Los resultados obtenidos de porcentaje de rechazo de sales y de flux de las tres membranas se muestran en las Tabla 2 y 3. La NF Control presentó un flux mayor en las tres concentraciones utilizadas de sulfato de sodio (de 119.29 a 130.81 LMH), en comparación con las modificadas a 80 psi de presión. Asimismo, en las tres concentraciones utilizadas, la NF AgNPs es la que presentó un flux pequeño: 5.67 veces menor que la NF Control, aproximadamente. El flux de NF Capsaicina se comportó similar a NF Control, ya que disminuyó a mayor concentración de sales, pero se mantuvo un alto flux (de 91.51 a 118.81 LMH).

TABLA 2. Porcentajes de remoción de sulfato de sodio de las membranas compuestas.

Membrana compuesta	1,000 ppm		3,000 ppm		5,000 ppm		Presión (psi)
	%R de Na ₂ SO ₄	Flux (LMH)	%R de Na ₂ SO ₄	Flux (LMH)	%R de Na ₂ SO ₄	Flux (LMH)	
NF Control	93.82	130.81	94.56	129.15	91.69	119.29	80
NF Capsaicina	95.09	118.81	81.23	117.86	68.07	91.51	80
NF Ag NPs	85.76	23.50	78.86	21.71	72.47	21.74	80

FUENTE: Elaboración propia.

Rechazo de sales de Mg₂SO₄

La NF Capsaicina fue la que presentó mayor flux utilizando sulfato de magnesio (97.69, 94.43, 86.32 LMH a 1000, 3000 y 5000 ppm respectivamente), aun mayor a NF Control (Tabla 3).

TABLA 3. Porcentajes de remoción de sulfato de magnesio de las membranas compuestas.

Membrana compuesta	1,000 ppm		3,000 ppm		5,000 ppm		Presión (psi)
	%R de MgSO ₄	Flux (LMH)	%R de MgSO ₄	Flux (LMH)	%R de MgSO ₄	Flux (LMH)	
NF Control	95.07	85.34	94.61	86.44	93.54	72.06	80
NF Capsaicina	47.01	97.69	43.16	94.43	40.83	86.32	80
NF Ag NPs	54.26	25.72	55.91	24.24	56.02	26.29	80

FUENTE: Elaboración propia.

Medición del ángulo de contacto

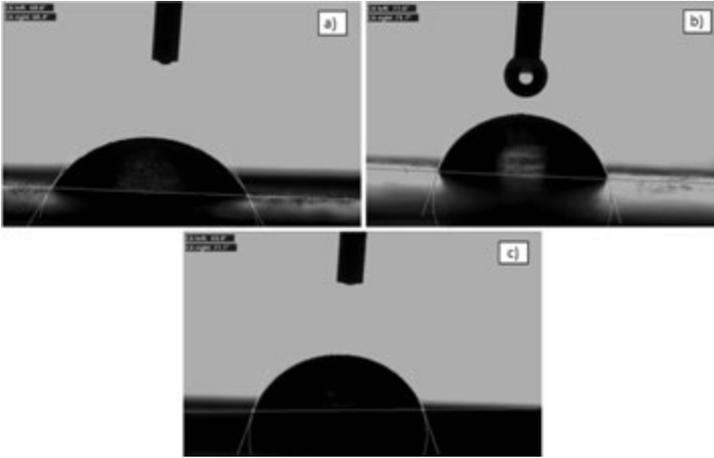
En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos del equipo de ángulo de contacto. La NF Control es la que presentó el ángulo de contacto más pequeño (Figura 3a), lo que nos dice que tiene características hidrofílicas y que tiene una mejor permeabilidad. Si comparamos los resultados obtenidos del flux de esta membrana en las tablas 2 y 3, vemos que sí presenta altos valores.

TABLA 4. Ángulo de contacto de las membranas compuestas.

Membrana compuesta	Θ						Promedio	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6		
NF Control	55.80	54.35	68.60	60.60	52.30	70.05	60.28	7.53
NF Capsaicina	70.95	66.85	71.05	72.65	78.85	83.50	73.98	6.08
NF Ag NPs	76.85	70.45	65.30	70.55	83.50	60.60	71.21	8.14

FUENTE: Elaboración propia.

FIGURA 3. Ángulos de contacto: (a) NF Control, (b) NF Capsaicina y (c) NF AgNPs.

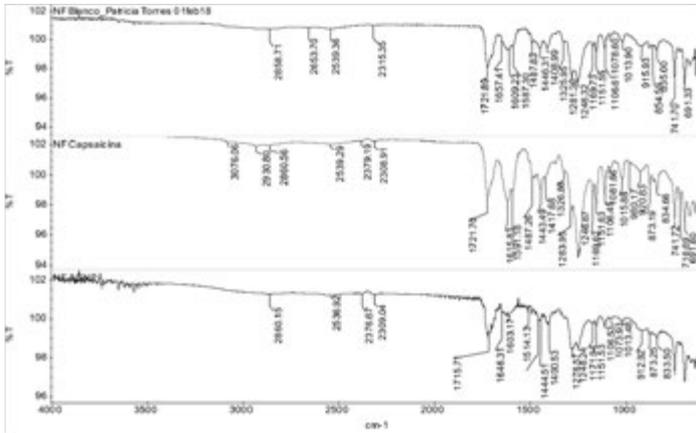


FUENTE: Elaboración propia.

Identificación de grupos funcionales

Para conocer la composición química de las membranas se utilizó el espectrofotómetro de infrarrojo por ATR. Los espectros infrarrojos obtenidos para cada una fueron registrados en un rango de números de onda de 600 a 4000 cm^{-1} . Se evaluaron las tres membranas preparadas: la membrana control (NF Control), la dopada con extracto de chiltepin (NF Capsaicina) y la dopada con nanopartículas de plata (NF AgNPs). En la Figura 4 se pueden apreciar los espectros obtenidos de las tres. Las NF Blanco y NF Capsaicina son parecidas entre sí, pero esta última presenta señales más fuertes. Por otro lado, NF AgNPs también muestra los mismos picos encontrados en las otras dos membranas, sin embargo, sus señales son más débiles.

FIGURA 4. Espectros IR de las membranas: (a) NF Control, (b) NF Capsaicina y (c) NF AgNPs.



FUENTE: Elaboración propia.

Medición de la rugosidad de las membranas

Para conocer acerca de la rugosidad de las membranas, estas se analizaron en el microscopio de fuerza atómica (AFM). De acuerdo con el rango utilizado por el microscopio, los colores morado y azul representan los puntos más altos, mientras que los colores café, rojo y anaranjado los puntos más bajos encontrados en la superficie de la membrana. El tamaño de escaneo para cada una fue de 50 micras.

Discusión

Valor A de las membranas

La NF Capsaicina presentó el valor mayor con 39.31×10^{-9} kg/s m² Pa, y NF AgNPs el menor con 11.52×10^{-9} kg/s m² Pa, lo cual indica que la NF Capsaicina tendrá un mayor flujo de permeado que la NF AgNPs (Tabla 1).

Desempeño de las membranas con Na_2SO_4

Las NF Control y NF Capsaicina presentaron alto porcentaje de remoción (93.82% y 95.09%), mientras que la NF AgNPs obtuvo buen porcentaje, pero menor que las otras (85.76%) en la concentración de 1000 ppm de Na_2SO_4 . Sin embargo, en la concentración de 5000 ppm, la NF Capsaicina presentó el menor rechazo de sales con 68.07%, seguida por la NF AgNPs con 72.47% y luego la NF Control con 91.69%, tal y como se muestra en la Tabla 2. Estos resultados son parecidos a los obtenidos por Rodríguez et al. (2015) para agua salobre de 5000 ppm y con una presión de 90 psia, donde obtuvo un rechazo de sales de 93.73%.

Desempeño de las membranas con MgSO_4

La membrana NF Capsaicina presentó el menor rechazo de sales comparada con las otras (1000 ppm= 47.01 %R; 3000 ppm= 43.16 %R; 5000 ppm=40.83 %R). La NF Control mantuvo el flux entre 72 y 85 LMH, el cual fue disminuyendo conforme aumentaba la concentración de MgSO_4 (Tabla 4). La NF AgNPs presentó un flux bajo, similar al obtenido con sulfato de sodio, 3.21 veces menor a la NF Control (entre 24 y 26 LMH). Respecto al porcentaje de remoción, la NF Control presentó el mayor rechazo (1000 ppm= 95.07 %R; 3000 ppm= 94.61 %R; 5000 ppm= 93.54 %R), seguida por la NF AgNPs con un 55.4% de rechazo aproximadamente, y por último la NF Capsaicina con porcentajes de remoción de sales entre 40.83% y 47.01%. Estos resultados también coinciden con Rodríguez et al. (2015) para agua salobre de 5000 ppm, pues también utilizó una presión de 90 psia con la que obtuvo un rechazo de sales de 93.73%.

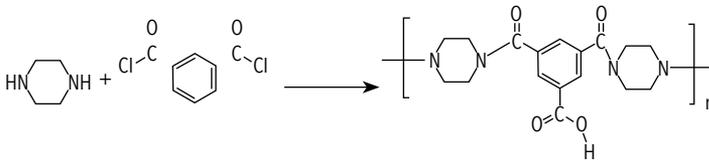
Ángulo de contacto de las membranas

La NF Capsaicina mostró el mayor ángulo de contacto con 73.98° , lo que indica que la membrana tiene propiedades hidrofóbicas probablemente por la acción antifúngica del extracto del chiltepín, y con ello no consigue pasar el flujo fácilmente. Sin embargo, esta membrana, al igual que la NF Control, presentó altos valores de flux de permeado. La NF AgNPs también mostró propiedades hidrofóbicas con 71.21° , lo cual coincide con los valores obtenidos de flux de permeado siendo la membrana con el menor flujo. La Figura 2 muestra los ángulos de contacto de las tres membranas, donde la Figura 3a es la que muestra las propiedades hidrofílicas de la NF Control.

Espectros de infrarrojos de las membranas

Debido a la reacción obtenida de la Piperazina con el TMC, se logró el polímero mostrado en la Figura 5. También se formó el grupo funcional carboxílico R-COOH, producto de la reacción del cloruro de acilo con la molécula de agua, el cual se encontró en las tres membranas con señales idénticas. De la misma manera se halló el estiramiento del grupo $-C=O$, el cual es característico de las amidas terciarias y vibraciones por flexión $-CH_3$, las cuales también fueron idénticas entre las membranas compuestas (Figura 4).

FIGURA 5. Reacción entre la Piperazina y el tricloruro de mesoilo.



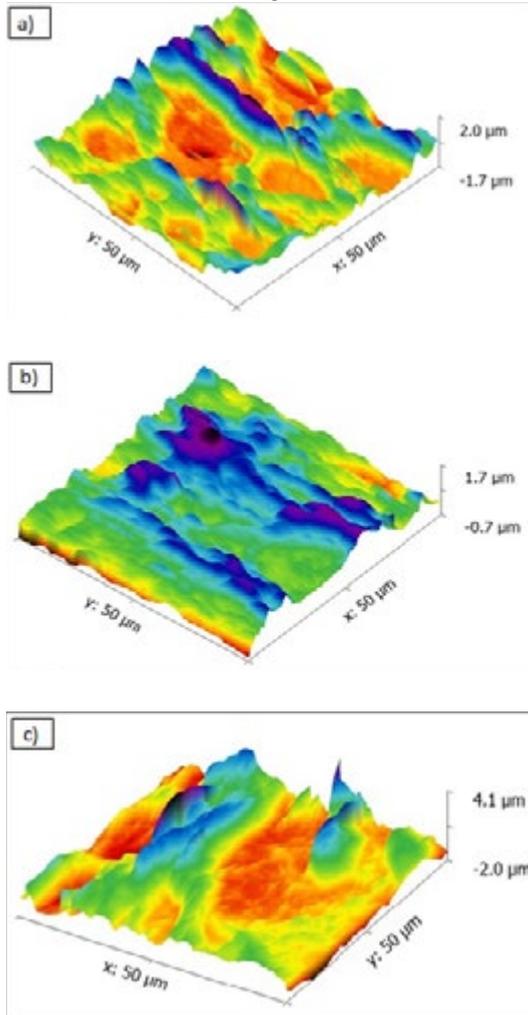
FUENTE: Elaboración propia.

Por otro lado, los picos encontrados de los estiramientos del grupo funcional amina C-N, para la membrana NF Capsaicina, fueron más pronunciados en comparación con la NF Control, mientras que para la NF AgNPs fueron menos notorios. De igual manera, las señales del estiramiento del grupo éter unido a anillos aromáticos (Ar-O-Ar) fueron bandas más intensas en la NF Capsaicina, seguido por la NF Control y, por último, la NF AgNPs. De acuerdo con Mejía (2013), la Capsaicina es una amida secundaria, por lo que la vibración por flexión CO-NH, correspondiente a las amidas primarias y secundarias del espectro obtenido de la NF Capsaicina, muestra las señales más intensas en comparación con las otras membranas obteniendo un pico de 1615.83 cm^{-1} (Figura 4).

Rugosidad de las membranas

En el escaneo a 50 micras de la membrana NF Control se obtuvo una rugosidad de 570 nm. Al observar la Figura 6a, se muestran puntos muy altos que van desde el color morado hasta colores casi rojizos. Si consideramos que a una mayor área de escaneo ($50 \mu\text{m}$) se obtiene una rugosidad más general de toda la membrana, la NF Control no cuenta con una rugosidad muy uniforme.

FIGURA 6. Análisis AFM: (a) NF Control, (b) NF Capsaicina y (c) NF AgNPs.



FUENTE: Elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 6b presenta los resultados con la NF Capsaicina obteniendo una rugosidad de 373 nm donde se observan puntos elevados que solo llegan al color verde, es

decir, la membrana no presenta una rugosidad tan elevada en comparación con el escaneo de la NF Control. Estos resultados coinciden con los reportado por Álvarez et al. (2018) quienes señalan que al agregar extracto de Capsaicina la rugosidad de la membrana se reduce.

Para el análisis de la membrana NF AgNPs, la rugosidad obtenida a 50 micras fue de 840 nm, siendo esta la de nanofiltración más rugosa de las tres analizadas. En la Figura 6c se puede observar cómo el área muestra puntos muy altos hasta muy bajos en forma de canales, dentro de estos es donde se da lugar a la incrustación de microorganismos lo que, con el tiempo, tapa a las membranas. Es muy notoria la rugosidad que se tiene en esta membrana, ya que se mantiene un área nada uniforme.

La NF Capsaicina fue la que presentó una rugosidad menor en comparación con las otras dos analizadas, lo cual indica que será más difícil que los microorganismos y bacterias se incrusten en ella.

Por otro lado, la membrana modificada con nanopartículas de plata presentó una rugosidad muy elevada, esto coincide con los resultados obtenidos de flux y rechazo de sales, ya que, el flujo de permeado se mantuvo muy por debajo, al igual que el porcentaje de remoción, en comparación con las otras analizadas.

Conclusiones

Se prepararon membranas de nanofiltración dopadas con extracto de Capsaicina y nanopartículas de plata. La membrana dopada con nanopartículas de plata tiene un mayor ángulo de contacto que la de Control y que la dopada con Capsaicina. Por consiguiente, el flujo de permeado resultó

menor con respecto a la membrana Control. La dopada con nanopartículas de plata resultó con una mayor rugosidad que la de Control y que la dopada con Capsaicina.

La membrana dopada con nanopartículas de plata rechaza menos sales que la membrana Control. La dopada con Capsaicina mantiene un alto flux y buen porcentaje de remoción de sulfato de sodio.

Las de nanofiltración preparadas se probarán para ver si son resistentes al bioensuciamiento y de esta forma alargar la vida útil de la membrana en los procesos de desalación de agua salobre.

Bibliografía

- Álvarez, J., Romero, G., Péres, S., Dévora, G., Sánchez, G. & Fimbres, A. (2018). Development, Characterization, and Applications of Capsaicin Composite Nanofiltration Membranes. *Desalination and Water Treatment*, 255-268.
- Ayyavoo, J., Nguyen, T., Jun, B., Kim, I. & Kwon, Y. (2016). Protection of polymeric membranes with antifouling surfacing via surface modifications. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 506, 190-201.
- Baker R., Cussler, E., EyKamp, W., Koros, W., Riley R. & Strathmann, H. (1991). *Membrane Separation Systems: recent development and future directions*. United States of America: Noyes Data Corporation.
- Cay, P. & Lind, M. (2018). Nanoporous materials in polymeric membranes for desalination. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 20, 19-27.
- Dévora, G., Martínez, M, Correa, M., Álvarez, J. & Fimbres, G. (2018). Using Desalination to Improve Agricultural Yields: Success Cases in Mexico. *Desalination and Water Treatment*, 3-16.
- Dong, H., Zhao, L., Zhang, L., Chen, H., Gao, C. & Ho, W. (2015). High-flux reverse osmosis membranes incorporated with

- NaY zeolite nanoparticles for brackish water desalination. *Journal of Membrane Science*, 476, 373-383.
- Gleick, P.H. (2014). *The World's Water Volume 8: The Biennial Report on Freshwater Resources*. United States of America: Island Press.
- Goh, P., Matsuura, T., Ismail, A. & Hilal, F. (2016). Recent trends in membranes and membrane processes for desalination. *Desalination*, 391, 43-60.
- Hilal, N., Kochkodan, V., Abdulgader, H., Mandale, S. & Al-Jil, S. (2015). A combined ion exchange-nanofiltration process for water desalination: III. Pilot scale studies. *Desalination*, 363, 58-63.
- Kummu, M., Guillaume, J., De Moel, H., Eisner, S., Flörke, M., Porkka, M., Siebert, S., Veldkamp, T. & Ward, P. (2016). The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Scientific Reports*, 6(38495), 1-16.
- Lau, W., Ismail, A., Misdan, N. & Kassin, M. (2012). A recent progress in thin film composite membrane: A review. *Desalination*, 287, 190-199.
- Lee, S., Kim, H., Patel, R., Im, S. & Kim, J. (2007). Silver nanoparticles immobilized on thin film composite polyamide membrane: characterization, nanofiltration, antifouling properties. *Polymers for Advanced Technologies*, 18(7), 562-568.
- Lin, S., Pérez, S. & Félix, R. (2007). Preparation, Characterization and Salt Rejection of Negatively Charged Polyamide Nanofiltration Membranes. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 51, 129-135.
- Mejía, F. (2013). *Aislamiento y caracterización fisicoquímica de la Capsaicina de tres variedades de ají*. (Tesis de licenciatura publicada). Pontificia Universidad Católica. Ecuador.
- Mekonnen, M. & Hoekstra, A. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), 1-6.

- Mohammad, A., Teow, Y., Ang, W., Chung, Y., Oatley, D. & Hilal, N. (2015). Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospect. *Desalination*, 356, 226-254.
- Pérez, S., Miranda, S., Lin, S., Álvarez, J., Pérez, J., Corrales, K. & Morales, J. (2016). Membranas de Nanofiltración, Preparadas Vía Polimerización en Interfase, Dopadas con Nanopartículas de ZnO: Efecto en su Desempeño. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 961-975.
- Pinnau, I. & Freeman, B.D. (1999). Formation and Modification of Polymeric Membranes: Overview, in Membrane Formation and Modification. *Membrane Formation and Modification*, 1-22.
- Rodríguez, A., Troncosos, R., Sánchez, A., González, D., Ruiz, E., Zamora, R., Ceceña, C., Grimaldo, O. & Avilés, M. (2015). Efecto antifúngico de extractos fenólicos y de carotenoides de chiltepín (*Capsicum annum* var. *glabrusculum*) en *Alternaria alternata* y *Fusarium oxysporum*. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(1), 72-77.
- Wei, J., Liu, X., Qiu, C., Wang, R. & Tang, C. (2011). Influence of monomer concentrations on the performance of polyamide-based thin film composite forward osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*, 381(1), 110-117.
- Xiao, F., Wang, B., Hu, X., Nair, S. & Chen, Y. (2018). Thin film nanocomposite membrane containing zeolitic imidazolate framework-8 via interfacial polymerization for highly permeable nanofiltration. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 83, 159-167.
- Zhou, D., Zhu, L., Fu, Y., Zhu, M. & Xue, L. (2015). Development of lower cost seawater desalination processes using nanofiltration technologies-A review. *Desalination*, 376, 109-116.
- Zhou, Y., Guan, X., Zhu, W., Wang, X., Yu, H. & Wang, H. (2014). Capsaicin inhibits *Porphyromonas gingivalis* growth, biofilm formation, gingivomucosal inflammatory cytokine secretion, and in vitro osteoclastogenesis. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 33, 211-219

A MANERA DE REFLEXIONES FINALES

Esmeralda Cervantes Rendón¹ y Germán Eduardo Dévora Isiordia²

Con estas reflexiones se pretende presentar los puntos en común que se encontraron en los capítulos de este libro que nos permiten identificar el tipo de problemáticas del agua en el estado de Sonora, así como una estrategia de acercamiento de estos con una ruta para proponer posibles soluciones.

En los capítulos anteriores se refleja que las problemáticas del agua en una región árida o semiárida están más relacionadas con la calidad y el abastecimiento de esta, ya que el acceso al agua es en su mayoría de fuentes subterráneas, y las fuentes superficiales que se pudieran tener son altamente utilizadas. Por lo anterior, adquieren una mayor relevancia los problemas de contaminación por fuentes antropogénicas o naturales.

Otro punto relevante es que las técnicas de remoción de metales pesados aquí presentadas buscan el uso de materiales presentes en la región y que representan también un pro-

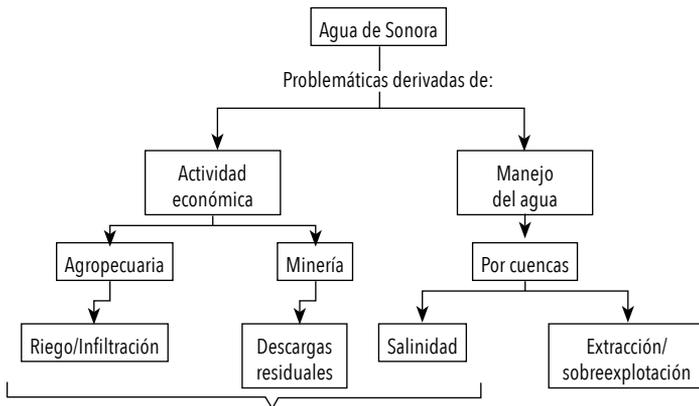
1 El Colegio de Chihuahua (El Colech).

2 Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON).

blema en su manejo como desecho, planteando opciones de tratamiento y uso para generar agua de mayor calidad.

En la Figura 1 se muestran las problemáticas del agua en el estado de Sonora con relación a sus actividades económicas y con el manejo de este recurso que, en general, son más las actividades agrícolas, acuícolas y de minería, sobre todo las derivadas por las descargas y filtraciones.

FIGURA 1. Relación de problemáticas del agua del estado de Sonora con sus posibles causas.



FUENTE: Elaboración propia con base en los capítulos del presente tomo.

Resalta en el texto la búsqueda de soluciones regionales para problemas locales que, aun cuando la problemática de calidad y acceso al agua es a nivel global, le otorgan características particulares, así como propuestas aplicables a su entorno y contexto. Esto es que, aunque se identifica la problemática de manera local, es necesario conocer la situación aguas arriba y aguas abajo, en especial cuando se habla de una división por cuencas que muchas veces traspasa las divisiones políticas y condiciones transfronterizas.

Por ello, se puede concluir que para presentar resultados de este tipo se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Realizar una caracterización geográfica, ambiental, social y económica regional de la problemática local del agua.
2. Identificación de técnicas de tratamiento establecidas para los conflictos locales de contaminación (en el caso del agua).
3. Determinación de posibles materiales, ya sea de desecho natural o que se generan en otros procesos productivos y que representa un problema en su manejo, para utilizar en las técnicas de tratamiento.
4. Identificación de las barreras técnicas, económicas y sociales para su desarrollo.
5. Determinación de las interacciones y rutas posibles entre actores y organismos para su implementación.

Dentro de los trabajos aquí presentados, se puede observar la aplicación de los tres primeros pasos, sobre todo de la importancia del primero, ya que con las revisiones bibliográficas se logra identificar situaciones particulares como las descargas residuales en Bahía de Lobos y sus implicaciones sociales, ambientales y económicas a grupos específicos como la Tribu Yaqui, pero también la interacción entre la actividad económica como la agricultura y la acuicultura con un problema de contaminación del agua o el manejo de la división por cuencas y los efectos a nivel regional. Mientras que en el segundo y tercero se pueden observar en los capítulos III, IV y V, donde no solamente se presenta el problema de contaminación, sino que se hace una búsqueda de posibles soluciones relacionadas con materiales de la región, en los que se

realizan pruebas experimentales (capítulos III y V). Sin embargo, el reto del cuarto y quinto paso es precisamente que requieren de un análisis interdisciplinario y de su aplicación en campo sobre las comunidades afectadas. Esta aplicación es el siguiente paso en cualquier investigación de este tipo y más en problemáticas como el manejo del agua que requieren de estrategias sustentables que ayuden a combatir los posibles efectos hidrometeorológicos a los que se enfrentan estas poblaciones de manera local, por ello la importancia de una caracterización de este tipo.



Los estados de Sonora y Chihuahua comparten problemáticas relacionadas con el agua y con base en los diferentes escenarios de cambio climático estos problemas podrían incrementarse, por ello en este tomo correspondiente al estado de Sonora se presentan diferentes situaciones relacionadas con el recurso hídrico, que al ser una región árida o semiárida están más enfocadas con su calidad y abastecimiento. Por otro lado, las técnicas de remoción de metales pesados aquí presentadas buscan el uso de materiales regionales que son residuos, planteando opciones para su manejo y uso como material de remoción con el fin de mejorar la calidad del agua del estado de Sonora.

Dra. Esmeralda Cervantes Rendón, es Química Industrial, con Doctorado en Investigación por El Colegio de Chihuahua. Se especializa en la investigación de temas socioambientales relacionados a



problemáticas del agua, la energía y el cambio climático, por medio del análisis bibliométrico y cienciométrico con un enfoque interdisciplinario en colaboración con redes temáticas y otros cuerpos académicos, buscando además un diálogo entre la sociedad y la academia a través de eventos con acceso a la población interesada. Con ello contribuye al diagnóstico de problemáticas ambientales considerando factores sociales. Por otro lado, desde 2007 coordina la Biblioteca Virtual Ambiental del Estado de Chihuahua con información de acceso abierto, disminuyendo la brecha digital entre la población del estado de Chihuahua.

Dr. Germán Eduardo Dévora Isiordia, es Ingeniero Químico, con Posdoctorado en la Universidad de Arizona, USA. Especialista



en tratamiento de aguas y Procesos de Desalinización por sistemas térmicos y de membranas. Su trabajo se centra en el diseño y puesta en marcha de procesos para brindar agua de calidad, además del tratamiento y acondicionamiento de aguas de desecho según la normatividad vigente para el sector industrial, agrícola, pecuario y de consumo humano. Acopla a los procesos que diseña el uso de energías renovables, de esta manera contribuye al control del cambio climático. Por otra parte, brinda justicia social al desarrollar proyectos de investigación para comunidades costeras alejadas del suministro de agua potable y energía eléctrica. Provee agua de calidad con el empleo de energía solar y materiales cambio de fase.



El Colegio de Chihuahua
Institución Pública de Investigación y Posgrado