

CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Tecnologías para la gestión sostenible del agua

Amado Enrique Navarro Frómata
Raúl Jacobo Delgado Macuil



Tecnologías para la gestión sostenible del agua

Amado Enrique Navarro Frómata
Raúl Jacobo Delgado Macuil



Gobierno de Puebla
Hacer historia. Hacer futuro.



Secretaría
de Educación
Gobierno de Puebla

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla



CONACYT
Registro Nacional de Instituciones
y Empresas Científicas y Tecnológicas
Registro: 1900555

Tecnologías para la gestión sostenible del agua

© Amado Enrique Navarro Frómata

© Raúl Jacobo Delgado Macuil

Dirección del Proyecto

Eduardo Licea Sánchez

Esther Castillo Aguilar

José Eduardo Salinas de la Luz

Arte

Vanesa Alejandra Vázquez Fuentes

Paulina Cordero Mote

Michel Diaz Sanchez

Formación de interiores

Vanesa Alejandra Vázquez Fuentes

Corrección de estilo

Dámaris Berenice Vera Zamora

Preprensa

Víctor Hugo Flores Hernández

Edición 2021

ISBN:978-607-437-578-7 (AM)

ISBN: 978-607-99506-0-6 (CONCyTEP)

D.R. © CLAVE Editorial

Paseo de Tamarindos 400B, Suite 109.

Col. Bosques de las Lomas, Ciudad de México, México. C.P. 05120

Tel. 52 (55) 5258 0279/80/81

ame@ameditores.mx

ecastillo@ameditores.mx

www.ameditores.com

Las opiniones y puntos de vista expresadas en la presente obra, son responsabilidad única y exclusiva del autor y no necesariamente representan las posiciones u opiniones de la editorial ni las de sus integrantes.

Los textos que conforman la obra fueron sometidos a dos dictámenes de pares ciegos. Se omiten los nombres de los dictaminadores por consideraciones de ética profesional y de procedimiento de arbitraje.

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida, archivada o transmitida en forma alguna o mediante cualquier sistema, ya sea electrónico, mecánico o de fotorreproducción, sin la previa autorización de los editores.

Impreso en México.

Índice

Prólogo	9
Capítulo 1. Agua, tecnología y belleza	11
Capítulo 2. La apropiación social del conocimiento tecnológico	33
Capítulo 3. Técnicas analíticas basadas en biosensores para la determinación de analitos en aguas contaminadas	51
Capítulo 4. Disponibilidad de agua para usos domésticos: alternativas para mitigar la escasez y la carga que representa para las mujeres	73
Capítulo 5. Las opciones del riego tecnificado: tecnologías para el ahorro del agua en el campo	89
Capítulo 6. Cuidando el agua verde: experiencias del manejo sustentable de tierras y captación de agua en el Ecocampus BUAP, Puebla, México	107
Capítulo 7. La captación de agua de lluvia: de la teoría a la práctica	125
Capítulo 8. Las plantas de tratamiento de agua, un enfoque sostenible	145
Capítulo 9. Humedales para el tratamiento de aguas residuales	167
Capítulo 10. Biofiltración sobre cama orgánica (BFCO)	185

Capítulo 11. Tecnologías alternativas para el tratamiento del agua en centros urbanos	211
Capítulo 12. Agua y minería en Colombia: enfoque para su tratamiento	235
Capítulo 13. El papel de las tecnologías electroquímicas en el saneamiento de aguas residuales para su gestión sostenible	255
Capítulo 14. Tecnologías adsorbentes para la gestión sostenible del agua	275

Prólogo

De acuerdo con el censo de población y vivienda 2020 de INEGI, en México somos ya 126 millones de habitantes, lo que supone la existencia de una mayor presión sobre la disponibilidad de agua para consumo humano. Por ello, el tema del agua y su gestión es vital para nuestro país.

Por citar un dato, se estima que México posee sólo 1% del total de agua dulce que hay en el planeta, cifra que lo ubica como uno de los países del mundo con baja disponibilidad de agua por habitante.

En ese sentido, vale la pena mencionar que, como efecto directo del crecimiento poblacional, el uso industrial, agrícola y ganadero, el uso indebido de las explotaciones mineras y el cambio climático, del periodo que va de 1950 a 2005, la disponibilidad de agua por habitante pasó de 11 mil 500 metros cúbicos a sólo 4 mil metros cúbicos, lo que significó una disminución de más del 60%. Actualmente se estima que la disponibilidad de agua por habitante es de 3 mil 500 metros cúbicos.

Por su parte, con el fin de disminuir el número de personas que sufren por la falta de acceso al agua potable (el PNUD estima que en el mundo hay más de 800 personas sin acceso al agua potable), el objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) plantea, para el 2030, que los gobiernos del mundo aseguren la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para sus poblaciones, lo que implica que los gobiernos, tales como el de México, garanticen, entre otras medidas, prácticas sostenibles en el manejo del agua.

En ese contexto, toma relevancia el Foro de Apropiación Social de las Tecnologías para la Gestión Sostenible del Agua, llevado a cabo del 28 al 30 de octubre de 2020 en sedes alternas del estado de Puebla. En este evento, se realizaron distintas mesas de trabajo para analizar la apropiación social del conocimiento tecnológico y su importancia para la gestión sostenible del agua, lo cual permitió la integración de los catorce capítulos que se reúnen en este libro que se presenta. Como se anuncia en el título del libro *Apropiación Social de las Tecnologías para la Gestión Sostenible del Agua*, los autores buscan contribuir con sus estudios y reflexiones al conocimiento ya existente del uso de las tecnologías para la gestión sostenible del agua, desde varias perspectivas de análisis.

Con ese propósito en mente, el libro plantea en los primeros capítulos algunas consideraciones sobre la asociación entre la gestión sostenible, la apropiación

social de la tecnología y la innovación, entendida como el proceso intencionado de comprensión e intervención de las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad, y la importancia del cuidado y embellecimiento del entorno; en este caso, de ríos, lagos y mares. Enseguida, mediante el abordaje de un caso de estudio de una localidad poblana, se destaca cómo a través del conocimiento transdisciplinario es posible detonar procesos de co-investigación entre Instituciones de Educación Superior, sociedad y sociedad civil, para impulsar proyectos locales en beneficio de la naturaleza y de las personas. De igual modo, se ilustra mediante el estudio de algunos organismos operadores del agua de la región centro de Veracruz, cómo se pueden generar alternativas para mitigar la escasez y la carga que representa para las mujeres las tareas de suministro de agua a los hogares.

Por otro lado, en el desarrollo de los siguientes capítulos, a través del estudio del riego tecnificado y su importancia, se destaca la necesidad de aprovechar el conocimiento acumulado tanto formal como informal, para realizar una gestión sostenible del agua. Asimismo, se pone de manifiesto la importancia del aprovechamiento del agua de lluvia, usando tecnologías como represas de mampostería, las cisternas de ferrocemento, entre otros, como estrategias locales para una mejor gestión del agua.

Otros de los temas abordados en esta obra, de gran valor académico e investigativo, son las distintas alternativas tecnológicas existentes para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales, urbanas y periurbanas, como el desarrollo de humedales, los cuales, a través de varios procesos físicos, químicos y biológicos, generan un agua tratada factible para ser reutilizada en diversos tipos de riego, entre otros beneficios. También, reviste importancia el tema de la biofiltración sobre cama orgánica para contextos rurales y periurbanos de México y otros países donde es factible su aplicación. Igualmente, se debe mencionar el enfoque de la electroquímica y su importancia en la obtención de agua de reúso o en procesos de tratamiento de agua para consumo humano, por mencionar algunos cuantos estudios de los varios que se plasman en este trabajo.

Las investigaciones de este libro muestran la trascendencia de considerar la apropiación social del conocimiento científico, tecnológico e innovativo, como medio para alcanzar mejores condiciones en lo social, económico y ambiental.

En las obras presentadas se denota un enorme esfuerzo de cada uno de sus autores por aportar teoría, metodología y, sobre todo, práctica al conocimiento acumulado de la apropiación social del conocimiento tecnológico y su importancia para la gestión sostenible del agua en México, por lo cual se convierte en lectura necesaria.

Mtro. Victoriano Gabriel Covarrubias Salvatori
Director General del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla
(CONCyTEP)

Capítulo 1

Agua, tecnología y belleza

Amado Enrique Navarro Frómata^{1*}
Raul J. Delgado Macuil²
Juan Carlos Mansur Garda³

A guisa de introducción: el porqué de este libro y algo más...

Recientemente se celebró el Foro sobre la apropiación social de tecnologías para la gestión sostenible del agua, auspiciado por la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, el Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional, el CONACyT y la Red Temática Gestión de la Calidad y Disponibilidad del Agua (los aspectos más relevantes de la Red se pueden consultar en <https://www.aguanet.com.mx/>). Como parte de las reflexiones alrededor de este Foro, surge la idea de preparar este libro para compartir y divulgar ideas sobre las tecnologías para mejorar la gestión del agua. Contando con el apoyo del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (CON-CyTEP), se materializan en estas páginas algunas reflexiones sobre el tema. El material puede parecer abigarrado en contenido y estilo, pero, si se analiza su idea principal, esto puede ser valorado de otra manera. Esta idea consiste en que la apropiación social del conocimiento, integrado por los aspectos inherentes al ámbito científico-técnico y por los saberes que provienen de la praxis y experiencia de toda la comunidad, es vital para el desarrollo sostenible o sustentable de la humanidad. Sirva entonces este material como una modesta contribución, útil para muchos lectores.

¹Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros.

²Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional, Laboratorio de Nanobiotecnología.

³Instituto Tecnológico Autónomo de México, Estudios Generales.

*Autor de correspondencia, navarro4899@gmail.com

El desarrollo sostenible y sus objetivos

Si hablamos del desarrollo sostenible o sustentable (sin entrar en discusiones de la mayor validez de uno u otro término) y entendemos como esencia de este que hoy podamos garantizar un existir decoroso a la población de nuestro planeta sin comprometer el futuro de los que lo habitarán después, lo primero que debemos valorar es qué aspectos lo integran, resumidos en la Figura 1. Para materializar esto hay que trazarse objetivos concretos. En 2015, todos los Estados miembros de las Naciones Unidas aprobaron 17 objetivos que deben guiar a las naciones en su quehacer para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo.

Figura 1. El desarrollo sostenible
(adaptada de <https://www.onu.org.mx/que-es-el-desarrollo-sostenible>)



Se señaló un plazo de 15 años para lograrlos y por ello se hace referencia a los mismos cuando se habla de la Agenda 2030. En la Figura 2 se muestran los objetivos.

Figura 2. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, aprobados por todos los Estados miembros de la ONU (adaptada de <https://news.un.org/es/story/2015/12/1347821>)

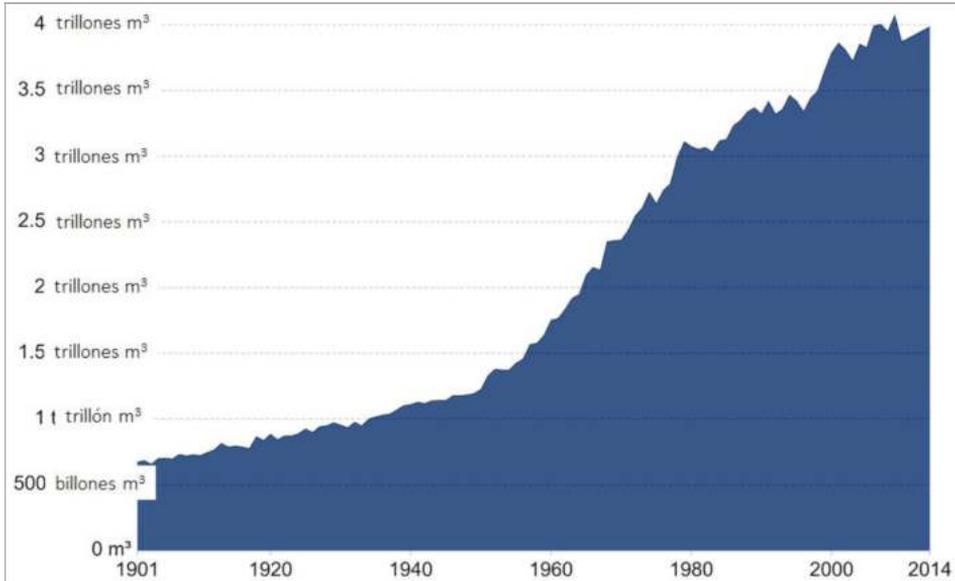


¿Qué es la gestión sostenible del agua?

El abasto de agua en cantidad suficiente y de buena calidad es indispensable para la salud y el bienestar de los seres humanos y de los ecosistemas, proporcionando, además, la base para el desarrollo socioeconómico. Sin embargo, aunque todos se benefician de ella, pocos saben cómo y muchos menos intervienen en su gestión. Por lo general la sociedad no está suficientemente informada para comprender cómo el uso del agua afecta tanto la cantidad como la calidad del recurso y su impacto económico. Este tema puede ser abordado más exhaustivamente por el interesado consultando el informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos de 2019, No dejar a nadie atrás (WWAP, 2019).

Sabemos que sólo una pequeña parte del agua de la Tierra es dulce —y es más pequeña la aprovechable—. Considerando el concepto de las fronteras planetarias que permiten el actuar seguro de la humanidad, el uso humano del agua dulce (alteración del ciclo del agua) se acerca ya a la frontera, propuesta generosamente, de 4,000 km³ anuales. El que requiera profundizar en el tema de las fronteras planetarias del agua, puede consultar un material que lo revisa (Gleeson *et al.* 2020).

Figura 3. Extracción mundial de agua dulce para usos agrícolas, industriales y domésticos desde 1900, medidas en metros cúbicos (m³) por año (adaptada de <https://ourworldindata.org/water-use-stress#:~:text=Globally%2C%20the%20United%20States%20is,largest%2C%20at%20140%20billion%20m%2C%20B3>).



Por otra parte, las fuentes de agua dulce están distribuidas desigualmente, tanto a nivel global como dentro de cada país, siendo también variable su disponibilidad temporal y su extracción para diversos usos. Con una población mundial estimada al 2030 de 8,300 millones y de 9,100 millones en el 2050, es fácil comprender el rol central que ocupa su gestión en el desarrollo sostenible. Todo esto se ve complicado por los problemas de la contaminación del agua, la desertificación de bosques y selvas que rompen el ecosistema hidráulico, el uso un tanto irracional del líquido en las labores de producción, la concentración urbana y el desorden territorial de la misma que sobreexplota mantos acuíferos y, ante todas las cosas, por la falta de cultura transversal entre el diseño normativo y la sociedad. A lo anterior hay que sumar la componente exógena del cambio climático. Una componente más del problema es la relación entre el agua y la energía. El abastecimiento de agua requiere de energía para la extracción, transporte, distribución y tratamiento del agua, antes y después de su uso. De una u otra forma, la producción, transmisión y uso de la energía conlleva un consumo de agua. Las crisis re-

gionales y globales que afectan a la población mundial, especialmente a las personas con menores ingresos, están relacionadas con este nexo entre el agua y la energía.

Entonces, la gestión sostenible del agua debe atender satisfacer racionalmente la demanda de agua para los diferentes usos consuntivos, garantizando que se protejan la calidad y la disponibilidad de las distintas formas en que se manifiesta este recurso. Esto último, evidentemente, requiere la devolución del agua usada al medio ambiente con la calidad adecuada. El logro de esto se lleva a cabo a través de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH). La GIRH es un proceso que promueve el desarrollo y manejo coordinados del agua, la tierra y otros recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales.

La visión de México

En México la GIRH se sustenta, fundamentalmente, en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) y el Plan Nacional Hídrico (PNH), que es un plan especial derivado del PND. Tal como se plantea en el PNH 2020-2024, publicado en el DOF el 30/12/2020 y en su Resumen (CONAGUA, 2020), para su elaboración se analizaron los principales problemas públicos relacionados con el recurso:

- Acceso a los servicios de agua potable y saneamiento insuficiente e inequitativo
- Uso ineficiente del agua que afecta a la población y a los sectores productivos
- Pérdidas humanas y materiales por fenómenos hidrometeorológicos extremos
- Deterioro cuantitativo y cualitativo del agua en cuencas y acuíferos
- Condiciones institucionales y de participación social insuficientes para la toma de decisiones y el combate a la corrupción

En la Figura 4 se resume la visión del sector hídrico, así como los objetivos y estrategias plasmados en el PNH 2020-2024. Como se puede apreciar, el primer objetivo es garantizar progresivamente el derecho humano al agua. Un aspecto importante y que justifica que haya que hacer una referencia obligada al PNH es precisamente que es decisiva la participación consciente de todos los ciudadanos, basándose justamente en el conocimiento de lo contemplado en dicho plan.

Figura 4. Visión del sector hídrico, objetivos y estrategias prioritarias del PNH 2020-2024 (adaptada de CONAGUA, 2020)



¿Cómo impacta el cambio climático esta gestión?

Como se mencionó anteriormente, el cambio climático (prácticamente ya emergencia climática) es una variable que introduce más incertidumbre y presión sobre la gestión sostenible del agua.

Para el Panel Internacional del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), el “cambio climático” es el cambio en el estado del clima, el cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana.

Es necesario diferenciar el término de “calentamiento global”, que es el incremento en la temperatura promedio de la superficie terrestre, debido a la acumulación de los denominados gases de efecto invernadero en la atmósfera, generados por la actividad humana, 4 de ellos de larga permanencia: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y halocarbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo). Su contribución al calentamiento se debe a

que evitan que una parte significativa de la energía radiante del sol que llega a la superficie de la tierra se libere de nuevo al espacio, como se muestra en la Figura 5:

Figura 5. Los GEI y el calentamiento global
(adaptada de <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-efecto-invernadero>)



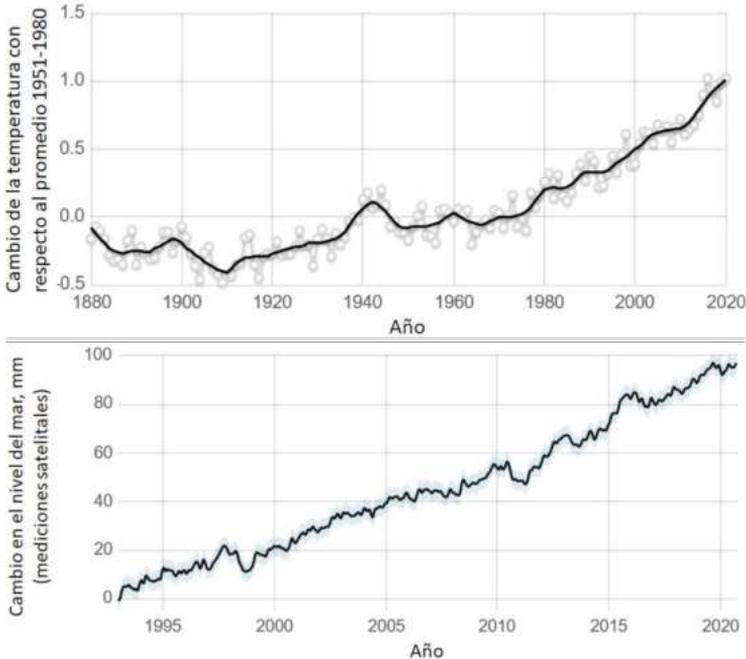
Es conveniente señalar que alrededor del 97% de los científicos dedicados al clima consideran que las tendencias observadas en el clima y el calentamiento global con mucha probabilidad se deben a la actividad humana. Sin embargo, las teorías negacionistas y/o conspiracionistas (a veces pagadas por intereses corporativos) también abundan en este terreno. Baste que haya un frío invernal para que pongamos en duda la evidencia de observaciones que van más allá de una percepción individual. En la Figura 6 ponemos solamente una muestra (se recomienda ver la evidencia que aparece, por ejemplo, en la página de la Agencia Espacial de Estados Unidos, NASA).

Y ¿cómo afecta el cambio climático al agua? El informe del estado de los recursos hídricos de 2020 aborda precisamente este tema y debe ser de lectura imprescindible si queremos poder enfrentar esta situación (UNESCO, 2020).

Entre muchos aspectos que vinculan la calidad y disponibilidad del agua con el clima se puede señalar, solamente para ilustrar, que:

- El cambio climático se manifiesta, entre otros aspectos, en el aumento de la frecuencia y magnitud de los fenómenos extremos, como las olas de calor, las precipitaciones sin precedentes, las tormentas y las marejadas ciclónicas.
- La calidad del agua se verá afectada negativamente por el aumento de sus temperaturas, la menor cantidad de oxígeno disuelto y, por consiguiente, la menor capacidad de autodepuración de los depósitos de agua dulce. Las inundaciones y una mayor concentración de contaminantes durante las sequías aumentarán el riesgo de polución del agua y de contaminación patogénica.
- También corren peligro muchos ecosistemas, en especial los bosques y los humedales. La degradación de los ecosistemas no solo producirá una pérdida de biodiversidad, también afectará la disponibilidad de servicios de ecosistema que dependen del agua, como su purificación, la captación y almacenamiento del carbono, la protección natural contra las inundaciones, así como el suministro de agua para la agricultura, la pesca y el ocio.

Figura 6. Evidencia del cambio climático (adaptadas de <https://climate.nasa.gov/evidence/>)



Por supuesto, esto no implica que debemos adoptar una posición pesimista y fatalista que nos lleve a cruzarnos de brazos. Es necesario adaptarse a la realidad del cambio climático y mitigar sus consecuencias. Adaptarse no es cruzarse de brazos, es adoptar las medidas de protección de la naturaleza, así como llevar a la práctica todas las medidas capaces de atenuar los daños del cambio climático mediante una adecuada gestión del agua. Por ejemplo, si restauramos un humedal, sus efectos se ven a corto plazo y a nivel local. Mitigar o atenuar conlleva la adopción de medidas cuyos efectos se ven a más largo plazo y a nivel global. Un ejemplo puede ser el incremento de la cobertura boscosa. Sus efectos en la gestión del agua se ven en años y se manifiestan más allá de la localidad. En general, aún es necesario avanzar más en el conocimiento del efecto que puede tener una adecuada gestión del agua en la atenuación y mitigación de los efectos del cambio climático.

Una última reflexión gira en torno a las preguntas ¿cómo conjugar agua, tecnología y belleza?, ¿qué impacto tiene la aplicación de la tecnología para la limpieza del agua con la mejora de las comunidades y el entorno?, ¿cuál es el sentido social de contar con ríos y lagos limpios?

Cómo lograr la Apropiación Social de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación

Uno de los grandes problemas en la búsqueda de la interacción academia-sociedad es conocer el tiempo exacto de buscar la interacción o saber el momento justo de la madurez de los proyectos que pueden impactar directamente a la sociedad.

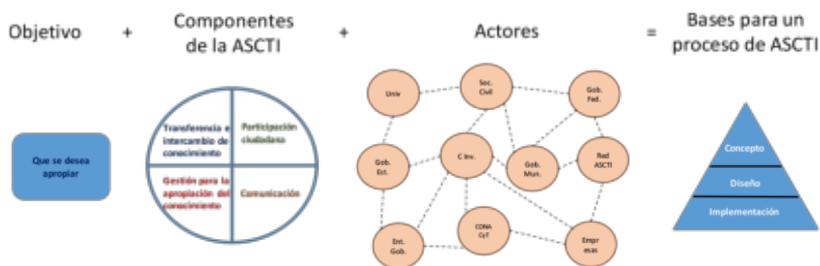
La Apropiación Social de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación (ASCTI) es un proceso intencionado de comprensión e intervención de las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad, construido a partir de la participación de los diversos grupos sociales que generan conocimiento (Gregory J. y Miller S., 1998). Este proceso tiene las siguientes características:

- Es organizado e intencionado.
- Está constituido por una red en la que participan grupos sociales, personas que trabajan en ciencia y tecnología y ciudadanos.
- Se realizan mediaciones para establecer articulaciones entre los distintos actores.
- Posibilita el empoderamiento de la sociedad civil a partir del conocimiento.
- Implica trabajo colaborativo y acuerdos a partir de los contextos e intereses de los involucrados.

Se necesita, por lo tanto, tener un objetivo claro, saber que se desea apropiarse, buscar los componentes de ASCTI, buscar los actores que deben propiciar este

acercamiento, para finalmente conceptualizar el diseño generado e implementarlo. La Figura 7 presenta un esquema general de lo que debe ser un modelo de apropiación social de la ciencia, tecnología e innovación.

Figura 7. Diagrama esquemático del modelo propuesto para la Apropiación Social de la Ciencia, Tecnología e Innovación

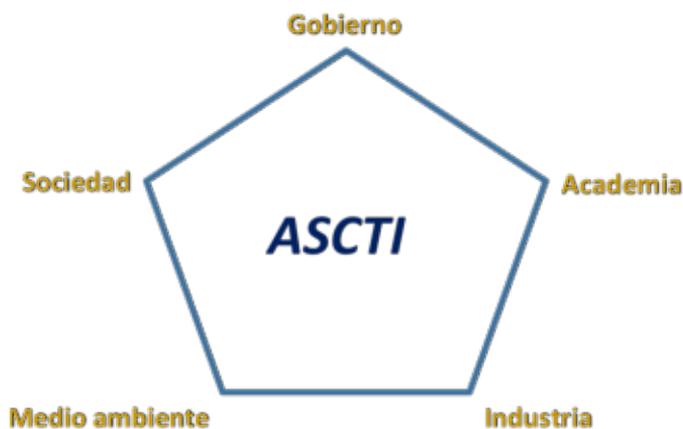


En la actualidad, la mayoría de las decisiones gubernamentales han sido enfocadas a la divulgación de la ciencia y la tecnología a niños y jóvenes; y se deja de lado a las instituciones gubernamentales, al sector productivo y a la sociedad civil, cuyo conocimiento de las situaciones en sitio (no en laboratorios) son de vital importancia para procesos de inclusión y participación en la producción del conocimiento experto (Felt, 2003, Avellaneda F. y Pérez Bustos 2009, Pérez Bustos, 2010). Todo esto, con la finalidad de incorporar en el sentido común y en la vida cotidiana la ciencia como estrategia de interacción con la realidad física y social; es decir, desarrollar una cultura receptiva a la ciencia es, entonces, un requisito indispensable para el desarrollo de las naciones (Ahumada y Miranda, 2013). En nuestro país, los esfuerzos se han enfocado a la relación academia-industria y en estos dos últimos años en el Programa Estratégico Nacional de Tecnología e Innovación Abierta, comúnmente denominado PENTA, y en las Convocatorias Fordecyt [Conacyt PENTA, 2019, Fordecyt 2019]. En ambas convocatorias se busca darle prioridad a la atención de problemas nacionales, como agua, alimentos, problemas socio ambientales, desarrollo urbano, salud, transición energética y cambio climático. Para ello, en ambas convocatorias es un requisito tener presente la pentahélice de la innovación abierta y el desarrollo sustentable, siendo necesario incluir cuatro de los cinco vértices del pentágono presentado en la Figura 8.

Sin embargo, la inclusión de todos los actores no es suficiente, ya que se tienen que tomar en consideración otros factores para cada uno de los actores involucrados en la ASCTI. En principio, normalmente la tecnología desarro-

llada en los laboratorios debe tener un punto de madurez suficiente para poder ser escalable, y para esto se definen 9 niveles de madurez de la tecnología, los también llamados Technology Readiness Levels (TRLs) (Horizon 2020, US Department Energy Technology, 2018).

Figura 8. Modelo propuesto para la vinculación de la ciencia, tecnología e innovación por el consejo de ciencia y tecnología de nuestro país



La Figura 9, presenta un esquema y la composición de los TRLs. En la actualidad la investigación en las universidades o centros de investigación, normalmente se queda en la etapa TRL3, la cual puede llevar un corto periodo de tiempo; sin embargo, el poder pasar las siguientes cuatro TRLs es una tarea titánica y casi siempre enfrentada de manera personal por el investigador, ya que los empresarios o las entidades gubernamentales nunca están pendientes de los desarrollos tecnológicos que se tienen hasta el momento. Por esta razón a estas cuatro etapas se le conoce como el valle de la muerte. Es difícil que las empresas quieran invertir en desarrollos tecnológicos que no presenten pruebas a escala real, pues este proceso de madurez de la tecnología se ve más como una enajenación y no como una apropiación de la ciencia, la tecnología y la innovación. Un ejemplo de investigaciones que han logrado cruzar el valle de la muerte son los desarrollos llevados a cabo por el instituto de ingeniería de la UNAM, campus Juriquilla, con el otorgamiento de la patente MX-362760, desarrollada por Almanza Salgado y Méndez Arriaga, la cual consiste en un sistema híbrido (fotoquímico y térmico) para la eliminación de contaminantes y subproductos no biodegradables presentes en agua. Sin embargo, de acuerdo a un estudio de

Domínguez Montero *et al.* del 2018, hasta el 2013 México solo contaba con 34 patentes asociadas al tratamiento de aguas, siendo mayormente empresas e inventores independientes los que realizan el mayor número de solicitudes.

Se sabe que las actividades primarias de los seres humanos son uno de los principales factores de contaminación, las cuales por sus dimensiones locales no son perceptibles a corto plazo, pero en el mediano y largo plazo generan la degradación de los ecosistemas. Algunas de estas actividades son: la ganadería rural, los desechos urbanos, municipales y rurales, el poco o nulo respeto del medio ambiente, entre otras. Por esta razón, es necesario poder insertar a la sociedad civil en la generación del conocimiento del proceso de degradación de una localidad, con la idea de poder revertir estas actividades en procesos sustentables.

Figura 9. Los niveles de madurez de un proyecto TRLs



Las industrias, por su volumen de desechos y contaminación, se han presentado como una de las principales actividades de contaminación de nuestros ecosistemas; sin embargo, se podría ubicar en segundo lugar. Y, como ya se ha mencionado anteriormente, la industria no invierte si la etapa de madurez de un proyecto no ha rebasado el valle de la muerte o si en función de los TRLs la inversión representa un riesgo que no se desea tomar; y desafortunadamente prefieren traer tecnología de otros países que invertir en tecnología desarrollada en México.

El cuarto componente, de la Figura 8, son las entidades gubernamentales, las cuales en nuestro país son perennes y están más enfocadas en cuestiones personales (acciones que les permitan mantener o escalar puestos), que en una verdadera intención de ayudar a resolver los problemas. Si a esto sumamos los vacíos en la normatividad o la falta de empalme entre las instituciones, sectores como las direcciones locales de CONAGUA, secretarías del ámbito federal o secretarías del ámbito estatal (Desarrollo Social, Secretaría de Salud, Medio Ambiente y Recursos Naturales, Economía, por mencionar algunas) se ven impedidas a ejecutar la normatividad. Es por ello que las cámaras de diputados

estatales, federales y la cámara de senadores deberían de hacer un esfuerzo realmente importante para evitar estos vacíos de poder. Sin embargo, si en estos esfuerzos no se toma en cuenta al sector de operatividad de estas entidades gubernamentales, las intenciones siempre quedarán en eso, en intención.

Y, por último, siempre se debería de observar la sustentabilidad de los desarrollos científicos, y aquí es donde entra el medio ambiente. Se debe considerar que en el corto plazo la adopción de las innovaciones ambientalmente benévolas no siempre representa un gran atractivo; sin embargo, la adopción de tecnologías integrales genera ahorros, mayores ingresos o una mejor posición competitiva en el mediano y largo plazo (Muñoz Villarreal, 1998).

La ONU, en su Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible [UN, programa 21, 2015], mencionó que para lograrlo es necesario aplicar los conocimientos científicos para articular y apoyar metas del desarrollo sostenible mediante la evaluación científica de la situación actual; es decir, es necesaria una mayor aportación de las ciencias para aumentar los conocimientos y facilitar la integración de la ciencia y la sociedad. Es por esto que los países de primer mundo invierten en reforzar la base científica para la ordenación sostenible, con la finalidad de aumentar los conocimientos científicos y, por ende, invierten en incrementar su capacidad científica, tanto en la generación de investigadores de alto nivel, como en la adecuación de espacios de investigación.

Por lo anteriormente expuesto, la apropiación social del conocimiento debería verse como el fundamento de cualquier tipo de innovación, donde están involucrados distintos grupos sociales. De hecho, la investigación nunca es ajena a la sociedad, se debería desarrollar al interior de esta, a partir de sus intereses códigos y sistemas. Y, entonces, si se logra visualizar de esta manera, la ciencia, la tecnología y la innovación no son más que la interacción entre grupos, artefactos y cultura social de expertos y no expertos. Nunca deberían verse o solicitarse como esfuerzos personales o colectivos de investigación.

Pero se nos había quedado pendiente ver el enlace entre lo visto hasta ahora, la belleza y el beneficio de las comunidades. Éste se centra sobre todo en otorgar al ser humano espacios habitables que incluyan, además de los recursos de subsistencia física, los recursos estéticos, que aportan una subsistencia más allá de lo estrictamente material. Si tenemos como objetivo el bienestar humano, debemos considerar que lo que hagamos no solamente debe ser útil y funcional. Debe ser, además, bello. Veamos un poco más al respecto.

Tecnología y estética: la necesidad de la belleza

La preocupación por lograr una mejor calidad de vida en las comunidades ha cobrado cada vez más atención dentro de los grupos científicos y de tecnología. Esto ha despertado un animado y nutrido diálogo con otras disciplinas, como la Filosofía, la Psicología, la Ciencia Política, la Economía o la Medicina entre otras. Dentro de este diálogo algunos círculos de estudio y reflexión se han enfocado en destacar la importancia del componente estético en la mejora de la calidad de vida de las personas y, concretamente en la necesidad de generar espacios bellos para contribuir al bienestar y sentido de vida de la persona y sus comunidades. Es de destacar el papel que a este respecto han desarrollado a lo largo de ya diez años los seminarios de Estética y Ciudad que se organizan anualmente en el ITAM, con el apoyo del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), y que reúnen a investigadores de distintas disciplinas a reflexionar año con año sobre la importancia del embellecimiento de los poblados y ciudades, a analizar la problemática de la carencia de espacios bellos, así como a proponer qué se debería hacer para lograr diseñar espacios que recuperen el componente estético. Estos encuentros parten del principio de que, así como todos somos de alguna manera responsables de la fealdad de las ciudades, también podemos ser —desde cada una de nuestras disciplinas y propuestas—, el detonante que inicie los procesos de embellecimiento de nuestros entornos.

Preocuparse por cuidar y embellecer los espacios naturales y urbanos es una tarea compleja pero altamente gratificante, en la que se busca armonizar el desarrollo de la vivienda y espacios habitables de las ciudades, junto con la estabilidad económico laboral, el desarrollo de la industria y comercio y, por supuesto, el cuidado del medio ambiente. La limpieza y embellecimiento de lagos y ríos se encuentra, sin duda, en medio de esta reflexión y es uno de los tantos problemas no resueltos de la época actual.

El lastre de esta problemática se remonta, según Lewis Mumford en su obra *Técnica y Civilización*, al siglo XVIII, en que se gestó la era que él denomina Paleotécnica y que se caracterizó por ser una época de grandes avances científicos y tecnológicos, pero también fue la responsable de la fealdad del paisaje natural y urbano. Una aproximación desde la interdisciplina nos permite comprender ahora con más claridad que la causa de este atentado al bienestar del ser humano no fue únicamente la aparición de la nueva tecnología del carbón, de los energéticos fósiles y químicos que sustituyeron el uso de las energías limpias hídricas y eólicas, cuanto de la transmutación de valores del ser humano que se dejó poseer por el espíritu de acumulación, trabajo y consumismo, en lugar de poner como más alto valor el espíritu de la vida. Aparejada a la degradación del

medio ambiente, tierra, ríos y aire, se dio también la degradación del trabajador: en pocas décadas, las ciudades y la naturaleza fueron degradadas en sus aspectos más esenciales. Poco a poco, el hombre cayó no sólo en la anemia moral, sino de los sentidos y de la mente; con ello, vino la degradación del ser humano y también desapareció la belleza de los paisajes para dar paso a la fealdad de los parajes naturales y las ciudades.

Figura 10. Nuestra herencia de la fase Paleotécnica genera aún degradación del ambiente y fealdad en las ciudades y los campos. Imagen de <https://pixabay.com/get/g844c9c9f4b0ad3a31d36a-0ac3b98cbe52fa0d7b6c8195bc22e080d84809665cdfc1b0939af1f6a82864e228bb6ebcf9b.jpg>



El siglo XXI se enfrenta a un desafío de gran magnitud que consiste en liberarse de las herencias negativas de la fase Paleotécnica a que hemos hecho mención, sin perder los logros que tuvo en muchos ámbitos de la calidad de vida y desarrollo científico. El camino ha presentado un gran reto intelectual y social, pero poco a poco se comienza a ver en algunos lugares cómo se restaura en algo la dignidad humana en los espacios laborales, así como devolverle la dignidad al medio ambiente. Estamos en los albores de la que llama Mumford la fase Neotécnica, en que se diseñan con mejores logros estrategias para generar propuestas laborales y tecnológicas que mejoren nuestra civilización y se diseñen ciudades y espacios naturales no sólo más limpios, sino más bellos. Se trata de una tarea

que no es fácil, pues estamos en una época de transición, una *pseudomorfosis*, en que no logramos integrar el trabajo, la vida y el arte, dice Mumford. Época de contradicciones en que, por un lado, buscamos la dignidad del ser humano y del medio ambiente, pero por otro seguimos adorado al dios Mammón y a Moloch. El hablar del valor estético y la importancia de la belleza en un libro como las *Tecnologías para la gestión sostenible del agua* contribuye al esfuerzo de sus autores por integrar trabajo, vida y arte, como reto de la era Neotécnica que está por venir.

Figura 11. El consumismo y la irresponsabilidad de los seres humanos también contribuyen a la degradación del ambiente y a degradar la belleza de los espacios naturales. Imagen de ds_30 <https://pixabay.com/es/photos/lastic-glass-garbage-papel-waste-5073837/>



Dejemos por un momento la explicación de Mumford y las fases de la técnica en la historia y hablemos de la importancia de procurar la belleza de los espacios, gracias a los que damos cuenta de cosas asombrosas; como, por ejemplo, darnos cuenta que el procurar la belleza de los espacios, así como la belleza de nuestro hogar, habla de quienes somos, es el reflejo de la importancia que le damos a nuestro entorno y a la gente que habita en ellos. La belleza o fealdad de un lugar muestra algo de nuestra humanidad. De la misma manera, al buscar el embellecimiento de un entorno se muestra el interés por el bien de las personas y sus comunidades; mientras que la belleza refleja las virtudes de sus habitantes como lo son el cuidado, el respeto y

amor a las cosas, la fealdad de los espacios, en cambio, reflejan el descuido, desinterés y ausencia de cuidado de sí mismos y del entorno de sus moradores.

Los frutos que trae el cuidado estético de los entornos saltan inmediatamente a la vista: gracias a la belleza y buen diseño de los espacios urbanos se desarrolla la personalidad, los seres humanos experimentan un mejor estado de ánimo frente a la belleza y encuentran una felicidad y un sentido de vida. La contemplación de la belleza contribuye a volvernos más compasivos y justos, nos humaniza porque nos ayudan a nuestro desarrollo y salud psíquica y física. De la misma manera, los espacios bellos generan un mayor encuentro entre los habitantes, se anima la vida participativa de las comunidades, pues la belleza tiene un poder de atracción que convoca y genera comunidades más cohesionadas, lo que fortalece una vida cívica y social más activa. Por el contrario, la fealdad desorganiza la psique y genera un mal estado de ánimo y tristeza. Los espacios feos desvinculan la comunidades porque su ausencia de atractivo hace que deje de haber interés por frecuentarlos, desaparecen los puntos de reunión y se desarticula y degrada la vida de la sociedad.

Figura 12. Las ciudades que cuidan de la belleza de sus ríos y de sus espacios son lugares más habitables para sus ciudadanos y los visitantes. Imagen de Tubinga a orillas del río Neckar de Portraitor <https://pixabay.com/es/photos/r%C3%ADo-%C3%A1rboles-ciudad-aldea-5740878/>



Para añadir otra razón de por qué la importancia del cuidado y embellecimiento del entorno —y, en este caso, de ríos, lagos y mares—, podría decirse a manera de analogía, que, así como la limpieza de los ámbitos hídricos tiene un impacto en la cadena ecológica, de la misma forma la belleza de los ríos, mares y lagos,

revitalizan la vida del espíritu y de las comunidades. Así como la limpieza del agua incide en una infinidad de elementos del ecosistema —como por ejemplo, da vida a las especies marinas que atrae animales terrestres y aéreos, y también permite un crecimiento más sano de la vegetación, que contribuye a su vez a regular el clima, además de atraer más especies animales terrestres, aéreas o anfibios que contribuirán a dar mayores nutrientes a la tierra a lo largo de cientos de kilómetros—, de la misma manera, el embellecimiento y limpieza de los entornos acuíferos trae un beneficio más allá del abastecimiento de comida, bebida e higiene para las comunidades. El embellecimiento y limpieza de estanques, lagos, ríos y mares genera un mayor sentimiento de arraigo y comunidad en sus pobladores, despierta un sentimiento de orgullo que es necesario para el crecimiento y desarrollo de una comunidad. De la misma manera, los espacios bellos y limpios despiertan un interés por desarrollar infinidad de actividades que dan vida a los pobladores de las comunidades: actividades lúdicas y deportivas como remo, pesca, natación. Estos espacios bellos y desarrollos comunitarios despertarán, a su vez, un sentimiento de confianza en quienes al ver un espacio limpio y con una fuerte carga estética acudirán a los restaurantes y espacios recreativos, lo que contribuirá a desarrollar la economía del lugar y la mejora en sus pobladores. Esto contribuiría quizás a mitigar la migración desordenada, que trae abandono y descuido de los espacios; que genera la pobreza, miseria y fealdad.

Figura 13. Mientras los espacios bellos y limpios despiertan el deseo de salir y pasar un buen momento, los espacios feos y contaminados inhiben los deseos de convivencia. Imagen de la izquierda de Elis Antonio Rios en Pixabay <https://pixabay.com/es/photos/basura-consciencia-conciencia-620464/>. Imagen de la derecha: Sasin Tipchai en Pixabay. <https://pixabay.com/es/photos/ni%C3%B1os-r%C3%ADo-el-agua-el-ba%C3%B1o-1822704/>



Pero no todo se reduce a un beneficio económico. Gracias a la belleza de los espacios se conforma y teje la narrativa de la vida, se hacen historias alrededor de los parajes naturales, ¿quiénes no hemos hecho una historia de vida al lado de un

río o del mar? Gracias a los espacios naturales con los que convivimos hacemos nuestra historia. Un río abreva la vida del espíritu, en él se construyen puentes donde nos damos cita los pobladores o los amantes, para ver pasar el río, para proyectar nuestra vida.

De igual manera, el embellecimiento de los espacios naturales contribuye a la elevación de las facultades más elevadas del espíritu. A través del interés por salir a caminar, correr o simplemente salir de paseo frente a un bello paisaje, las personas se disponen a contemplar y serenar su espíritu; actividad esencial para romper con el ciclo de rutina y del trabajo, salir del ruido de la vida cotidiana, respirar los olores de la naturaleza, escuchar el canto del río, admirar la iluminación, la salida de la luna, la puesta del sol y, junto con la contemplación de la naturaleza, vivir plenos del sentido último de la existencia que son los valores más propios de la vida humana: el bien y la belleza, valores esenciales de todo verdadero habitar.

Figura 14. La conservación y limpieza de los ríos propician el embellecimiento del entorno. A la izquierda, imagen de Roman Grac en <https://pixabay.com/es/photos/puente-parque-naturaleza-gree-2767545/> a la derecha, imagen de djedj en <https://pixabay.com/es/photos/canal-r%C3%ADo-puente-bicicleta-%C3%A1rbol-2643627/>



El embellecimiento del paisaje contribuye a la formación de las personas. ¿A dónde ir a pasear y hacer una narrativa de vida si los ríos están contaminados, despiden olores hediondos y envenenan nuestro cuerpo y nos enferman?, ¿cómo poder habitar en la fealdad? Por esto el interés de contribuir con investigaciones, como la que aquí presentamos, de devolverle a la naturaleza y al ser humano la dignidad que les corresponde.

Figura 15. El embellecimiento y limpieza de los espacios naturales contribuye a dar serenidad y paz a quien la contempla. Imagen de Pexels en <https://pixabay.com/es/photos/banco-lago-parque-%C3%A1rea-recreativa-2178847/>



Bibliografía

- Ahumada, J., M. F. (2003). Ciencia, tecnología y sociedad: Algunas reflexiones Documento para la organización de Estados americanos. Recuperado el 18 de Noviembre de 2012, de http://www.science.oas.org/doc/policy/ahumada_cyt03_26_04.pdf.
- Almanza Salgado R. y Méndez Arriaga F. (2019). Unidad combinada para la eliminación de contaminantes y subproductos no biodegradables presentes en agua mediante procesos fotoquímicos y térmicos. Patente-MX-362760.
- CONAGUA. (2020). Resumen del Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/programa-nacional-hidrico-pnh-2020-2024>.
- Development of Technology Readiness Level (TRL). Metrics and Risk Measures. EE.UU. Department of Energy.
- Domínguez Montero L.E., Jiménez Cisneros B.E., Poggi Varaldo H.M (2016). La propiedad intelectual. El tratamiento del agua residual y la posibilidad de crear trabajos en México. Consejo Consultivo de Ciencias. <http://www.cciencias.mx/es/ciencia-y-opinion/item/570-propiedad-intelectual.html>

- Felt, U. (2013). Optimising public understanding of Science and Technology: final report. Wien: Institut für Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsforschung der Universität Wien. Disponible en: <http://www.univie.ac.at/viruss/OPUSReport/>. Acceso en: 22 jun. 2007.
- Franco, M. y Pérez-Bustos, T. (2009). ¿De qué ciencias hablan nuestros materiales de divulgación? *Revista Colombiana de Educación*, Bogotá, n.56, pp. 78-101. 2009.
- Gleeson, T. Wang-Erlandsson L., Zipper S.C., Porkka M., Jaramillo F., Gerten D., Fetzer I., Cornell S.E., Piemontese L., Gordon L.J., Rockström J., Oki T., Sivapalan M., Wada Y., Brauman K.A., Flörke M., Bierkens M.F.P., Lehner B., Keys P., Kumm M., Wagener T., Dadson S., Troy T.J., Steffen W., Falkenmark M., Famiglietti J.S., (2020). The Water Planetary Boundary: Interrogation and Revision. *One Earth*, 2(3), 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.009>.
- Gregory, J. y Miller, S. (1998). Initiatives and activities in the public understanding of science. En: Gregory, Jane; Miller, Steve. *Science in public: communication, culture and credibility*. Nueva York: Plenum Press. p. 220-241.
- HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2014-2015. General Annexes <https://www.conacyt.gob.mx/index.php/el-conacyt/penta>. <https://www.conacyt.gob.mx/index.php/fondo-institucional-de-fomento-regional-para-el-desarrollo-cientifico-tecnologico-y-de-innovacion-fordecyt>. <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/agenda21spchapter35.htm>
- Muñoz, C. (1998). *Revista Banco de México, Comercio exterior*.
- Pérez-Bustos, T. (2010). Los márgenes de la popularización de la ciencia y la tecnología: conexiones feministas en el sur global. Tesis (Doctorado) – Programa Interinstitucional en Educación, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá; Universidad del Valle, Cali; Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Technology Readiness Assessment Guide. U.S. Department of Energy. *Technology Readiness Levels Handbook for Space Applications*. ESA.
- UNESCO, ONU Agua. (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático, París, UNESCO.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París, UNESCO.

Capítulo 2

La apropiación social del conocimiento tecnológico

María Evelinda Santiago Jiménez¹

Introducción

Uno de los mayores retos que la academia tiene es hacer posible que el conocimiento generado a través de la investigación científica —social o tecnológica— llegue a la población urbana o rural. En este sentido, compartir los hallazgos científicos haría posible que las personas, familias y sociedad se apropiaran de conocimiento que tuviera que ver con la solución de sus problemas cotidianos. Yendo aún más lejos, seguramente la ciudadanía beneficiada, al momento de internalizarlo, haría innovaciones, que quizá desde la mirada de los expertos no serían trascendentes, pero sí lo serían para los actores locales. Entonces, se debe compartir el conocimiento a través de un proceso de coinvestigación y un diálogo de saberes. King *et al.* (1996:169) refieren que para iniciar el proceso del diálogo de saberes y la coinvestigación es primordial:

Iniciar con un compromiso que provea reciprocidad inmediata que ayude a mejorar la salud y el bienestar de la gente del bosque. Para hacer esto, requiere que los investigadores pregunten a las personas, con quienes empiezan a trabajar, cuáles son sus necesidades inmediatas².

Así, el proyecto matriz de la investigación puede estar permeado por una serie de soluciones a los problemas cotidianos. De esta forma, los actores locales que harán de interlocutores saltan a la vista, haciendo que el proceso sea menos complejo. Indudablemente, al entablar el diálogo se logra visualizar y comprender los problemas, la resiliencia y las potencialidades que cultivan en la comunidad. Es así que esta propuesta tiene como eje la premisa. Primero hay que reconstruir el proyecto de vida de los actores locales, incrustado en la reconstrucción y conservación de los

¹Instituto Tecnológico de Puebla, mariaevelinda.santiago@itpuebla.edu.mx

²Traducción libre de la autora.

ecosistemas. A todo lo anterior también se le ha denominado transdisciplina, la que, a grandes rasgos, tiene las siguientes características:

- a. es un proceso que permite a los integrantes ir más allá de las fronteras metodológicas de sus propias disciplinas;
- b. está centrada en la solución de un problema que involucra varios problemas dibujados por varios matices;
- c. es un proceso de investigación que tiende a volverse holístico e integral, ya que la solución de un problema, en la práctica, se ha observado que requiere de la interpretación de dos o más disciplinas;
- d. los procesos de innovación están estrechamente relacionados con la complejidad y la incertidumbre que vive la localidad, porque cataliza que las tecnologías modernas sean reinterpretadas acorde al sistema social y ecológico local;
- e. la construcción del conocimiento empírico y básico no recorre los caminos que la ciencia tradicional invoca, sino que se tiene que flexibilizar el proceso al estar inmerso en un diálogo de saberes: disciplinarios y tradicionales;
- f. es un proceso que tiene que ver con una investigación social donde se involucra la colaboración sinérgica entre dos o más disciplinas. Además, existen grandes niveles de integración en el “paquete” de conocimientos disciplinares que están involucrados en el proceso de investigación;
- g. las prácticas investigativas están centradas en un problema, haciéndolo la vértebra; es decir, está por encima de la preocupación metodológica de una disciplina específica.

Es importante esclarecer qué son la multidisciplina, la interdisciplina y la transdisciplina. La multidisciplina reúne a expertos alrededor de un problema, cada disciplina busca una solución al mismo; pero no se cataliza un diálogo para construir una solución holística. Cada área disciplinaria involucrada soluciona el problema desde sus marcos teóricos y metodológicos. Por otro lado, durante la interdisciplina también se reúnen los expertos para resolver un problema, pero dialogan entre sí las disciplinas diferentes, hasta lograr una solución integral. Lo interesante de este proceso es que a partir de este tipo de trabajos han nacido subdisciplinas que definen nuevos marcos teóricos y metodológicos. Ejemplos de estas subdisciplinas son: el derecho ambiental, la bioética, la mecatrónica y la geografía cultural, por mencionar algunas. Por su parte, la transdisciplina no solo reúne a expertos de diferentes disciplinas, sino que acopia saberes no reconocidos como científicos. En el proceso transdisciplinario se acude a la integración de diferentes disciplinas, pero también es vitalmente importante que los actores locales participen de manera activa en la generación de soluciones. Esto, a través de un diálogo de

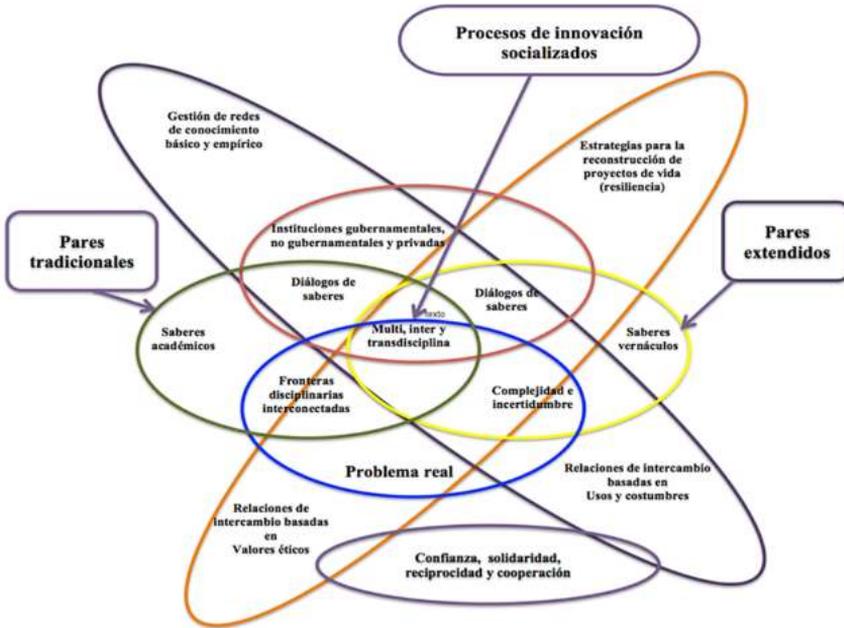
saberes y la co-investigación, donde el saber científico es tan importante como el conocimiento de las personas que viven la incertidumbre y complejidad debido a diferentes razones ambientales y sociales.

La Imagen 1 representa la interacción entre actores sociales de diferente índole, así como los valores éticos —solidaridad, confianza, cooperación y reciprocidad— necesarios para que la transdisciplina sea posible. Los autores Funtowitz y Ravetz (2000) hablan de la inclusión de conocimientos que no son considerados expertos y que son acumulados por las personas a través de experiencias que viven en lugares impactados; o bien, es información que forma parte de su cultura. En cualquiera de los casos, el conocimiento acumulado no solamente es útil para delinear con más detalle el problema, sino que cataliza procesos de innovación al dialogar horizontalmente las situaciones apremiantes. A los actores sociales con quienes se entablan diálogos en búsqueda de soluciones Funtowitz y Ravetz (2000) los llaman pares extendidos porque aportan, a la definición del problema y su solución, saberes vernáculos que los pares tradicionales (expertos científicos) no podrían obtener dentro de laboratorios, talleres y/o en sus espacios de trabajo. Sobre el análisis de la realidad y del conocimiento, Berger y Luckmann (2003[1968]) reflexionan y dicen que:

[Un análisis de conocimiento y realidad] deberá tratar no sólo las variaciones empíricas del “conocimiento” en las sociedades humanas, sino también los procesos por los que cualquier cuerpo de “conocimiento” llega a quedar establecido socialmente como “realidad” (2003 [1968]:13).

Es decir, sobreponer una realidad sobre otra borraría los procesos a los que están sujetos los conocimientos que construyen una realidad dentro de una sociedad. Es por eso que el diálogo de saberes es vital, porque es un eje que tiene inmersa la premisa de que la realidad no se puede imaginar, sino que la realidad debe conocerse y dialogarse para comprender e internalizar sus matices. Los impactos sociales y ecológicos provocan que una sociedad determinada construya nuevos conocimientos y con ellos una nueva realidad. En algunos casos, las sociedades locales logran conservar su realidad a través de la práctica de su conocimiento. Para los procesos transdisciplinarios es importante conocer cómo algunas de esas sociedades conservan su realidad.

Imagen 1. La inter, multi y transdisciplina



Fuente: elaboración propia.

Este documento presenta la experiencia transdisciplinaria basada en el proyecto “Estudio integral de la franja tunera Las Villanuevas: sociedad, tecnología y medio ambiente”, donde la transdisciplina se construye de manera paulatina a través de un diálogo directo con los actores locales. Es a través de este diálogo que conoce su realidad y, con ella, sus potencialidades. Estas últimas, se fueron develando a medida que las conversaciones sucedían. En esta experiencia concurren dos actores sociales, uno materializado en la comunidad de San Sebastián Villanueva, Municipio de Acatzingo, Puebla y el otro en el Instituto Tecnológico de Puebla. El Foro Consultivo para la Ciencia y la Tecnología publica el reporte para la Evaluación de Proyectos multi/inter y transdisciplinarios, llegando a definiciones sobre lo que es la disciplina, la multidisciplinaria, la interdisciplina y la transdisciplina (ver Imagen 2). Como puede observarse, la multidisciplinaria sí es una investigación colaborativa, pero no es interactiva. Cada investigador hace su trabajo y, cuando lo termina, presenta su reporte y se toma un sabático del proyecto donde participó. Por el contrario, en los proyectos interdisciplinarios el compromiso no termina cuando un grupo de investigadores de una disciplina determinada acaba su parte, sino que comparte sus hallazgos y busca que sus fronteras metodológicas sean flexibles para crear solu-

ciones integrales. Por su parte, en los procesos transdisciplinarios, no sólo se trabaja de manera integral, sino que existe la apertura para incluir los saberes no expertos porque guardan información que en los laboratorios no es posible encontrar.

Imagen 2. Definiciones de proyectos multi, inter y transdisciplinarios



Fuente: Foro Consultivo de Ciencia y Tecnología (2014).

Estudio integral de la franja tunera Las Villanuevas: sociedad, tecnología y medio ambiente

San Sebastián Villanueva es una comunidad donde la vida gira alrededor de la producción del nopal verdura y nopal tuna. Estos cultivos son el medio que sustenta la economía familiar y comunal. El paisaje de la localidad está surcado por las nopaleras, tanto en terrenos planos como en las colinas. A la región donde se ubica San Sebastián se le denomina Las Villanuevas, título que da nombre al tipo de tuna que se cultiva: "tuna Villanueva". La franja tunera de las Villanuevas está ubicada al norte, con San Hipólito Soltepec; al sur, con San Pablo de las tunas; al sureste, con Santa Úrsula, y al oeste, con San Sebastián Teteles. De cómo se cambió del policultivo al monocultivo, los pobladores cuentan que en 1940 sólo dos personas cultivaban la tuna llamada Villanueva en San Sebastián, pues la comunidad se dedicaba principalmente a la siembra de maíz y granos, como frijoles y habas, entre otros. A

raíz de que los comuneros se dieron cuenta de que para la producción de tuna y nopal se requiere menos agua, menos abono y se obtienen más ganancias, optaron por cambiar sus cultivos por monocultivos de Opuntia. Cambiar la manera de cultivar fue una estrategia para combatir la pobreza y, al dar resultado, acondicionaron cada vez más áreas de tierra para monocultivo. Con la demanda del producto tuvieron que deforestar gran parte del bosque que rodeaba a la región. Para incrementar el volumen, los agricultores se iniciaron en el empleo de fertilizantes y plaguicidas; ocasionando un desequilibrio ecológico y la disminución de muchas especies. A medida que la demanda de la tuna y el nopal incrementaba, el uso de estos químicos aumentó, especialmente durante la temporada alta. La realidad de la comunidad cambió después de años; el cáncer apareció en las familias, niños y adultos. De un momento a otro las personas se enfermaban, las personas no lograban comprender la razón, mientras seguían utilizando fertilizantes y plaguicidas en sus cultivos.

En búsqueda de ayuda

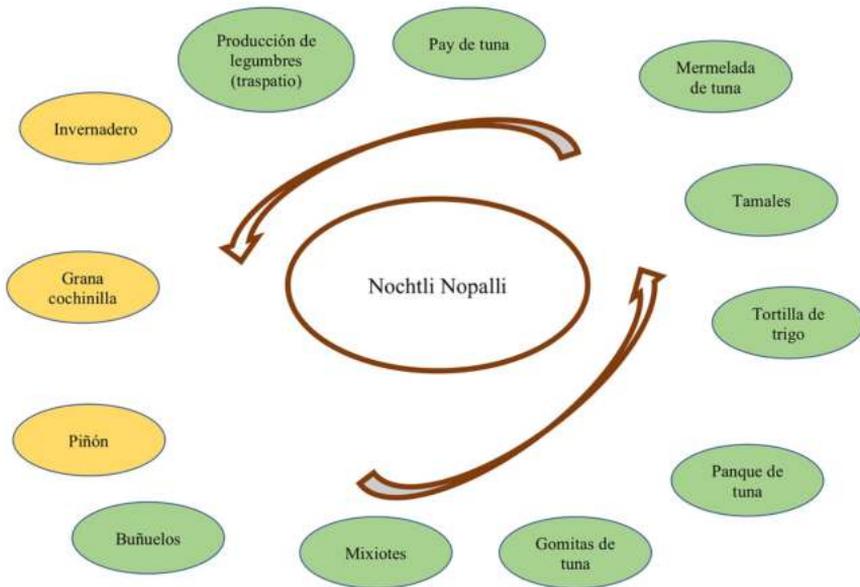
La Sociedad Productiva para el desarrollo de Villanueva (SOPRODEVI) nace en 2004 con el objetivo de buscar estrategias que contrarresten la demanda fluctuante que existe en el nopal y la tuna. La cooperativa reconoce la necesidad de darle un valor agregado a sus productos y dejar de ofrecerlos en fresco. Al mismo tiempo, está consciente que se ha diezmado la salud de los ecosistemas y la salud de las personas por el uso de químicos. Con la intención de resolver el problema en el que se encuentra la comunidad empiezan una búsqueda de alternativas. Esta acción los lleva a vincularse con la Fundación ADO y después con el Instituto Tecnológico de Puebla. En 2006 SOPRODEVI inicia una alianza con el Instituto Tecnológico de Puebla. Con el afán de lograr una vinculación transparente, se firma un acuerdo de colaboración. La unión entre la cooperativa y la Institución de Educación tiene la misión de construir proyectos de beneficio mutuo, con el interés de modificar, para una parte, el aparente irremediable destino a la pobreza, la migración y el deterioro ambiental. Para la contraparte, dar a los estudiantes la oportunidad de amalgamar sus conocimientos con los de la localidad y obtener un grado académico. En este sentido, se reconoce que, a través del encuentro entre conocimiento académico y conocimiento vernáculo, se logra diseñar, construir y poner en marcha estrategias a la medida de la realidad de las localidades. Por su parte, los estudiantes lograron internalizar la realidad de la comunidad, reconociendo que existe un entorno ético y político que ella practica. La relación dio lugar a que los actores locales generaran sus propias estrategias, recursos de subsistencia y reproducción social, sin menoscabo de su integridad familiar, comunitaria e identidad.

Acciones colectivas

Es relevante hacer notar el impacto positivo de las acciones colectivas, las cuales son un elemento que logra transformar la manera como los actores locales toman decisiones. Dicho sea de paso, estas se convierten, muchas veces, en acciones políticas que logran reconstruir sus proyectos de vida. No obstante, en otras ocasiones se diluyen porque el sistema estructural es mucho más difícil de superar debido a todas las condicionantes que se imponen para acceder a recursos de diferente índole. En este sentido, en 2008 la cooperativa se diluye. Una de las razones principales es la migración hacia el “Norte” con la esperanza de poder mejorar sus destinos. No obstante, algunos de sus integrantes deciden mantener la llama viva. En este sentido, a partir de la organización que se cerró, nació otra cooperativa, llamada Nochtli Nopalli; conformada, mayormente por padres, hermanos, esposos, amigos y nietos. Esta nueva agrupación toma la iniciativa de utilizar componentes orgánicos para la producción de tuna y nopal. Además, se acerca al Instituto Tecnológico de Puebla para recuperar la alianza creada con SOPRODEVI, con el cual inicia un diálogo para construir un plan que tenga como vertebra sus potencialidades. Es decir, todas las habilidades que un colectivo realiza. Estas pueden estar inmersas en su riqueza cultural. Las potencialidades son acciones que están ubicadas en lo cotidiano y a las cuales, regularmente, los actores sociales no le dan un valor más allá de su uso. En el esquema de abajo (Imagen 3) se puede apreciar el recuento de potencialidades que Nochtli Nopalli logró identificar. Cada potencialidad identificada significa una actividad cotidiana que puede ser convertida en una estrategia para lograr intercambios justos con el resto de la sociedad. Por ejemplo, la producción de productos orgánicos que el resto de la sociedad pagaría a precios justos.

Los sistemas productivos se definieron a través de reuniones continuas. De esta manera, los requerimientos de cada potencialidad se fueron convirtiendo en procesos sistematizados, fundamentados en herramientas de la ingeniería industrial y la biología. Una de esas potencialidades es la grana cochinilla. Para la siembra y cosecha de la grana se diseñó y construyó un invernadero con ciertas características, como que pudiera ser manipulado por cualquier integrante de la cooperativa. El invernadero es una especie de rompecabezas que se ensambla y desensambla de manera sencilla, con la finalidad de que pueda ser trasladado de un lugar a otro. Esto obedece a las características del clima de San Sebastián Villanueva, Acatzingo, donde existen túneles de viento que pueden levantar cosas o artefactos que no estén bien colocados. De esta manera, el invernadero se creó con la posibilidad de movilizarse a lugares donde el viento no lo derrumbara (ver Fotografía 1).

Imagen 3. Potencialidades de Nochtli Nopalli



Fuente: Elaboración propia a partir de la gráfica de Ramírez Espinosa (2014).

Fotografía 1. Invernadero



Fuente: Ramírez Espinosa (2014).

Es importante mencionar que el artefacto no fue regalado a Nochtli Nopalli, sino que se entregó en comodato. Es decir, es un aparato que está en calidad de resguardo por la cooperativa, con el objetivo de que lo utilice para fines experimentales que estén basados en procesos amigables con la naturaleza. Para la definición del proceso de la siembra de la grana cochinilla se utilizaron las herramientas *lean manufacturing* (manufactura esbelta) y ergonomía. Se diseñaron y construyeron artefactos con materiales sencillos y simples como puede observarse en la Fotografía 2. Se les capacitó para utilizarlas y volverlas a hacer si llegaran a romperse.

Fotografía 2. Cosecha de la grana cochinilla



Fuente: Ramírez Espinosa (2014).

Para la organización y control del proceso de la grana cochinilla se diseñaron tarjetas *kamban*, como puede observarse en la Fotografía 3.

Al inicio del proceso de cosecha de la grana cochinilla no se obtuvo la cantidad que se esperaba, pero a medida que pasó el tiempo la producción se incrementó. El problema llegó cuando se quiso comercializar. El mercado está trabajado por grupos que no permiten la entrada de otros productores. Por ello, Nochtli Nopalli tuvo que mirar hacia otras potencialidades más viables.

Fotografía 3. Sistema productivo tradicional organizado a través de manufactura esbelta



Fuente: Ramírez Espinosa (2014).

Fotografía 4. Grana cochinilla



Fuente: Ramírez Espinosa (2014).

Es importante hacer hincapié en que la creación de sistemas productivos tradicionales, robustos, fue posible gracias a la participación de los actores sociales en la definición de los detalles para el diseño y puesta en marcha de cada uno de ellos. Cabe mencionar que, para los comuneros y comuneras, las actividades definidas como potencialidades no tenían un valor de cambio, pero sí un valor de uso, específicamente porque son parte de sus vidas cotidianas. El trabajo comunitario e institución de educación hace posible la participación de estudiantes de diferentes niveles para que no sólo miren hacia el mundo empresarial como referencia de aplicación de sus conocimientos, sino que también tomen muy en cuenta que existe una parte de la sociedad que requiere conocimiento especializado. Para este caso, la participación estuvo a cargo de estudiantes de la maestría en Ingeniería, quienes aprendieron que no sólo se puede aplicar los conocimientos de la ingeniería industrial a problemas de empresas y organizaciones del mundo globalizado, sino que es posible llevarlas al mundo rural. En términos de conocimiento transdisciplinario, se construyó un diagrama de proceso que representa cómo se realizó el intercambio entre saberes tradicionales y tecnocientíficos. El diagrama de proceso representa momentos en los que la organización realiza las actividades sin la intervención de los actores externos (nodo color verde). El diálogo de saberes está representado con la conjunción de los cuatro nodos, como sucede en las operaciones 2, 13 y en la inspección 6. Para estas acciones de retroalimentación transdisciplinaria se realizaban reuniones *in situ* para analizar y reflexionar cómo amalgamar ambos conocimientos y que fueran útiles en la práctica.

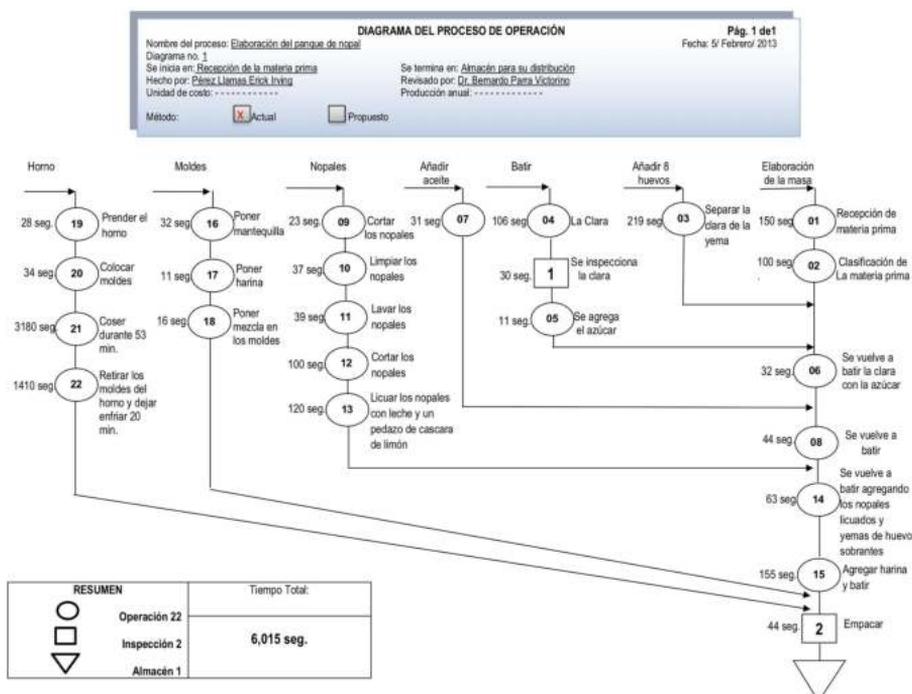
Imagen 4. Diagrama de saberes



Fuente: Ramírez Espinosa (2014).

Desafortunadamente, el proyecto basado en la grana cochinilla no fructificó porque la calidad de la tintura no alcanzó los estándares establecidos en el mercado. No obstante, esta experiencia llevó a incursionar en otras de las “potencialidades” encontradas, una de ellas fue la elaboración del panqué y madalenas de nopal (ver la Imagen 3). Algo relevante fue la disponibilidad de la cooperativa para internalizar el conocimiento externo, sin que eso minara su conocimiento sobre la tuna y el nopal. El aterrizaje de esta otra potencialidad fue posible gracias al conocimiento de una de las estudiantes sobre la elaboración de panqués, de esta manera se logró crear el panqué de tuna. En el afán de que no se incurriera en procesos desordenados se hizo un análisis del proceso productivo. Este quedó representado por un diagrama del proceso de operación (Imagen 5). El objetivo de la utilización de herramientas ingenieriles no solamente significa la sistematización de los procesos, sino también organizar el centro de trabajo, que, dicho sea de paso, es la cocina familiar. Es decir, no es una nave industrial, sino un espacio colectivo donde se produce y se convive.

Imagen 5. Diagrama del proceso de operación



Fuente: Pérez Llamas (2015).

Acorde al diseño del proceso, la cocina se reordenó, pero no fue un reordenamiento radical y drástico, sino que ese espacio cumplió ambas funciones: cocina para la convivencia familiar, compartir los alimentos y espacio productivo. Las modificaciones, de acuerdo con el diagrama, se hicieron con la participación de los integrantes de la organización Nochtli Nopalli. Al mismo tiempo que apuntaban sus requerimientos familiares, aceptaron las sugerencias que les comentaron. Es importante hacer ver que cuando algo no concordaba con su forma de vivir dentro de la cocina lo manifestaban y se insertaba en la logística del proceso. En este sentido, las herramientas ingenieriles han sido utilizadas para diseñar procesos a la medida. Estos, han sido dialogados tantas veces como fue necesario.

Fotografía 5. Madalenas rumbo al horno



Fuente: Morales (2015).

Después de tres años de alianza entre Nochtli Nopalli y el Instituto Tecnológico de Puebla se logró que varias de las potencialidades se convirtieran en productos útiles para hacer intercambios justos con el resto de la sociedad (ver Fotografía 7). La definición de las potencialidades propició la diversificación de la economía de Nochtli Nopalli. Consecuentemente se catalizó un proceso de reconstrucción de su proyecto de vida.

Fotografía 6. Madalenas listas



Fuente: Morales (2015).

Después de tres años de alianza entre Nochtli Nopalli y el Instituto Tecnológico de Puebla se logró que varias de las potencialidades se convirtieran en productos útiles para hacer intercambios justos con el resto de la sociedad (ver Fotografía 7). La definición de las potencialidades propició la diversificación de la economía de Nochtli Nopalli. Consecuentemente se catalizó un proceso de reconstrucción de su proyecto de vida.

Fotografía 7. Venta de productos a base de tuna y nopal



Fuente: Nochtli Nopalli.

El conocimiento cotidiano o tradicional en la construcción de conocimiento

La crisis ambiental y social se ha convertido en una realidad que poco a poco deja de ser una ficción. En este sentido, existen personas que están buscando alternativas que disminuyan no sólo las crisis, sino también los efectos que ellas tienen en la sociedad y la naturaleza. Es bien cierto que el impacto sobre los ecosistemas no es un hecho que apareciera de un momento a otro, sino que ha tenido que ocurrir cientos de años, desde quizá la más grande de las expoliaciones que vivió el planeta: el llamado descubrimiento del continente americano. Teresa Kwiatkowska (2012:47) expresa que:

Si bien la preocupación por los efectos nocivos de la actividad humana en el mundo natural no se limita a la época moderna, es sólo en las últimas décadas que se ha reconocido ampliamente la gravedad de los problemas ambientales, iniciándose así la búsqueda de soluciones posibles.

Lo anterior lleva a afirmar que, indudablemente, las perturbaciones ecológicas del ambiente sólo son la parte visible de un mal más profundo. Este mal está fincado en los estilos de vida que practican un número reducido, pero impactante, de individuos de la especie humana. Contrarrestar esa tendencia es complejo porque la sociedad está subida en un tren bala que, por la velocidad, presenta la realidad borrosa. El destino: modernidad e industrialización, cubiertas de verde por el desarrollo sustentable. Esta realidad borrosa requiere ser interpretada, analizada, escudriñada desde muchos ángulos, ya no es posible hacerlo desde un solo espacio disciplinario. Enfatizando que la complejidad e incertidumbre presentes requieren, con urgencia, no sólo la concurrencia de un conjunto de disciplinas disímiles, sino también de todos aquellos conocimientos que la humanidad alberga dentro de sus actos cotidianos. Como se mencionó, a esto se le ha llamado transdisciplina. De las características ya mencionadas con anterioridad, de relevancia son:

- a. su capacidad para catalizar amalgamas entre las fronteras metodológicas de las disciplinas participantes;
- b. su interés por solucionar problemas complejos;
- c. su tendencia gira en torno hacia los procedimientos integrales, ya que la solución de un problema, en la práctica, se ha observado que requiere de la interpretación de dos o más disciplinas;
- d. su desarrollo investigativo resulta en investigaciones que reinterpretan a la tecnociencia moderna acorde al sistema social y ecológico del territorio en cuestión convirtiéndose en una plataforma para la construcción de diálogos de saberes;

- e. finalmente, al estar basada en un cuerpo interdisciplinario, tiene la potencialidad de crear subdisciplinas que respondan a los nuevos retos sociales y ecológicos, ejemplos son: mecatrónica, derecho ambiental, bioética, biotecnología, bioeconomía, geografía económica, entre otras.

Leavy (2011) explica que la investigación transdisciplinaria busca responder a las necesidades de la sociedad. De hecho, la transdisciplina tiene que ver con una investigación social que involucra colaboración sinérgica entre dos o más disciplinas, donde existen grandes niveles de integración en el “paquete” de conocimientos disciplinares que están involucrados en el proceso de investigación. Aún más, las prácticas investigativas que se realizan están centradas en un problema, haciéndolo la vértebra. Es decir, está por encima de la preocupación metodológica de una disciplina específica. Es importante hacer hincapié en que la transdisciplina es posible a través de la interacción metodológica. Pero que, al mismo tiempo, requiere innovación, creatividad y flexibilidad para responder adecuadamente a los problemas sociales y no al revés. Es decir, es el desarrollo de ciencia con la gente y no para la gente (Funtowicz y Ravetz, 2003). Este tipo de ciencia es ciencia que, incursionando en las reflexiones expresadas por Nuccio Ordine (2013) en su libro *La utilidad de lo inútil* exige nacer y que no nace para darle glorias a los investigadores; sino que, aunque se pudiera considerar ciencia “inútil” por no redituar beneficios económicos a los mismos de siempre, debido a la crisis ambiental y social, se convierte en urgente. Además, se le demanda vincularse con la gente, escuchar a la gente, investigar con la gente y no para la gente. La ciencia tecnológica y la ciencia social están en una disyuntiva: seguir investigando para un mercado global, expoliador de la naturaleza o investigar para crear soluciones para los problemas socioambientales actuales y futuros. La transdisciplina es un ejemplo de cómo se construye ciencia con la gente, en el afán de que, a través de un acompañamiento respetuoso, se logre reconstruir su proyecto de vida. Esto último es posible a medida en que los actores locales y sus organizaciones aprendan a relacionarse con otros sujetos y otras organizaciones. Es decir, la reconstrucción de proyectos de vida es un proceso definido por la gestión de un sistema de relaciones, donde existe un intercambio de conocimientos de manera horizontal entre los actores locales y los expertos. Uno de los resultados más importantes de los procesos transdisciplinarios tiene que ver con el desarrollo de capacidades personales a través de las relaciones que se gestan durante el diálogo de saberes que, además, propician el control sobre las propias condiciones de vida.

Conclusiones

La ciencia y la tecnología, regularmente, se han realizado sin la participación de la ciudadanía porque los saberes de la sociedad son considerados como opiniones sin valor. No obstante, la crisis ambiental y social ha hecho que algunos científicos —desafortunadamente no todos— inicien un proceso de valoración de esos saberes denostados como ingenuos o inservibles. En este documento se presenta cómo la alianza entre una organización campesina y una institución de educación superior hace posible que las “potencialidades” —actividades cotidianas— se conviertan en motores para la reconstrucción de proyectos de vida de manera transdisciplinaria, dentro de un espacio amigable con la naturaleza. Estos cambios repercuten positivamente, no sólo en la vida de las personas, en términos de salud; sino que también reconstruyen la calidad ambiental, al quitar presión a los ecosistemas, consecuencia de la disminución o erradicación de la emisión de residuos de todo tipo.

Finalmente, tiene que ver con la creación de nuevos marcos conceptuales. En este sentido, estos procesos aportan nuevas ideas y métodos. Por su parte, lo interdisciplinario está relacionado con el hecho de abrir las fronteras metodológicas para que puedan integrarse otros conocimientos y dar pie a una amalgama que logre interpretar y proponer soluciones holísticas. Por su parte, multidisciplinario significa poner conocimiento junto a otro sin interposición de ningún nexo o elemento de relación; en otras palabras, es la combinación de varias disciplinas con el objetivo de analizar un mismo problema sin llegar a relacionarse de manera íntima.

Bibliografía

- Berger, Peter L. y Luckmann, T. (2003 [1968]). *La construcción social de la realidad*. Argentina: Amorrortu Editores.
- Foro Consultivo de Ciencia y Tecnología. (2014). *Evaluación de proyectos multi, inter y transdisciplinarios*. México: Foro Consultivo de Ciencia y Tecnología.
- Funtowicz, S. y Ravetz, J. (2000). *La ciencia posnormal. Ciencia con la gente*. Barcelona: Icaria. Antrazyt.
- Kwiatkowska, T. (2012). Aldo Leopold y la Ética de la Tierra. *Euphyia. Revista de filosofía*. Volumen VI. Número 11. Julio-Diciembre 2012, pp. 47-63
- Leavy, P. (2011) *Essentials of Transdisciplinary Research: Using Problem-Centered Methodologies (Qualitative Essentials)*. Left Coast Press. Edición de Kindle.

- López, F. (2016). Así contaminamos el agua en nuestra casa, y así podemos evitarlo. *Iagua*. Artículo electrónico. Visitado 12 de noviembre 2020. <https://www.iagua.es/blogs/francisco-jose-lopez-fra/asi-contaminamos-agua-nuestra-casa-y-asi-podemos-evitarlo>
- Morales, J. (2015). Reingeniería de un Modelo de Negocios Sustentable para Nochtli Nopalli S.P.R De R.L. de San Sebastián Villanueva, Acatzingo, Puebla. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Puebla.
- Ordine, N. (2013). *La utilidad de lo inútil. Manifiesto*. Akhenaton. Edición de ePub base r1.0
- Pérez, E. (2015) Sistematización Productiva Para El Panque De Nopal De La Sociedad Productos Sustentables De Tuna Y Nopal S.P.R. De R.L. En San Sebastián Villanueva, Acatzingo, Puebla. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Puebla.
- Ramírez, H. (2014) Diseño De Proceso Productivo Para La Grana Cochinilla Como Estrategia Productiva, Alternativa Y Sustentable, Para La Organización Productos Sustentables Tuna Y Nopal S.P.R. De R.L. De San Sebastián Villanueva, Puebla. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Puebla.

Capítulo 3

Técnicas analíticas basadas en biosensores para la determinación de analitos en aguas contaminadas

Raúl J. Delgado Macuil¹
Marlon Rojas López¹
Abdu Orduña Díaz¹
Valentín López Gayou¹
Abel I. Balbin Tamayo²
Laura S. López Rizo³
Madelin Blanco de Armas³
Hideko Yamanaka⁴
Ana Margarita Esteva Guasa²

Introducción

El agua es uno de los más preciados recursos naturales, su disponibilidad se encuentra actualmente comprometida por el exceso de contaminación que han generado las actividades humanas (Eltzov, E. *et al.* 2015; Gosset, A. *et al.* 2016). La determinación de la contaminación en los cuerpos de agua —aguas residuales, ríos, arroyos, aguas subterráneas y entornos marinos— (USEPA, 1995) es muy compleja debido al tipo y volumen de contaminantes que se pueden encontrar en ellas (Schwarzenbach R.P., 2010; WHO, 2014; Carr, G.M. y Neary J.P., 2018). La contaminación de estos cuerpos de agua es resultado de la liberación de contaminantes en el suelo o medio ambiente, una vez que los contaminantes

¹Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional, Laboratorio de Nanobiotecnología. Carretera Estatal Santa Inés Tecuexcomac-Tepetitla km. 1.5, C.P. 90700, Tepetitla de Lardizabal Tlaxcala, México. Direcciones electrónicas: rdelgadom@ipn.mx, mrojasl@ipn.mx, valgayou@hotmail.com

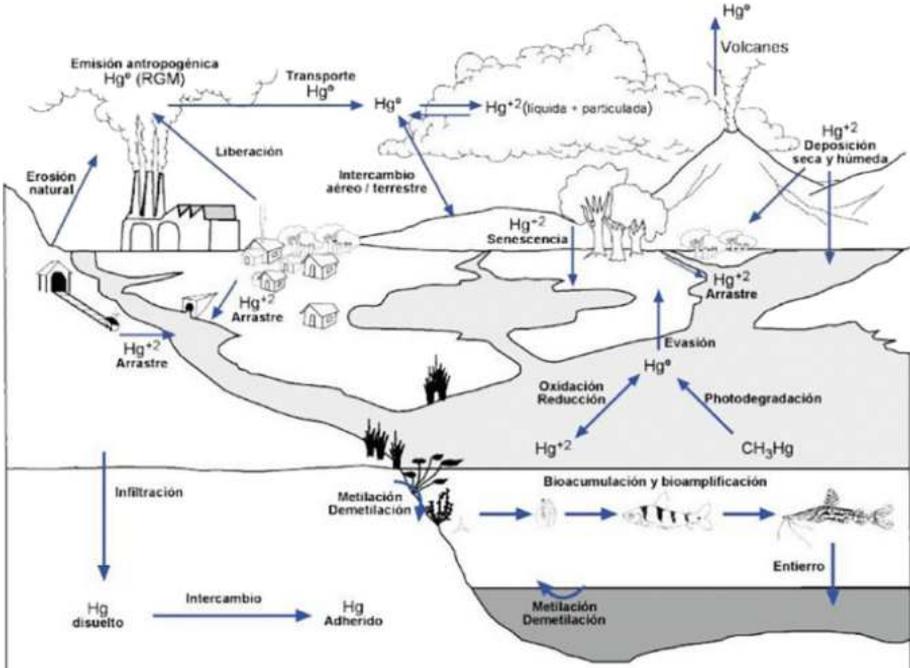
²Departamento de Química Analítica. Facultad de Química. Universidad de La Habana. Dirección electrónica: ibrahim@fq.uh.cu

³Laboratorio de Investigaciones del Sida del Centro de Investigaciones Científicas de la Defensa Civil (LISIDA).

⁴Universidad Estatal Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.

son liberados ellos encuentran su camino hacia las aguas superficiales o mantos acuíferos, de acuerdo a diversas propiedades biológicas, físicas o químicas. Procesos de difusión, dispersión, adsorción o velocidad de movimiento facilitan la propagación de los contaminantes. La contaminación del agua se puede definir como la acumulación de una o varias sustancias ajenas al agua, que genera un grave daño en la vida de los seres vivos que cohabitan alrededor de ella (animales, plantas y por supuesto personas) (Cornish G. *et al.* 1999; Henze M. *et al.* 2008; Brown A. y Matlock M.D., 2011). Sin embargo, por el mismo proceso hidrológico del agua, los contaminantes pueden generar una inmisión o presencia en los recursos naturales, en otros cuerpos de agua, el aire o el suelo y, de esta manera, pasar por cualquiera de las acciones naturales hacia los seres vivos o materiales con los que se encuentran en contacto. Como muestra representativa, en la Figura 1 se presenta el transporte de un solo contaminante, el mercurio, el cual es liberado y, por procesos de intercambio, deposición, arrastre, transporte, procesos químicos del tipo óxido/reducción, foto degradación, infiltración, metilación, o senescencia, puede ser depositado en cualquier superficie del planeta (líquida, sólida o gaseosa).

Figura 1. Proceso de presencia del mercurio en la superficie del planeta



Existen una gran variedad de contaminantes, sin embargo, estos se pueden clasificar en tres tipos:

Físicos: materiales sólidos o en suspensión que limitan el paso de luz hacia los cuerpos de agua.

Químicos: los cuales pueden ser de origen orgánico e inorgánico. Entre los orgánicos se encuentran los compuestos orgánicos persistentes, plaguicidas disolventes producto de las actividades industriales, entre otros. Entre los inorgánicos se encuentran los detergentes y metales pesados, principalmente. Recientemente se ha generado una nueva clasificación a los contaminantes químicos, llamados *emergentes*, entre los cuales se encuentra los antibióticos, los fármacos y las drogas.

Biológicos: entre los cuales se encuentran los microorganismos patógenos como bacterias, protistas, helmintos y virus, donde la población de más alto riesgo son los niños y personas mayores.

Los químicos y los biológicos pueden ser bioacumulables y, en términos de afectaciones a la salud, se pueden clasificar en: contaminación por microorganismos, contaminación por químicos inorgánicos y contaminación por químicos orgánicos. Sin importar su clasificación, cualquiera de estos contaminantes, de manera directa o indirecta, pueden causar efectos adversos a la salud; por ejemplo, la interrupción del sistema endocrino, inducción de toxicidad o genotoxicidad y efectos cancerígenos (Korostynska O. *et al.* 2013).

Por lo anterior, el monitoreo de la calidad del agua se ha convertido en una demanda mundial, no solo para conocer la seguridad hídrica de las naciones, sino para poder establecer las acciones necesarias para el manejo de la contaminación (Dixon, W. y Chiswell, B. 1996). Actualmente existen una gran variedad de métodos para determinar la calidad del agua, los cuales mayormente se encuentran en laboratorios de pruebas, lejos de las zonas afectadas. Algunos de estos métodos se basan en técnicas de espectrofotometría de absorción o de cromatografía (Wang J., 1985; Rubinson K.A., 2004; Van Geen, A. *et al.* 2005; Wang J. 2006; Brindha, K. *et al.* 2011; Safarzadeh-Amiri, A. *et al.* 2011). Los kits de campo ofrecen una buena alternativa para el monitoreo en el sitio; sin embargo, la mayoría son para análisis básicos como temperatura, DQO, DBO, pH. Considerando la necesidad de realizar grandes volúmenes de monitoreo los kits se vuelven imprácticos e incosteables (Rahman, M.M. *et al.* 2002; Awuah, E., 2009; George, C.M., 2012).

Es claro que, debido a la diversidad de los contaminantes que se encuentran en los cuerpos de agua y por lo anteriormente expuesto, el que actualmente muchos grupos para la investigación han dedicado esfuerzos y tiempo en desarrollar diversas metodologías para la determinación de los principales contaminantes en los cuerpos de agua. Muchas de estas tecnologías se basan en la generación de sensores y/o biosensores, ya que estos sistemas de determinación modernos han generado grandes perspectivas para el monitoreo en sitio y para el manejo de grandes volúmenes de muestras. Los biosensores, debido a su simplicidad y selectividad, resultan muy prometedores para el control de la contaminación ambiental (Ntuhuga, J. N., 2006; Biswas, P. *et al.* 2017). Un biosensor es un dispositivo analítico que consiste en un elemento de reconocimiento biológico (ERB) inmovilizado en una matriz o soporte (transductor), el cual convertirá la señal bioquímica producida, por la interacción del ERB con el analito, en una señal detectable y hasta cuantificable. Los biosensores que han tenido un mayor desarrollo están basados en sistemas de transducción ópticos y electroquímicos.

En este capítulo se presentan los avances logrados en el grupo de trabajo multinacional, para el desarrollo de sistemas biosensor, para la determinación de pesticidas, metales pesados, virus y microorganismos patógenos.

Pesticidas (endosulfán)

Para la determinación de pesticidas se han desarrollaron sistemas biosensor electroquímicos y ópticos, basados en procesos biocatalíticos (utilizando enzimas) o de bioafinidad (utilizando anticuerpos o ácidos nucleicos), aunque actualmente se busca aprovechar las ventajas de la nanotecnología, la aplicación de materiales a escala nueve órdenes de magnitud menor a un metro, principalmente con nanopartículas metálicas como cobre, zinc, fierro, plata y oro; y las derivadas del carbono (Lira, R. *et al.* 2018; Royano, S., 2020). Los pesticidas son contaminantes orgánicos producto de las actividades agroindustriales. Aunque su uso ya debería estar limitado u eliminado, su presencia en los cuerpos de agua significa un grave peligro para la salud de los seres vivos.

Desarrollo experimental

Reactivos. Tetraclorato de oro (HAuCl_4) al 99.99% (Sigma Aldrich), citrato de sodio ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$) (J. T. Baker), cloruro de sodio NaCl (Meyer), Lucigenina (LG) (Sigma Aldrich).

Síntesis de nanopartículas de oro (AuNPs). Se empleó el método de reducción química (Kelly *et al.* 2003; Kimling *et al.* 2006) usando tetraclorato de oro como

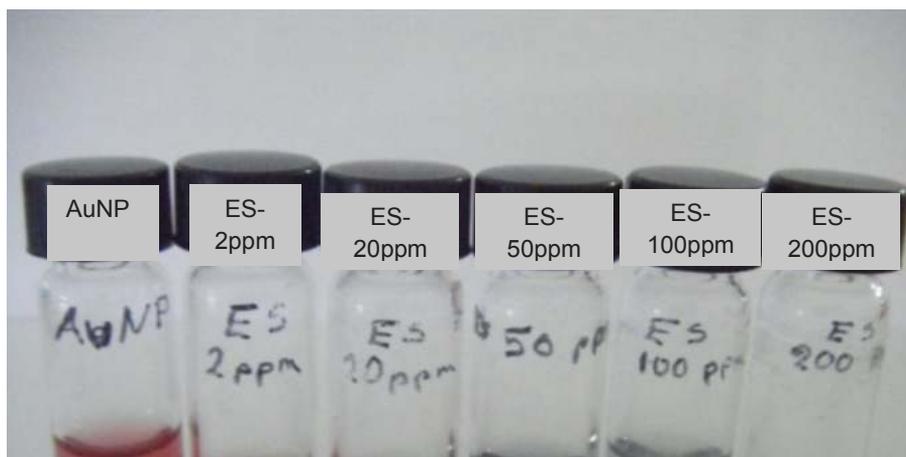
agente precursor y citrato de sodio como agente reductor. Se preparó tetraclorato de oro en solución al 4% y se agregó a 200 ml de agua desionizada y se dejó en ebullición y agitación magnética. Poco antes de que iniciara la ebullición se adicionó citrato de sodio al 1%. Después de 30 minutos la solución pasó de incolora a un color rojo rubí, el cual es indicativo de la presencia de nanopartículas de oro (AuNP).

Preparación de soluciones de endosulfán (ES) y AuNP-ES. Una vez sintetizadas las nanopartículas de oro AuNPs, se prepararon soluciones coloidales de AuNP a las cuales se les agregaron diferentes concentraciones de ES, para quedar finalmente a concentraciones de: 2, 20, 50, 100 y 200 ppm. Estas se dejaron reaccionar durante varios intervalos de tiempo (0, 9 y 21 h).

Resultados y discusión

Las soluciones coloidales de AuNP —a las cuales se les agregaron diferentes concentraciones de ES, para quedar finalmente a: 2, 20, 50, 100 y 200 ppm— mostraron un cambio de coloración (Nair *et al.* 2003, Yu *et al.* 2008) dependiendo de la concentración de ES presente. Empezando por la solución control (AuNP) que tiene un color rojo rubí, posteriormente observando una degradación de este último color transformándose en gris azulado y finalmente en incoloro para concentraciones de 200 ppm (Figura 2).

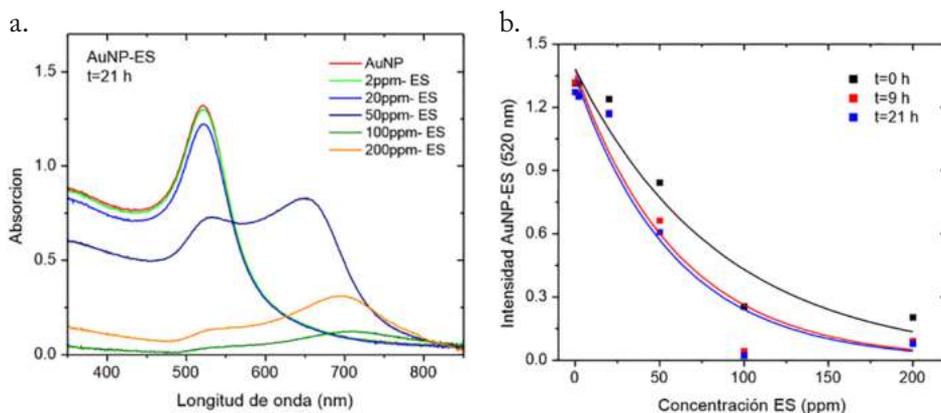
Figura 2. Soluciones coloidales de AuNP-ES preparadas a 2, 20, 50, 100 y 200 ppm



La Figura 3(a) muestra los espectros de absorción ultravioleta-visible (UV-Visible) de las soluciones coloidales de AuNP-ES para distintas concentraciones

de este pesticida, desde 2 hasta 200 ppm para un tiempo de reacción de 21 h. Cuando la reacción AuNP-ES se realiza para bajas concentraciones de ES (2 y 20 ppm), solo es perceptible una disminución de la intensidad del plasmón (520 nm), debido a que se están empezando a agregar las estructuras AuNP-ES y está disminuyendo el número de nanopartículas individuales (AuNP). Sin embargo, cuando la reacción se realiza para altas concentraciones de ES (50, 100 y 200 ppm) se observa ahora el proceso de agregación de las estructuras AuNP-ES y, como consecuencia, la aparición de agregados que inician en 660 nm y se desplazan hacia longitudes de onda mayores con la concentración de ES. Cabe resaltar que, aunque la reacción entre AuNPs y ES es más notoria para 9 y 21 h, también puede evidenciarse la detección de ES inmediatamente después de mezclar AuNPs y ES. De esta manera, una modalidad de evaluación de la concentración del pesticida ES la constituye el monitoreo de la intensidad de absorción UV-visible de la banda de las nanopartículas de oro AuNPs centrada alrededor de 520 nm (Figura 3b), así como para altas concentraciones (50–200 ppm), mediante la banda a 660 nm, la cual se asocia a agregados de nanopartículas.

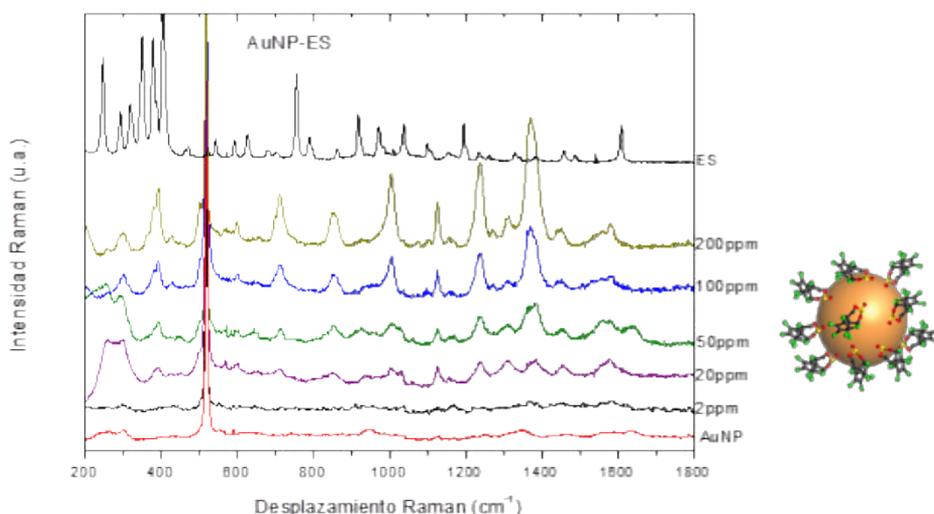
Figura 3. (a) Espectros UV-visible de la reacción entre AuNP y ES para distintas concentraciones entre 2 y 200 ppm durante 21 h de reacción. (b) Intensidad de la banda de absorción UV-visible de las AuNPs a 520 nm como función de la concentración del pesticida endosulfán



En la Figura 4 se muestran los espectros SERS (dispersión Raman amplificada en la superficie) (Sánchez *et al.* 2001; Kneipp *et al.* 2006; Hudson *et al.* 2009), correspondientes al complejo AuNP-ES, para diferentes concentraciones de ES (2, 20, 50, 100 y 200 ppm) y cuyas soluciones coloidales fueron inmovilizadas sobre sustratos de Si monocristalino para su análisis. En la misma figura se muestra además el espectro de ES con bandas características entre 200 y 400 cm^{-1} debidas

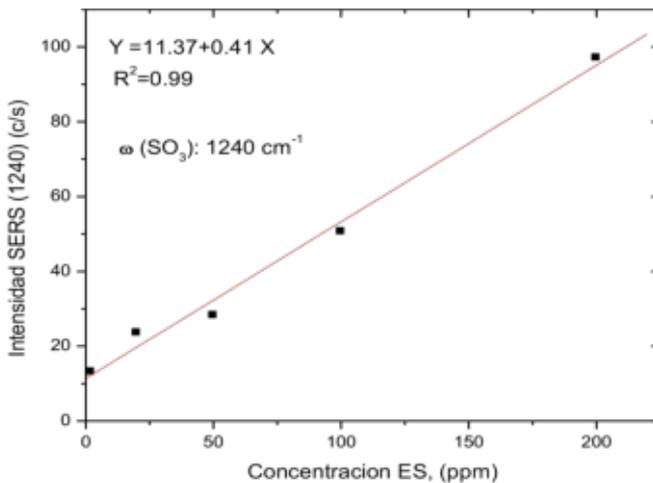
a los enlaces C-Cl, las deformaciones del esqueleto entre 450 y 850 cm^{-1} , dentro de las cuales destacan las posicionadas a 543, 690, 628 y 757 cm^{-1} , los enlaces C-H entre 860 y 1050 cm^{-1} , así como la banda en 1608 cm^{-1} asociada al enlace C=C. Existe otra banda de menor intensidad a 1240 cm^{-1} debida al enlace SO_3 (Guerrini *et al.* 2008). Esta última banda en 1240 cm^{-1} podría utilizarse para elaborar una curva de calibración basada en la intensidad SERS de esta, en función de la concentración de ES, como se muestra en la Figura 5. La selectividad de los sensores aquí desarrollados puede ser minimizada por la presencia de elementos afines a la superficie de las nanopartículas, con enlace del tipo iónico.

Figura 4. Espectros SERS de la reacción AuNP-ES para 0, 2, 20, 50, 100 y 200 ppm de ES. Del lado derecho se muestra una representación esquemática de la adsorción de moléculas de ES sobre la superficie de una nanopartícula AuNP



Los avances aquí presentados con la generación de sensores basados en nanopartículas de oro permitirán en un futuro, desarrollar nanopartículas con síntesis verde que permitan la generación de biosensores basados en anticuerpos o enzimas para la determinación más selectiva de los plaguicidas y de esta manera el trabajo aquí presentado es un antecedente muy importante para el desarrollo futuro de biosensores con nanopartículas.

Figura 5. Curva de calibración SERS del complejo AuNP-ES, banda 1240 cm^{-1} , hecha con 0, 2, 20, 50, 100 y 200 ppm de ES



Metales pesados

Los metales pesados se encuentran entre las sustancias tóxicas más antiguas conocidas por el hombre aún a muy bajas concentraciones, del orden de μgkg^{-1} (Nava-Ruiz *et al.* 2011). En el presente, debido a las innumerables fuentes de exposición tales como el agua, los alimentos o el aire contaminado, son un importante blanco en la salud pública (Lucho-Constantino *et al.* 2005). Su toxicidad está caracterizada por el elemento metálico en cuestión, pero se ve modificada por el tipo de compuesto, orgánico o inorgánico y sus características de hidrofiliabilidad o liposolubilidad, que determinan su toxicocinética y, por tanto, determinan la posibilidad de alcanzar sus dianas. Las biomoléculas más afectadas por los metales son las proteínas con actividad enzimática, por lo que su patología es multisistémica (Khan *et al.* 2008). Los principales sistemas afectados son el gastrointestinal, neurológico central y periférico, hemático y renal. Algunos de los compuestos metálicos se consideran carcinógenos (Nava-Ruiz *et al.* 2011).

Materiales y métodos

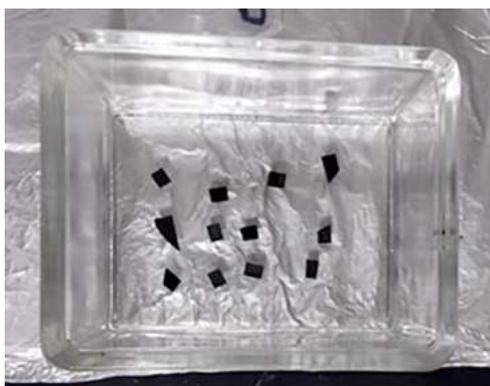
Se utilizaron obleas de silicio cristalino con orientación (1,0,0) con un grosor de 254–304 μm y una resistividad de 5–10 Ω/cm . Las obleas se cortaron en soportes de 3–5 mm^2 . Posteriormente se hidroxiló la superficie de cada oblea. La disolu-

ción para la hidroxilación de las matrices consistió en 15 ml de agua desionizada y 15 ml de metanol, al cual se le agregaron 844 mg de KOH (1 M). La disolución fue colocada en una caja coplin, donde se introdujeron soportes previamente cortados y lavados. Se dejaron hidroxilar durante una hora, posteriormente se sacaron, se enjuagaron 3 veces con metanol y se secaron bajo el flujo de nitrógeno. Más tarde, se funcionalizó la superficie de la matriz; para esto, se colocaron 29.4 ml de tolueno, se tapó con aluminio y se calentó usando una parrilla eléctrica hasta llegar a 90 °C, momento en que se agregaron 600 µl de 3-AMPTS y se retiró de la parrilla. Se permitió que la mezcla descendiera su temperatura hasta 30 °C. Una vez llegada a esta temperatura, se vertió en una caja coplin y se colocaron soportes previamente hidroxilados con la cara pulida hacia arriba. Se dejó funcionalizar durante dos horas, posteriormente se extrajeron los soportes y se enjuagaron tres veces con tolueno.

Como elemento de reconocimiento biológico se utilizaron las enzimas *L lactato deshidrogenasa* y *urease*. Los metales por determinar fueron Hg, Pb, Cu, Cd y Cr, todos estos reactivos adquiridos en Sigma-Aldrich. La concentración de metales en el agua fue de 0.1 µgL⁻¹ a 1000 mgL⁻¹.

Una imagen de los sistemas biosensor planares se presenta en la Figura 6.

Figura 6. Imagen de los biosensores desarrollados para la determinación de metales pesados



Resultados

En la Figura 7 se muestra de manera representativa los resultados obtenidos para la determinación de tres de los metales utilizados. Los espectros de los sistemas acuosos mostraron diferencias, tanto con el tipo de metal como en función de la concentración de este. Aquí es posible observar perturbaciones en la región OH y de tijeo de acuerdo con la concentración de metal. Estas modificaciones en

las intensidades y geometría de las bandas fueron perceptibles, incluso a concentraciones tan bajas como $0.1 \mu\text{gkg}^{-1}$.

Figura 7. Espectro de infrarrojo de Cd^{2+} , Cr^{6+} y Pb^{2+} a $0.1 \mu\text{gkg}^{-1}$ en la región de estiramiento de OH ($4000\text{--}3750 \text{ cm}^{-1}$)

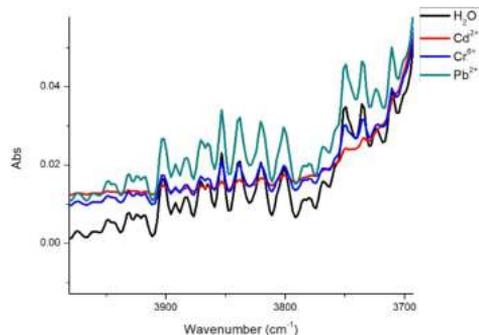
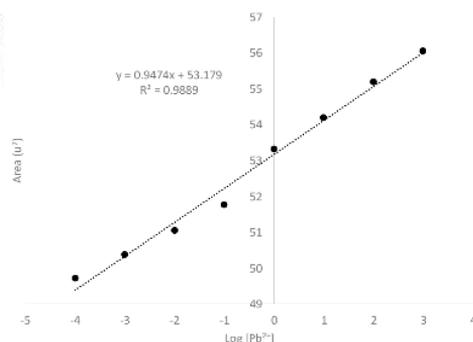


Figura 8. Relación lineal entre el área bajo la curva y la concentración de $\log [\text{Pb}^{2+}]$ en solución acuosa



Los cambios espectrales observados en las figuras anteriores pueden ser atribuidos a las interacciones entre cationes con grupos nucleofílicos, afectando el movimiento vibracional de la molécula del agua, ya que la introducción de cationes de metales pesados en la estructura de los sorbentes utilizados provocó la modificación de las intensidades de la banda debido a las vibraciones de estiramiento de los grupos OH y grupos aniónicos. En ambos casos, los cambios sistemáticos se relacionaron con el tipo de catión (su naturaleza química) y su concentración en la solución inicial.

Tratando de establecer una relación cuantitativa entre la concentración del metal pesado y algún parámetro observado, se calculó el área bajo la curva en la región de tijeeteo ($2007\text{--}1305 \text{ cm}^{-1}$) de cada metal en función de su concentración. En la Figura 8 se presenta la relación lineal entre la concentración del plomo y su absorbancia para fines de cuantificación. Este mismo procedimiento se realizó para el resto de los metales de interés en el área del medio ambiente.

Biosensor electroquímico basado en ADN para virus

En los últimos años se ha prestado mucha atención al uso del grafito en materiales compuestos, aprovechando sus excepcionales propiedades mecánicas y eléctricas para el desarrollo de plataformas electroquímicas (Lucarelli, F., *et al.* 2004; Bojorge, N. y Alhadef, E., 2011). Por lo tanto, existe un interés especial en el uso de estos electrodos de carbono en el desarrollo de biosensores para la detección de moléculas biológicamente relevantes, como el ADN de los virus.

El objetivo de este trabajo fue la detección de ADN en una muestra clínica con electrodos de grafito epoxi modificados para el desarrollo de biosensores para enfermedades virales de ADN. La preparación del electrodo compuesto incluyó el uso de grafito resina epoxi modificado con óxido de grafeno, para introducir los grupos carboxílicos necesarios para la posible unión covalente de especies biológicamente relevantes. Los electrodos se probaron utilizando ADN proviral de VIH-1 en muestras clínicas.

Materiales y métodos

El método voltamétrico fue desarrollando usando un potenciostato Palm Sens (Palm Instruments BV) acoplado a una computadora administrada por el *software* para computadora Palm Sens y operando en el modo de onda cuadrada de análisis voltamétrico. El electrodo de trabajo de grafito-epoxi modificado con óxido de grafeno (EGIIog) se construyó siguiendo el trabajo de Balbin-Tamayo *et al.* El electrodo de Ag/AgCl (KClsat) se usó como referencia y se usó un alambre de platino como electrodo auxiliar.

El oligonucleótido para el gen gag H1Gag1584 biotinilado (secuencia 5'-AAA GAT TAA TCC TGG G-3', secuencia del gen gag, idénticas a las de la cepa de referencia ELI del banco de genes de Los Álamos. Cepa ELI, número de acceso de Genbank K03454), y el oligonucleótido complementario (ADNc, secuencia 5'-CCCAGGATTATCCATCTTT-3'), fue sintetizado por Exxtend Biotechnology Ltda (oligonucleótido-Biotina, Brasil).

El oligonucleótido biotinilado H1Gag1584 se inmovilizó en la superficie del electrodo de epoxi-grafito modificado, mediante la estreptavidina se unió covalentemente a los grupos carboxílicos de superficie mediante enlaces peptídicos (Lucarelli, F., *et al.* 2004; Ocaña, C. and M.d. Valle, 2014). El oligonucleótido biotinilado se unió a la estreptavidina unida a la superficie del electrodo de epoxi-grafito modificado con óxido de grafeno (EGIIog) mediante el mecanismo llave-cerradura. Luego se realizó la detección electroquímica de la señal de oxidación de guanina del oligonucleótido H1Gag1584. Este oligonucleótido empleado codifica una región del gen gag H1Gag1584 del VIH-1. Esta es una de las regiones más conservadas del virus; es decir, que varía poco entre los grupos de VIH-1.

Preparación de muestras clínicas

El ADN de las células mononucleares de sangre periférica se extrajo de 100 μ l de sangre total mediante cromatografía de afinidad en columna con QIAmp DNA mini Kit, QIAGEN y QIACube kit de extracción automatizada. Estas muestras se

caracterizaron en el Laboratorio de Biología Molecular de LISIDA, a través de su carga viral por su detección directa en sangre periférica mediante el sistema estándar para el diagnóstico *in vitro* COBAS®, cuyo límite de detección es de 20 copias mL⁻¹. Las muestras corresponden a personas con seguimiento clínico y serológico, según lo establecido por el algoritmo para el diagnóstico de infección por VIH-1 en Cuba. Dos muestras con una carga viral menor de 20 ml⁻¹ copias se utilizaron como control positivo bajo (<20 ml⁻¹ copias) y dos muestras con carga viral alta (≥104 copias mL⁻¹ (RNA de mL⁻¹)), como Control positivo alto y una muestra como Control negativo (0 copias mL⁻¹ (ARN mL⁻¹)).

La Figura 9 muestra los voltamperogramas por onda cuadrada del electrodo EGIIog, EGIIog activado con NHS/EDC, EGIIog con estreptavidina unida covalentemente, EGIIog con el complejo de estreptavidina/H1Gag1584 biotinilado en el electrolito soporte (tampón fosfato a pH 6,9, 20 mmolL⁻¹). Para el electrodo EGIIog con el complejo de estreptavidina/H1Gag1584 biotinilado, se muestra una señal potencial de 0.94V, cercana al potencial de oxidación de la guanina (Wang, J., 2003).

Figura 9. Voltamperograma de onda cuadrada en tampón de fosfato a pH 6,9 del electrodo (EGIIog)

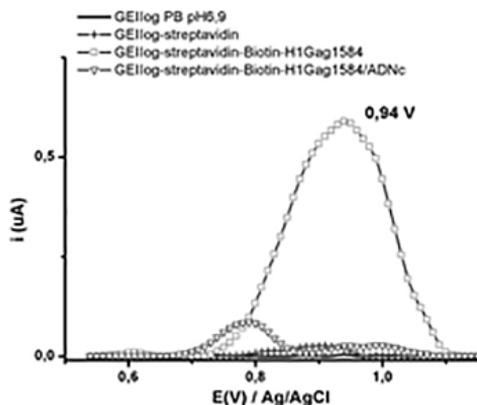
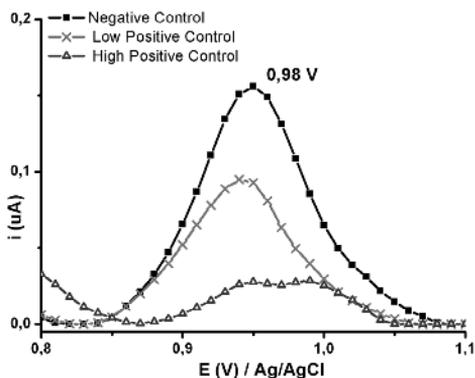


Figura 10. Voltamperograma de onda cuadrada de control negativo, control positivo bajo y control positivo alto, en PB a pH 6,9, 20 mmolL⁻¹



La detección de ADN proviral puede reducir el período posterior a la exposición a aproximadamente 11 días y, por lo tanto, también se puede usar para detectar el VIH-1 en individuos que aún no han montado una respuesta inmunitaria, o para resolver resultados serológicos indeterminados (Collins, A., 2010).

Los grupos carboxilo de los electrodos de epoxi-grafito modificados con óxido de grafeno permitieron la inmovilización del oligonucleótido biotina-H1Gag1584 en el electrodo por el mecanismo llave-cerradura entre el oligonucleótido biotinilado y la estreptavidina. Esta inmovilización evita la adsorción no específica, permite una buena configuración espacial del oligonucleótido y mejora la selectividad del electrodo (Pividori, M.I. *et al.* 2000).

En el voltamperograma de la Figura 10, se puede observar una señal a 0,98 V asociada con la señal de oxidación de guanina de la cadena biotinilada H1Gag1584. La intensidad de corriente de la señal de 0,98 V experimenta una disminución cuando el biosensor (electrodo con el oligonucleótido) entra en contacto con los controles positivos en condiciones de hibridación. Este comportamiento está relacionado con la formación de enlaces de hidrógeno, entre las bases complementarias, del oligonucleótido biotinilado y el ADN proviral, lo que causa una disminución en la densidad electrónica por la formación de estas interacciones (Paleček, E., 2005; Erdem, A., 2007).

La cantidad de ADN proviral detectable en muestras con alta carga viral puede estar condicionada por un mayor número de células infectadas, que pueden tener más de una región de ADN proviral integrada, lo que estaría de acuerdo con la marcada disminución de la señal para el control positivo alto a controlar. Mientras que las muestras tienen una carga viral baja (control positivo bajo), solo se debe a las regiones de ADN proviral en las pocas células infectadas. La disminución de la intensidad de la corriente de oxidación de guanina desde el oligonucleótido biotina-H1Gag1484 hasta el potencial de 0,98 V, permitió la detección del ADN del VIH-1 proviral, mediante voltamperometría de onda cuadrada en un tampón de fosfato pH 6,9.

Microorganismos patógenos (Salmonela entérica)

Se realizó la detección de *Salmonela* entérica a una concentración de 500 UFCmL⁻¹. Para esto se emplearon tres sustratos (silicio cristalino, silicio amorfo, y carburo de silicio amorfo hidrogenado) con un área de 25 mm², funcionalizados mediante la técnica de autoensamble en monocapas (SAMs).

Obtención, purificación y caracterización del anticuerpo policlonal IgG anti-Salmonella

Se empleó como antígeno bacterias de *Salmonella typhimurium* ATCC 14028 (Instituto de Ciencias Microbiológicas de Benemérita Universidad Autónoma de Puebla), se utilizó adyuvante completo de Freund (Sigma Aldrich) en la primera inmunización (día 0). Las inmunizaciones posteriores se realizaron con

adyuvante incompleto de Freund (días 21, 31 y 38). Se tomaron muestras de sangre de la vena principal de la oreja del conejo. La sangre se extrajo en un tubo de ensayo sin anticoagulante para ser centrifugada durante 10 min a 3500 rpm a 25 °C. La producción de anticuerpos policlonales se ensayó mediante un ensayo Dot-ELISA de las muestras de suero obtenidas los días 0, 21, 31 y 38, según el método modificado propuesto por Cervantes-Landín *et al.* (2014).

Tras constatar la presencia del anticuerpo IgG anti-Salmonella, se extrajo la sangre del conejo mediante punción cardíaca para proceder a la obtención del suero y posterior purificación de anticuerpos mediante un kit de purificación de Proteína A IgG (Thermo Fischer Scientific). La concentración de IgG se determinó por el método de Bradford (Bradford, 1976) y se caracterizó por FTIR (FT-IR Bruker Vertex 70) con reflexión total atenuada (ATR) en el rango de 4000-400 cm^{-1} usando aire como línea de base. La segunda derivada del espectro de anticuerpos se obtuvo usando el *software* OriginLab 6.0.

Autocapas autoensambladas en matrix de silicio

Los sustratos utilizados fueron silicio cristalino comercial tipo p (100, Pure Wafer) y las películas aSiCH y aSi fueron sintetizadas en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) por el método PECVD; los sustratos se cortaron en trozos de 5x5 mm.

El proceso de limpieza por ultrasonido se realizó por inmersión de cada sustrato en acetona y en metanol (Meyer); luego de esto, se utilizó flujo de nitrógeno con el fin de eliminar la humedad de los materiales y finalmente se colocó en un horno de convección (lumistell IEC- 41) a 110 °C durante 30 min.

Para obtener grupos hidroxilo en las superficies, las películas se trataron con H₂SO₄: H₂O₂ (3:1) durante 30 min. Luego de este proceso, los sustratos se limpiaron por ultrasonido tres veces con agua desionizada, el secado se realizó con flujo de N₂ y luego se metió en un horno a 110 °C durante 30 min. Para generar grupos amino en las superficies, una solución al 2% de (3-aminopropil) trimetoxisilano (3-APTMS, Sigma Aldrich) en tolueno anhidro (previamente calentado a 100 °C y enfriado a 25 °C) fue generada, todos los sustratos se sumergieron en solución 3-APTMS durante 1 h, luego se realizó la limpieza ultrasónica utilizando tolueno y metanol. El secado se realizó en estufa a 110 °C durante 1 h. se utilizó una solución al 2,5% de glutaraldehído (GA, Sigma Aldrich) en PBS (pH 7,4) como reticulante. Luego, cada película se colocó en la solución durante 1 h a 25 °C / 300 rpm.

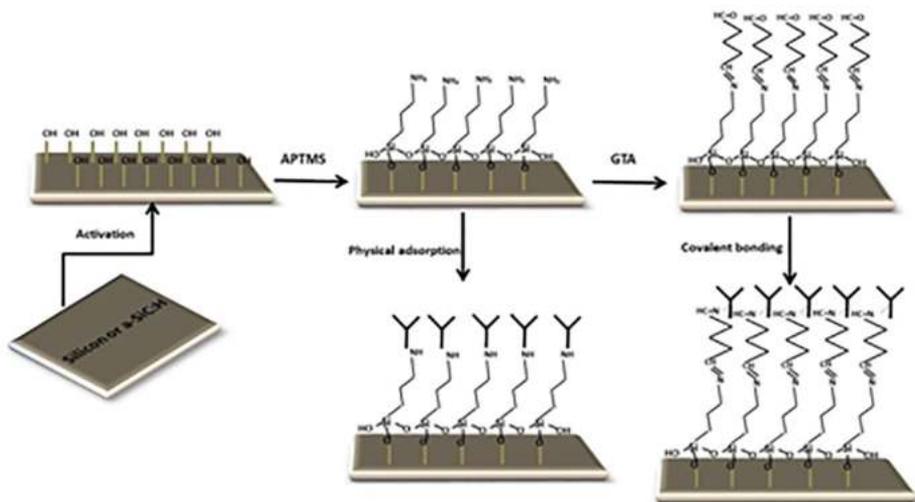
El anticuerpo generado en los pasos anteriores se utilizó como elemento de reconocimiento biológico. Las plataformas se sumergieron en una solución de

anticuerpo (0.01 mgL^{-1}) en PBS (pH 7.4) durante 1 h a $4 \text{ }^\circ\text{C}$, se limpió tres veces con $200 \text{ }\mu\text{L}$ de PBS durante 5 min y, finalmente, se almacenaron los sustratos en $500 \text{ }\mu\text{L}$ de PBS a $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Después de terminar cada una de las etapas de autoensamblado por monocapas los sustratos fueron analizados por FTIR.

Detección de Salmonella typhimurium en cada sustrato y posterior caracterización mediante técnica FTIR

Para el proceso de detección, cada sustrato biofuncionalizado se colocó en $400 \text{ }\mu\text{L}$ de suspensión bacteriana (500 UFCmL^{-1} aproximadamente), luego se incubó por 1 h a $37 \text{ }^\circ\text{C}$, luego de esto se realizaron 3 lavados a cada sustrato con $200 \text{ }\mu\text{L}$ de PBS y posteriormente se analizaron mediante FTIR, para proceder al cálculo de la segunda derivada de los diferentes espectros obtenidos (proceso de detección y bacterias) mediante el uso del *software* OriginLab 6.0.

Figura 11. Detección de *Salmonella typhimurium* y posterior caracterización por FTIR



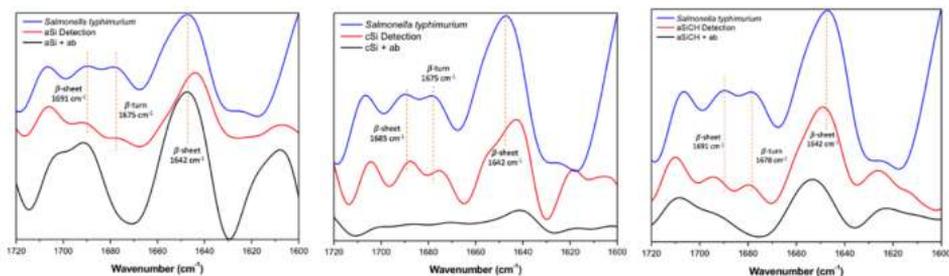
Resultados

Se utilizaron espectros de sustratos biofuncionalizados con proceso de detección para calcular la segunda derivada de cada uno de ellos, con el fin de analizar la estructura secundaria de proteínas, en este caso de proteínas presentes en bacterias de interés (~ 3.300 proteínas bacterianas identificadas en la cepa de *Salmonella typhimurium* (Liu *et al.* 2015). Para realizar este paso, se utilizó el análisis de

amida I ($1700-1600\text{ cm}^{-1}$), ya que se reporta que la alta sensibilidad a pequeñas variaciones en la geometría molecular de este grupo que se refleja en la estructura secundaria (Dong *et al.* 1990) permite estudiar el plegamiento, despliegue y agregación de proteínas (Barth, 2007).

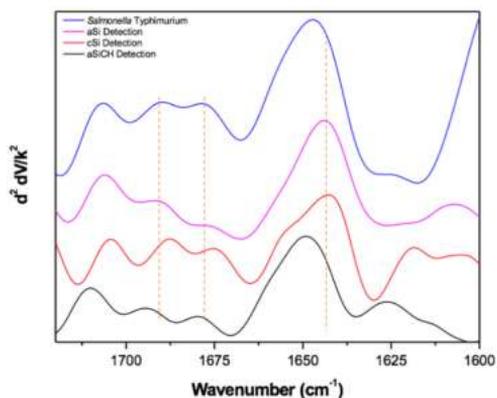
En la Figura 12 se muestran las segundas derivadas calculadas para los espectros correspondientes a biofuncionalización y detección. En la parte superior se colocó la segunda derivada de *Salmonella typhimurium* ATCC 14028, en los tres espectros de cada sustrato se observa la banda a 1642 cm^{-1} y se relaciona a la estructura de láminas β (Kong *et al.* 2007; Barth, 2007 & Natalello *et al.* 2005). Esta banda también está presente en los espectros de anticuerpos y bacterias, se puede destacar también la presencia de dos bandas, una en 1675 cm^{-1} y otra en 1690 cm^{-1} (giros β y láminas β , respectivamente) (Kong *et al.* 2007; Barth, 2007 & Natalello *et al.* 2005) que no están presentes en los sustratos biofuncionalizados y que se pueden utilizar para confirmar la detección de bacterias en cada uno de los sustratos.

Figura 12. Espectros de la 2ª derivada obtenidos de cada detección (1) aSi, (2) cSi y (3) aSiCH. de abajo hacia arriba: biofuncionalización, detección de bacterias y muestra de *Salmonella t.*



En comparación con otros estudios donde se ha detectado *Salmonella typhimurium* (Alexandre *et al.* 2018; Yang *et al.* 2009), la detección se realizó en sustratos planos con un área específica (25 mm^2) y se estableció un tiempo de detección de 60 min; además, se detectó una concentración de 500 CFU mL^{-1} en comparación con Seo *et al.* (1999) quienes detectaron entre $1 \times 10^5 - 1 \times 10^7\text{ CFU mL}^{-1}$ en una superficie de sensor derivada de silano. En la Figura 13 se realiza una comparación de cada proceso de detección con el espectro FTIR de la segunda derivada de *Salmonella*, en la que se puede observar que las bandas están más definidas en los espectros de cSi y aSiCH que en el espectro de aSi. Con este estudio estos materiales tienen la oportunidad de ser utilizados para el desarrollo de biosensores.

Figura 13. Comparación de diferentes espectros de detección de la segunda derivada con el espectro de la segunda derivada de *Salmonella typhimurium*



Conclusiones

En este capítulo se mostraron cuatro tipos de sensores y biosensores generados para la determinación de pesticidas (endosulfán), metales pesados (Cd^{2+} , Cr^{6+} y Pb^{2+}), virus (VIH-1) y microorganismos patógenos (*Salmonella typhimurium*). Las técnicas ópticas y electroquímicas aquí mostradas prueban ser una buena alternativa a las técnicas químicas o moleculares convencionales. Los soportes empleados para el desarrollo de los biosensores permiten extrapolar los resultados a otros tipos de contaminantes (analitos) de interés en la gestión de los cuerpos de agua del país.

Bibliografía

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 1995), <http://www.epa.gov/ppcp/faq.html>, consultado en octubre 2020.
- Alves, C.R. (2018). A rapid and specific biosensor for *Salmonella typhimurium* detection in milk. *Food and Bioprocess Technology* 11, 748–756.
- Alexandre, D.L., Melo, A.M.A., Furtado, R.F., Borges, M.F., Figueiredo, E.A.T., Biswas, A., Cheng, H.N. & Awuah, E.; Nyarko, K.B.; Owusu, P.A.; Osei-Bonsu, K. (2009). Small town water quality. *Desalination*, 248, 453–459.
- Barth, A. (2007). Infrared spectroscopy of proteins. *Biochimica et Biophysica Acta* 1767, 1073–1101.
- Biswas, P., Karn, A. K., Balasubramanian, P., & Kale, P. G. (2017). Biosensor for detection of dissolved chromium in potable water: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 94, 589–604.

- Bojorge, N. y E. Alhadeff, Graphite-Composites Alternatives for Electrochemical Biosensor. Metal, Ceramic and Polymeric Composites for Various Uses. 2011.
- Brindha, K.; Rajesh, R.; Murugan, R.; Elango, L. (2011). Fluoride contamination in groundwater in parts of Nalgonda District, Andhra Pradesh, India. *Environ. Monit. Assess.* 172, 481–492.
- Brown A. y Matlock M.D. (2011). A review of water scarcity indices and methodologies. White Pap. 109, 19.
- Carr, G.M., Neary J.P. (2008). Water quality for Ecosystem and human health; United nations Development programme, Global Environment Monitoring System/water programme: Nueva York, Estados Unidos.
- Collins, A. (2010). Laboratory User Handbook. Micropathology Ltd.
- Cornish G., Mensah E., Ghesquire P. (1999). Water quality and Peri urban irrigation: An assessment of surface water quality for irrigation and its implications for human health in peri urban zone of Kumasi. HR Wallingford Ltd. Ghana.
- Dixon, W. y Chiswell, B. (1996). Review of aquatic monitoring program design. *Water Res.* 30, 1935–1948.
- Dong, A., Huang, P., Caughey, W.S. (1990). Protein secondary structure in water from second-derivative amide I infrared spectra. *Biochemistry* 29, 3303–3308.
- Eltzov, E., Slobodnik, V., Ionescu, R. E., Jaskulak, M., Rorat, A., Grobelak, A. Kacprzak M. Marks, R. S. (2015). On-line biosensor for the detection of putative toxicity in water contaminants. *Talanta*, 132, 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.09.032>.
- Erdem, A. (2007). Chapter 19 Genosensor technology for electrochemical sensing of nucleic acids by using different transducers, in *Comprehensive Analytical Chemistry*, S. Alegret and A. Merkoçi, Editors. Elsevier. pp. 403–411.
- George, C.M.; Zheng, Y.; Graziano, J.H.; Rasul, S.B.; Hossain, Z.; Mey, J.L.; van Geen, A. (2012). Evaluation of an arsenic test kit for rapid well screening in Bangladesh. *Environ. Sci. Technol.* 46, 11213–11219.
- Gosset, A., Ferro, Y., & Durrieu, C. (2016). Methods for evaluating the pollution impact of urban wet weather discharges on biocenosis: A review. *Water Research*, 89, 330–354. doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.020.
- Guerrini, L. (2008). Funcionalización de nanopartículas metálicas para la detección de contaminantes orgánicos persistentes mediante espectroscopia Raman Intensificada por superficie. Universidad Autónoma de Madrid.
- Henze, M., Van Losdrecht, M.C., Ekama, G.A., Brdjanovic, D. (2008). Biological wastewater treatment, principle, modeling and design. IWA publishing London UK.

- Hudson, SD. y Chumanov, G. (2009). "Bioanalytical applications of SERS (surface-enhanced Raman spectroscopy)". *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 394:679–686.
- Ju, Y. y Lead, JR. (2008). "Manufactured nanoparticles: An overview of their chemistry, interactions and potential environmental implications" *Science of the total environment* 400:396-414.
- Kelly, KL., Coronado, E., Zhao, LL. y Schatz, GC. (2003). "The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment". *Journal of Physics Chemistry B* 107:668-677, 2003.
- Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y.M., Huang, Y.Z., Zhu, Y.G.(2008). Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China, *Environmental Pollution*, vol. 152, núm. 3, abril 2008, pp. 686-692, ISSN 0269-749.
- Kimling, J., Maier, M. Okenve, B., Kotaidis, V., Ballot, H., y Plech, A. (2006). "Turkevich Method for Gold Nanoparticle Synthesis Revisited". *Journal of Physics Chemistry B* 110:15700-15707.
- Kneipp, K. Moskovits, M. y Kneipp, H. (2006) "Surface-Enhanced Raman Scattering Physics and Applications". Editorial Springer. 103.
- Kong, J. & Yu, S. (2007). Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica* 39, 549-559.
- Korostynska O., Mason A., Al-Shammaá A. (2013). Monitorin pullutants in wastewatr: tradicional lab based versus Modern Real -Time approaches. Smart sensors for real time water quality monitoring. Springer, Heidelberg, Alemania pp.1-24.
- Lira, R., Méndez, B., De los Santos, G., Vera, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta Universitaria*, 28(2):9-24.
- Lucarelli, F., *et al.*(2004). Carbon and gold electrodes as electrochemical transducers for DNA hybridisation sensors. *Biosensors and Bioelectronics*. 19(6): p. 515-530.
- Lucho-Constantino C.A., Prieto-García F., Del Razo L.M., Rodríguez-Vázquez R., Poggi-Varaldo H.M. (2005). Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, volúmen 108, número 1, 5 de junio de 2005, pp. 57-71, ISSN 0167-8809.
- Nava-Ruíz, C., Méndez-Armenta, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio), *Arch Neurocién (Mex)* Vol. 16, núm. 3: 140-147.
- Nair, A., Renjis, T. y Pradeep, T. (2003). Detection and extraction of endosulfan by metal nanoparticles. *J. Environ. Monit.* 5: 363-365.

- Natalello, A., Ami, D., Brocca, S., Lotti, M. & M. Doglia, S. (2005). Secondary structure, conformational stability and glycosylation of a recombinant *Candida rugosa* lipase studied by Fourier-transform infrared spectroscopy. *Biochemical Journal* 385, 511-517.
- Ntihuga, J. N. (2006). Biosensor to Detect Heavy Metals in Waste Water. En: *Proceedings from the International Conference on Advances in Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1016/b978-008045312-5/50018-2>.
- Ocaña, C. y M.d. Valle. (2014). A comparison of four protocols for the immobilization of an aptamer on graphite composite electrodes. *Microchim Acta*, (181): p. 355-363.
- Paleček, E. y F. Jelen. (2005). Electrochemistry of Nucleic Acids, in *Perspectives in Bioanalysis*, F.S. Emil Paleček and J. Wang, Editors. Elsevier. p. 73-173.
- Pividori, M.I., A. Merkoçi, y S. Alegret. (2000). Electrochemical genosensor design: immobilisation of oligonucleotides onto transducer surfaces and detection methods. *Biosensors and Bioelectronics*, 2000. 15(5-6): pp. 291-303.
- Rahman, M.M.; Mukherjee, D.; Sengupta, M.K.; Chowdhury, U.K.; Lodh, D.; Chanda, C.R.; Roy, S.; Selim, M.; Quamruzzaman, Q.; Milton, A.H.; *et al.* (2002). Effectiveness and Reliability of Arsenic Field Testing Kits: Are the Million Dollar Screening Projects Effective or Not? *Environ. Sci. Technol.* 36, 5385-5394.
- Royano, S. (2020). Biosensores electroquímicos para la determinación de pesticidas en aguas. Tesis de Maestría, UNED F.C.
- Rubinson K.A. Rubinson J.F. Ros L.L. (2004). *Análisis instrumental*. Pearson Educación.
- Safarzadeh-Amiri, A.; Fowlie, P.; Kazi, A.I.; Siraj, S.; Ahmed, S.; Akbor. (2011). A. Validation of analysis of arsenic in water samples using Wagtech Digital Arsenator. *Sci. Total Environ.* 409, 2662-2667.
- Sánchez CS. Domingo C. García RJV. y Aznárez JA. (2001). "Surface-Enhanced Vibrational Study (SEIR and SERS) of Dithiocarbamate Pesticides on Gold Films". *Langmuir* 17:1157-1162.
- Schwarzenbach R.P., Egli T., Hofstetter T.B., Von Guten U. Wehrli B. (2010). Global water pollution and human health. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 35, 109-136.
- Seo, K.H., Brackett, R.E., Hartman, N.F. & Campbell, D.P. (1999). Development of a rapid response biosensor for detection of *Salmonella typhimurium*. *Journal of Food Protection* 62, 431-437.
- Van Geen, A.; Cheng, Z.; Seddique, A.A.; Hoque, M.A.; Gelman, A.; Graziano, J.H.; Ahsan, H.; Parvez, F.; Ahmed, K.M. (2005). Reliability of a Commercial Kit To Test Groundwater for Arsenic in Bangladesh. *Environ. Sci. Technol.* 39, 299-303.

- Wang, J. (1985). Stripping analysis: principles, instrumentation and applications, VCH.
- Wang, J., A.-N. Kawde, and M. Musameh, Carbon-nanotube-modified glassy carbon electrodes for amplified label-free electrochemical detection of DNA hybridization. *Analyst*, 2003. 128(7): p. 912-916.
- Wang, J. (2006). Analytical electrochemistry, wiley VCH.
- WHO y UNICEF. (2014). Progress on drinking water and sanitation; WHJO; Geneva, Switzerland; UNICEF; Nueva York, Estados Unidos.
- Yang, G.J., Huang, J.L., Meng, W.J., Shen, M. & Jiao, X.A. A reusable capacitive immunosensor for detection of *Salmonella* spp. Based on grafted ethylene diamine and self-assembled gold nanoparticle monolayers. *Analytica Chimica Acta* 647, 159-166.

Capítulo 4

Disponibilidad de agua para usos domésticos: alternativas para mitigar la escasez y la carga que representa para las mujeres

Laura Celina Ruelas Monjardín¹
Carolina Chávez Ruelas²

Introducción

La disponibilidad de agua en el hogar ha sido una prioridad en las diferentes reuniones internacionales intergubernamentales y en los acuerdos de la ONU tendientes a procurar el bienestar y la salud de sus ocupantes. En estas reuniones y acuerdos, ha sido evidente el reconocimiento hacia la mujer en su papel primordial en el abasto de agua en las viviendas. En la Conferencia de Dublín que se celebró en 1992 y reunió a expertos en el asunto del agua con el patrocinio de la ONU, para discutir metas de política hídrica mundial, se reconoció en su Declaración sobre Agua y Desarrollo Sustentable “que la mujer desempeña un papel fundamental en el abastecimiento, protección y gestión del agua (principio No. 3)”. Una década después, en 2001, en la Declaración de Bonn, se reconoció que la ordenación de los recursos hídricos debe basarse en un enfoque participativo, donde hombres y mujeres participen en igualdad en la gestión el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos y en la distribución de los beneficios. Pero, sobre todo, que debe fortalecerse la función de la mujer en las esferas relacionadas con el agua, y ampliarse su participación. En diciembre de 2003, la Asamblea General de las Naciones Unidas, al establecer el Decenio Internacional para la Acción “El Agua, fuente de vida”, planteó como objetivo “ocuparse más a fondo de las cuestiones relativas al agua en todos los niveles y de la ejecución de los programas y proyectos relativos al agua, y que al mismo tiempo se trate de asegurar la participación e intervención de la mujer en las medidas de desarrollo relacionadas con

¹Instituto Tecnológico Superior de Xalapa.

²London School of Economics.

^{*}Autor de correspondencia, lauramonjardin@hotmail.com

el agua, y promover la cooperación en todos los niveles, para ayudar a alcanzar los objetivos relativos al agua convenidos internacionalmente y contenidos en el Programa 21, la Declaración de los Objetivos del Milenio (2000-2015) y los que están en vigor, como los Objetivos de Desarrollo Sustentable (2015-2030)”.

La aceptación y ejecución de todos estos acuerdos internacionales exige políticas efectivas que aborden las necesidades de la mujer y la preparen y doten de la capacidad de participar, en todos los niveles, en programas de recursos hídricos, incluida la adopción de decisiones y la ejecución, por los medios que ellas determinen (Tortajada, s/f).

Sin embargo, como señala Ivens (2008) aun cuando dicha participación puede contribuir a mejorar la eficiencia en el manejo del agua para consumo humano —y que el hecho del acceso al agua por parte de ellas mejora su salud y la de sus hijos e hijas—, no existe claridad acerca de cómo esta participación, en particular en la toma de decisiones en el proceso de gestión, puede directamente contribuir a su bienestar personal y a la equidad de género. Además de que, si no se da un cambio en los roles tradicionales de género, como el de las tareas domésticas, la participación de las mujeres en la gestión y manejo del agua comunitaria significará más horas de trabajo que se suman a las inequidades cotidianas que de por sí ya viven (Ivens, 2008).

Numerosos estudios han revelado que un recurso tan básico como el agua es un asunto que involucra activamente a las mujeres, siendo las principales responsables de su transporte y de su cuidado en los sistemas tradicionales de suministro en muchas comunidades (Melero, 2011). El Fondo de Desarrollo de las Naciones Unidas para la Mujer (UNIFEM) (<https://www.unwomen.org/>) afirma que, en la mayoría de los países en desarrollo, son las mujeres las responsables de la gestión del agua a nivel doméstico y comunitario. En algunos países, mujeres y niñas utilizan más de 8 horas diarias recorriendo de 10 a 15 km y trasladando una media de 15 litros de agua por cada trayecto. El tiempo dedicado a actividades relacionadas con el suministro de agua ha influido para que 15 millones de jóvenes mujeres en edad de asistir a la escuela primaria nunca tengan la oportunidad de aprender a leer o escribir, en comparación con los 10 millones de hombres en situación similar.

La Agenda 2030 tiene entre sus propósitos poner fin a las barreras que evitan que las mujeres y las niñas desarrollen todo su potencial, pero hay muchos retos por vencer. En América Latina y el Caribe, las mujeres de los grupos de ingresos más bajos destinan más tiempo al trabajo y cuidados domésticos no pagados que aquellas de los países más ricos. Los hombres dedican menos tiempo en estas tareas, independientemente de su ingreso. La colecta de agua es fiel reflejo de esta tarea, ya que las mujeres y las niñas son las responsables de la colecta del

80% del agua para los hogares que no tienen acceso a ésta en sus instalaciones. La situación de México y, más aún, del estado de Veracruz, ilustra esta realidad.

Disponibilidad del agua para uso doméstico en México y en el estado de Veracruz

Generalmente, las estadísticas del agua que se presentan en las publicaciones oficiales se refieren a la disponibilidad, como un enunciado absoluto. Sin embargo, cuando este se desagrega en sus diferentes componentes, la realidad es muy diferente; sobre todo, para las mujeres, cuando se toma en cuenta que la responsabilidad del suministro ha recaído en ellas.

La Tabla 1 ilustra cómo, para el 2010, el 70% de las viviendas a nivel nacional disponían de agua dentro de la vivienda. Este porcentaje, para el mismo periodo, disminuye al 50% para el estado de Veracruz. En esta condición de disponibilidad de agua en la vivienda, el 51.1% de los residentes son mujeres. Para el 2018, hubo un ligero incremento en esta cobertura a nivel nacional (74.1%) y para Veracruz (52.6%). El porcentaje de mujeres que residen en el hogar prácticamente se mantuvo en esta entidad (51.5%). Como se puede observar, el 47.4% de las viviendas de Veracruz, contra el 25.9% del total nacional, recurren a fuentes de agua fuera del hogar, tales como: llave en el terreno, acarreo de vivienda vecina, compra de agua a pipas o de pozo, río, lago o arroyo. Esta condición representa una carga adicional para el 48.5% de las mujeres que residen en viviendas de Veracruz, debido a que, tradicionalmente, el abasto de agua ha recaído bajo su responsabilidad.

Tabla 1. Fuentes de suministro de agua en las viviendas de México y de Veracruz, 2010 y 2018

Disponibilidad de agua	Porcentajes 2010				Porcentajes 2018			
	Vivienda		Residentes en Veracruz		Viviendas		Residentes en Veracruz	
	Nacional	Veracruz	Total	Mujeres	Nacional	Veracruz	Total	Mujeres
Agua entubada dentro de la vivienda	69.60%	49.90%	48.40%	48.90%	74.10%	52.60%	50.60%	51.50%
Agua entubada fuera de la vivienda dentro del terreno	21.90%	34.00%	34.10%	34.10%	18.70%	28.70%	30.90%	30.30%
Agua entubada de llave pública (o hidrante)	0.30%	0.70%	0.90%	0.90%	0.20%	0.10%	0.20%	0.10%
Captadores de agua de lluvia	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.40%	2.70%	2.70%	2.50%
Agua entubada que acarrear de otra vivienda	1.10%	0.70%	0.50%	0.50%	0.80%	1.30%	1.20%	1.30%
Agua de pipa	1.60%	1.70%	2.10%	1.80%	1.80%	1.90%	1.80%	1.90%
Agua de un pozo, río, lago, arroyo u otra	5.50%	13.10%	14.10%	13.80%	4.00%	12.60%	12.50%	12.30%

Fuente: INEGI, 2010 y 2018.

El hecho de disponer de agua entubada dentro de la vivienda o tomar ésta de la llave ubicada en el terreno de la vivienda no indica que el recurso esté disponible siempre que se le requiera. Los datos de BID/LAPOP (2019, citado en Cavallo, Powell y Serebrisky, 2020), muestran que en 2018 el hogar promedio en América Latina y el Caribe tenía agua 18 horas al día. Ello, a pesar de que la cobertura de agua potable se sitúa en alrededor del 80% en la región. En la Tabla 2 se muestra que, en el 2010, el porcentaje de viviendas del país que contaban con una dotación de agua todos los días fue de 73.4, mientras que en Veracruz fue del 70.8%. El porcentaje de mujeres que residían en viviendas de Veracruz con esta dotación de agua fue del 70.2%. Para 2018, la dotación disminuyó, tanto a nivel nacional (65.3%) como a nivel estatal (54.5%). Conviene resaltar que el porcentaje de mujeres que residen en una vivienda de Veracruz, con esta condición de suministro, bajó al 53.9%, contra el 70.2% que presentaba en 2010.

Tabla 2. Frecuencia en la dotación de agua en la vivienda a nivel nacional y estado de Veracruz, periodo 2010-2018

Dotación de agua	Porcentajes 2010				Porcentajes 2018			
	Viviendas	Residentes en Veracruz			Viviendas	Residentes en Veracruz		
		Nacional	Veracruz	Total		Mujeres	Nacional	Veracruz
Diario	73.40%	70.80%	69.90%	70.20%	65.30%	54.50%	53.20%	53.90%
Cada tercer día	14.60%	15.70%	15.70%	15.30%	15.00%	16.40%	17.20%	16.70%
Dos veces por semana	5.40%	9.60%	10.50%	10.70%	5.60%	6.20%	6.50%	6.50%
Una vez por semana	3.70%	2.90%	2.70%	2.40%	4.10%	2.70%	3.00%	3.00%
De vez en cuando	2.90%	1.10%	1.10%	1.50%	2.80%	1.60%	1.60%	1.80%

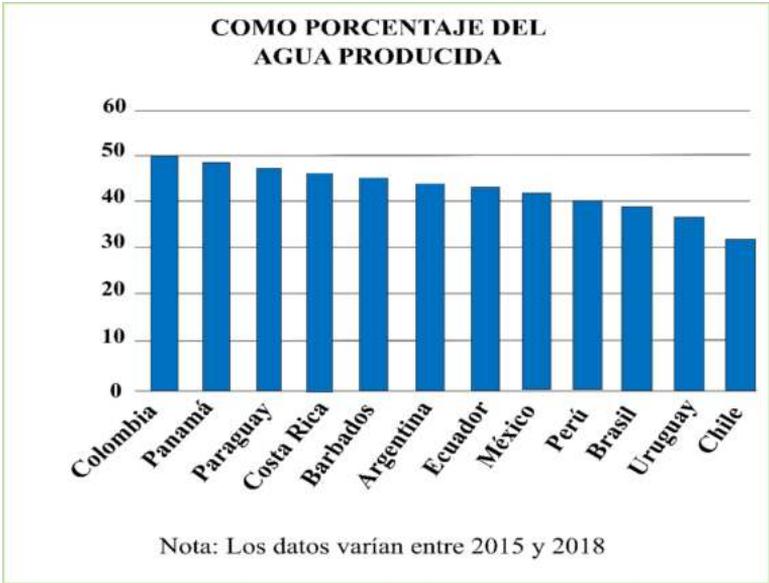
Fuente: INEGI, 2010 y 2018.

El descenso en la disponibilidad diaria puede explicarse por varias razones. Una de ellas puede estar relacionada con la disminución en la disponibilidad per cápita de agua, debido al descenso en las precipitaciones. En el país, ésta se ha visto disminuida desde hace medio siglo. Entre 2015-2019 se dio una disminución de entre un 10 y 20%. La menor precipitación ha dado como resultado que la disponibilidad per cápita pasara de 11 500 m³/hab/año en 1955 a 3 150 m³/hab/año en el 2025 (CONAGUA-SEMARNAT, 2018). Si este promedio se divide por zona urbana, se tiene que la Ciudad de México verá disminuida su disponibilidad del 10 al 17% para el 2050 (Martínez, Kralisch, Escolero y Perevochtchikova, 2015). El asunto de la escasez de agua es un tema de preocupación mundial, ya que se estima que ésta afecta a más del 40% de la población del planeta. Esta cifra, de

por sí ya alarmante, probablemente crecerá por el aumento de las temperaturas globales debido al cambio climático. Por ello, se estima que al menos una de cada cuatro personas se verá afectada por la escasez recurrente de agua para 2050. Por ello, asegurar una fuente segura de suministro de agua es necesario para promover los medios de vida y ampliar las opciones de diversificación.

Otro factor que puede explicar este descenso en el suministro diario es la pérdida de agua que se da en los sistemas de conducción del agua. De acuerdo con la Figura 1, en México se pierde el 45% del agua que se bombea. Esto generalmente ocurre por fugas en las tuberías.

Figura 1. Pérdidas de agua en los sistemas de conducción en América Latina y el Caribe



Fuente: Pastor, 2019.

Al respecto, Cavallo, Powell y Serebrisky (2020) han señalado que, al escatimar gastos en el mantenimiento de la infraestructura, se provoca un deterioro más rápido de la infraestructura y acelera la necesidad de un mantenimiento futuro. La inversión en mantenimiento de infraestructura es menor a los costos en que se incurren cuando se construyen nuevos activos. Si la región no mejora la eficiencia de su inversión, cerrar la brecha de infraestructura tardará más y será más difícil de conseguir.

La calidad del agua influye en la disponibilidad de agua en las viviendas. La calidad del suministro de agua depende del tratamiento adecuado, tanto del agua potable como de las aguas residuales. En la región de América Latina y el Caribe, los servicios de agua y saneamiento presentan grandes deficiencias. Sólo el 22% de las aguas residuales se manejan de manera segura (Cavallo, Powell y Serebrisky, 2020). En cuanto a las aguas residuales municipales, existe una capacidad instalada que está fuera de operación —o bien, dada de baja— por lo que sólo se trata un porcentaje de lo recolectado por el sistema de alcantarillado. En México, las plantas de tratamiento, en promedio, operan en un 61.97% de su capacidad instalada. En el estado de Veracruz, éstas tienen un menor desempeño, con el 58.64%. Es decir, que en el país hay una capacidad ociosa del 38.03%. Sin embargo, se debe considerar que no todo el volumen de agua residual es colectado por el sistema de alcantarillado. De acuerdo con el dato más reciente, a nivel nacional, la cobertura de alcantarillado es de 91.4%, que para las áreas urbanas es de 96.6% y 74.2% para las áreas rurales (CONAGUA-SEMARNAT, 2018). Ante los problemas de disponibilidad —entre ellos, la contaminación del agua— una alternativa de bajo costo son los sistemas de captación (SCALL), como opción para complementar el suministro.

Los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) pueden ser una opción para los hogares de México y de Veracruz que tienen agua entubada dentro y fuera de la vivienda, pero que la reciben dos o una vez a la semana o de vez en cuando. En el 2010, el 12% de las viviendas del país estaban en esta situación de irregularidad en el servicio; en Veracruz, esta situación se presentaba en el 13.5% de las viviendas, en las cuales, el 14% de sus residentes eran mujeres (INEGI, 2010). Para 2018, el porcentaje de viviendas con esta carencia prácticamente se mantuvo (12.6%), aunque en el caso de Veracruz el servicio de dotación mejoró, puesto que el porcentaje descendió a 10% y, con ello, el porcentaje de mujeres residentes en estas viviendas, al mostrar un 11.3% (INEGI, 2018).

Para el 2018, INEGI (2018), ya incluyó en su encuesta el dato sobre captadores de agua de lluvia en las viviendas. Al respecto, esta encuesta reportó que, a nivel nacional, 124 650 viviendas (0.4% del total de viviendas) contaba con este sistema. En Veracruz, este sistema se reportó para 62 937 viviendas (2.7%) del total de éstas, en las cuales, el 2.5% de los residentes son mujeres. Cabe señalar, que el uso de este sistema supera, en Veracruz, a la compra de agua de pipa. Ello indica que los hogares prefieren encontrar estrategias más baratas para el acopio de agua en el hogar. Para ilustrar este dato, la Tabla 3 presenta lo encontrado por Rovira, Sánchez y Rovira (2020) en tres localidades de El Salvador, donde se evaluó el potencial de este sistema como fuente de agua alternativa en comunidades sin servicios confiables de agua.

Tabla 3. Costo por metro cúbico, según la alternativa de suministro de agua, en El Salvador (DlIsAm)

Alternativa de suministro de agua	San Salvador	Comalapa	San Miguel
Captación de agua de lluvia	2,20	2,15	2,10
Agua comprada	5,00	10,00	7,50
Ampliación de la red de agua	10,48	10,48	10,48
Agua obtenida de una fuente cercana (menos de 500 metros)	15,62	15,62	15,62
Agua obtenida de una fuente lejana más de 500 metros del hogar (4 horas por 200 litros)		31,25	31,25
RHS (sistema de captación de agua de lluvia) más agua comprada (por m ³)	3,60	5,97	4,67

Fuente: Rovira, Sánchez y Rovira, 2020.

Los resultados anteriores sugieren que los SCALL pueden satisfacer todas las necesidades de agua de un hogar durante la estación lluviosa, pero que es un recurso limitado durante la estación seca. Es una fuente de agua eficiente en costos, incluso cuando se combina con agua comprada para cubrir la demanda durante la estación seca. Cabe señalar que el SCALL es una técnica muy antigua, donde el agua cosechada o colectada se almacena en cisternas o aljibes, principalmente para uso doméstico. Se trata de un tipo de sistema de distribución de agua, que puede ser de mejor calidad que muchas fuentes de agua subterránea y superficial. Sus costos de inversión son bajos en comparación con alternativas, como la ampliación de la red de agua desde zonas urbanas, o el desarrollo de sistemas locales a partir de pozos o perforaciones (Cavallo, Powell y Serebrisky, 2020). Los costos operativos para los hogares son bajos en relación con el costo de buscar agua en fuentes distantes o de comprar agua de proveedores comerciales. Por lo tanto, los SCALL tienen el potencial para mejorar la equidad en el acceso y la calidad de los servicios de agua (Rovira, Sánchez y Rovira, 2020).

Se puede decir que en México y en Veracruz un número importante de viviendas cuenta con sistemas de almacenamiento de agua (tinaco en la azotea, cisternas, aljibes, pileta o depósito de agua) que posibilitan el empleo de los SCALL. Para 2010, el 75% de las viviendas del país contaban con estos sistemas. En Veracruz, este porcentaje fue ligeramente mayor, con el 78.7% (en donde el 77.8% de los residentes son mujeres). Para 2018, se dio un incremento a nivel

nacional (76.5%), pero disminuyó en Veracruz (77.8%), aunque el porcentaje de residentes de mujeres en viviendas con estos sistemas aumentó a 78.2%.

Aunque estas opciones de complemento a la disponibilidad de agua en el hogar representan soluciones ante la situación de escasez o de abasto regular de agua en las viviendas, la realidad es que ante una disponibilidad per cápita en descenso, la estrategia de aumento de la dotación de agua debe replantearse frente a una basada en el uso eficiente y la conservación del agua.

Estrategias para uso eficiente y conservación del agua

El agua es un recurso infinito y cada vez más escaso. La escasez conlleva múltiples y posibles consecuencias; entre ellas, desabastos agudos de agua, reducción en la seguridad alimentaria, degradación de los ecosistemas ribereños, extinción de especies, dificultades para mantener una variedad de fuentes de suministro de agua, así como estrés en la sociedad local (Postel *et al.* 1996). Además, las crisis en la disponibilidad amenaza los esfuerzos por reducir la huella del carbono (impacto en el medio ambiente por la emisión de dióxido de carbono) y de mantener la asequibilidad y constancia en los servicios municipales de suministro y tratamiento del agua (Hoekstra y Chapagain, 2007; Richter, 2014). Las estrategias para aumentar su disponibilidad, por ende, son cada vez más inviables, desde el punto de vista económico y ambiental. De ahí que los suministros de agua a las viviendas deban complementarse con las estrategias de conservación y manejo de la demanda; es decir, hacer más con menos agua.

Las estrategias para impulsar el uso eficiente del agua son medidas o iniciativas que se dan como resultado de una reducción en el uso esperado del agua o de la demanda por agua de los proveedores, como parte de un proceso de inversión de capital y de planeación corporativa o de las empresas (Stiles, 1996). La mayoría de las estrategias que adoptan los sistemas de suministro de agua se enfocan en el uso eficiente del agua, restricciones en el suministro y regulaciones que tienen consecuencias, como medios de controlar el uso del agua (Bemelmans-Videc *et al.* 2011; Farley y Bremer, 2017). El modelo de Kreutzwiser y Feagan (1989) resume los tres principales componentes que caracterizan el enfoque basado en la demanda, que se orientan primordialmente hacia el uso eficiente del agua y que son: la estrategia económica, la tecnológica/manejo y la administrativa/comportamiento o cultural (Tabla 4).

Tabla 4. Índices de compromiso de manejo la demanda o uso eficiente

Estrategia Económica			
Estrategia Económica	Puntuación	Estrategia Tecnológica/Manejo	Puntuación
Estructura tarifaria		Medición	
▪ Precio fijo	1	▪ Sector residencial	5
▪ Medidor descendente	3	▪ Sector comercial, institucional e industrial	5
▪ Medidor fijo	5	Presupuesto 2007 para reparación de medidores	
▪ Medidor inclinado	10	▪ Si es mayor a la media de todos los presupuestos municipales	2.5
Tarifa diaria/Hora pico	7	▪ Si es superior a la media de los presupuestos propios de los últimos 5 años	2.5
Precio marginal	5	Distribución del presupuesto para la reparación de fugas 2007	
Aumento en la tarifa total	3	▪ Si es mayor a la media de todos los presupuestos municipales	5
Sobreprecio en verano	7	▪ Si es superior a la media de los presupuestos propios de los últimos 5 años	5
Aumento a corto plazo	5	Limitar la distribución del sistema de presión	5
Sobreprecio por aguas negras	3		
Otros cargos	2		
Puntuación máxima	42	Puntuación máxima	30
Estrategia Administrativa/Comportamiento		Puntuación	
Educación/Información			
▪ Folletos sobre el recibo del agua			1
▪ Seminarios/Reuniones			1
▪ Medios de comunicación			1
▪ Recorridos a las plantas de tratamiento			1
▪ Programas de educación para industrias y comercios			1
▪ Otras estrategias similares			1
Dispositivos para conservación del agua			1
Plomería y/o reglamentos de construcción			10
Reglamento sobre el uso del agua			3
▪ Restricciones voluntarias			1
▪ Restricciones obligatorias			7
▪ Otros			1
Puntuación máxima		28	
Puntuación total		10	

Fuente: Adaptado de Kreutzwiser y Feagan, 1989.

Como se puede observar en la tabla anterior, la estrategia que más influye en el uso eficiente es la económica, seguida por la tecnológica/manejo y por último, la administrativa/comportamiento. Este modelo ha sido probado en 219 municipios de la provincia de Ontario en Canadá para analizar en qué medida los organismos municipales que prestan el servicio de agua potable, drenaje y saneamiento orientan sus acciones hacia el uso eficiente del agua. Este modelo considera que la estrategia económica, vía el mecanismo de precios, es el medio más efectivo para promover la conservación del agua. La estrategia tecnológica/manejo considera al

medidor y a la reparación de fugas, como las medidas que inducen una reducción en el uso del agua y, finalmente, la estrategia administrativa/comportamiento se apoya en acciones de educación que fomentan una conducta de conservación del agua entre los usuarios. De aplicarse esta última dimensión, los mayores ahorros se darían con la instalación de dispositivos domésticos y reglamentos de construcción que promueven el uso eficiente del agua.

La propuesta de tarifas se sustenta en el supuesto de que si se le da al agua potable un valor económico, los usuarios harán un mejor uso de ella. Esto haría posible recuperar grandes cantidades de volúmenes para su utilización en otras actividades que no requieren agua de primer uso. Sin embargo, es conveniente que la estructura tarifaria refleje el costo real de llevar el agua desde su fuente de extracción a los lugares donde será utilizada. Por ello, de acuerdo con Roemer (2007), la importancia que tiene el proporcionarle un valor económico al agua (precio por medio de tarifas) está en función de quién recaude el cobro por el servicio. Se dice que este lo deben manejar directamente los organismos operadores responsables del suministro y no otras entidades públicas.

De esta forma, esta teoría presupone que el precio del agua cumple una triple función, que es social, económica y financiera. La función social que cumple el precio es la de reconocer la capacidad de pago y el nivel socioeconómico del grupo e individuo. La función económica se refiere a los incentivos para orientar la demanda o uso eficiente del agua. La función financiera del precio es la autosuficiencia de la empresa proveedora del servicio. Se trata de que los ingresos cubran los costos operativos y de funcionamiento de las inversiones realizadas en el sistema de agua.

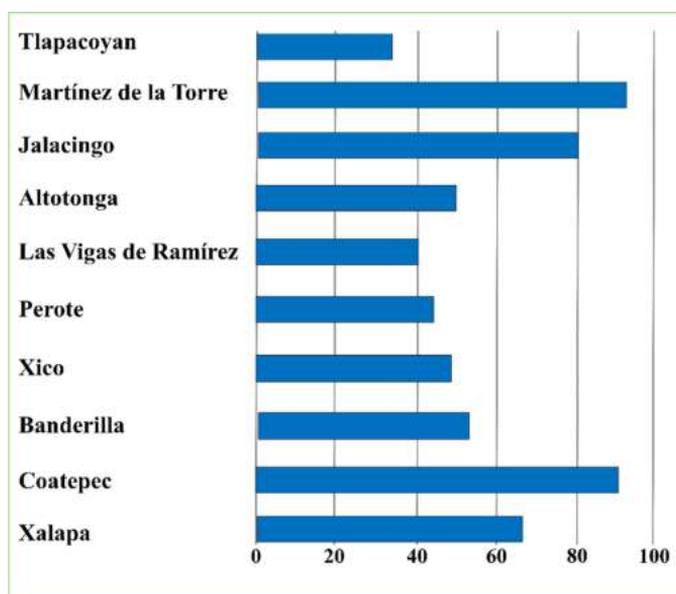
La idea de que los organismos operadores responsables del suministro sean quienes manejen los ingresos monetarios es la de tratar que el nivel de la tarifa no responda a situaciones políticas, sino a los requerimientos financieros y contables del servicio. Lo anterior evidencia que si bien este enfoque está técnicamente bien definido, el aspecto político relacionado con la implementación de los cobros es un asunto discutible y controversial (Ruelas, 2006).

La dimensión económica de este modelo fue evaluada por González (2013), en diez organismos operadores del agua de los municipios de Altotonga, Banderilla, Coatepec, Jalacingo, Las Vigas de Ramírez, Martínez de la Torre, Perote, Tlapacoyan, Xalapa y Xico, que se localizan en la zona centro del estado de Veracruz. Lo que subyace en todos estos organismos es que se constituyen e insertan en la política de descentralización de la gestión del agua, que tiene por intención traspasar recursos y funciones del gobierno central a los gobiernos locales —y, a veces, en un mismo movimiento, a la sociedad local—. Lo importante de esto es que la descentralización pretende reemplazar un funcionamiento tecnocrático y

autoritario para instalar una gestión democrática y con participación local. Por ello, la participación de la mujer en estas instancias podría encontrar un campo fértil para incidir en la toma de decisiones.

Sin embargo, en la Figura 2 se muestra que el porcentaje de recuperación por cobro de agua en más de la mitad de los organismos analizados está por debajo del 50%, siendo los más bajos Tlapacoyan, Las Vigas de Ramírez, Perote, Altotonga y Xico, todos ellos organismos desconcentrados de la CAEV. Martínez de la Torre y Jalacingo son los únicos organismos de similares características que sobrepasan el 80%. Llama la atención que de los Organismos que son Comisiones Municipales, es decir, descentralizados, como es el caso de la Comisión de Banderilla, de acuerdo con la información proporcionada solo alcanza el rango de entre 46% y 55% de recuperación en el cobro. Con un porcentaje más alto se encuentran los organismos de Xalapa y Coatepec, con los rangos de entre 55 a 100%.

Figura 2. Porcentaje estimado que se recupera por el cobro del agua en los 10 organismos operadores de la región centro de Veracruz



Fuente: González, 2013.

Como se puede observar, el porcentaje de recuperación es muy bajo, si se toma en cuenta el número de habitantes que cada organismo tiene a su cargo de proporcionar el servicio (Tabla 3).

Los municipios de Altotonga y Banderilla, aunque presentan tasas de crecimiento menos elevadas en comparación con los demás, tendrían que tener programas de uso eficiente de agua, para que el consumo no siga en aumento y provoque un uso excesivo que genere algún desabasto de líquido. Los municipios de Martínez de la Torre, Coatepec y Tlapacoyan, aunque presentan tasas de crecimiento menores al 1%, y por consecuencia esperarían menor crecimiento poblacional, en números absolutos tienen una población alta, por lo que seguirán imponiendo una fuerte presión sobre el consumo y la prestación del servicio (Tabla 5).

Tabla 5. Demanda potencial del servicio del agua a los 10 organismos operadores de la región Centro de Veracruz

Organismo	Población	No. De hogares	No. De viviendas ocupadas	Promedio de ocupantes por vivienda	Viviendas que disponen de agua	Tasa de crecimiento %	Tasa de crecimiento estatal %
Xico	35,188	8,237	8,279	4.3	7,831	2.18	1.00
Las Vigas de Ramírez	17,958	4,151	4,154	4.3	3,292	1.61	1.00
Tlapacoyan	58,084	15,095	15,115	3.8	13,370	0.37	1.00
Martínez de la Torre	101,358	27,550	27,729	3.7	20,368	0.16	1.00
Perote	68,982	15,592	15,596	4.3	14,703	2.23	1.00
Altotonga	60,396	13,915	13,956	4.3	10,020	1.66	1.00
Jalacingo	40,747	8,977	9,006	4.5	7,807	2.59	1.00
Banderilla	21,546	5,629	5,690	3.8	5,416	1.46	1.00
Coatepec	86,696	22,862	22,862	3.8	21,760	0.59	1.00
Xalapa	457,928	129,184	129,184	3.6	118,813	0.11	1.00

Fuente: INEGI, 2010; CONAPO, 2010, citado en González, 2013.

Si bien se identificaron las características de los organismos de acuerdo a su tasa de crecimiento poblacional con referencia a la disponibilidad del agua, también es de suma importancia diferenciar a estos organismos con respecto a la tasa de crecimiento estatal, ya que el 60% de los organismos están por arriba del promedio estatal, lo que se refleja en organismos como los de Xico, Perote y Jalacingo. Esto trae problemas de orden financiero que no permiten más inversión y mejoramiento en su infraestructura y provocan que exista una menor posibilidad de eficiencia en sus operaciones.

En cuanto al enfoque de conservación del agua, a pesar de que tiene aceptación internacional, este enfrenta grandes retos, como lo es el cambio en la percepción que la sociedad tiene hacia el valor real del agua y la necesidad de inculcar una actitud de responsabilidad hacia el recurso como un todo. Por tanto, se reconoce como un elemento clave en la transición hacia una sociedad que haga un uso sustentable del agua, el introducir enfoques de conservación (McGranahan, 2002), debido a que el gasto en dispositivos para el uso eficiente del agua, altas

tarifas y políticas ahorrativas sobre programas de incentivos financieros puede desincentivar las inversiones en la conservación y en la participación de los hogares en actividades de conservación. Sobre este aspecto, Addo, Thoms y Parsons (2019) encontraron que el aumentar mensajes sobre la conservación con mensajes sobre incentivos sobre el buen comportamiento produce altas intenciones de actuar. Mensajes específicos sobre estrategias de conservación tienen influencia en las respuestas afectivas, cognitivas y de comportamientos en los jefes de familia, ya que percibieron la situación de escasez y la disposición de actuar.

Sin embargo, la comunicación de esfuerzos para la conservación del agua no funciona en el vacío, se requiere la participación y compromiso de los tomadores de decisiones políticas y las instancias gubernamentales para apoyar estos esfuerzos de conservación. En este sentido, se insertan las acciones del Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del municipio de Zacatlán, Puebla (SOSAPAZ) (Ruelas, 2017), que estuvo implementando campañas de difusión y apoyo de la ciudadanía, para que el organismo operador funcionara con la solvencia económica que le permitiera tener una cobertura del 75% en el servicio de agua potable, drenaje y saneamiento en la Cd. de Zacatlán y zona conurbada. Se utilizaron cápsulas de radio y televisión para informar sobre la operación de la planta de tratamiento (P.T.A.R.) y la obligación de pagar su operación. Por ello, cuando se les preguntó cuánto estarían dispuestos a pagar por familia para limpiar toda el agua que usan en su casa y en sus W.C. al mes, siempre mostraron disposición a pagar el doble o más que lo que se cobra en su recibo de agua. Ello, porque aceptan que es muy barato los \$17.00 que se les cobra al mes, y que en promedio son 56 centavos diarios por el saneamiento de una casa familiar.

El área de Cultura del Agua se encarga de la encuesta de satisfacción de los usuarios, que generalmente se hace en enero de cada año, que es cuando se presenta la promoción de descuento por pago anticipado y se tiene la mayor afluencia de usuarios. En esta fecha se monitorea la opinión de los usuarios con respecto al servicio que se presta y el impacto de los ajustes a la tarifa, que es en enero. La aceptación de los incrementos anuales se da en gran medida por la atención a los reportes de falta de servicio por reparaciones y fugas, para lo cual existe una coordinación entre las áreas de Cultura del Agua, comunicación social y, en caso de cierres programados, con los inspectores lecturistas del área afectada. El caso de SOZAPAZ ilustra cómo la cercanía del organismo operador con los usuarios del agua, a través del Departamento de Cultura del Agua, les ha permitido obtener esta cobertura en la dotación de agua potable, drenaje y saneamiento, vía la implementación de tarifas diferenciadas de acuerdo al consumo y al tipo de usuarios, medidores del volumen de agua consumida, reparación de fugas, etc.

Conclusiones

Es un hecho que la escasez del agua es un asunto de preocupación mundial, debido a que se acentúa a un ritmo alarmante. Por eso, el dotar de agua en cantidad y calidad suficiente, confiable y asequible, ha sido una prioridad en la agenda política internacional desde hace varias décadas. En estas agendas, se reconoce el papel de la mujer en las tareas de suministro de agua a los hogares. El suministro de agua a los hogares es una actividad que ha recaído en las mujeres y niñas, sobre todo de los países en desarrollo. Esta tarea se da a costa de la realización de otros derechos, como es el acceso a la educación, a disponer de tiempo libre para actividades de esparcimiento, entre otras.

Dado que la asignación de estas tareas a la mujer se ha venido dando por un asunto de género, y que el cambio cultural hacia la igualdad del género en estas tareas es un asunto que se puede ir gestando de manera paulatina, las instituciones públicas deben ir desarrollando estrategias para que el suministro no represente una ardua tarea para las mujeres y niñas. En este sentido, se deben impulsar estrategias que complementen el aprovisionamiento de agua a los hogares, tales como la captación de agua de lluvia, ya que puede solventar los problemas de escasez y ser una fuente de agua más baratas que la compra de agua de pipas o embotellada. Adicionalmente, las estrategias de manejo de la demanda de agua, al fomentar el uso eficiente del agua, contribuyen a mitigar la escasez y a reconocer que el agua es un recurso finito.

Los casos analizados de los organismos operadores del agua de la región Centro de Veracruz ilustran que aún falta mucho por hacer en torno a la meta de impulsar un uso eficiente del agua. El caso del organismo operador del municipio de Zacatlán, Puebla, en contraste, muestra que cuando existe una estrecha comunicación entre usuarios y el prestador de servicios, estos se corresponsabilizan de la gestión eficiente del recurso, en términos de suministro y de saneamiento. El uso eficiente, finalmente, redundará en menos horas de dedicación de la mujer a estas actividades, así como en mejores condiciones de salud y seguridad personal. Finalmente, el género como un proceso dinámico de representación de lo que significa ser hombre o mujer se va construyendo a partir de las situaciones de la vida diaria, donde el agua está siempre presente.

Referencias

Addo, J. B., Thoms, M. C. y Parsons, M. (2019). The influence of water conservation messages on reducing household water use. *Applied Water Science*, 9(126), 1-13.

- Bemelmans-Videc, M. L., Rist, R. C. y Vedung, E. O. (Eds.). (2011). *Carrots, sticks, and sermons: Policy instruments & their evaluation*. Transaction Publishers, New Brunswick. 288 p.
- Cavallo, E., Powell, A. y Serebrisky, T. (Eds.). (2020). *De estructura a servicios: el camino hacia una mejor infraestructura en América Latina y el Caribe*. (Consultada 20 de octubre de 2020). <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/De-estructuras-a-servicios-El-camino-a-una-mejor-infraestructura-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- CONAGUA-SEMARNAT (2020). (Comisión Nacional del Agua y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2018). *Estadísticas del Agua en México*. (Consultada 3 de octubre de 2020). http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Farley, K. A. y Bremer, L. L. (2017). Water is life: local perceptions of páramo grasslands and land management strategies associated with payment for ecosystem services. *Ann Am Assoc Geogr*, 107(2), 371–381
- González M., M. G. (2013). *El proceso de descentralización en la gestión del agua, a través de la eficiencia económica de los organismos operadores: estudio de caso en la zona centro del estado de Veracruz*. Tesis de Maestría en Contabilidad y Gestión Empresarial. IIESCA, Universidad Veracruzana.
- Hoekstra, A.Y. y Chapagain, A.K. (2007). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resour Manag*, 21(1), 35-48.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). Módulo de Condiciones Socioeconómicas de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (MCS-ENIGH). (Consultada 17 de agosto de 2020). <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/35>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2018). Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH). (Consultada 17 de agosto de 2020). <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2018/>
- Ivens, S. (2008). Does Increased Water Access Empower Women? *Development*, Palgrave Macmillan. *Society for International Deveopment*, 51(1), 63-67.
- Kreutzwiser, R. D. y Feagan, R. B. (1989). *Municipal utilization of water demand management; the Ontario Experience*. (Consultada 17 de septiembre de 2020). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.1989.tb03104.x>
- Martínez, S., Kralisch, S., Escolero, O. & Perevochtchikova, M. (2015). Vulnerability of Mexico City's Water Supply Sources in the Context of Climate Change. *Journal of Water and Climate Change*, 6(3), 518–33.
- McGranahan, G. (2002). *Demand-side water strategies and the urban poor*. (Consultada 15 de septiembre de 2020). <https://pubs.iied.org/pdfs/9160IIED.pdf>

- Melero A., N. (2011). La participación de la mujer en el acceso y gestión del agua. Una experiencia cubana. *Revista Andaluza de Ciencias Sociales*, (10), 21-30.
- Pastor, C. (2019). *El mantenimiento como herramienta para conseguir infraestructura de alta calidad y durabilidad*. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, D.C. 36 p.
- Postel, S. L., Daily, G. C. y Ehrlich, P. R. (1996). Human appropriation of renewable fresh water. *Science*, 271, 785-788
- Richter, B. (2014). *Chasing water: a guide for moving from scarcity to sustainability*. Island Press, Washington, 375 p.
- Roemer, A. (2007). *Derecho y economía: Políticas públicas del agua*. Miguel Ángel Porrúa. México. 317 p.
- Rovira, C., Sánchez, M. y Rovira, M. D. (2020). Is Rain Water Harvesting a Solution for Water Access in Latin America and the Caribbean? An Economic Analysis for Underserved Households in El Salvador. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, D. C. 41 p.
- Ruelas M., L. C. (2006). *Los conflictos por la Distribución del Agua. La necesidad de su manejo desde la perspectiva de la planeación colaborativa*. Consejo Estatal de Protección al Ambiente. Xalapa, Ver., México. 96 p.
- Ruelas M., L.C. (2017). *Gobernanza para el manejo integral de cuencas. El programa de gestión del río Necaxa, una subcuenca de montaña*. El Colegio de Veracruz y Juan Pablos Editor. México, 170 p.
- Stiles, G. (1996). Demand-side management, conservation, and efficiency in the use of Africa's water resources. (Consultada 8 de septiembre de 2020). <http://www.nzdl.org/gsdllmod?e=d-00000-00---off-0cdl--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-11--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0--4----0-0-11-10-0utfZz-8-10&ccl=CL2.23&d=HASH017bfa6f446d1b98d332bd60.5.1>=1>
- Tortajada, C. s/f. El agua y el medio ambiente en las conferencias mundiales de las Naciones Unidas. Agenda 21, Ayuntamiento de Zaragoza, España. España. 259 p.

Capítulo 5

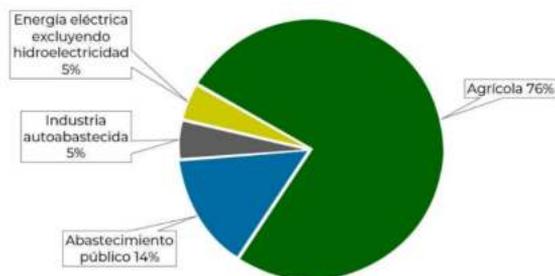
Las opciones del riego tecnificado: tecnologías para el ahorro del agua en el campo

Humberto Herrera López¹
Amado Enrique Navarro Frómata¹

El uso del agua para el riego agrícola en México

Es sabido que las actividades agropecuarias son la base de la alimentación y la supervivencia para el hombre, por esta razón cada una de sus áreas o disciplinas de estudio e investigación deben fortalecerse para producir más con menos recursos y a un menor costo. El riego agrícola, por su estrecha relación con el uso, el manejo y la conservación del agua, es una de estas áreas dentro de la agricultura que requiere de mayores estudios, avances tecnológicos y de la aplicación de estos sin deteriorar el medio ambiente. Únicamente el 0.01% del agua del planeta se encuentra disponible para su uso potencial lo que nos da un total de 0.14 millones de km³. En lo que se refiere a los usos del agua en México, el 76% corresponde al uso agrícola como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Distribución de los volúmenes de agua concesionados para usos consuntivos en México, 2017 (adaptada de CONAGUA, 2020)



¹Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros.

*Autor de correspondencia, humberto950@hotmail.com

Esto nos muestra la importancia de la aplicación adecuada del agua de riego para la gestión sostenible del agua en México (por supuesto, en los demás países también). Según el Programa Nacional Hídrico 2020-2024 (CONAGUA, 2020), México ocupa el 11° lugar a nivel mundial por su producción agrícola y el 7° lugar por su superficie con riego. La superficie sembrada dedicada a la agricultura es de aproximadamente 22 millones de hectáreas, de las cuales, 6.1 millones cuentan con infraestructura de riego y el resto es de temporal. La superficie bajo riego esta compuesta por 86 distritos de riego que cubren 2.5 millones de hectáreas, y aproximadamente 40 mil unidades de riego para 3.6 millones de hectáreas. En general, solamente un 10 % del área mencionada cuenta con riego tecnificado. Aunque la superficie bajo riego es mucho menor que la de temporal, su productividad es significativamente mayor (de entre 2 y 3 veces la de temporal), por lo que las áreas de riego generan mas de la mitad de la producción agrícola nacional. De esto se derivan estrategias y acciones puntuales que tienen que ver con la eficiencia del uso del agua, como se muestra en la Figura 2, debiendo añadirse que es vital una mayor tecnificación del riego.

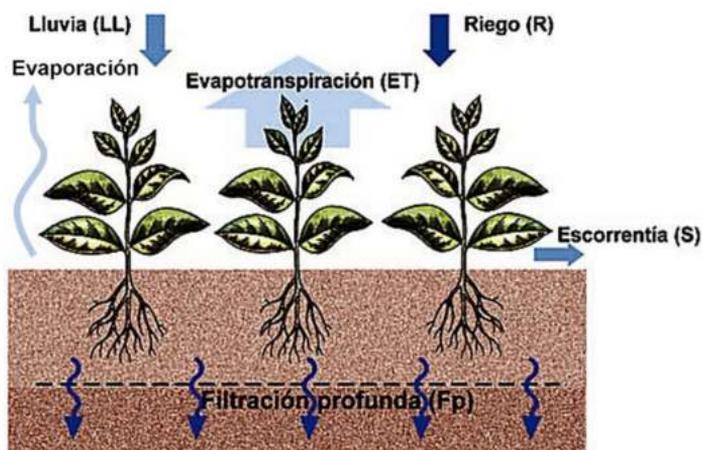
Figura 2. Estrategias prioritarias y acciones puntuales del Objetivo prioritario 2 del PNH 2020-2024 (Adaptada de CONAGUA, 2020)



Los fundamentos del riego

El agua es el principal constituyente de las plantas (entre el 50% y 80% de su peso), constituyendo además el medio de transporte de los nutrientes que provienen del suelo. El mayor consumo del agua se da en el proceso de evapotranspiración, que constituye un importante proceso en su desarrollo, siendo más del 95% del consumo de la misma. El déficit de agua en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo produce mermas en su rendimiento, por lo que, si la precipitación pluvial en una determinada zona agrícola es insuficiente o se encuentra mal distribuida en el tiempo y el espacio, se presentará un déficit de humedad. Por lo tanto, para evitarlo generalmente debe complementarse el agua de lluvia que reciben los cultivos, con agua suministrada mediante el riego. El agua que necesitan los cultivos para cumplir sus funciones fisiológicas se adquiere de forma natural por las precipitaciones en el temporal o en los meses más lluviosos del año, pero cuando ésta es escasa o su distribución no coincide con los períodos de máxima demanda de las plantas, es necesario aportarla artificialmente; es decir, a través del riego. Entonces, debemos ocuparnos de que el riego sea lo más eficiente y oportuno posible. Lógicamente, parte del agua se infiltra, otra se escurre y otra se evapora, como se muestra en la Figura 3. La elección del sistema de riego influye en el balance de estos procesos.

Figura 3. Componentes del balance del agua (adaptado de Fernández Gómez *et al.* 2010)



La máxima eficiencia en la producción agrícola es la consecuencia de un número elevado de variables, nunca de un factor único. La ocurrencia de lluvias, la aplicación de riego complementario, mejor conocido como riegos de auxilio, junto con una buena elección del sistema correcto y el uso de maquinaria adecuada y variedades de alto potencial, uso adecuado de fertilizantes con base a resultados de análisis de suelos y de agua, etc., son parte de un conjunto de medidas que, de no preverse su concurrencia en tiempo y forma, conduce a que el resultado final no sea el óptimo y no se aproveche en medida razonable su potencial.

Los sistemas de riego

En la actualidad son tres los métodos de riego utilizados en agricultura: superficie, localizado y aspersión. No es esta la única clasificación.

En el riego por superficie, el agua discurre sobre el suelo aprovechando la fuerza de gravedad y la pendiente de la parcela en su caso, sin necesidad de dotar al agua de presión. En el caso del riego localizado y del riego por aspersión, es necesario suministrar al agua una energía determinada para que ésta circule por las tuberías a presión.

Cuando el agua de riego circula o se encuentra almacenada en balsas, embalses, canales, ríos, etc., y estos se encuentran situados a un nivel suficientemente alto con respecto a la parcela de riego, el agua, conducida por una red de distribución cerrada, adquiere una determinada presión. Ésta se debe a la energía que tiene por la propia diferencia de altura con respecto a la parcela.

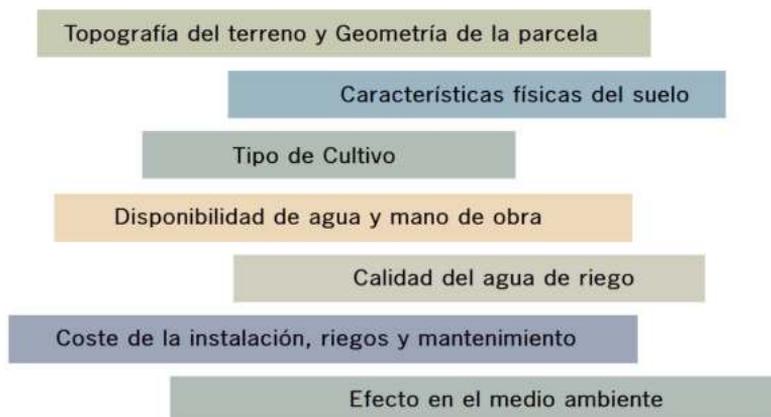
En caso de que el agua no se encuentre en estas condiciones —por ejemplo, si la parcela de riego está a mayor altura que el lugar donde se encuentra almacenada e incluso al mismo nivel—, será necesario suministrarle energía para que alcance la presión necesaria para circular por toda la red de riego y salir por los emisores con una presión tal que garantice su buen funcionamiento.

La selección del método de riego se basa en criterios agronómicos, económicos y de operación de los sistemas de riego (Figura 4). Estos criterios tienen relación con el cultivo, el suelo, la topografía, el clima, la disponibilidad del agua, los recursos económicos de los usuarios, la disponibilidad de mano de obra, las labores culturales efectuadas al medio físico, la concepción cultural del manejo del riego y la disposición de mejorar las técnicas de riego y la forma de administración de la unidad de riego.

Debido al incremento acelerado de escasez del agua, los planes de cultivo deben adaptarse a la disponibilidad del recurso, sin olvidar cuestiones de mercado, y por lo tanto, la selección del método de riego debe considerar, en primera instancia, la disponibilidad del agua y el plan de cultivos. Los demás criterios de

selección desde luego que juegan un papel importante en la adopción del método de riego y son de gran utilidad para analizar diferentes alternativas de riego en una segunda etapa de selección, ya que algunos por sí solos pueden determinar el método de riego.

Figura 4. Factores a considerar en la elección del método de riego
(adaptada de Fernández Gómez *et al.* 2010)



Evaluando los criterios para seleccionar el método de riego, a continuación se valoran la disponibilidad del recurso y los conocimientos del agricultor. Para profundizar en estos aspectos se puede consultar a Demin, 2014.

La disponibilidad del agua a nivel parcela en cuanto a cantidad y duración está asociada a la forma de operación del sistema de conducción y distribución de la unidad de riego. La disponibilidad del agua en la parcela, en un gran caudal en tiempo reducido y con grandes intervalos entre entregas sucesivas, señala la conveniencia del uso del método de riego por inundación; salvo que económicamente sea posible la construcción de un reservorio regulador, en cuyo caso se pueden considerar otras alternativas. Por el contrario, si el caudal es reducido y se dispone por tiempos largos y las entregas sucesivas son más frecuentes, puede emplearse eficientemente el riego por surcos. Finalmente, si el caudal es muy reducido pero más o menos constante, o está disponible un elevado número de horas al día, sin lugar a dudas que los métodos de riego por goteo y aspersión son una buena alternativa.

Por otro lado, los conocimientos del agricultor y sus habilidades en lo referente a la aplicación del riego, así como su disposición para aprender nuevas técnicas de aplicación del agua, juegan un papel muy importante en la selección del método de riego. Así, por ejemplo, el uso del riego presurizado con válvulas de control reduce mucho el peso de las decisiones que debe de tomar el usuario.

El riego superficial: algunos problemas en la zona cañera de la Mixteca Poblana

Los métodos de riego superficiales son los más usados en el caso de la región cañera de la Mixteca Poblana, donde el uso del agua para este fin presenta problemas que conducen a un consumo por encima de lo necesario. De acuerdo con lo detectado en reuniones con los ejidos, con pequeños propietarios independientes, así como en visitas en campo, se detectaron los siguientes problemas:

- Los canales de riego se encuentran muy deteriorados, por lo que la canalización de agua se vuelve cada vez menos eficiente y el gasto de agua que tiene que llegar al cabezal de riego o la parcela a regar es menor, por lo que no alcanzan a dar el agua necesaria para cumplir las funciones biológicas del cultivo, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Canal de riego deteriorado



- Las cajas repartidoras, por lo mismo, se encuentran en pésimas condiciones, lo que ocasiona que el reparto del agua no sea equitativo y algunos usuarios se benefician con más litros por segundo, como se muestra en la Figura 6.

Fig 6. Caja repartidora en malas condiciones



- Aunado a lo anterior, en las parcelas a las que llega suficiente agua se aplica un volumen en exceso provocando erosión en los suelos e intervalos de riego tan dilatados que las plantas sufren estrés por mucho tiempo de agua, afectando los rendimientos, como se muestra en la Figura 7.
- El casi absoluto predominio de la técnica de riego por surcos, así como su explotación ineficiente, sin la introducción de nuevas técnicas de riego por multicompuertas, aspersión o por goteo.
- La mala selección de la técnica de riego o mal manejo de la técnica actual.
- Falta de diseño y construcción de obras hidrométricas en la red.
- Ineficiente manejo de los tiempos y volúmenes de agua en la red de distribución.
- Falta de aprovechamiento de la capacidad de bombeo instalada.
- Mal estado de mantenimiento y conservación de la red de canales de riego y drenaje.

- Diseño inadecuado de la red de conducción y distribución.
- No existe consenso entre los propietarios para que se aplique el agua de acuerdo con las normas de riego conocidas y no por cantidad de horas, como en la actualidad se realiza.

Figura 7. Riego rodado



La caña de azúcar, bajo condiciones ambientales óptimas, evapotranspira o consume entre 1350 y 1650 mm/año de agua procedente de la lluvia o del riego para producir entre 90 y 165 t/ha/año en dependencia del ciclo de siembra, la variedad, el potencial productivo del suelo y el estado de la plantación; lo cual equivale a tasas de aprovechamiento de entre 10 y 15 mm/t de caña y de 80 y 140 mm/t de azúcar.

El consumo diario de agua varía, en promedio, entre 2.5 y 5 mm en dependencia también del estado vegetativo, la edad de la plantación y la época del año. Los valores máximos medios mensuales alcanzan entre 6.0 y 6.5 mm/día cuando el gran período de desarrollo coincide con las temperaturas más altas.

Un régimen pluviométrico moderado pero bien distribuido es preferible a un exceso de lluvias concentrado solo en una parte del año. Lo mismo ocurre en el riego, donde poca agua bien administrada es mejor que su uso irracional.

El bajo nivel de las precipitaciones en el área de caña del ingenio de Atencingo obliga a utilizar el riego en el 100% del área, donde una correcta interpretación de las relaciones de agua-suelo-planta para la regulación controlada de

la humedad del suelo resulta imprescindible para obtener altas producciones sin perjudicar el medio ambiente bajo un manejo integral sostenible. Aún aplicando este sistema de riego, se puede obtener una mayor eficiencia en el uso del agua.

Uno de los aspectos importantes a considerar en la aplicación del riego parcelario, y que no se debe de perder de vista, es que el agua que se aplica a las parcelas viene del río, de una presa o bien de pozo profundo. Una vez que ya está definida la fuente de agua, es necesario revisar de dónde se va a tomar el agua; es decir, si es una toma de agua de cabecera o bien un canal principal, o bien, ya se cuenta con tubería e hidrantes y, por otro lado, tomar en cuenta que lo más importante son los canales distribuidores o tuberías primarias, secundarias y terciarias para su implementación, además de una buena red de drenaje para evacuar los excedentes de agua y mantener un buen lavado de las sales. Por último, tener estructuras de control al momento de terminar el riego o de suspensión de riegos para evitar la entrada de agua a las parcelas como compuertas, válvulas, medidores, aliviadores y los que comúnmente conocen los productores como azacuales.

Independientemente de que se han señalado algunos problemas para el riego rodado, es una opción muy difundida por la simplicidad de sus operaciones y el bajo requerimiento de energía. Los agricultores pueden hacer mucho para mejorar la eficiencia de este sistema si se atienden los problemas señalados y utilizan sus conocimientos de cada cultivo, para no aplicar en exceso el agua ni que haya períodos largos entre riegos que conlleven estrés hídrico en el cultivo.

Las opciones del riego tecnificado

¿Por qué es bueno evaluar el uso de las opciones del riego tecnificado?

La tecnificación del riego permite, entre otros aspectos (PSI 2016a):

- Mejorar la tecnología de la agricultura irrigada, por medio de modernos y eficientes sistemas de riego. Esto permite aplicar al cultivo el agua que requiere en cantidad, calidad y oportunidad para mejorar la producción, alcanzando una mayor eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes, mayor producción y disminuyendo las pérdidas y desperdicios.
- Disminuir el consumo de agua en las parcelas y, por consiguiente, lograr una disminución de los gastos por tarifa eléctrica.
- Tener mayor disponibilidad de tiempo para dedicarse a otras actividades.
- Obtener mayores ingresos económicos para los agricultores.
- En la Figura 8 se ilustra que una mayor eficiencia conlleva un mayor nivel tecnológico. La elección y el aprovechamiento depende ya del agricultor.

Figura 8. Eficiencia y nivel de tecnología entre diferentes sistemas de riego
(adaptada de Miranda, 2016)



Sin pretender agotar el tema, veremos algunos de los sistemas de riego más importantes.

El riego por multicompuertas

Es una versión más técnica del riego por gravedad. Se caracteriza por ser un sistema de riego de baja presión; es decir, que no requiere generar una presión para su buen funcionamiento —alrededor de 1 o 2 metros de la columna de agua para su operación en la válvula—. Se emplea para aplicaciones de riego por gravedad en parcelas, aprovechando la carga hidráulica disponible de la fuente de abastecimiento, por lo que la ventaja principal es que el agua se conduce entubada hasta el inicio del surco o melga sin tener pérdidas de agua por infiltración, evaporación o por conducción, siendo posible dar riegos más uniformes, con láminas más pequeñas y, por lo tanto, más frecuentes (Figura 9). Consta de tubos, válvulas y conexiones de PVC, con protección ultravioleta y empalme de unión flexible, de fácil y hermético ensamble y desarmado. Sus compuertas regulables derivan el agua directamente al surco. Su instalación también puede ser mixta con una parte fija enterrada (matrices conductoras), y el resto en la superficie (PSI, 2016a, 2016b). Partiendo de parcelas que ya disponían de agua conducida por tuberías se implementó un sistema de este tipo, como se muestra en la propia Figura 9. En una parcela se logró incrementar el número de tendidas de 3 a 5. Comúnmente con el riego rodado se implementaban 3 tendidas, lo que quiere decir, dado que cada tendida

consta de 10 surcos, que se incrementaron 20 surcos más de riego ahorrando tiempo de regadío y maximizando el aprovechamiento del agua (Navarro *et al.* 2019).

Figura 9. Sistema de riego por compuertas. a) Características del sistema (adaptada de PSI, 2016b); b) detalle de compuerta (tomada de agua.org.mx); c y d) Sistema instalado en la Mixteca Poblana en dos etapas de crecimiento de la caña



a



b



c



d

Resumiendo, entre las bondades del riego por multicompuertas se pueden señalar (PSI, 2016a):

- Sustituye muy bien a los canales de conducción y distribución, disminuyendo las pérdidas por infiltración, alcanzando alta eficiencia de riego (70%).

- Bajos costos de inversión, de instalación, de operación y mantenimiento.
- Gran versatilidad del sistema, que permite regar con agua de pozo y de avenidas.
- Simple de diseñar y fácil de instalar, cuando se utiliza tubería de PVC.
- Mínima inversión y rápida recuperación de capital.
- Permite mejorar la fertilización de los cultivos.

El riego por aspersión

El sistema de riego por aspersión con cañones consiste en simular la lluvia, pero controlando la duración e intensidad de esta (Figura 10). Esto tiene ventajas, como la fijación de nitrógeno atmosférico y el control de algunas plagas de importancia agrícola como el gusano cogollero.

Indiscutiblemente, este sistema ya es un poco más complicado, dado que el sistema exige un cierto grado de presión del agua para que funcione correctamente. Se requieren 4 kilos de presión, por lo cual, si se tiene tubería vieja esta puede no aguantar la presión y, por lo tanto, los tubos se van a reventar, ocasionando problemas. Por ello, antes de implementar este tipo de sistema se tienen que revisar minuciosamente las condiciones en que se encuentra la tubería para que todo funcione adecuadamente; además, es necesario disponer de un hidrante con el cual se conectará la tubería, que generalmente es de aluminio si se quiere un sistema móvil.

Con este tipo de sistema de riego se pueden regar casi todos los cultivos, excepto aquellos que son muy sensibles a mucha humedad en el follaje. Se adapta a todo tipo de suelos, debiendo de tener cuidado en aquellos que tienen poca infiltración y también en suelos con pendientes pronunciadas. Se adapta a terrenos hasta con 6 metros de elevación sin problema alguno, teniendo una eficiencia mayor al 85%; es decir que con la misma cantidad de agua que se riega una parcela de caña de azúcar de una hectárea por sistema de riego por gravedad. Al implementar este sistema por aspersión con cañones se pueden regar 1.8 hectáreas con la misma cantidad de agua.

En un experimento de aplicación del sistema en 5 hectáreas de un productor cañero de la Mixteca Poblana se obtuvo un rendimiento de 175.6 y 160 toneladas por hectáreas en plantilla y soca (la media de la región es de 120 toneladas por hectárea). Además, el productor comentó que en vez de los 15 días para regar sólo necesitó 10 (Navarro *et al.* 2019).

En resumen, el riego por aspersión con cañones tiene las siguientes bondades (PSI, 2016a):

- Aplicar agua a los cultivos en forma uniforme y controlada.
- Reducir las pérdidas por conducción y distribución.
- Eliminar los requerimientos de nivelación de suelos.
- Eliminar el peligro de erosión de los suelos.
- Mínimizar la demanda riego.
- Mejorar la eficiencia y economía en la aplicación de fertilizantes y pesticidas.

Figura 10. Sistema de riego por aspersión con cañones



El riego por goteo

Se le denomina así porque permite la aplicación del agua y los fertilizantes en la zona radicular del cultivo, en forma de “gotas” de manera localizada, con alta frecuencia, en cantidades estrictamente necesarias y en el momento oportuno (PSI 2016a).

Es una de las técnicas relativamente más recientes, de mayor complejidad por el número de componentes que lo integran, y que implica conocer su funcionamiento a la hora de su implementación; pues realizar el cambio drástico de riego por gravedad a riego por goteo implica un manejo del agua totalmente diferente, empezando por el tipo de conducción, ya que el sistema de riego por goteo es totalmente por líneas de conducción, además de la implementación de filtros para disminuir el taponamiento de los goteros y ahí es donde empiezan los problemas, porque depende mucho del equipo de filtración a utilizar y del tipo y calidad del agua a utilizar. Por ejemplo, si es de río tendría que filtrarse con un separador de sólidos como un hidrociclón, o si es de pozo profundo, con el uso de filtros de arena de mallas o filtro de anillos y posteriormente el uso de inyectoros para aplicar la solución nutritiva, o bien, un venturi. En la Figura 11 se muestra el sistema instalado en una parcela de caña de azúcar.

Figura 11. Sistema de riego por goteo



El sistema de riego por goteo en el cultivo de caña ha tenido resultados impresionantes, ya que con la cantidad de agua proporcionada para una hectárea de caña de azúcar se logró implementar 2 hectáreas con sistema de riego por goteo y, además, a la par regar una hectárea por el método de riego rodado. Lo anterior, debido a que el sistema de riego por goteo exige una presión muy baja (alrededor de 1 kilo de presión para que el sistema funcione adecuadamente). Si la presión excede el valor estipulado se corre el riesgo de reventar la cintilla, o bien, echar a perder los goteros y que en lugar de gotear empiecen a chorrear el agua, lo cual implica un desperdicio de agua y pérdida de presión. Por tal motivo, se buscó desfogar el agua a una parcela aledaña regulando la presión necesaria para las dos hectáreas implementadas. El rendimiento, en caña, fue de 200 toneladas por hectárea, mientras que con riego rodado se cosechó 160 toneladas por hectárea (Navarro *et al.* 2019).

Por otro lado, la implementación de este tipo de sistema de riego por goteo nos permite realizar la nutrición de los cultivos más dirigida. Se requiere una capacitación especial al productor para la elaboración de la solución nutritiva para evitar taponamientos en goteros y así lograr un riego eficiente, sin problemas y con una durabilidad prolongada. No obstante, tiene algunas dificultades a las que hay que prestar atención para que no afecten su implementación, como es la obstrucción de los sistemas por sólidos y sales y saber que requiere de más conocimiento para su adecuada instalación y manejo.

¿Cómo acceder a los recursos que México destina para el riego tecnificado?

México destina recursos para apoyar a sus productores a tecnificar el riego. En el Diario Oficial de la Federación (DOF 2020), se publicaron las reglas para que “el Programa de Apoyo a la Infraestructura Hidroagrícola se apliquen con estricto apego a los principios de igualdad, no discriminación, eficiencia, eficacia, economía, honradez y transparencia, señalados en los artículos 1 y 134 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. De esta manera se establecen las bases para aportar recursos a los usuarios hidroagrícolas con el fin de que ejecuten acciones e inversiones para preservar y mejorar la infraestructura federal a su cargo y, con ello, mantener e incrementar la producción. Lo anterior, bajo el principio de que la infraestructura hidroagrícola es esencial para alcanzar los objetivos nacionales en materia de seguridad alimentaria, derechos humanos, igualdad de género, agua para las poblaciones rurales, fomentar el arraigo al campo, acceso a las comunidades e infraestructura del medio rural.”

Asimismo se señala, con respecto a los apoyos de la CONAGUA, que el monto del apoyo podrá ser de “Hasta \$22,279.00 por hectárea para acciones de rehabilitación y tecnificación de infraestructura hidroagrícola, relocalización y reposición de pozos, tecnificación del riego, control de maleza acuática, drenaje parcelario, adquisición e instalación de equipo y mecanismos para estructuras de control, automatización y medición volumétrica del agua en canales, conductos presurizados, plantas de bombeo y pozos; así como el almacenamiento, procesamiento y envío de datos, derivados de la medición, manejo, control y uso del agua para riego”.

Por supuesto, dado que los fondos no son ilimitados, los proyectos que se presenten consursan y son evaluados de acuerdo con una escala que puede ser consultada en el documento. Por tanto, considerando que pueden ser mejor evaluados los proyectos colectivos, es necesario unirse. No se debe olvidar que en la unión está la fuerza.

Reflexiones finales

Se han expuesto, sin la idea de agotar el tema o profundizar en los aspectos abordados, algunas consideraciones sobre el riego tecnificado y su importancia. La reflexión más importante es la necesidad de la capacitación y superación constante para aprovechar al máximo el conocimiento acumulado en México, tanto el académico como el ancestral, para una mejor gestión del agua. Como una simple muestra, se pueden consultar muchos materiales y experiencias interesantes de los materiales y congresos del Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (disponibles en su sitio de internet <http://www.riego.mx/>). Además, es importante considerar que:

- Debemos utilizar el agua que necesita el cultivo en el momento que lo necesita, no debemos utilizar mucha agua en unos momentos y que haya intervalos largos entre aplicaciones del riego que conlleven estrés hídrico para los cultivos. Como se hace ahora, desperdiciamos mucha agua.
- Se deben atacar los puntos débiles que afectan la eficiencia de la conducción del agua en los canales e interparcelaria, así como en la aplicación en parcela que da como resultado que la eficiencia global del riego oscile entre alrededor de un 40%.
- Aplicando el riego tecnificado logramos ahorros de agua entre 50 y 80% y, demostrado en las parcelas que se implementaron, rendimientos mucho mejores en la caña de azúcar.
- En la unión, la capacitación y la transmisión de las buenas experiencias y prácticas agrícolas, está la fuerza enorme para mejorar.

Algunas recomendaciones

- Derivado de la experiencia en la implementación de las técnicas de riego se puede decir que para lograr una eficiente implementación de sistemas de riego es necesario realizar la nivelación del área a sembrar, para evitar encharcamientos y poder lograr el avance del agua de manera uniforme.
- Buscar organización entre los productores para lograr un consenso entre los propietarios de cada parcela en el ejido, para que se apliquen las normas de riego establecido y no por una cantidad de horas, como se hace normalmente.
- Entubar o revestir según sean las posibilidades los canales de riego que se encuentran sobre tierra para disminuir pérdidas por conducción.
- Rehabilitar los repartideros de agua por ejido para lograr una distribución equitativa y así evitar conflictos entre ejidatarios.
- Implementar más parcelas, que ya disponen de agua entubada, con las técnicas de riego que más se acoplen a su parcela, partiendo de que el mejor sistema de riego es aquel que le coloca el agua en su parcela con una mayor eficiencia y con un menor costo posible.
- Estar atentos a los programas gubernamentales de apoyo para la tecnificación del riego, tanto estatales como federales.

Bibliografía

- CONAGUA. (2020). Resumen del Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/programa-nacional-hidrico-pnh-2020-2024>.
- Demin, P. (2014). Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego : métodos de riego: fundamentos, usos y adaptaciones. - 1a. ed. - San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca: Ediciones INTA.
- DOF. (2020). Reglas de Operación para el Programa de Apoyo a la Infraestructura Hidroagrícola, a cargo de la Comisión Nacional del Agua, aplicables a partir de 2020. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5591244 &fecha=07/04/2020
- Fernández Gómez R., Ávila Alabarces R., López Rodríguez M., Gavilán Zafra P., Oyonarte Gutiérrez N.A., (2010). Manual de riego para agricultores: módulo 1. Fundamentos del riego: manual y ejercicios. Sevilla: Consejería de Agricultura y Pesca, Servicio de Publicaciones y Divulgación, 2010.
- Miranda, J.F., (2016). ABC del riego tecnificado de agricultura. Nota de Opinión y Ciencia No. 010-2016-SGL, Sociedad Geográfica de Lima. Disponi-

- ble en: <http://www.socgeolima.org.pe/images/2016/03-06-2016/Nota-de-Opinion-y-Ciencia-No.-010-2016-SGL.pdf>
- Navarro Frómata, A.E., Herrera López, H., Castro Bravo, C., (2019). Irrigation Water Challenges: A Study Case in the State of Puebla, Mexico. En: Water Availability and Management in Mexico. Editores: Elena María Otazo-Sánchez, Amado Enrique Navarro-Frómata, Vijay P. Singh. Springer Nature, Suiza, AG 2020. pp. 249-265.
- PSI. (2016a). ¿Sabe Usted qué es el Programa de Riego Tecnificado? Programa Subsectorial de Irrigaciones. Disponible en http://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/biblioteca_guias_programa_de_riego_tecnificado.pdf.
- PSI. (2016b). Sistema de riego por multicompuertas. Programa Subsectorial de Irrigaciones. Disponible en http://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/biblioteca_hojas_riego_multicompuertas.pdf

Capítulo 6

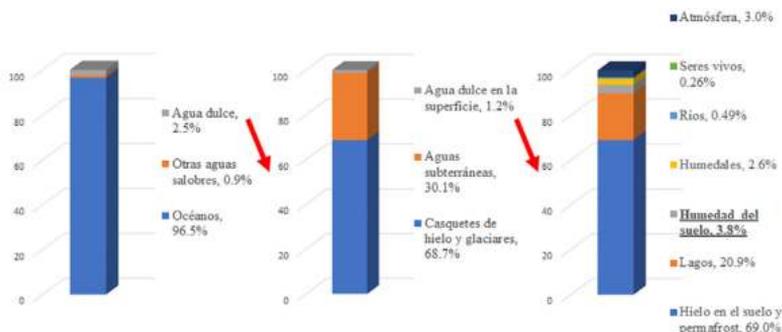
Cuidando el agua verde: experiencias del manejo sustentable de tierras y captación de agua en el Ecocampus BUAP, Puebla, México

Jesús Ruiz Careaga^{1*}
Abel Cruz Montalvo¹
Amado Enrique Navarro Frómeta²
Fernanda González González³
Antonio Pacheco Ríos³

Introducción: El agua verde

Siempre que hablamos del agua nos vienen a la mente la lluvia, un río, un lago, el mar y en algunos casos, el agua que extraemos de las fuentes subterráneas. Sin embargo, no siempre nos percatamos de las proporciones en la que se encuentra el agua en nuestro planeta. En la Imagen 1, se muestran los distintos porcentajes de la distribución del agua en la Tierra.

Imagen 1. Distribución del agua en nuestro planeta (elaborada con los datos de USGS, 2020)



¹ICUAP, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

²Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros.

³Colegio de Postgraduados, campus Tabasco.

*Autor para correspondencia, jesus.ruiz@correo.buap.mx

El agua dulce es tan solo un 2.5% del agua total. A su vez, el agua dulce en la superficie terrestre es solamente el 1.2% de esa cantidad de agua dulce. Si miramos la distribución del agua dulce superficial, nos damos cuenta de que el 3.8% del agua dulce superficial es la humedad del suelo. Esto equivale a un volumen de 16,500 km³ de agua y siendo tan solo el 0.001% de toda el agua del planeta, es la base de la producción agrícola. Esta agua no la vemos.

Con el ánimo de que se entiendan algunos términos que se manejan con relación al agua, a la hora de evaluar la cantidad que se utiliza en las diferentes actividades humanas, lo que constituye la huella hídrica, veamos lo que es el agua azul y el agua verde. Se entiende que el agua azul es la de los lagos, los ríos y los acuíferos. El agua azul se da en dos formas: escorrentía superficial, en las masas de agua superficiales, y escorrentía subterránea renovable, en los acuíferos. El agua verde es la fracción del agua de lluvia que se almacena en el suelo y está disponible para el crecimiento vegetal (Glosario de riego, 2020).

Las buenas prácticas de conservación del suelo están íntimamente ligadas al agua verde (Martínez-Guzmán, 2013). Precisamente a mostrar una experiencia con respecto a ello, se dedica este trabajo.

Un poco de historia, trascendencia y localización del área de estudio

En marzo del 2017, por disposición del Dr. Alfonso Esparza Ortiz, rector de la BUAP, se destinaron 2 ha en el Ecocampus BUAP en Valsequillo para la creación de un Sector de Referencia sobre Manejo Sustentable de Tierras (MST) y Captación de Agua. La idea de este sector de referencia surge de la experiencia de más de dos décadas de trabajos de conservación y recuperación de suelos en la Sierra Norte de Puebla y varios municipios del estado donde un grupo de investigadores del DICA, en colaboración con especialistas del Instituto de Suelos de Cuba, llevaron a cabo proyectos sobre el diagnóstico de los suelos y la degradación. En los 90 se priorizó la formación de recursos humanos, se trabajó estrechamente con las comunidades rurales que poseían predios en estado avanzado de degradación de suelos, incapaces de producir alimentos suficientes para servir de sustento a familias que se han visto sumidas en la pobreza porque sus tierras han perdido la capacidad de sustentar cultivos agrícolas rentables. Comunidades rurales de los municipios de Huehuetla, Huachinango y Tetela de Ocampo, en la Sierra Norte de Puebla, fueron convocadas por su capacidad de poder revertir la degradación ambiental de sus tierras. Para el montaje de 5 sectores de referencia en municipios en sus predios, se contó con apoyo económico para asistir el trabajo en estas comunidades que recibían pagos por lo que se considera un servicio ambiental. Como los proyectos que se acometieron tenían

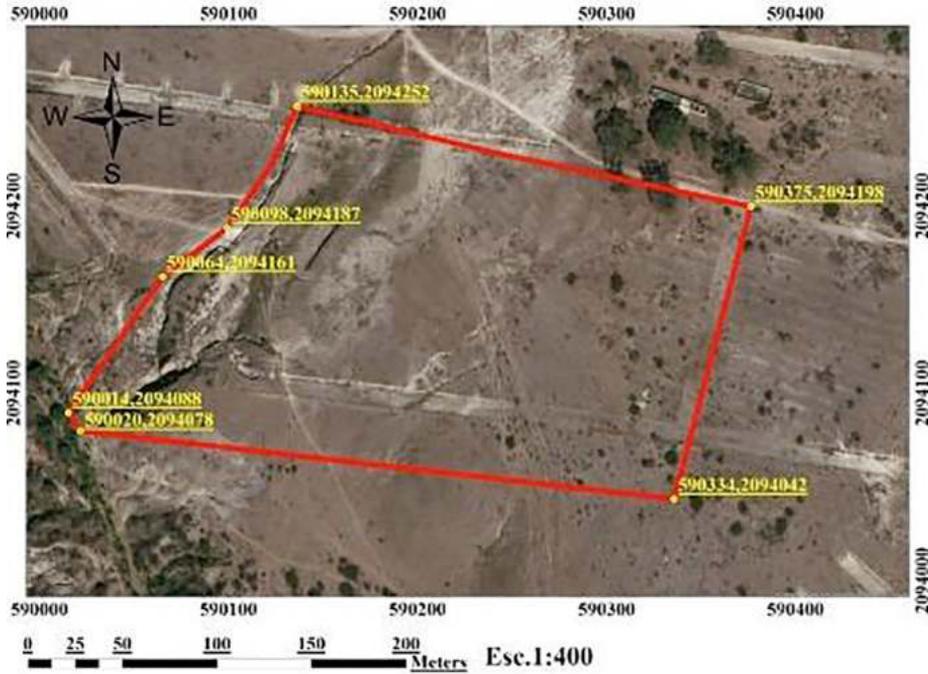
vigencia temporal, terminados éstos ya no se contaba con recursos para darles continuidad y dichos sectores de referencia quedaron por un tiempo como campos demostrativos de cómo manejar las tierras con métodos amigables con el entorno y donde pasaron varias de las primeras generaciones de estudiantes del área de Recursos Naturales del postgrado en Ciencias Ambientales del ICUAP. En 2010 se propone la creación de un sector de referencia en predios de la BUAP para contar con un espacio donde se pudiera aplicar el sistema de medidas concebidas en el MST y manejar este sector como si fuera el predio de un pequeño(a) productor. La idea era introducir tecnologías para conservar suelos con potencial agrícola, disminuir la erosión en áreas afectadas y restaurar sectores con pérdida total de los horizontes edáficos, cultivar parcelas para el sustento familiar y reforestar áreas que una vez fueron bosques. Se pretende convertir este sector de referencia en un modelo que puede aportar experiencias en beneficio de pequeños(a) productores que viven en zonas áridas de Puebla, México y Latinoamérica. Este trabajo es un referente de cómo manejar los suelos en zonas áridas, disminuyendo en lo ambiental el deterioro de estos ecosistemas terrestres; en lo social, mejorar el nivel de vida en comunidades pobres y en lo económico incrementar la producción agrícola, de frutales y forestal con especies originarias de estas zonas y otras de importancia alimentaria.

Esta propuesta surge por la precaria situación ambiental y social en zonas áridas y semi áridas de Puebla y se apoya en los lineamientos del Grupo de Trabajo sobre Desarrollo de Tierras Áridas de la FAO publicados en 1994, donde se recomienda priorizar para el desarrollo de las zonas áridas, atender o plantear nuevas estrategias sobre la disminución de la degradación de tierras y cuerpos de aguas, mejorar la fertilidad de los suelos, organizar los servicios de conservación de suelos y la vida silvestre, reducir la presión sobre los recursos naturales, disminuir la pobreza, priorizar la investigación aplicada y monitoreo de los cambios que ocurren en ecosistemas terrestres de zonas áridas, mejorar la seguridad alimentaria, facilitar la participación comunitaria y la capacitación para funcionarios y campesinos.

El sector de referencia está localizado en el Ecocampus BUAP de Valsequillo, justo entre la localidad de San Pedro Zacachimalpa y African Safari, con coordenadas mostradas en la Figura 1. En este predio de 5 ha se inician los trabajos de instalación de la infraestructura de campo para la investigación del impacto de las medidas de manejo sustentable de tierras sobre la conservación, recuperación, mejora de la calidad de los suelos y retención de agua de lluvia en el segundo semestre de 2017. En 2018, a través de la delegación CONAFOR en Puebla se recibieron recursos para trabajos de conservación, cercado y reforestación. En agosto del mismo año, el predio fue seleccionado por CONAFOR y

TV AZTECA para realizar por primera vez en Puebla, después de 18 años, el evento “Un Nuevo Bosque” financiado además por CONAGUA, SDRSOT y la BUAP, asistieron 2 000 personas, evento que fue transmitido a todo el país por esta cadena televisiva. Para la celebración de este evento se requirieron otras 5 ha mas que el rector, con visión ambiental, autorizó de forma inmediata, por lo que actualmente el sector de referencia cuenta con 10 ha.

Figura 1. Localización del Sector de Referencia en el Ecocampus BUAP Valsequillo, entre San Pedro Zacachimalpa y Africam Safari, Puebla



Materiales y métodos

Integración de grupos de investigación

La propuesta es desarrollar un trabajo de investigación multidisciplinario donde participen especialistas de varias dependencias del ICUAP; además, se mantiene contacto con otras instituciones, con la finalidad de crear vínculos de colaboración y poder acceder a tecnologías y recursos complementarios. Dentro

de la BUAP participan dos especialistas del Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA) encargados de la parte de diagnóstico de campo, conservación y recuperación de suelos y la reforestación; de Microbiología de Suelos del (CICM) participan dos especialistas que se ocupan de la biodiversidad microbiana y del manejo de cultivos agrícolas, como maíz, frijol, calabaza y frutales; los especialistas de Centro de Agroecología (CENAGRO) están a cargo del control de plagas, biodiversidad de la mesofauna, la flora y fauna, en esta última parte también se integra un especialista de Departamento Universitario para el Desarrollo Sustentable (DUDESU). El trabajo que se expone en este artículo es el realizado por dos especialistas del DICA-ICUAP, apoyado por estudiantes del postgrado en Ciencias Ambientales y en colaboración con un miembro de la Red “Gestión de la calidad y disponibilidad del Agua”.

Trabajo de campo

Diagnóstico de los suelos y la erosión

A partir de la prospección edáfica se realizó el diagnóstico de los suelos y del grado de erosión, se hizo un recorrido y se inspeccionó el área para identificar el estado de conservación y/o deterioro de los suelos, se hicieron observaciones visuales en 16 sitios. En cada sitio se cavó una pequeña calicata de 60 cm de profundidad a partir de la cual se empleaba la barrera si era necesario, se anotaba: tipo de perfil de suelo; es decir, la composición de sus horizontes A, B y C o la falta de alguno de ellos y la profundidad a la que aparecía la roca madre. En cuanto al entorno se anotó tipo de relieve, pendiente, formaciones vegetales y porcentaje de cubrimiento de la cobertura vegetal, el valor medio anual de las precipitaciones y las intensidades, ambas no varían en el predio. A partir de esta información se determinó describir 5 perfiles de suelos y se definieron los niveles de erosión expresados por la pérdida parcial o total de los horizontes edáficos. Esto se empleó para diseñar el sistema de medidas antierosivas y/o de conservación que se aplicaron en cada contorno según sus características. En cuanto al diagnóstico de campo se consultó el manual de Ruiz y col. 1999 y la metodología de la FAO, 1980, que es una fórmula paramétrica que considera factores naturales para definir la erosión.

Instalación de la infraestructura

Para la instalación de la infraestructura del sistema de manejo sustentable de tierras y captación de agua en el sector de referencia se tomó en cuenta el diag-

nóstico de campo y según se trate de captar agua de lluvia, proteger suelos con potencial agrícolas, disminuir el impacto de la lluvia en áreas sujetas al proceso de erosión, restaurar áreas con pérdida total de los o del control de cárcavas se adoptan diferentes medidas. Las medidas aplicadas son: construcción de zanjas trincheras, trazado de curvas de nivel, siembra de barreras vivas, construcción de muros de piedras acomodadas o cementadas.

Indicadores de calidad del suelo

Para estudiar los cambios en los suelos provocados durante el proceso erosivo se seleccionaron variables edáficas como indicadores de la calidad del suelo y la erosión. Se seleccionó un perfil patrón, el mas conservado que no fue impactado con fuerza por el manejo a que han sido sometidos los suelos de esta zona. Los perfiles hoy degradados constituían una unidad similar al del perfil patrón, solo que la erosión provocó cambios en la estructura edáfica y hoy se clasifican de forma diferente a sus similares conservados. Para evaluar los cambios provocados por la erosión se tomaron como indicadores el contenido en materia orgánica, el pH, la CIC ($\text{cmol}^{(+)}\text{kg}^{-1}$) y contenido en CaCO_3 . Los análisis de laboratorios se realizaron en laboratorios del Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas del Instituto de Ciencias de la BUAP, se utilizaron los métodos de la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Resultados

Diagnóstico de los suelos y la erosión

En el Ecocampus BUAP en Valsequillo se desarrolla un proceso erosivo que impacta tierras con potencial agrícola, transformándolas en áreas con altos niveles de deterioro. Es un paisaje que muestra los efectos de la actividad humana por las prácticas agrícolas, pecuarias y la tala de árboles y arbustos, actividades comunes en estas zonas y realizadas por el hombre desde hace décadas. Dichas actividades impactan negativamente sobre los ecosistemas terrestres en zonas áridas, son la causa de la degradación de las tierras, pérdida de la capa superficial del suelo y pérdida de la biodiversidad de la flora, de la fauna silvestre y de la micro y macro fauna edáfica (Giraldo y col. 2009; Mora y col. 2013; Lasanta, 2010; Barbaran y Arias, 2001), en la Figura 2 se muestra el estado en que se encontraba inicialmente este sector de referencia en marzo de 2017.

Figura 2. a) Pastoreo intensivo antes de iniciar los trabajos de recuperación.
b) Erosión moderada. c) Erosión muy severa



Los niveles de deterioro de los suelos en áreas que una vez fueron terrenos forestales, han sido el resultado de la falta de previsión y descuido en el manejo de las tierras, deforestación, pastoreo intensivo y agricultura en pendiente. Estas acciones el deterioro del entorno en zonas con déficit de humedad, factor que han favorecido la transformación de los suelos y el paisaje, ya planteado por Askari y Holden (2014), Juhos *et al.* (2016) y Barrezueta *et al.* (2017)). El área de estudio ha sido dedicada a la agricultura y al pastoreo intensivo, las cuales son la causa principal del deterioro actual de estas tierras.

Para diseñar la infraestructura apropiada en cada contorno para retener suelo y captar de agua de lluvia, se tomó en cuenta la pendiente, grado de erosión y porcentaje de cubrimiento de la cobertura vegetal. Dada su extensión, el nivel de las precipitaciones es el mismo para todo el predio. De esta forma se separaron contornos de niveles de erosión moderada, pendientes entre 3% a 5% y cubrimiento de la cubierta vegetal entre 90% a 100%. En estas áreas con potencial agrícola solo se sembraron barreras vivas de *Vetiveria zizanioides* en curvas de nivel a una distancia que varía entre 10 a 12 m entre hileras (Figura 3). En los dos años de instalada esta medida el suelo retenido por las barreras vivas fue muy poco o nulo, lo que permite evaluar de forma preliminar la eficiencia de esta medida para disminuir la erosión laminar en esta parte del predio.

Figura 3. a) Siembra de *Vetiveria zizanioides* en contorno. b) Barreras vivas de *Vetiveria zizanioides* en áreas con potencial agrícola al año de sembradas



En los contornos con erosión fuerte y muy fuerte, con pendientes de 5% a 10% y cubrimiento de la cobertura vegetal entre 40% y 60%, se construyeron muros de piedras acomodadas protegidos, represas de mampostería y zanjas trincheras para la retención de suelo y captación de agua de lluvia (Figura 4). En esta microcuenca se concentra el agua de lluvia que antes corría libremente hacia la presa y hoy suelo y agua son retenidos por la obras construidas.

Figura 4. a) Siembra de vetiver como protección del muro de piedras. b) Muro de piedras protegido con barreras de *Vetiveria zizanioides*. c) Construcción de zanja trinchera. d) Zanja trinchera para la retención de suelo y captación de agua de lluvia



En las áreas con erosión severa y muy severa, pendientes superiores al 10% y cubrimiento de la cobertura vegetal entre 10% a 20% se reforestó con *Juniperus deppeana* en hoyos de 25 x 25 cm con adición de suelo y humus de lombriz en relación 50/50, se construyeron cajetes con piedras acomodadas en forma de media luna protegidos con cobertura vegetal muerta (Figura 5). Los valores de altura de las plantas, grosor del tallo y área de goteo en las plantas donde se aplican medidas de conservación y que están en proceso de evaluación ya muestran tendencia de mejores índices de desarrollo que las plantas no sometidas a manejo, lo que debe considerarse como un resultado preliminar.

En el límite donde convergen un área con erosión moderada y otra con erosión muy severa, que es el punto de inflexión de la pendiente entre la zona de declive, se construye un muro de piedras cementadas que tiene construido 15 m de 60 m programados. Esta obra tiene el objetivo de detener el suelo arrastrado por

la aguas de escorrentías; además, como está construido en un espacio con erosión muy severa, es utilizado también para verter suelos recuperados y cubrir un área donde la roca aflora. Ya se han recuperado cerca de 10 m² de extensión, con una altura máxima de 80 cm la cual que puede ser cultivado o reforestado con éxito.

Figura 5. a) *Juniperus deppeana* con 2 meses de sembrados. b) *Juniperus deppeana* a los 2 años de sembrados, protegido con cajetes de piedras acomodadas en forma de media luna y cobertura vegetal muerta



En la Figura 6 se puede apreciar la masa suelo acarreado desde las construcciones de CU que se han incorporado como parte de la restauración de un área degradada. En la base del muro se colocaron restos vegetales, que puede ser considerada una práctica para almacenar carbono. Esta práctica es un ejemplo de cómo se puede actuar para restablecer ecosistemas terrestres degradados de forma rápida, terminado el muro se procederá a calcular el área restaurada y el volumen de suelo incorporado.

Figura 6. Muro de piedras cementadas donde se deposita suelos acarreados de construcciones civiles de CU, en la base del muro se depositan restos de construcción y ramas de la poda



Indicadores de calidad del suelo

Se emplean variables, morfológicas, físicas y químicas de los suelos como indicadores de la calidad de los suelos y la erosión. Estas variables sufren cambios durante el proceso de degradación. Primero, se selecciona un perfil patrón en un área conservada, que no haya estado afectado por la erosión. Este perfil patrón, que tiene todos sus horizontes y es apto para la agricultura, se compara con otros perfiles localizados en zonas degradadas y que han sufrido los efectos de la erosión y han perdido su potencial agrícola. Todos los perfiles que se estudian tienen con-

diciones similares de clima, roca, vegetación y relieve. Los cambios en las variables de los suelos erosionados son el reflejo de un proceso inducido por el hombre.

Se estudian tres perfiles. El perfil 1 (perfil patrón) representa los suelos conservados, aptos para la agricultura, es un suelo profundo y conserva todos sus horizontes (gráfico 1) es el suelo mas extenso en el sector de referencia, clasificado como Cambisol, con características vérticas. Con este perfil patrón se comparan dos perfiles similares, pero afectados por la erosión, por lo que presentan cambios de las variables edáficas que los diferencia del patrón (perfil 1). El perfil 2 (similar erosionado del perfil patrón) con erosión muy fuerte, es un suelo poco profundo que ha perdido los horizontes A y B1, lo que lo hace poco productivo desde el punto de vista agrícola, clasificado como Leptosol. El perfil 3, (también similar erosionado del perfil patrón), con erosión muy severa, ha perdido todos sus horizontes edáficos y la roca aflora en la superficie (Figura 7).

De los tres perfiles estudiados, solo el perfil patrón desarrollado en una pendiente menos pronunciada que el resto de los perfiles y una cobertura vegetal protectora entre 80 a 100% de cubrimiento ha mantenido niveles de erosión moderados, a pesar de haber sido sometido al mismo manejo. Es un error grave no tener en cuenta las condiciones del entorno en el proceso productivo de las tierras, lo cual atenta contra la estabilidad de los ecosistemas terrestres que son reservorios de carbono, pues una vez degradadas son inútiles para la agricultura y se convierten en fuentes emisoras de carbono a la atmósfera.

Las variables edáficas utilizadas como indicadores de la calidad y la erosión de los suelos en este trabajo son: la profundidad, el color y el contenido en carbonato de calcio.

La profundidad como indicador de la calidad de los suelos y la erosión

La profundidad debe catalogarse como el indicador mas fiable para determinar la calidad de un suelo y los niveles de erosión, el perfil patrón (perfil 1) tiene un espesor útil (hasta donde pueden penetrar la raíces) de 82 cm considerando la suma de los horizontes A, B1, B2, BCD y CD; sin embargo, el perfil 2, con erosión muy fuerte, ha perdido con respecto al perfil patrón el A y el B1 totalmente (36 cm de espesor). Estos horizontes aparecen en la Figura 7 en color gris. Por su parte, el perfil 3 ha perdido con respecto al patrón todos los horizontes edáficos (82 cm de espesor) y la roca expuesta en superficie. Este proceso erosivo debe catalogarse como un desastre ecológico y que ocurre a solo 30 minutos de Ciudad Universitaria (CU), en Puebla. Esta pérdida de suelos significa perder la capacidad de producir alimentos, bienes y servicio; lo cual, no es una opción adecuada para las zonas áridas y semi áridas. Urge hacer más para revertir este

proceso, ya que la erosión afecta las capas superiores del suelo, en especial a la más fértil y la que sirve como sustrato a plantas y animales. Con la pérdida de suelos cambian los niveles de humedad, temperatura, pH y disponibilidad de nutrientes, lo que afecta la sobrevivencia y el crecimiento de las plantas. Según sir Robert Watson, Presidente de IPBES “La salud de los ecosistemas de los que nosotros y todas las demás especies dependemos se está deteriorando más rápidamente que nunca. Estamos erosionando los cimientos de nuestras economías, medios de vida, seguridad alimentaria, salud y calidad de vida en todo el mundo” (Informe IPBES 2019).

Figura 7. Pérdida parcial o total de horizontes edáficos en una sección de tres suelos. (Las barras que están en color gris son los horizontes que se han perdido por erosión)



El color como indicador de la calidad de los suelos y la erosión

El color es una propiedad que tiene poco incidencia sobre el comportamiento del suelo (Porta y col. 1999); sin embargo, refleja la composición y las condiciones de óxido-reducción y está determinado generalmente porque las partículas finas del suelo están revestidas por la materia orgánica humificada de color oscuro o bien de óxido de hierro (rojo y amarillo) o debido al material parental (FAO 2009). En un artículo docente, Moreno y col. relacionan el color del suelo con la mineralogía de los materiales edáficos cromógenos, como el manganeso de color negro, los carbonatos y el yeso de color blanco, la materia orgánica de color pardo o negro y los óxidos de hierro de rojo o amarillo. En este trabajo, y reconociendo como acertado lo expuesto por estos autores mencionados, se considera el color como una propiedad morfológica porque es una variable que se puede ver y definir a simple vista. Para determinar el color se utilizó la tabla de

colores Munsell (Munsell 2000); el color en la parte superior del perfil patrón es pardo oscuro, propio de suelos conservados ricos en materia orgánica, mientras que en el perfil 2, con erosión muy fuerte (pérdida parcial de los horizontes superiores), disminuye el contenido en materia orgánica por la erosión y el color negro típico de horizontes conservados se torna más claro, pasando a pardo grisáceo obscuro. Por último, cabe mencionar que en el perfil 3, con erosión muy severa (pérdida total de los horizontes edáficos), es pardo claro amarillento, no hay materia orgánica y el color está definido por los minerales primarios que integran la roca. Esta variación de tonos oscuros en los suelos conservados y más ricos en materia orgánica, cambiando a tonalidades más grises en la medida que aumentan los niveles de erosión disminuye la materia orgánica, lo que justifica el uso del color como indicador de la calidad del suelo y el nivel de degradación en este predio.

El contenido en carbonato de calcio como indicador

Otra variable que se utiliza en este trabajo como indicador de la calidad y erosión de los suelos es el contenido en carbonato de calcio. El perfil patrón presenta valores de CaCO_3 de 2.09% en A, menos de 8% en B1 y B2, 25.19% en BCD y 43.56% en CD. Esta distribución del contenido en carbonato de calcio es típica de suelos conservados, donde los contenidos más bajos se presentan en superficie como consecuencia del lavado intenso a que son sometidos los suelos durante las épocas de lluvia. En profundidad, donde el lavado no es intenso, los valores de CaCO_3 se incrementan en un 8% y 25.19% en la parte media del perfil y en profundidad el valor determinado es de 43.56%, lo cual es similar al contenido de las rocas formadoras del suelo. Cuando la erosión elimina los horizontes A y B, aparecen en superficie los horizontes BCD y CD ricos en carbonatos de calcio. Es por esto que el perfil 2, afectado por la erosión, presenta valores altos de carbonato cerca de la superficie, debido a que el horizonte CD está a solo 17 cm de profundidad. En el caso del perfil 3, con pérdida total de A, B y C, el material de origen calcáreo aflora en superficie y los valores de CaCO_3 son mayores de 50%. Esta distribución de los carbonatos según los niveles de erosión es la causa por la que se puede considerar como un indicador de la calidad del suelos y la erosión.

Conclusiones

- La infraestructura para la conservación, recuperación de los suelos, captación de agua de lluvia, construcción de una unidad de lombricomposta y el banco de semillas de *Vetiveria zizanioides* para llevar a cabo la investigación

no requiere de gran inversión, en comparación con los beneficios socio ambientales que aportan.

- La incorporación del suelo acarreado de las obras civiles de Ciudad Universitaria en áreas degradadas que cuentan con obras de conservación es un ejemplo de cómo podemos remediar los ecosistemas terrestres degradados de forma rápida.
- Las obras de conservación y captación de agua de lluvia favorecen la disminución de sólidos hacia la presa Valsequillo, contribuyendo a evitar el azolve en este cuerpo de agua.
- Los valores de altura de las plantas, grosor del tallo y área de goteo donde se aplican medidas de conservación muestran tendencia de mejores índices de desarrollo que sus similares no sometidas a manejo.
- El suelo acarreado desde las construcciones de CU para la restauración de áreas degradadas es un ejemplo práctico de cómo se puede actuar para restablecer ecosistemas terrestres de forma rápida.

Recomendaciones

- Este sector de referencia se ha creado con el ánimo de convertirlo en la “Estación Experimental de Manejo Sustentable de Tierras del ICUAP”.
- Está planteada una investigación multidisciplinaria en la que deben participar dependencias del ICUAP y otras de la BUAP con visión de trabajo colectivo, por lo que se recomienda no vincular esta área a una sola dependencia.

Agradecimientos

Al vicerrector de la BUAP, Dr. Ygnacio Martínez Laguna y al C. P. Carlos Martín del Razo, por la atención prestada al desarrollo de este proyecto de investigación.

Bibliografía

- Askari, M. S. & Holden, N. M. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. *Geoderma*, 230–231, 131–142. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019>
- Barbaran F. y Arias, H. (2001). Migración en el Chalco semi árido de Salta: Su relación con la ganadería, la explotación forestal y el uso de la fauna silvestre en el departamento de Rivadía. *Revista Andes*. Número 12. ISSN 0327 1676.
- Barrezueta, S., Paz, A. y Chabla, J. (2017). Determinación de indicadores para calidad de suelos cultivados con cacao en provincia de El Oro-Ecuador. Re-

- vista Cumbres. 3(1) 2017: pp. 17 -24. Revista científica. ISSN 1390-9541(p) | 1390-3365(e).
- FAO. (1980). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.
- FAO. (1994). Aspectos claves de las estrategias para el desarrollo sostenible de las tierras áridas. ISBN 92 5 303318 5. Roma, Italia.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Cuarte edición. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. 99 pp.
- Giraldo C. L. A., Ríos O. H., F. & Polanco M., F. (2009). Efecto de dos enraizadores en tres especies forestales promisorias para la recuperación de suelos. Revista de Investigación Agraria y Ambiental. RIAA 0(1): 41-47.
- IPBES. (2019). Informe. La peligrosa pérdida “sin precedentes” del ecosistema natural. En: https://www.ipbes.net/news/Media-Release-Global-Assessment#_ftn1
- Juhos, K., Szabó, S. & Ladányi, M. (2016). Explore the influence of soil quality on crop yield using statistically-derived pedological indicators. Ecological Indicators, 63, 366-373.
- Lasanta, T. (2010). Pastoreo en áreas de montaña: Estrategias e impactos en el territorio. Estudios Geográficos. Volumen 71, núm. 268.
- Martínez Guzmán, M.A. (2013). Tecnologías para el uso sostenible del agua. Una contribución a la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático. GWP-FAO. Tegucigalpa, Honduras. E-ISBN 978-92-5-307931-5 (PDF).
- Mora, C., Jiménez, J., Rodríguez, E., Rubio, E., Yerena, J. Y González, M. (2013). Efecto de la ganadería en la composición y diversidad arbórea y arbustiva del matorral espinoso tamaulipeco. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. Vol. 4. Núm. 17. ISSN 2007 1132.
- Moreno, H., Gisbert, J. e Ibáñez, S. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Munsell Soil color Charts. (2000). US Departamento Agriculture, Handboox 18. Survey manual.
- Núñez-Ravelo F. A. 2017. Geomorfología y sedimentología del sistema de cárcavas en el borde costero al suroeste del Castillo de Araya, Estado Sucre, Venezuela. Investigaciones Geográficas. Instituto de Geografía. UNAM. Núm. 92. ISSN 2448-7279.
- NOM-021-SEMARNAT-(2000). Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. Barcelona. México. 849 pp.

- Ruiz, J., Calderón, E., Tamariz, V., Tremols, J., Cruz, A., Valera, M. y Handal, A. (1999). Manual para la descripción de perfiles de suelo y evaluación del entorno. Serie apoyo a la docencia. ISBN 968 863 396 8.
- USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos), 2020. ¿Dónde está el agua de la Tierra? (en inglés). https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/where-earths-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Consultado el 3/11/2020.
- Glosario de riego. (2020). <https://www.riego.org/glosario/tag/agua-verde/page/2/>. Consultado el 3/11/2020.

Capítulo 7

La captación de agua de lluvia de la teoría a la práctica

Ismael Ballinas Tapia¹

Introducción

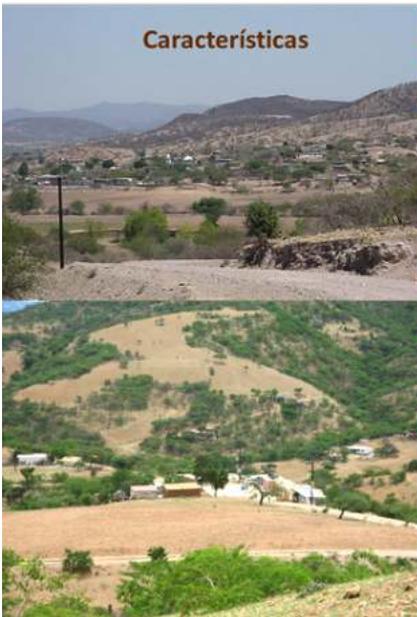
El agua es el recurso natural más usado, apreciado, valorado y con mayor presencia en la vida de los seres humanos; sin embargo, nuestra poca cultura de conservación, almacenamiento adecuado, gestión y la contaminación han provocado que este recurso no renovable se vuelva un negocio para las grandes empresas transnacionales. Las políticas de los gobiernos neoliberales en materia de agua han provocado desequilibrio en las relaciones naturales de los habitantes en los ejidos, los comuneros y las comunidades que dependen de fuentes de agua locales que en muchos casos, por el desconocimiento de la posesión legal, han pasado a manos de particulares incluso con la complicidad de autoridades agrarias, y dependencias encargadas de cuidar la explotación moderada de este recurso.



¹Arraigo de la Mixteca A.C., ballinas@gmail.com.

Se tiene la idea de que la extracción del agua del subsuelo es la solución a la infinidad de actividades socioeconómicas de la población, pero con la exposición de los motivos anteriores es más que claro que el uso irracional ha provocado la degradación de los recursos hídricos. Por estas razones, se aborda el aprovechamiento de la lluvia, usando tecnologías adecuadas como represas de mampostería, las cisternas de ferrocemento, aunado al uso de sistemas de riego para el uso y aprovechamiento adecuado del agua. Para esto, es necesario llevar a cabo una planeación participativa; es decir, que las mujeres, hombres, jóvenes y los niños participen en la identificación de sus recursos, la problemática en la disposición de estos y la búsqueda de alternativas viables para su aprovechamiento. Además, se debe empoderar a los productores de las comunidades para decidir sobre el uso sustentable de sus recursos naturales y principalmente el recurso agua. Lo anterior se ha visto sustentado en las aportaciones de la **Red Temática en Sistemas de Captación de Agua de Lluvia**, que ha desarrollado modelos funcionales y exitosos que han demostrado el aprovechamiento, el uso y el impacto social de la captación de agua de lluvia. También tenemos a la **Red Temática SCALL** (Asociación voluntaria de investigadores o personas con interés de colaborar y articular acciones encaminadas, hacia un manejo sustentable del recurso agua de lluvia).

¿Cómo le hace la gente para abastecerse de agua?



Características

La región de la Mixteca Poblana se encuentra dentro de la Zona Ecológica Trópico Seco:

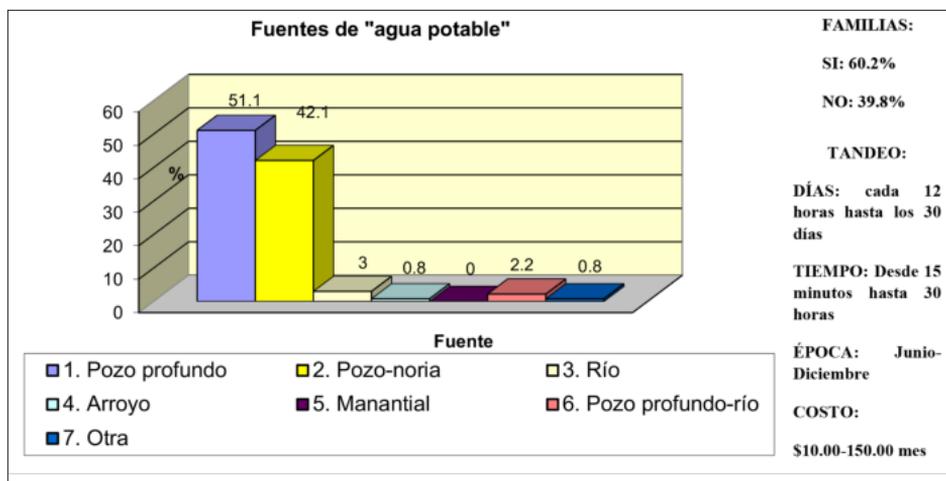
Tres tipos de climas:

- Clima **semiseco muy cálido** el BS1(h')w(w)
- El clima **cálido subhúmedo** Aw0(w).
- El clima semicálido subhúmedo A(C)w0(w).

Con lluvias en verano
 Con temperatura media anual mayor de 22 °C
 Régimen pluvial de 4 a 5 meses con **lluvias** de corta duración y gran intensidad. 600 mm.

Topografía:

- Accidentada: **Pendiente mayor de 30%**
- Lomeríos y valles: **Menor del 25%**



En la fotografía anterior se observa la realidad sobre la situación del agua en la Mixteca Baja Poblana, una es la degradación y erosión que ha sufrido la cubierta vegetal que trae como consecuencia la erosión con la presencia de lluvias torrenciales y la otra es una gráfica de cómo le hace la gente para abastecerse de agua.

Antecedentes

Este tema tiene una gran relevancia para las comunidades rurales, ya que durante muchos años los gobiernos han promovido programas que no conservan los recursos naturales, que degradan los suelos con los paquetes tecnológicos de la famosa revolución verde y que, por una aplicación desmedida en lugar de incrementar los rendimientos, han llevado a la disminución de la superficie cultivable, lo que ha traído como consecuencia la disminución de los rendimientos y la dependencia de los programas de subsidio gubernamental. Otra causa es el mal manejo de los recursos de los programas, la corrupción, el condicionamiento de los apoyos, el manejo inadecuado de las estrategias para ejecutar el recurso económico. Es opinión del autor que debemos aprovechar los resultados de otros medios rurales, que aporten sus experiencias, como dicen los investigadores sociales, transmitir la experiencia de campesino a campesino—, porque su lenguaje lo interpretan mejor entre ellos. Por estos motivos se plantea que para una buena ejecución de los apoyos debemos tomar en cuenta la participación activa, decidida, proactiva de las y los ciudadanos, jóvenes, niños y, en general, de todas las personas, para aprovechar su experiencia, enriquecer los aprendizajes y tener claro que un técnico o promotor no lo sabe todo. Muchas veces los productores tienen más experiencia, solo falta moldear y solo debemos facilitar los procesos

de aprendizaje, porque las y los productores en poco tiempo son los mejores promotores de las metodologías de cualquier naturaleza. Partimos de datos duros como que el **98% de las familias no contaban con depósitos** adecuados para almacenar el agua de lluvia, **solo el 2 % contaba con sistemas de captación** de agua y depósitos construidos con recursos propios, sólo el **5% de los pobladores cultivaba hortalizas**, en el tiempo de recorrido para acarrear agua tardaban de 30 minutos y hasta dos horas, los medios de transporte más usados son los burros, caballos, carros particulares, camionetas pickups y de redilas. En la Mixteca Poblana **el promedio de precipitación anual es de 600 mm por m²**, la lluvia se concentra en aguaceros torrenciales que causan desastres naturales, erosión. Las y los productores mostraron mucho interés en la oportunidad que se presentaba para iniciar con la solución a su problema de disponibilidad de agua, para ello se realizó una gira tecnológica a la comunidad de Vicente Guerrero, en el municipio de Españita, en el Estado de Tlaxcala, donde los técnicos y algunos productores conocieron las experiencias de esa comunidad con una trayectoria de más de 40 años. Desde ahí inicio el contacto de los productores, técnicos y los coordinadores del programa para conocer una ecotecnia que traería soluciones a las necesidades y limitantes de la región Mixteca, en este lugar conocimos la cisterna de ferrocemento como alternativa viable.

Procedimiento para la determinación del consumo de agua como referencia CONAGUA

1. Calcular la cantidad de ocupación permanente y temporal de la vivienda. Según el censo del INEGI de 2010, el promedio de ocupantes por vivienda particular habitada es de 3.9. Para efectos de un cálculo inicial se puede considerar una ocupación de 4 habitantes por vivienda, y para cada proyecto específico, se tendrá que utilizar la cantidad real de habitantes.
2. Calcular el consumo de agua para la vivienda siguiendo los siguientes parámetros. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), para cumplir con el derecho humano al agua y al saneamiento, (2010) el consumo de agua de la vivienda por habitante está entre 50 y 100 l/hab/día. Para el cálculo se utilizará el primer valor; es decir, dotación mínima de 50 l/hab/día.
3. Restar la cantidad de agua pluvial anual que se podrá captar y al tamaño del tanque de captación que se utilizará. Para cálculos de captación pluvial se requiere analizar registros de precipitación de al menos 15 años, información que se encuentra disponible en la página smn.cna.gob.mx. En caso de que no se encuentren actualizados los datos o por mantenimiento de la página,

se podrán consultar directamente en la dependencia de CONAGUA. La precipitación permitirá determinar el área mínima requerida para captar el volumen necesario que permita brindar la dotación establecida.

Elementos de cosecha de agua

El sistema más sencillo de cosechar agua de lluvia se compone de CINCO partes:

1. Un área de donde se capta el agua de la lluvia;
2. un sistema de recolección y conducción para mover el agua;
3. un sistema de intercepción y purificación del agua;
4. el componente principal, que es la estructura de almacenamiento;
5. el sistema de distribución o aprovechamiento.

Área de captación del agua de lluvia

El área de captación es la superficie sobre la cual cae la lluvia. Las áreas que se utilizan para este fin son los techos de casas habitación, escuelas, bodegas, invernaderos y laderas revestidas o tratadas con materiales que la impermeabilizan. Es importante que los materiales con que están construidas estas superficies no desprendan olores, colores y sustancias que puedan contaminar el agua pluvial o alterar la eficiencia de los sistemas de tratamiento. Además, la superficie debe ser de tamaño suficiente para cumplir la demanda y tener la pendiente requerida para facilitar el escurrimiento pluvial al sistema de conducción.

Sistema de conducción

El sistema de conducción se refiere al conjunto de canaletas o tuberías de diferentes materiales y formas que conducen el agua de lluvia del área de captación al sistema de almacenamiento a través de bajadas con tubo de PVC.

Estructura para el almacenamiento del agua de lluvia

Son cisternas o tanques donde se almacena el agua de lluvia captada, que puede utilizarse, previo al tratamiento para uso doméstico durante todo el año. Los materiales utilizados para la construcción de las cisternas o tanques de almacenamiento pueden ser los siguientes:

Plásticos: fibra de vidrio, polietileno y PVC.

Metales: barril de acero y tanques de acero galvanizado.

Concreto: ferrocemento, piedra, ladrillo o *block* y bloque de concreto.

Madera: madera roja, abeto, ciprés, bambú.

Ventajas y desventajas de los diferentes depósitos de agua

Tabla 1. Descripción de la tabla

Tipo de depósito	Ventajas	Desventajas
Fibra de vidrio	Pueden almacenar de 2000 a 8000 litros. Tienen larga duración.	Existen riesgos de contaminar el agua. Son frágiles.
Concreto (piedra, block y cemento)	Son las más comunes. Los materiales se encuentran accesibles. Pueden almacenar hasta 40,000 litros.	Tienen riesgos por grietas; el olor y el sabor del agua cambian. Se requiere de un albañil.
Metálicos	Son fáciles de armar, se pueden cambiar de lugar. Pueden almacenar grandes volúmenes de agua.	Si no se tiene mantenimiento tiende a oxidarse, desprende metales pesados y tienen un costo elevado.
Polietileno (botes, toneles, tinacos)	Son también muy comunes. Pueden almacenar de 200 a 40,000 litros.	A mayor volumen mayor es el costo. Abarcan mucho espacio. En colores claros se desarrollan algas.
Geomembrana		
Madera	El agua se mantiene fresca y mantiene su sabor. Son fáciles de desmontar.	Son poco utilizados, deben colocarse en un lugar seguro y almacenan bajos volúmenes.
Ferrocemento	Bajo costo. Son fáciles de construir y no se requiere conocimientos de albañilería, los materiales se consiguen fácilmente. Fácil de reparar. Tamaño de 10,000 a 10,000 litros.	La construcción debe ser continua. Para evitar fisuras mantenerla con agua.

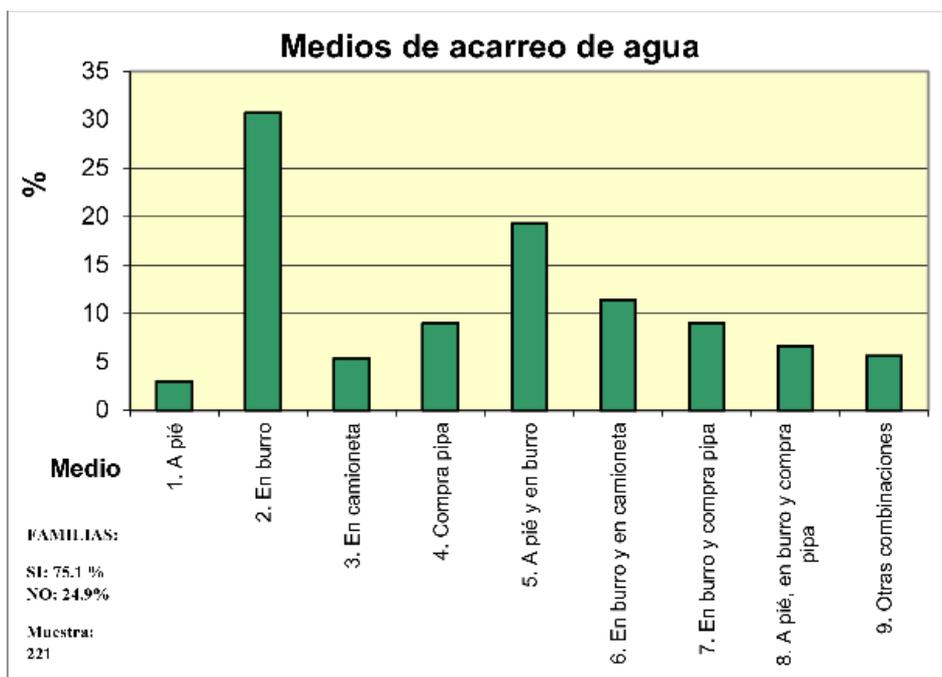
Lo que se encontró como depósitos tradicionales para almacenar agua



Las condiciones de pobreza, la nula atención de los gobiernos para asesorar a los productores, los bajos índices de desarrollo humano, entre otras condiciones que durante años los políticos han aprovechado para hacerlos dependientes de apoyos paternalistas, cuando hay alternativas viables para sacar de la pobreza alimentaria. Estas condiciones se encontraron en la Mixteca Baja Poblana en todas las comunidades seleccionadas de acuerdo con los criterios establecidos por la FAO.

Acarreo de agua; distancias de 2,500 m; 2:30 horas





En las fotografías anteriores se observan las condiciones en las que se encontraban los depósitos tradicionales, los diferentes tipos y la capacidad de almacenamiento. La última imagen es una gráfica sobre un estudio realizado por el COLPOS, campus Puebla, donde se encuestó a los productores sobre los diferentes medios de transporte para el agua, además de la distancia y el tiempo de recorrido.

Expectativas sociales

En la práctica se aprecia que las personas de las comunidades rurales han perdido la confianza en las instituciones, en los técnicos y los promotores. Lo anterior, debido a las acciones desagradables como el engaño, el fraude, las corruptelas y los malos tratos. Por ello, cuando llegan nuevos actores a las comunidades, los pobladores se muestran desconfiados, escépticos e incrédulos de que una nueva propuesta pueda cambiar la imagen de lo que han vivido. Además, en la región de la Mixteca hay una particularidad que es la poca disponibilidad de agua, entonces los productores plantean la imperante necesidad del agua de todas formas posibles, y lo más común son las solicitudes de pozos profundos, de pipas de agua y la conducción de tuberías de los ríos o arroyos más cercanos. Con todo esto, las expectativas no son pocas ni sencillas porque resolverlas implica muchos recursos económicos, mucho tiempo y

demasiados trámites burocráticos, lo que complica la credibilidad de los técnicos o promotores. En pocas palabras los retos no son pocos, ni sencillos.



En este esquema observamos el proceso de adopción de la tecnología aplicada, donde se observa como un ciclo de aprendizaje aplicable en distintos medios rurales, ya que se ha comprobado su utilidad en distintos países, estados y municipios.

Gira tecnológica



Para lograr todo el proceso se realizaron giras de intercambio de experiencias, una de ellas al campus Montecillos del COLPOS en Texcoco, Estado de México, donde se pudieron apreciar diferentes innovaciones tecnológicas aplicables para zonas rurales.

Tecnologías implementadas

La experiencia se desarrolló en la región de la Mixteca Baja Poblana en los municipios de Ahuehuetitla, en las comunidades Guadalupe Alchipini, El Papayo, El Peñón, Piedra Blanca; otro municipio es Axutla, comunidad de Tlaxixinca, Chila de Sal; en la comunidad de San Pedro Ocotlán; en Chinantla fueron las comunidades de Amatepetlán, Cuatecontla, Cuicatlán, San Miguel Buena Vista, Tehuixtla; en el municipio de Piaxtla, en las comunidades de Inopilco, Loma Bonita, Progreso, Santa Cruz, Santa María, Tlaxcuapan, Tecuautitlán, Yetla; en el municipio de San Pablo Anicano, en las comunidades de Francisco González Boca Negra, El Pedregoso y San Miguel Tulapa; en Tehuiztzingo, en las comunidades de Atopolitlán, Boqueroncitos, Cuautluta, Hornos de Zaragoza, Tlachinola, Tejalpa, Tuzantlán; en Tecomatlán, en las comunidades El Tempexquixtle, La Unión, Isla La Paz, Quicayán, Mixquiapan, Tezoquipan; en el municipio de Tulcingo fueron las siguientes comunidades: Aguacatitlán, Atzompa, Francisco Villa, Guadalupe Victoria, Guadalupe Tulcingo y La Ciénega. En los años 2005 al 2011, se llevó a cabo el Proyecto Estratégico de Seguridad Alimentaria de la FAO (PESA-FAO), una estrategia metodológica que se desarrolló en México desde el año 2002 en regiones de alta y muy alta marginación, donde a través de la planeación participativa los productores de las comunidades con los índices más bajos de desarrollo humano iniciaron el mejoramiento de sus condiciones de vida, trabajando el área del traspatio, el sistema milpa, sus principales cadenas productivas y la diversidad productiva, con lo cual los productores complementan sus ingresos. Específicamente en la Mixteca Baja Poblana se escuchó a las y los productores, vecinos de las comunidades rurales que se preocupan por mejorar las condiciones de vida de sus familias, inicialmente a través de reuniones comunitarias, diagnósticos participativos, dinámicas que facilitan el análisis de información, análisis FODA, árbol de problemas, árbol de soluciones, planes de desarrollo comunitario, todo lo anterior aunado a una estrategia de desarrollo comunitario bajo la directriz de la metodología de la FAO. Así, se escucharon sus inquietudes de falta de agua, la búsqueda de soluciones a ese problema tan sentido se fue traduciendo en una propuesta viable, sencilla y económica, que cambiaría en poco tiempo la imagen de los técnicos y el programa que se desarrollaba. Posteriormente, luego de la visita a la comunidad de Vicente Guerrero

en Tlaxcala, se hizo la propuesta de implementar acciones de capacitación de manera estratégica, que facilitara la apropiación de la ecotecnología conocida como “Cisterna de Ferrocemento”, la cual no era nueva en la región. Años atrás ya había experiencias con un programa conocido como “Los Campesinos del Futuro”, que construyó cisternas de muestra en las entradas y salidas de las comunidades, pero lejos de la utilidad de la población y sus familias. El reto era grande, llevar esta ecotecnia a cada familia o por lo menos a las familias de mayor prioridad. Entonces, se llevaron a cabo 5 capacitaciones estratégicas para facilitar que en el momento en que se autorizaran los recursos para la construcción de estas obras los beneficiarios ya estuvieran convencidos de la ecotecnia, ya que durante estas capacitaciones varias personas dudaban de la viabilidad, la resistencia y el grosor de la pared, argumentando que ellos estaban acostumbrados a construir tanques o cisternas con paredes muy gruesas y muy costosas, que eso aseguraba la resistencia y durabilidad de esas obras a las que estaban acostumbrados.



Cisternas de ferrocemento: alternativa viable para la captura y almacenamiento de agua de lluvia y otras fuentes.



Ventajas de las cisternas de ferrocemento:

1. Mayor capacidad de almacenamiento.
2. Reducción de costos de materiales y construcción.
3. Facilidad para construir.
4. Facilidad para el manejo y uso.
5. Apropiación y manejo de aprendizaje.
6. Aprovechamiento de los promotores de las comunidades.



¿Qué aspectos se deben tomar en cuenta para diseñar una cisterna de ferrocemento?

1. Cantidad de agua que necesita la familia o unidad de producción.
2. El promedio de lluvia anual en la región.
3. El porcentaje de desperdicio.
4. La superficie del techo disponible para captación.
5. Uso del agua almacenada.
6. Ubicación de la cisterna en relación con los demás elementos del traspatio (techo, huerto, animales cocina).
7. Asesoría técnica adecuada.

El proceso de adopción de esta ecotecnía fue una experiencia que marcó un antes y un después en los programas de desarrollo rural, y más en una región con una precipitación tan baja y con condiciones de mucha adversidad. Ello se debió a que el trabajo que representa construir una cisterna —y en tan pocos días— fue un verdadero reto. No obstante, gracias a la organización, y la necesidad de solucionar el problema de escasez de agua, surgió la oportunidad de aprovechar un recurso disponible que año con año causa desgracias por la lluvias torrenciales. Además, algunos beneficios colaterales se lograron con esta estrategia, como el trabajo en grupo, el aprovechamiento de la capacitación, el autoempleo y la convivencia comunitaria.

Las comunidades rurales y la adopción de ecotecnologías

Etapas de construcción de una cisterna de ferrocemento: a) selección del lugar; b) limpieza, trazado y excavación; c) tejido de mallas; d) colocación del piso; e) encofrado y repellido; f) revoque; g) pulido y afinado; h) techado.

a) Selección del lugar



b) Limpieza, trazado y excavación



c) Tejido de mallas



d) Colocación del piso



e) Encofrado y repellido



f) Pulido y afinado



g) Techado



Otro componente importante y esencial fue el COUSSA-PESA que, a través de la organización comunitaria promovida por la estrategia de la FAO, en coordinación con la CONAZA y el Gobierno estatal, se destinó recurso para la construcción de jagüeyes, represas de mampostería, abrevaderos, obras secundarias como líneas de conducción, depósitos comunitarios, lo que amplió los beneficios del programa que atendió el problema del agua a nivel comunitario y se atendió la necesidad a nivel familiar. Hay estudios realizados por el colegio de Postgraduados, campus Puebla, que demuestran el impacto que tuvo esta estrategia en la región y en muchas otras en las regiones pobres del país. Actualmente el Gobierno del estado, mediante la dirección de conservación de agua y suelo, está apoyando estas obras de gran impacto.

La estrategia del PESA-FAO trajo a las comunidades rurales la oportunidad de análisis de su realidad, de recuperar la participación comunitaria, de la inclusión de las mujeres, los jóvenes y niños que participaron en todas las actividades. La gestión del agua se ha convertido en una prioridad que la gente toma como suya y no espera a que el Gobierno la atienda. Existen alternativas viables, fáciles de construir, económicas, y sobre todo útiles, que solucionan el problema del agua. Durante mi experiencia he observado, aprendido de los procesos de la gente, la creatividad, la rapidez con que adoptan nuevas metodologías y tecnologías y cómo se vuelven promotores con sus vecinos; es decir, que ellos son especialistas prácticos y son capaces de transmitir su experiencia a los campesinos y gente de otras regiones del mundo.



Experiencias de Vida



SOCIALIZACIÓN DE LA EXPERIENCIA



Esta experiencia fue visitada innumerables veces por autoridades de la FAO y su televisora, la agencia EFE de España, la SAGARPA, la SDR, estudiantes de maestría y doctorado la UNAM, el COLPOS, así como un intercambio de experiencias en Cuba entre otras que conocieron los resultados e impactos.

La participación de las mujeres como ejes de desarrollo de las comunidades mixtecas

En la experiencia presentada hay comunidades como San Miguel Tulapa, El Pedregoso, del Municipio de San Pablo Anicano, donde las mujeres por su experiencia de ser alfareras adoptaron a la perfección esta técnica del ferrocemento, incluso ellas dirigieron a los varones en la construcción de la ecotecnia. En este caso se aprovechó un conocimiento, pero lo más importante es la participación decidida, el empoderamiento de la mujer como un pilar en el desarrollo de las comunidades rurales.

Conclusiones

- Las familias campesinas de la mixteca han desarrollado estrategias para la gestión del agua; no obstante, demanda tiempo y trabajo.
- La incorporación del componente cisterna de ferrocemento es indispensable, sobre todo cuando los recursos son escasos como el agua, pero no son el fin, sino que actúan como medios para lograr la producción de alimentos, y la seguridad alimentaria, que es el fin principal.
- Sin duda, con la implementación del PESA-FAO, se dio un gran paso en la búsqueda de soluciones al problema de déficit de agua, y consecuentemente, una nueva forma de gestión.

Pregunta:

¿Qué programas están vigentes y como acceder a ellos?

Actualmente el gobierno del estado de Puebla a través de la Secretaría de Desarrollo Rural tiene un área de conservación de agua y suelo, que es la encargada de recibir solicitudes, hacer las visitas de campo y verificar la viabilidad técnica de los proyectos, además de dictaminar y autorizar las obras.

Bibliografía

Lineamientos técnicos: sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda. Programas de agua potable programa nacional para captación de agua de lluvia y enotecnias en zonas rurales (Procaptar). Abastecimiento de agua por captación de agua de lluvia. CONAGUA (Comisión Nacional Del Agua).

Encuesta de resultados de la operación del proyecto estratégico de seguridad alimentaria PESA-FAO, 2008. Colegio de Postgraduados Campus Puebla. Dr. Ocampo Fletes, Ignacio. Dr. López Tecpoyotl, Zenón Gerardo. Dr. Parra Inzunza, Filemón.

El enfoque regional en el desarrollo agrícola. Estrategia regional para la producción de alimentos en traspatios de familias con alta marginación. Dr. Ocampo Fletes, Ignacio. Dr. López Tecpoyotl, Zenón Gerardo. Dr. Parra Inzunza, Filemón.

Red. Temática SCALL, Dirección: Km. 36.5, México 136,5 Montecillo, Texcoco. C.P 56230 Estado de México, dirección electrónica: redscall.18@gmail.com, Teléfonos: (01) 595 95 103 23 y (01) 595 95 20 200 *Ext.* 1200.

Capítulo 8

Las plantas de tratamiento de agua, un enfoque sostenible

María del Carmen Durán-Domínguez-de-Bazúa¹
Salvador Alejandro Sánchez-Tovar¹

Resumen

El agua es vital para todos los seres vivos del planeta Tierra. En este capítulo se presentan los lineamientos que cualquier persona, familia o comunidad deben saber para cuidarla y usarla de manera inteligente para nunca padecer por falta de ella. Se presentan los principios de su limpieza para usarla por primera vez y cómo pueden todos(as) ayudar a conservarla después de haberla ensuciado, mediante sistemas sencillos que pueden permitir su reutilización y la de los productos secundarios que son resultado de su limpieza.

Palabras clave: plantas de tratamiento de agua, agua potable, agua usada o residual, productos del tratamiento del agua, uso sostenible.

Introducción

Desde los tiempos prehistóricos, la población siempre ha ubicado su lugar de residencia cerca de los cuerpos de agua, tomando de ellos el agua necesaria para su supervivencia y arrojando a ellos sus residuos, incluyendo aquellas aguas que ya no le eran útiles —conocidas como aguas residuales o usadas—, dejando a la naturaleza el trabajo de estabilizar esos residuos y limpiar esas aguas (Xie y col. 2017). Conforme fueron pasando los milenios y los seres humanos empezaron a poblar cada vez más extensiones de tierra, la capacidad de esos cuerpos de agua para autodepurarse empezó a ser insuficiente. Esto obligó a ver la necesidad de

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química, Laboratorios 301, 302 y 303 de Ingeniería Química Ambiental y de Química Ambiental, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México. Direcciones electrónicas: mcduran@unam.mx, salvadorinvestigador@live.com.mx

limpiar o potabilizar el agua antes de usarla y a limpiarla nuevamente después de haberla usado. Esto ocurrió realmente hasta finales del siglo XIX y principios del XX, por lo que todavía son pocos años en comparación a los miles de años en que no preocupaba su destino y, por ello, es importante crear conciencia entre todos y todas sobre la necesidad de ayudar a la naturaleza para que ella no nos destruya como está ocurriendo actualmente.

Lo que se tiene hoy en día es una actualización de ese conocimiento y esto hace necesario buscar la forma en que todos(as) participen para lograr que esas fuentes de agua recuperen su pureza y que todos(as) nos apropiemos de ese conocimiento y lo transmitamos a nuestros hijos y nietos para evitar repetir las crisis sufridas cuando la población aumentó considerablemente desde la Edad Media, en el inicio de la industrialización, y las actuales, donde mueren millones de personas por la falta de agua limpia y de la limpieza de las aguas usadas, que se conoce como saneamiento.

El 19 de noviembre se celebra el **Día Mundial del Saneamiento o Día Mundial del Retrete (W.C. o escusado)**. La Organización de las Naciones Unidas ha alertado sobre la necesidad de acometer grandes inversiones en alcantarillado, colectores y depuradoras en la mayoría de los países, donde millones de niños mueren cada año por enfermedades asociadas con la defecación al aire libre. Las cifras revelan que unos 2,400 millones de personas carecen de letrinas en muchas regiones del mundo; donde, además, las malas condiciones sanitarias y la falta de agua potable provocan pérdidas económicas por valor de 260,000 millones de dólares anuales². La Figura 1 presenta un diseño de letrina de divulgación abierta que puede ser construida a bajo costo.

Figura 1. Diseño abierto de letrina. Tomado de: https://www.youtube.com/watch?v=xXzwEJm1_9w



²Asamblea General, ONU. Saneamiento para todos (24 de julio de 2013) <https://undocs.org/pdf/symbol=es/A/RES/67/291>

A continuación se presentan algunas definiciones de lo que esos sistemas de potabilización, como se llama a las plantas que limpian el agua para su primer uso, y de saneamiento, para volverla a dejar limpia y que otros puedan usarla también. Estas definiciones se requieren para que cualquier persona las comprenda y se sienta parte del grupo que debe conservarla, ya que una de las riquezas naturales de nuestro planeta es **el agua** y por eso se le llama a la Tierra **el planeta azul** (Figura 2). No queremos que nuestra Tierra se convierta en un planeta como Marte, donde ya no hay agua.

Figura 2. Cascadas de Agua Azul, Chiapas, México



Para una descripción más técnica se pueden consultar las notas de un curso sobre tratamiento de agua (Durán-de-Bazúa, 1981).

Definiciones

Hay dos tipos de plantas de tratamiento: las que tratan el agua para consumirla directamente (agua potable) o para ponerla en contacto con la piel (agua para bañarse, lavarse las manos, etc.). **El agua se purifica** en las fuentes de agua como los manantiales, los arroyos, los ríos, los lagos e, incluso, el mar **gracias al trabajo de miles de millones de microorganismos que no se perciben a simple vista**. Estos microorganismos usan como alimento a las sustancias que impurifican el agua,

como la orina y la materia fecal. Ellas se multiplican con este alimento y se transforman en un material sólido que puede separarse del agua más fácilmente que lo que sería tratar de quitar la orina del agua. Estos microorganismos son, a su vez, alimento para otras especies, como los protozoarios que también se reproducen con ellos. Y esas siguientes especies son alimento de otras, como los micrometazoarios, etc., etc., llegando esta cadena alimenticia hasta los peces. Sin embargo, si son demasiados seres humanos los que tiran su orina y materia fecal, así como otros residuos, al agua será cada vez más difícil lograr que esos microorganismos puedan limpiarla y que ellos no se conviertan en un peligro, ya que los siguientes organismos que se alimentan de ellos no pueden acabar tan rápidamente con esos seres vivos, y así sucesivamente ocurre con los siguientes escalones de esa cadena alimenticia, dejando que ese cuerpo de agua quede tan contaminado que ya no pueda aprovecharse. Esto ha obligado a los grupos sociales a crear sistemas que imitan el trabajo de esos seres microscópicos vivos que se encuentran en los cuerpos de agua y se les llama **plantas de tratamiento biológico**. Estas plantas de tratamiento van a estar formadas por diferentes etapas, justamente siguiendo lo que la naturaleza hace en los manantiales, los arroyos, los ríos, los lagos y también el mar. Las Figuras 3a y 3b muestran parte de un folleto hecho para que la población comprenda lo que es una planta de tratamiento de aguas residuales, como se les conoce.

Figura 3a. Hoja tomada de un folleto de la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán, Sinaloa, México, para explicar lo que hace una planta de tratamiento de aguas sucias (JAPAC, 1999)



Figura 3b. Tomado de: Junta municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán (JAPAC, 1999)

¿Por qué es tan importante la planta de tratamiento de aguas residuales?



Por 2 razones:

1.- **Protege la Salud Pública.**
Disminuye las enfermedades causadas por bacterias y virus.
Los sistemas de desinfección de aguas residuales tratadas, utilizado actualmente, eliminan muchos de esos microorganismos dañinos.

Qué podría ser más importante

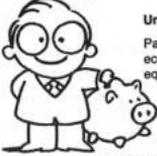
2- Protege la calidad del Agua.
Así podemos disfrutar de la limpieza en océanos, lagos, ríos y arroyos.
De esta manera, el tratamiento de las aguas residuales nos ayuda a disfrutar de nuestra naturaleza.



¿Quién opera las plantas de tratamiento?

La operación diaria de la planta de tratamiento es labor de gente altamente capacitada. Se requiere de:

- Un Gerente**
Para asegurar que la planta no tenga problemas económicos y cuente con personal entrenado y equipo para realizar su trabajo.
- Personal de laboratorio**
Para supervisar la calidad del agua tratada y lodos generados asegurando que el tratamiento esté funcionando correctamente.
- Operadores de planta**
Son quienes conocen el proceso de tratamiento y supervisan éste antes de descargar el agua en nuestro medio ambiente. La mayoría de los operadores se deben capacitar y pasar un examen de sus conocimientos.
- Personal de mantenimiento**
Para prevenir fallas y solucionar problemas del equipo mecánico y eléctrico.






Ahora, hay otro problema muy grave que no se tenía hace unos cientos de años y que es la presencia de muchas **sustancias químicas** que los seres humanos hemos producido y que no existían en la naturaleza. Si nosotros las tiramos con el agua sucia que llega a esas plantas de tratamiento, allí no podrán ser usadas como alimento y, peor aún, si son tóxicas podrían matar a los microorganismos que limpian los otros componentes que ensucian el agua. Por esta razón, se está buscando que esas sustancias químicas, como los detergentes (el jabón, aunque es producido químicamente con grasa y lejía [sosa cáustica], sí puede ser aprovechado por los microorganismos), los medicamentos, así como muchos compuestos como las pinturas o los adelgazadores de las pinturas, el aceite gastado de los motores, los combustibles y muchas otras sustancias que **no son naturales se separen** y no se tiren a los cuerpos de agua o al suelo. Además, si se tienen drenajes, **no deben llegar** a las coladeras que dan a esos drenajes. Así, su tratamiento puede hacerse de manera especial para no contaminar ni el suelo, ni el agua, ni el aire.

Si las personas **no** hacen esta separación, las plantas de tratamiento **deben** considerar **operaciones** adicionales que la naturaleza **no** tiene para poder contener con estas sustancias tóxicas y evitar que dañen a los microorganismos que trabajan **para limpiar el agua**. A estas operaciones o etapas se les llama **tratamientos físico químicos**.

¿Cómo y cuáles son las plantas de tratamiento?

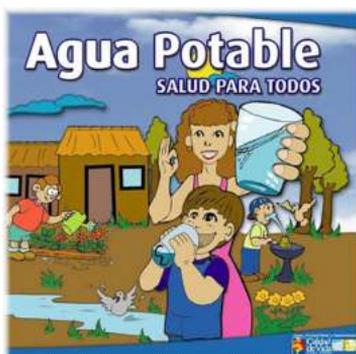
Este capítulo está dedicado a las plantas de tratamiento de aguas residuales. Hay, además, otras plantas que también tratan el agua, pero esta agua es para nuestro consumo directo (para beberla, para lavarnos las manos, para cocinar nuestros alimentos, etc.). A este segundo tipo de plantas se les llama **plantas potabilizadoras**. A continuación se da una breve reseña sobre ellas para que las y los lectores se familiaricen con ellas, aunque no son el objeto de este capítulo. Para más detalle, consultar el libro de Bernal-González y Durán-Domínguez-de-Bazúa (2013).

Plantas potabilizadoras

Las plantas de potabilización esencialmente lo que hacen es quitar las sales que el agua tenga disueltas y que pudieran ser dañinas (sobre todo si tienen arsénico o plomo o mercurio, que son tóxicos y cancerígenos para la mayor parte de los seres vivos), así como los microorganismos potencialmente patógenos (que causan enfermedades). El agua a simple vista puede parecer limpia, ya que estas sales y estos microorganismos no dan color, sabor, ni olor al agua (Figura 4). Por eso, cuando se abre un pozo o se quiere usar el agua de un manantial o de un “ojo de agua” deben siempre tomarse muestras en frascos lavados y hervidos y enviarlas a un laboratorio para que analicen esas muestras de agua y que se garantice que esa fuente de agua sea potable y, si no lo es, que con esa información se pueda definir el tipo de operaciones que debe tener la planta de potabilización para garantizar la inocuidad del agua para las personas, sus animales y sus plantas.

Figura 4. Agua potable

Tomado de: Universidad Central de Venezuela Cátedra Libre de Derechos Humanos (<https://clvddhhucv.wordpress.com/2013/01/26/derecho-al-agua/>)



Para quitar las sales, en las zonas rurales lo más sencillo es pasar el agua por filtros hechos de piedra de río, cantera o tambos plásticos o metálicos empacados con materiales como la paja o el rastrojo de cultivos de cereales o las cáscaras y cabezas de crustáceos, como los camarones o las jaibas si se vive en zonas ribereñas, para que los metales pesados o el metaloide arsénico se queden atrapados en esos materiales, los cuales se pueden quemar después como combustible y los metales quedan en las cenizas, las cuales se pueden usar mezcladas, con el barro para hacer ladrillos o adobes. El agua ya tratada se desinfecta con cloro, sobre todo si se almacena en un jagüey³ o en un tanque, para garantizar que no lleve microorganismos potencialmente patógenos.

En las grandes plantas potabilizadoras se usan sustancias químicas para que quiten esas sales. Después, se deben tratar los lodos que se forman con esas sustancias químicas y las sales, porque contienen todos esos metales o metaloides usándolos justamente para hacer ladrillos o tabicones. El agua ya limpia también debe desinfectarse, ya que generalmente viaja desde varios metros hasta kilómetros dependiendo de dónde estén las casas; o sea, antes de llegar a los destinos de los que la van a usar para tomar, preparar comida, lavarse las manos, bañarse, etc. Para esa desinfección se usan compuestos a base de cloro, que es el desinfectante más barato, en forma de hipoclorito de sodio o, mejor aún, de dióxido de cloro, que es la forma menos tóxica del cloro.

Pasando al objeto de este capítulo, las **plantas de tratamiento de las aguas residuales o ya usadas** limpian el agua que proviene de los servicios sanitarios, después de lavar la ropa, de bañarse, de usarla en fábricas, hospitales, escuelas, etc.). A continuación se describen estas plantas.

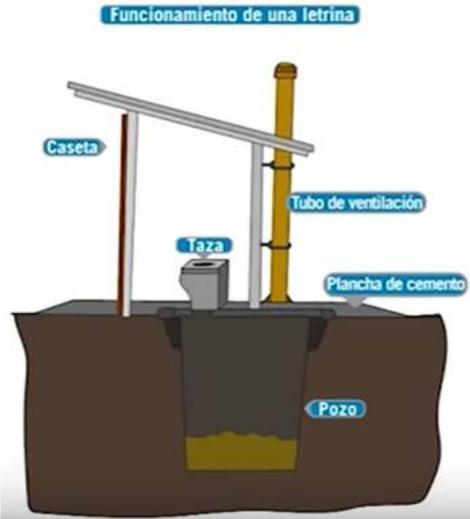
Plantas de tratamiento de aguas usadas o residuales, PTAR

Las plantas de tratamiento de las aguas usadas pueden ser tan sencillas como una fosa recubierta de barro o arcilla, para evitar que el agua se trasmine y contamine las fuentes de agua de los manantiales y que lentamente dentro de la fosa los microorganismos empiecen a limpiarla. Los sitios idóneos para su uso son las casas en el campo o, en general, en zonas rurales. A estos sistemas se les conoce como **fosas sépticas**. Las letrinas se conectan a ellas (Figura 5). No son muy eficientes, aunque sean para una sola familia, ya que los microorganismos no son muy

³1. m. América. Balsa, pozo o zanja llena de agua, ya artificialmente, ya por filtraciones naturales del terreno (RAE). En Colombia se utiliza el término jagüey para depósitos superficiales de agua en zonas con sequías estacionales prolongadas; posiblemente el término esté relacionado con la cultura Wayúu (guajiros). Al igual que la voz Jagüel, usada en el Cono Sur para indicar un pozo o zanja que retiene el agua de lluvia y sirve para abreviar el ganado o el riego. Proviene de la palabra quichua jagüei o jagüey.

rápidos para consumir los contaminantes del agua, especialmente, si no tienen contacto con el aire. Lo que tradicionalmente se ha hecho es hacerles una salida hacia el subsuelo y dejar que los microorganismos del suelo limpien el agua, además de los componentes del propio suelo (Bautista-Zúñiga y col. 1995). Aquí debe cuidarse que esta agua no vaya a llegar a cuerpos de agua subterráneos de los que se alimente un “ojo de agua” o un manantial porque podría contaminarlo y, si no se tiene suficiente cuidado, los microorganismos potencialmente patógenos o sus productos tóxicos pueden ser ingeridos por las personas, a través del agua de ese manantial contaminado. No son adecuadas para zonas suburbanas o urbanas, justamente porque no hay suelo suficiente hacia dónde dirigir el agua clarificada que sale de la fosa séptica. Otra situación que no se contempla con las fosas sépticas es la producción de gases por parte de los microorganismos y que simplemente se dispersan en el aire. En el campo esto no representa un peligro, ya que los árboles pueden usar estos gases como fuentes de nutrientes, pero en las ciudades estos sistemas **no son recomendados** (Durán-de-Bazúa, 1994).

Figura 5. Letrinas conectadas a fosas sépticas en el campo donde no hay drenajes



Tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=x3Zqy61J7os>



Tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=zCR8w1MihnM>

Otro tipo de sistema de tratamiento de aguas usadas para casas en el campo y zonas rurales y algunas suburbanas que tengan traspatio es el acoplamiento de las fosas sépticas con los que se conocen como **humedales artificiales** o sistemas con **plantas acuáticas** (Figura 6). Este sistema se usaba desde la época prehispánica en el antiguo valle del Anáhuac, ahora cubiertos todos sus lagos con casas y edificios. Consiste en aprovechar la zona húmeda donde están las raíces de las plantas acuáticas, como los tules, los carrizos, el chichicaxtle, los popales, etc. A esta zona inundada se le llama **rizosfera** que viene del latín (la lengua que se hablaba en la época de Jesucristo y de la que se derivaron el español, el rumano, el italiano y otras lenguas) y que significa “esfera de las raíces” y allí están justamente los microorganismos que usan los contaminantes pero que, además, con el apoyo de las raíces reciben oxígeno que la planta produce por la fotosíntesis y sustancias químicas que genera la planta, a las que se les llama exudados y que matan a los organismos que causan enfermedades y que inactivan a los virus que vienen en el agua residual. Esto asegura que el agua que salga de allí no tenga patógenos ni sustancias tóxicas. El agua ya tratada se envía a un jagüey o una laguna para que se oxigene y para que se acabe de estabilizar. Incluso, se pueden cultivar peces en ella y con eso verificar que el agua ya no tiene sustancias tóxicas, ya que los peces son indicadores de la calidad del agua. En esta combinación, los gases que producen los microorganismos son asimilados por las plantas acuáticas (Arreguín-Rojas y col. 2013).

Figura 6. Humedales artificiales prototipo de la UNAM (Viveros de Coyoacán y CCH Sur)



Algo importante en los dos sistemas, el de la fosa séptica y el de los humedales combinados, es lo que debe hacerse con sus subproductos. Se debe hacer una segunda fosa también impermeabilizada con barro o arcilla para recolectar los “lodos”, porque ese es el aspecto que tienen los sólidos del fondo de la fosa séptica, así como las grasas y otros materiales flotantes. De esta manera, los sólidos que se van acumulando en la fosa séptica se juntan con la hojarasca de las plantas acuáticas y se ponen rociados con cal en capas en esta segunda fosa para que se forme una “**composta**”. Allí se pueden poner también los restos de la elaboración de la comida que no puedan darse a los animales de granja para comer. La **composta** debe moverse varias veces a la semana para promover que el aire entre y ayude a la descomposición de estos materiales y que, eventualmente, puedan servir como mejoradores de suelos, ya que no son realmente fertilizantes porque no tienen los tres componentes básicos que requieren las plantas: nitrógeno, N, fósforo, P, potasio, K (N:P:K), en las proporciones en que algunos cultivos las necesitan, sobre todo en suelos pobres o ya muy empobrecidos después de varias cosechas en donde las plantas cosechadas se van llevando los nutrientes del suelo. Pero, al menos, ayudan a mejorar su calidad (Durán-de-Bazúa, 1994).

Los sistemas que deben instalarse en las poblaciones de más de 2,500 personas se llaman propiamente plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR. Son sistemas que incluyen, en primer lugar, las tuberías que llevan el agua ya usada desde las casas hasta las instalaciones de las PTAR. A esta red de tuberías se le llama el drenaje o red sanitaria y, cuando esta no existe, se tienen canales o zanjas que conducen las aguas hasta la propia planta. Esto no es muy bueno, porque al estar a cielo abierto tienen malos olores y, lo peor, es que junto con los olores van gotas muy pequeñas (como el vaho que producimos y que sale por la boca y puede verse a simple vista cuando hace mucho frío) que llevan a los microorganismos de una persona que podría estar enferma y que pueden contagiar a todos los que pasen cerca de esas zanjas o canales (Durán-de-Bazúa, 1994).

Una planta de tratamiento tipo PTAR tiene sistemas de separación más tecnificados que una fosa séptica. El primero de ellos se llama **separación preliminar o primaria**. Puede tener cribas o coladeras o rejillas para residuos sólidos grandes, cribas para residuos sólidos pequeños, decantadores donde se separan las grasas y aceites o los objetos flotantes que no se pudieron separar en las cribas y sedimentadores primarios donde se terminan de quitar esos sólidos muy pequeños (Figura 7).

Figura 7. Etapas comúnmente encontradas en las PTAR. (Modificado de: JAPAC, 1999)



Algo importante es que estos sólidos y lodos separados en esta etapa primaria son peligrosos, ya que llevan microorganismos potencialmente dañinos para la salud y ahora sabemos que también llevan virus como el SARS-CoV-2, que produce el COVID-19 y que sigue activado en las aguas residuales después de varios días. Por ello, deben tratarse y desinfectarse. Y, por eso, **no es bueno** que las personas **tiren su basura a los canales o las zanjas o incluso a los drenajes** porque contaminan con los residuos de letrinas e inodoros, conocidos como residuos sanitarios, aumentando el volumen de residuos peligrosos que deben estabilizarse y desinfectarse antes de enviarlos al suelo o a un sitio de disposición controlada de residuos sólidos (Figuras 8, 9).

De allí, si el agua residual no trae contaminantes tóxicos como residuos de medicinas o sustancias químicas o aceites gastados, se pasa a una segunda etapa que se conoce como **separación secundaria o biológica o tratamiento secundario**. En esta operación se deben separar los materiales que están disueltos y no pudieron quitarse en la separación primaria. Para eso, se usan justamente microorganismos como los de las fosas sépticas o el suelo o la rizosfera de los humedales artificiales. Ellos se alimentan o utilizan esos contaminantes disueltos y los transforman en nuevos microorganismos y gases. Estos gases, que se producen cuando los organismos que transforman los residuos respiran como los seres humanos, son bióxido de carbono y agua y, cuando no respiran sino que producen gases que no son como el aire, se llaman organismos anaerobios y producen metano (como el gas que sale de los pozos petroleros), ácido sulfhídrico

(el que huele a huevos podridos) y amoníaco (que también daña la nariz y causa la muerte y por eso ya no se usa en los refrigeradores), principalmente, aunque también producen bióxido de carbono (Bernal-González y Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2013).

Figura 8. Modificado de: Junta municipal de agua potable y alcantarillado de Culiacán (JAPAC, 1999)



Uno de los problemas de estos gases, ya sean de los organismos que respiran o de los que no respiran, es que nadie piensa que si salen al aire atmosférico pueden llevar con ellos (con cada burbuja) microorganismos y virus potencialmente dañinos como una fina película sobre ellos (como las pompas de jabón con las que juegan los niños) y, por eso, estos sistemas no deben estar abiertos sino que deben cerrarse y los gases deben pasar por filtros antes de enviarse a la atmósfera, particularmente los gases de organismos aerobios o que respiran. Y si son anaerobios deben ser lavados para quitarles el amoníaco y el ácido sulfhídrico que son **muy venenosos** para los seres humanos y los animales. El metano residual se puede usar como combustible, ya que es lo que se conoce como “gas natural”. En la India es el combustible de las casas más pobres, pues lo producen de los residuos de las vacas (que son sagradas) y los de sus casas. Con ese metano, que usan como combustible, hierven el agua para tomar y cocinan. El agua con la que quitaron el amoníaco y el ácido sulfhídrico al **biogás**, como se le conoce a estos gases, la usan

para regar, ya que contiene nitrógeno amoniacal y azufre, que son útiles para las plantas, especialmente para los cereales (Durán-de-Bazúa, 1990).

Los excedentes de microorganismos que sirvieron para la transformación de las sustancias disueltas en el agua residual cribada y clarificada deben ser tratados también. Se les conoce como lodos secundarios, para diferenciarlos de los lodos obtenidos de la separación primaria, y también son peligrosos por su contenido de virus y microorganismos potencialmente dañinos para la salud (patogénicos). También pueden separarse en un equipo conocido como sedimentador secundario y, de allí, deben ser estabilizados y dispuestos de manera correcta para evitar problemas de salud pública (Durán-de-Bazúa, 1994).

Finalmente, el agua ya tratada en estos sistemas secundarios debe desinfectarse precisamente para evitar problemas. También, en la mayoría de las PTAR se usa el dióxido de cloro o el hipoclorito de sodio, si no se tiene acceso al primero.

Figura 9. Modificado de: Junta municipal de agua potable y alcantarillado de Culiacán (JAPAC, 1999)

¿Cómo puedo ayudar al mejoramiento de las plantas de tratamiento?

Puedes ayudar en muchas formas, por ejemplo:



Disponer los productos de limpieza del hogar de manera adecuada.

- No arrojar solventes, pesticidas, thinner, pinturas, aceites de automóvil o productos de limpieza con químicos dañinos en los drenajes sanitarios y pluviales. (Hay que separarlos para que se dispongan de manera adecuada)
- Usar los fertilizantes y pesticidas cuidadosamente.
- Tratar de encontrar alternativas seguras para los productos que puedan dañar nuestras fuentes de abastecimiento.

Estar informados:

- Informarnos acerca de nuestras fuentes de agua y de los problemas que éstas enfrentan.
- Conocer lo que tu comunidad está haciendo para proteger las fuentes de abastecimiento de agua.
- Concientizar a otros ciudadanos de la importancia que tiene el tratamiento de las aguas residuales en tu comunidad.



Ayorando a tu planta local de tratamiento de aguas residuales:

- Estando pendiente de que la planta opere correctamente, descargando aguas libres de contaminantes.
- Estar enterado de que la planta cuenta con los medios para operar correctamente.
- Visitar tu planta local. Conocer sus problemas y ver de que manera puedes ayudar.



Usando el agua inteligentemente:

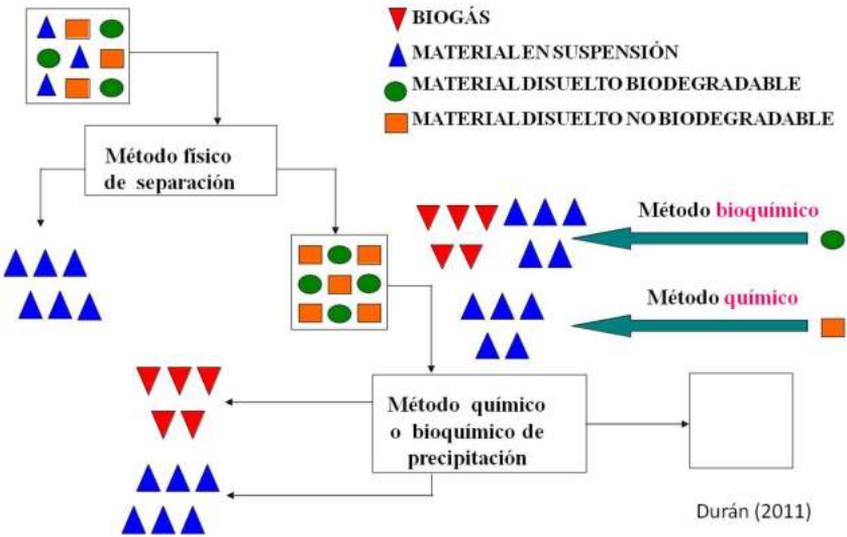
- Tener un buen uso del agua en casa y en tu trabajo.
- Arreglar fugas e instalar elementos que te ayuden a ahorrar agua.
- Cuidar el agua que usas en la limpieza de tu casa (Hay que ver lo importante que es este recurso)
- No arrojar gasolina, thinner, aceite ni insecticidas a tu drenaje sanitario.



Si el agua residual sí trae contaminantes tóxicos, como residuos de medicamentos, artículos de higiene personal como los champúes, los detergentes, los blanqueadores, entre otros, y las aguas residuales industriales que no fueron adecuadamente tratadas en las fábricas donde se produjeron, así como otras sustancias dañinas para los seres vivos. Las PTAR deben tener una etapa especial de tratamiento que se

conoce como **separación química o tratamiento terciario**. Cuando las concentraciones de estas sustancias tóxicas son muy altas debe realizarse esta etapa antes del tratamiento secundario, porque si la planta no tiene sistemas de tuberías y válvulas para poder modificar la operación que se introduzca primero a este tratamiento terciario o químico se pueden matar a los microorganismos del sistema secundario o biológico, si se trata de realizar después de este. Esto significa que las personas propietarias de fábricas o negocios **no deben enviar a los drenajes o sistemas de alcantarillado o zanjas o canales** sus aguas residuales, ya que nadie mejor que ellos(as) saben lo que está en esas aguas. Tampoco deben enviarse aceites gastados (sean de negocios de “fritangas” o de talleres mecánicos), ya que causan muchos problemas en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Ellos(as) deben tener **ética y conciencia**, ya que el daño que causan eventualmente se les va a regresar a ellos(as) y a sus familias, en forma de enfermedades como el cáncer (Figura 10) (Durán-de-Bazúa, 1994).

Figura 10. Diagrama de la separación de contaminantes disueltos en el agua por métodos químicos y bioquímicos. Los contaminantes deben estabilizarse, ya que son residuos peligrosos



En los sistemas terciarios, que pueden ser químicos o bioquímicos, dependiendo del tipo de contaminantes que traigan las aguas residuales, deben planearse las etapas y sistemas que deben instalarse. Este diseño de ingeniería es como **un traje a la medida y es más costoso**, mientras las sustancias que trae el agua, como contaminantes, sean más complejas y tóxicas. Por eso es que resulta mejor que cada

fábrica o negocio realice su propio tratamiento de forma inteligente separando, incluso dentro de sus propias instalaciones, las sanitarias (de los comedores, baños y servicios) de las aguas producidas en cada operación industrial. En una fábrica de pinturas para automóviles se pudo reducir el costo del tratamiento del agua residual mezclada que tiraban a un arroyo a la décima parte, solamente con usar de manera inteligente las atarjeas que tenían, separando en ellas las de cada operación que realizaban, las de las cocinas y los lavabos para los alimentos de los obreros, así como las de las regaderas. Por un lado, las de los sistemas de enfriamiento de los equipos industriales donde se preparaban los polímeros que eran la base de las pinturas; por otro lado, las de los talleres por otro lado, etc. Y, además, se logró reducir la cantidad de agua que requerían, minimizando los costos a pagar a la Comisión Nacional del Agua por el consumo de agua y por el agua residual vertida al arroyo que, además, ya no traía contaminantes peligrosos (Medina-García, 1997; Sánchez-Cortés, 1997).

Terminando con la disposición de los residuos de las PTAR, además de los biogases, están los llamados lodos, como se mencionó arriba, ya que hay lodos primarios, lodos secundarios y lodos terciarios, además de los contenedores de reactivos químicos adicionados en las diferentes etapas, de los residuos de los laboratorios con los que cuentan para realizar los análisis de calidad de cada una de las etapas de tratamiento de las aguas residuales, de los sistemas eléctricos con los que controlan el flujo del agua, de las cribas, entre otros residuos, así como de la iluminación y de los trabajadores y empleados de la PTAR. Las Figuras 11 y 12 presentan algunos puntos clave a cuidar en las PTAR.

Como en el ejemplo anterior de la planta de pinturas, se tiene un estudio de la PTAR de una ciudad de 675,973 habitantes en el año 2020 (según el Consejo Nacional de Población de México, CONAPO), donde se hizo una propuesta sobre el uso eficiente de la electricidad que consume esa planta y cómo puede ahorrarse en ella energía eléctrica reduciendo los costos de manera considerable (Aguilar-Urcid, 2016). Para la estabilización y disposición controlada de estos residuos, tradicionalmente se emplean sistemas anaerobios para reducir el volumen y la masa de estos sólidos convirtiéndolos en biogás rico en metano; después, se depositan en sitios de disposición controlada. Sin embargo, en los últimos 30 años, en Europa lo que se hace es combinar los residuos de las plantas de tratamiento con los residuos municipales, incinerándolos en enormes sistemas que producen electricidad, agua caliente para los sistemas de aire acondicionado y calentamiento en invierno; además, gases son tratados para evitar problemas de dioxinas y furanos enviados a la atmósfera, que son cancerígenos. Las cenizas se usan justamente para producir ladrillos.

Una planta en la ciudad de Viena, en Austria, forma parte del plan de gestión de los **residuos** que se producen en ella, donde residen la mitad de los austríacos (sería, en proporción como poco más de dos veces más grande que la Ciudad de México y su zona conurbada, que tiene 25 millones de habitantes de los 125 que somos). La cantidad de **residuos** que recibe tratamiento térmico es de cerca de 265,000 toneladas anuales. Su combustión produce, además de calor para el sistema de calefacción centralizada, electricidad para su propio abastecimiento. Las instalaciones de la planta de incineración de Spittelau (nombre del barrio donde está instalada en Austria) tienen la mejor tecnología ambiental disponible en el momento actual: precipitadores electrostáticos y filtros húmedos para la eliminación de los metales pesados, ácido clorhídrico y dióxidos de azufre y un sistema catalítico de depuración de gases de combustión que reduce los óxidos de nitrógeno (NOx), las dioxinas y los furanos con un alto grado de eficacia. Otro indicador de la compatibilidad ambiental de la planta incineradora de residuos de Spittelau es el hecho de que el diseño arquitectónico fue realizado por el célebre artista internacional Friedrich (Federico) Hundertwasser, que es un ambientalista convencido y que únicamente accedió a hacerse cargo de este proyecto de forma honorífica, tras largas discusiones sobre los aspectos ambientales (Contacto principal, Fernwärme, Wien, 2020).

Figura 11. Tomado de: Junta municipal de agua potable y alcantarillado de Culiacán (JAPAC, 1999)

Algunas preguntas y respuestas



Los lodos que produce la planta de tratamiento ¿son un riesgo para nuestra salud?

Cuando se manejan correctamente, los lodos pueden ser usados, incinerados o enterrados de manera segura.

Es un sistema de tratamiento que se utiliza para una casa o comunidad muy pequeña. Por ejemplo una fosa séptica. Estos sistemas se pueden usar donde, por su tamaño, una planta de tratamiento es incosteable y poco práctica.

¿A qué le llaman tratamiento en el sitio?





¿Es costoso construir y operar las plantas de tratamiento?

Sí, pero sus beneficios (tratar el agua y mejorar la Salud Pública) exceden en mucho los costos.

Figura 12. Tomado de: Junta municipal de agua potable y alcantarillado de Culiacán (JAPAC, 1999)



Cambios en los caudales del agua

La cantidad (y calidad) de agua residual que recibe la planta de tratamiento puede cambiar rápidamente debido a lluvias o descargas extraordinarias de algunas industrias. Los operadores de la planta deben estar preparados para responder a esos cambios.

Problemas con las plantas potabilizadoras y las plantas de tratamiento de aguas residuales

Algo muy importante y que normalmente no se sabe son los **problemas asociados con estas plantas**, tanto las potabilizadoras como las de tratamiento de aguas residuales o usadas.

En el caso de las plantas potabilizadoras, los responsables de su construcción buscan ahorrar usando sustancias químicas baratas, como el alumbre (un material que tiene aluminio), por lo que al terminar su uso deben ser enviadas a disposición controlada o ser depositadas en zonas donde no representen peligro. Esta parte resulta costosa y muchas plantas no tienen este mecanismo de disposición controlada. Lo que hacen es ir haciendo montañas de estos lodos al lado de la propia planta potabilizadora, lo que representa un peligro. Estos puntos deben considerarse al momento de diseñar y construir la planta potabilizadora y saber exactamente cuál sistema es mejor para eliminar sales y desinfectar el agua dependiendo de la localización geográfica de la planta y de las opciones que existen (Torres y col. 2012). Para las plantas de tratamiento de aguas residuales o usadas ocurre lo mismo. Muchas de ellas fueron construidas con préstamos del Banco Mundial o el Banco Interamericano de Desarrollo. Esto hizo que los responsables buscaran la manera de enriquecerse indebidamente con estas construcciones. Uno de los problemas más comunes es que no se tienen las tuberías de drenaje desde las casas o las zanjas o canales que transportan las aguas negras o residuales para llevarlas a la planta. Por tanto, las plantas son “elefantes blancos” que no se usan, ya que no tienen agua negra que limpiar.

Otro problema comúnmente encontrado es que, nuevamente, tratando de ganar dinero con su construcción, se hicieron mucho más grandes de lo que era necesario (se conoce como **sobredimensionamiento**), ocasionando que su operación sea muy costosa para el caudal de agua residual que les llega y ningún

gobierno municipal tiene dinero suficiente para “echarlas a andar” o las opera con pérdidas. Por ejemplo, una PTAR diseñada para limpiar el agua de 20,000 personas, recibe el agua de solamente 3,000 personas. Como no es posible técnicamente hacer que los motores y bombas y otros equipos trabajen menos, sino que deben estar operando como si fueran a recibir más agua, se usa una cantidad excesiva de electricidad y de todos los insumos requeridos para el tratamiento del agua y, como están sobrados, el costo se eleva mucho por litro de agua tratada.

Un tercer problema es que se usen tecnologías que ya son obsoletas en otros países y que se adquirieron a sabiendas de ello por el afán de lucro. Esto hizo que las PTAR, cuando están operando, causen daños a las personas que viven en las zonas aledañas a ellas por los aerosoles que les llegan y que llevan microorganismos patógenos que les causan enfermedades.

Todos estos problemas deben ahora ser resueltos, ya que hay en el país más de 2,500 plantas de tratamiento de aguas residuales y una proporción enorme de ellas trabajan mal o tienen problemas serios desde el punto de vista de ingeniería (Navarro-Frómeta y col. 2019).

¿Qué debemos hacer como ciudadanos responsables y conscientes?

Los ciudadanos debemos apoyar con nuestro granito de arena para que las **plantas que ya existen** se reconviertan o mejoren su operación para que realmente sean un apoyo para la sociedad en su conjunto, no solamente mexicana, sino de cualquier país del mundo y devuelvan el agua a su calidad original. ¿Cómo podemos hacerlo?

- En primer lugar, cuidando el agua y usándola de forma inteligente.
- En segundo lugar, no tirando basura en las coladeras ni en las zanjas o canales.
- En tercer lugar, para las medicinas que ya no sirven, el aceite quemado, los productos de limpieza hechos con sustancias químicas, pedirles a los servicios de limpia que los envíen a disposición especial y vigilar que los empleados realmente lo hagan y que no los pongan con la basura doméstica. Algo muy común es que uno pague para que se lleven el “cascajo” de una obra y ellos lo tiren en la cuneta de una carretera o donde primero puedan sin preocuparse del daño que causan. Por eso ahora hay multas de hasta medio millón de pesos a quienes se sorprenda haciendo estas actividades.
- En cuarto lugar, cuando hagamos una nueva obra en la casa busquemos que las tuberías del agua de lavado de la ropa se vayan para los W.C. ya que con eso se puede ahorrar agua y lograr que esa corriente de aguas negras sea debidamente tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales.

- ¡Involucrémonos en las juntas de la comunidad para saber exactamente lo que se hace con el agua, tanto la que es limpia, y que vamos a consumir al preparar los alimentos y a usar para lavar los trastes y para bañarnos, como la que vamos usar para los inodoros!
- ¡Conozcamos las plantas potabilizadoras de agua y las plantas de tratamiento de aguas residuales o usadas!
- Eduquemos a nuestros(as) hijos(as) con el ejemplo y démosles la mejor herencia: un país limpio, con ríos, lagos, jagüeyes y manantiales limpios.
- Consideremos que esas plantas potabilizadoras de agua y de tratamiento de aguas residuales o usadas son **nuestras** como parte de la comunidad, y cuidémoslas como lo que son:
- ¡Propiedad de todos y cada uno de nosotros!
- ¡Cuidemos el agua, patrimonio de todas y de todos!

Modificado de: Junta municipal de agua potable y alcantarillado de Culiacán (JAPAC, 1999)

**Así... ¡El tratamiento
de las aguas residuales nos
da agua sin contaminantes!
¡Agua limpia!**



- Conocer el tratamiento de aguas residuales
- Conocer lo que tu comunidad está haciendo para controlar la contaminación del agua
- Entender el valor de tener un tratamiento de las aguas residuales.

Reconocimientos

Los autores reconocen el valioso apoyo académico del Dr. Leonel Ernesto Amábilis-Sosa, quien ha trabajado en el sector del tratamiento de aguas residuales con enorme compromiso social y profesional, por su valiosa revisión de este documento. Todos los errores son responsabilidad de los autores únicamente.

Asimismo, la primera autora quiere dedicar este opúsculo a la Frau Dr.-Ing. Gabriele Irene Engelmann a quien debe todo el conocimiento que adquirió sobre el tratamiento de aguas residuales durante los años setenta y ochenta del siglo xx en aquellos laboratorios de Am Fasanengarten, en una pequeña ciudad alemana que lleva por nombre “El descanso de Carlos” (Karlsruhe).

Bibliografía

- Aguilar-Urcid, V.E. (2016). **Optimización y ahorro de energía eléctrica en una planta de tratamiento de aguas residuales**. Título de Ingeniero Químico. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Enero 08, 2016. Ciudad de México, México. <https://132.248.9.195/ptd2017/octubre/0766507/Index.html>.
- Arreguín-Rojas, Agustín* (Coordinador), Durán-Domínguez, María del Carmen, Bernal-González, Marisela, González-Sandoval, María del Refugio, Sánchez-Tovar, Salvador Alejandro. (2013). Manual de operación y mantenimiento del humedal artificial del CCH PLANTEL SUR, con actividades didácticas para el BACHILLERATO UNAM. ISBN 978-607-7807-12-4. Pub. CCH-Sur (Proys. INFOCAB) SB201608 y PB201312, Facultad de Química, UNAM y AMCATH. Ciudad de México, México. 46 pags. 10 ejemplares/exemplars, 1a. Ed. (2010). Libro electrónico (disco compacto), 2ª. Ed. (2013)
- Bautista-Zúñiga, F., Luna-Pabello, V.M., Durán-de-Bazúa, C. (1995). El suelo, un reactor químico muy interesante. *Educación Química*, 6(4):226-230. ISSN 0187-893-X.
- BernalGonzález, M. y Durán-Domínguez-de Bazúa, M.d.C. (2013). Tratamiento de agua y aguas residuales. *Vol. 7, Serie: QUÍMICA AMBIENTAL DEL AGUA*. Pub. AMCATH y Labs. Ing. Quím. Amb. y Quím. Amb. Facultad de Química, UNAM. 127 pags. 1a. Ed. México D.F. México.
- Contacto principal: *Fernwärme Wien Ges.m.b.H.* SpittelauerLinde 45. Vienna, Austria. Patrocinador: ciudad de Viena (District Heating Company Vienna). Austria. Socio: Dipl. Ing. Peter Wintoniak. SpittelauerLinde 45. Vienna, Austria. Socio: Ing. Ernst Hoffmann. SpittelauerLinde 45. Vienna, Austria. <http://habitat.aq.upm.es/dubai/96/bp014.html#:~:text=Esta%20planta%20forma%20parte%20del,electricidad%20para%20su%20propio%20abastecimiento>. Consultada el 25 de agosto de 2020.
- Durán-de-Bazúa, C. (1990). *Consultancy Report to Food and Agriculture Organization of the United Nations*. School of Energy Studies for Agriculture, Punjab Agricultural University. 23 págs. Pub. FAO-UNO. Ludhiana, India.
- Durán-de-Bazúa, M.d.C. (1994). NOTAS sobre un curso de **Tratamiento biológico de efluentes de la industria alimentaria y de proceso**, ofrecido a es-

- tudiantes de maestría en la Facultad de Ingeniería Civil y Mediciones de la Universidad de Karlsruhe, RFA. 113 páginas. Traducción al español. Pub. Facultad de Química. UNAM. 5ª. edición (1994). México D.F. México.
- JAPAC. (1999). **¿Qué es una planta de tratamiento de aguas residuales?** Editado por la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán. Abril. Culiacán, Sinaloa, México.
- Medina-García, S. (1997). **Estudio de prefactibilidad de un sistema de segregación y tratamiento biológico de las aguas residuales generadas en una planta de pinturas.** Título de Ingeniero Químico. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Marzo 19, 1997. Ciudad de México, México. <https://132.248.9.195/ppt2002/0247883/Index.html>
- Navarro-Frómata, A.E., Sánchez-Tovar, S.A., Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.d.C. (2019). **Consideraciones para el mejoramiento sustentable de la infraestructura de plantas de tratamiento de aguas residuales en México, informe técnico.** Documento entregado a la Presidenta de la Comisión de Ciencia, Tecnología e Innovación de la H. Cámara de Diputados. Ciudad de México, México.
- Sánchez-Cortés, M.M. (1997). **Estudio sobre el uso racional del agua en una planta de pinturas a través del tratamiento y reutilización de sus aguas residuales.** Título de Ingeniero Químico. Facultad de Química, UNAM. (Unanimidad). Mayo 14, 1997. Ciudad de México, México. <https://132.248.9.195/ppt2002/0249919/Index.html>
- Torres, P., Hernández, D., Paredes, D. (2012). **Revista Ingeniería de Construcción.** 27(3):145-154 www.ricuc.cl
- Xie, Y., Bie, Q., He, C. (2017). Human settlement and changes in the distribution of river systems in the Minqin Basin over the past 2000 years in Northwest China. *Ecosystem Health and Sustainability.* 3:11, 1401011, <https://doi.org/10.1080/20964129.2017.1401011>.

Capítulo 9

Humedales para el tratamiento de aguas residuales

Armando Rivas Hernández¹

Resumen

Los humedales de tratamiento son sistemas que emulan los procesos de depuración existentes en los humedales naturales, mediante los cuales se disminuye la carga contaminante existente en el agua residual, a partir de un riguroso diseño ingenieril, una cuidadosa construcción y de una sistemática operación y mantenimiento. El sistema está integrado por uno o varios estanques que contienen especies vegetales, las cuales proporcionan el oxígeno requerido por los microorganismos para efectuar la biodegradación. Al fluir el agua residual se desarrollan varios procesos físicos, químicos y biológicos, que en su conjunto generan un agua tratada factible para ser reutilizada en diversos tipos de riego; o bien, para proteger la calidad del agua de los cuerpos receptores. Han tomado una gran importancia a nivel internacional, básicamente por sus bajos costos y por lo sencillo de su operación; además de ser amigables con el ambiente, son estéticos y cuando son bien dimensionados y operados no generan malos olores. Existen diferentes tipos de humedales de tratamiento y pueden utilizarse a nivel familiar, rural, ciudades medianas, y, cuando hay terreno disponible, hasta en grandes ciudades. También son utilizados para el pulimento (tratamiento avanzado) de los efluentes de sistemas electromecánicos y para el tratamiento de lodos. En México, después de 30 años de su uso, conforman el 8% de la infraestructura de tratamiento. Sin embargo, los humedales de tratamiento, por emular los principios de la autopurificación, requieren de extensas áreas de tratamiento, lo que dificulta la disponibilidad de terreno y limita su uso. Se tiene, por lo tanto, la necesidad de optimizarlos, por lo que se requiere investigar y mejorar su estructura y funcionalidad, a fin de obtener mejores eficiencias de remoción de contaminantes, con menores costos de tratamiento. En este capítulo se describen y señalan los

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, rivas.hz@gmail.com

principales tipos de humedales. Se describen los mecanismos de remoción de contaminantes, las actividades de operación y mantenimiento, las ventajas y desventajas y sus aplicaciones.

Introducción

Los humedales de tratamiento han sido utilizados desde hace tres décadas. Han tomado gran importancia en los últimos 15 años. En México se utilizan desde 1990. Actualmente, representan el 8% de la infraestructura de tratamiento (CONAGUA, 2018). Es importante señalar que, durante el desarrollo de esta tecnología, los humedales de tratamiento han sido denominados de múltiples maneras: humedales construidos —del inglés, *constructed wetlands*— (Kadlec, 1996), humedales artificiales, lechos de hidrófitas, lechos de macrófitas, sistemas de tratamiento de aguas negras con plantas acuáticas (STANPA), biofiltros, lechos enraizados, o como lechos de plantas acuáticas (Rivas, 1997). Posteriormente, Kadlec (1999) y Kadlec y Wallace (2009) los citan como humedales de tratamiento, denominación que, con el objeto de homogenizar su nombre en el idioma español (y que se utiliza en este escrito), fue propuesta y consensuada por la recién formada Red Panamericana de Humedales de Sistemas de Tratamiento durante la III Conferencia de Humedales de Tratamiento realizada en Santa Fe, en Argentina, en el año de 2016 (<https://www.gob.mx/imta/articulos/creacion-de-la-red-panamericana-de-sistemas-de-humedales-de-tratamiento?idiom=es>).

En la actualidad existen básicamente dos tipos de humedales: los naturales, que funcionan bajo los principios de autopurificación natural y los de tratamiento del agua residual (creados por el hombre), que se dimensionan para fines específicos, respecto a una calidad esperada en el agua tratada. Son sistemas que se diseñan y construyen con base en principios de ingeniería, por lo que se incrementa la velocidad de reducción de contaminantes, se mejora el funcionamiento hidráulico. Se seleccionan y utilizan especies vegetales acorde a cada caso (se debe prevenir introducir especies que no sean de la región). Para optimizar el funcionamiento del sistema se efectúa una operación y mantenimiento manera sistemática.

Los humedales de tratamiento no son una tecnología reciente, Kadlec y Wallace (2009) citan su uso en pequeños prototipos a partir de los años 60 en Alemania; sin embargo, su desarrollo tecnológico se presenta a finales de los años 80, donde incluso se había generado información relevante para su dimensionamiento, operación y mantenimiento (EPA, 1988). Durante los años 90 tomaron una significativa importancia en Norteamérica, Europa y Asia (Rodríguez,

2003), y por supuesto en Latinoamérica; de hecho, en México ya existían pequeños sistemas desde el inicio de los años 90 (Rico y Rivas, 1992).

Existen diversos estudios en los que se indica la importancia que tienen los humedales, en los que se evalúa su capacidad de depuración del agua residual. Una gran ventaja de los humedales de tratamiento consiste en que pueden recibir flujos continuos de aguas residuales con altas concentraciones de nutrientes (EPA 2000).

En México, desde hace muchos años, es frecuente el vertido del agua residual, municipal y de retorno agrícola en los humedales naturales, lo que ha provocado su desarrollo en inmensas áreas, debido al aporte de nutrientes; pero, al mismo tiempo, han sido afectados al deteriorar su calidad del agua (CONAGUA-IMTA-FGRA 2007). Rivas (2002) refiere que los humedales de tratamiento constituyen una alternativa eficiente y de bajo costo para la protección de los humedales naturales, los cuales están fuertemente impactados por la descarga de aguas residuales, lo que pone en riesgo su existencia, pérdida de especies y afectación de las actividades productivas.

Se ha probado que los humedales de tratamiento, al funcionar con energía solar, son una alternativa viable y eficiente, incluso en zonas donde no se cuenta con el servicio de energía eléctrica, como es el caso de las zonas rurales (Crites y Tchobanoglous, 1998), se pueden utilizar tanto en climas fríos como templados (Rousseau y Hooijmans, 2009); además, sus subproductos pueden ser reutilizados y comercializados (Rivas *et al.* 2007).

Al utilizar un sistema híbrido de humedales; es decir, mediante la combinación de diferentes tipos de humedales, conjuntamente con lagunas de maduración (Rivas, 1996), es factible generar un agua tratada baja en materia orgánica (DBO), nutrientes (nitrógeno, fósforo), así como de coliformes fecales y huevecillos de parásitos. Por tanto, se obtiene un tratamiento avanzado, sin la necesidad del uso de desinfectantes químicos, que cumple con los requerimientos normativos de México, para diferentes tipos de reúso del agua tratada (en la industria, riego de áreas verdes, riego de cultivos, agricultura, acuicultura o para mejorar la calidad del agua de los cuerpos receptores). Knox *et al.* (2008) y Yu *et al.* (2012), citan que los humedales de tratamiento pueden proporcionar un efluente bajo en materia orgánica (DBO5), en macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y en microorganismos patógenos.

De acuerdo con la CONAGUA (2018), el 8.0% de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) corresponden a los humedales de tratamiento. En los años 90 la alternativa tecnológica más usada (50% del número total de las PTAR) eran las lagunas de estabilización, debido principalmente a su sencillez de operación y bajos costos de tratamiento. Sin embargo, para el año 2015 el

porcentaje se redujo a un 26.5%, mientras que los humedales de tratamiento incrementaron durante ese periodo del 2% al 8% y su tendencia es hacia el incremento, conforme van siendo conocidos y aceptados en el sector de saneamiento. Cabe señalar que los humedales de tratamiento han sido reportados ya sea como un único proceso de tratamiento o en forma combinada con tanques Imhoff, fosas sépticas o sedimentadores primarios. De igual modo, se enfatiza que el Inventario Nacional de PTAR solamente muestra información oficial, pero no incluye los humedales de tratamiento que han sido construidos por empresas, escuelas, unidades habitacionales o por propietarios particulares, por lo que el número real con facilidad es duplicado. De hecho, CONAGUA- IMTA-FGRA 2007 citan la instalación de docenas de humedales a nivel familiar, que no forman parte del inventario nacional.

Una importante causa de la disminución del porcentaje de las lagunas de estabilización se ha debido principalmente al aumento de las restricciones de los límites de descarga, conforme a la normativa en México, considerando que los efluentes mediante estos sistemas contienen grandes concentraciones de algas, lo que impacta en el vertido de sólidos, demanda bioquímica de oxígeno y nutrientes hacia las aguas receptoras (Rolim, 1999).

Los modelos existentes para su dimensionamiento generan áreas altamente discrepantes, desde 3 hasta 10 m²/hab (Vymazal, 2008), ya que se basan en constantes obtenidas para condiciones inmensamente diferentes (Europa, EE.UU., etc.) de las existentes en México. Al mismo tiempo, las ecuaciones no incluyen elementos de hidráulica que pudieran optimizar su eficiencia. Se tiene, por lo tanto, la necesidad de optimizarlos, por lo que se requiere investigar y mejorar su estructura y funcionalidad, a fin de obtener un mejor rendimiento y un menor costo de tratamiento.

Desde luego que no hay que olvidar el concepto de tecnología apropiada, que consiste en seleccionar la alternativa de tratamiento más adecuada, dependiendo de las circunstancias técnicas, económicas, sociales, ambientales y políticas de cada caso. En aquellas situaciones en donde se tengan problemas de disponibilidad de terreno no podrán utilizarse los humedales, ya que demandan hasta 20 veces más superficie que los sistemas compactos (electromecánicos), e incluso habrá ocasiones en que deberá seleccionarse un sistema que requiera poco espacio —por ejemplo, los discos rotatorios—.

También se precisa mencionar que muy probablemente más del 50% de las PTAR electromecánicas en México están fuera de operación (CONAGUA [2020] cita que de 3,359 PTAR el 24.3% no operan), debido principalmente a insuficiencia de recursos económicos (el 80% de los costos de operación corresponden al servicio de energía eléctrica, los humedales no la necesitan para su

funcionamiento) y a falta de capacitación de los operadores (los operadores de los humedales de tratamiento requieren una capacitación muy sencilla). Es de suma importancia enfatizar que muchos de los sistemas fuera de operación corresponden a humedales de tratamiento que fueron mal diseñados, con deficiencias constructivas, y que no son atendidos (operados) correctamente.

Definición, estructura y funcionalidad

Los humedales de tratamiento son sistemas para el tratamiento de aguas residuales donde los contaminantes son transformados en gases, biomasa (microorganismos y vegetación) y en compuestos mineralizados (Hammer, 1989).

Consisten en estanques o canales (unidades de tratamiento) con alto contenido de humedad, contienen plantas acuáticas (flotantes, sumergidas o emergentes), tienen instalados un conjunto de tuberías y estructuras de entrada y salida (registros) para distribución y recolección del agua, usualmente son impermeabilizados para evitar fugas o infiltraciones, se construyen con una leve pendiente para facilitar el flujo del agua, se desarrollan capas de microorganismos en todas las superficies (raíces, fondo, y en el medio filtrante, cuando este es utilizado). En la Figura 1 se esquematiza la estructura de un sistema de humedales.

Se observan tres estanques en serie, el lecho filtrante (grava o tezontle), la macrófita (tule), tuberías y registros para el control del caudal, detalles de la impermeabilización y de la biopelícula (capa de microorganismos) en diversas superficies, la fuente de energía (luz solar), así como el aspecto del agua tratada conforme avanza el tratamiento.

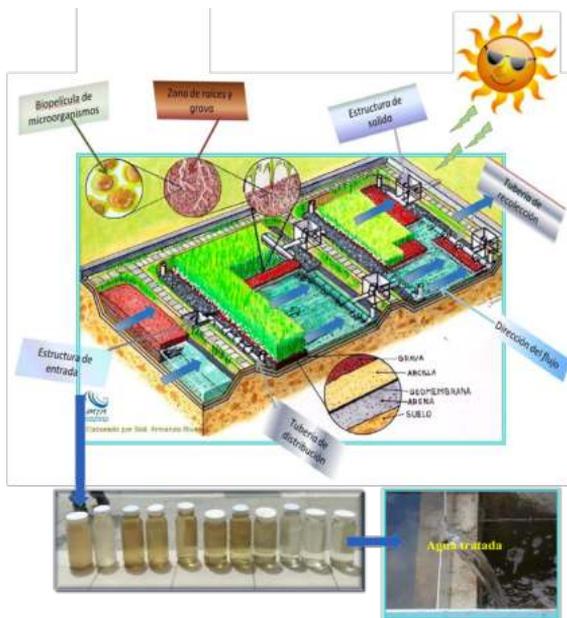
Los estanques permanecen inundados, total o parcialmente, de tal modo que siempre haya la humedad suficiente para el desarrollo de la vegetación. La vegetación que ha evolucionado para vivir bajo estas condiciones de alta humedad se denomina macrófitas, como es el caso del carrizo (*Arundo donax* o del género *Phragmites*) y el tule (géneros *Typha sp.* o *Scirpus*) o de algunas especies flotantes como el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), y la lentejuela (*Lemna sp.*).

Los estanques son poco profundos, usualmente entre 0.4 y 1.0 m, para que logre desarrollarse sin dificultad el área radicular y logre llevar el oxígeno hacia todo el volumen del estanque. Las principales funciones de las plantas consisten en: generar oxígeno y proporcionarlo a los microorganismos existentes en la zona radicular, absorber nutrientes (nitrógeno y fósforo), asimilación de contaminantes en sus tejidos, filtración de sólidos en el área radicular.

Se hace fluir lentamente el agua residual a través de los estanques, la cual, en periodos entre 7 y 15 días de tiempo de contacto con los microorganismos, de una manera continua va mejorando su calidad por la reducción de contaminantes

mediante procesos fisicoquímicos y biológicos. Se controla el flujo del agua a través del volumen del estanque para propiciar que el agua residual llegue a los microorganismos y las plantas, en el entendido de que la materia orgánica contenida en el agua residual contiene los nutrientes que requieren dichas plantas y microorganismos para su desarrollo (fuente de energía y creación de nuevas células). Se deben utilizar macrófitas de la región y evitar introducir especies que pudieran afectar a la vegetación local.

Figura 1. Estructura de un sistema de humedales de tratamiento



Copyright. IMTA, Armando Rivas Hernández.

Es importante remarcar que su potencial depurador está enormemente limitado por las zonas de transición entre los procesos de reducción de contaminantes, ineficiencias hidráulicas e inexistencia de operación y mantenimiento (Rivas *et al.* 2005). Estos sistemas soportan fuertes variaciones de calidad y cantidad del agua debido principalmente a los grandes tiempos de retención (grandes volúmenes) en los que se realiza el tratamiento, en función de la calidad de agua esperada en el efluente. Es importante conocer el tipo de contaminantes en el agua residual con el fin de determinar si pueden presentarse afectaciones por la presencia de sustancias tóxicas (Kadlec y Knight, 1996).

En la Figura 2 se presenta un aspecto general del proceso de tratamiento de aguas residuales mediante un humedal de tratamiento. Se observa el tamaño, impermeabilización con geomembrana (capa de poliuretano o de PVC), tuberías, y la macrófita utilizada (*Arundo donax*, carrizo).

Figura 2. Panorámica de un humedal de tratamiento



Los estanques con plantas deben estar precedidos de un tratamiento previo para la eliminación de basuras (sistema de rejillas), arenillas y otros sólidos (desarenador), y grasas y aceites (trampa para grasas); así como de un tanque séptico o algún otro proceso anaerobio (ausencia de oxígeno), como puede ser un biodigestor, un reactor anaerobio o un tanque Imhoff, para remover materia orgánica y sólidos en suspensión (García *et al.* 2004).

Además de su uso para el tratamiento de aguas residuales, funcionan como áreas para la protección de la vida silvestre al proporcionar un nuevo hábitat para aves acuáticas y otras formas de vida. De igual modo, con estos sistemas se puede prevenir la eutroficación de cuerpos receptores. Existen en México humedales de tratamiento, que ocupan grandes extensiones de terreno, los cuales se han convertido en áreas de protección de la vida silvestre, como lo son aves y otras formas de vida. Un importante ejemplo lo constituye el Tanque Tenorio, en San Luis Potosí, que corresponde a un humedal de 1.0 Km de largo, por 1.0 km de ancho, donde se han registrado 27 especies de aves. El objetivo principal del humedal es para el pulimento del agua tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales Tenorio. En la Figura 3 se muestra la presencia de aves en el Tanque Tenorio.

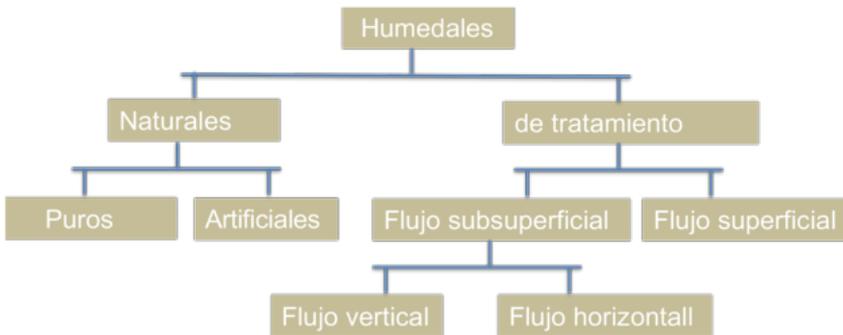
Figura 3. Presencia de aves en el Tanque Tenorio



Clasificación de los humedales de tratamiento

La tipología de clasificación de los sistemas de humedales se ha clasificado en dos tipos de sistemas: los naturales y los de tratamiento. En la Figura 4 se esquematiza su clasificación.

Figura 4. Clasificación simplificada de los humedales.



Los naturales presentan dos variantes: naturales puros (con poca o ninguna influencia antropogénica) y artificiales (inducidos por actividades antropogénicas). Dentro de los humedales naturales puros se encuentran los pantanos de agua fresca, los de agua salada, pantanos de arbustos, pantanos boscosos, manglares, ciénegas, pantanos de musgo, pantanos de cipreses y ramales. Incluyen una amplia variedad de hábitats interiores, costeros y marinos. En la Figura 5 se muestra un humedal natural, que es altamente impactado por la descarga de aguas residuales municipales.

Figura 5. Humedal natural, en Lerma, Estado de México.



Los humedales artificiales (de influencia antropogénica) básicamente se han desarrollado en zonas con descargas de agua residual municipal, doméstica o de retorno agrícola, cuyos nutrientes propician su desarrollo.

Los humedales de tratamiento presentan una amplia variedad de tipos, en función del criterio utilizado para su denominación (variante de funcionamiento hidráulico, tipos de especies vegetales que utilizan, regionalismos de lenguaje, con o sin material filtrante, entre otros). Los hay de dos tipos: de flujo superficial (flujo inundado, Figura 6a) y flujo subsuperficial (flujo subterráneo). Estos últimos presentan dos variantes: flujo vertical (Figura 6b) y flujo horizontal (Figura 6c). La diferencia principal radica en que los de flujo subsuperficial contienen un medio de empaque (grava, tezontle, trozos de madera, arena, etc.), en cuyas superficies (conjuntamente en las raíces de las plantas) se desarrolla la capa de mi-

croorganismos. Las plantas (tule, carrizo, entre otras) enraízan en el medio filtrante. Evidentemente, en los de flujo inundado se utilizan especies emergentes (tule y juncos), flotantes (lirio acuático, lentejuela, etc.) o sumergidas (elodea o yana).

Figura 6. a) Humedal de flujo superficial, b) Humedal de flujo subsuperficial vertical, c) Humedal de flujo subsuperficial horizontal.



En la Figura 1 se muestra de manera gráfica los componentes de humedales de flujo subsuperficial horizontal. En estos sistemas el agua ingresa y se distribuye a todo lo ancho del estanque mediante tuberías perforadas. El propósito es hacer pasar lentamente el agua a través del medio filtrante. Conforme avanza hacia la salida se va reduciendo la concentración de los contaminantes. Al término del estanque el agua es recolectada mediante tuberías ranuradas instaladas para ese fin. El medio poroso interviene de manera eficiente en los procesos de filtración y sedimentación (Fernández *et al.* 2004).

La ubicación de las estructuras hidráulicas es de gran importancia para evitar la generación de flujos preferenciales y zonas muertas.

En los humedales de flujo subterráneo vertical el agua es distribuida mediante tuberías ranuradas sobre la superficie del medio filtrante. Usualmente el flujo es suministrado por pulsos, de tal modo que el medio poroso no está per-

manentemente inundado y se propician condiciones aerobias; sin embargo, por la escasez de zonas anaerobias, no se obtienen buenas tasas de desnitrificación, por lo que el amonio es solamente transformado en nitrato (Arias *et al.* 2003).

Los humedales, además de ser utilizados para el tratamiento del agua residual, también son frecuentemente usados para el tratamiento de lodos, ya sea los generados en el biodigestor, en el tanque séptico, o los provenientes de otras plantas de tratamiento. En Europa es común el tratamiento de los lodos mediante los humedales de tratamiento. Usualmente se utilizan los de flujo subsuperficial vertical para este fin.

Mecanismos de remoción

La reducción de contaminantes se desarrolla mediante procesos físicos (sedimentación, adsorción, absorción, filtración), químicos (hidrólisis, generación de gases como el bióxido de carbono y el gas metano) y biológicos (desarrollo de microorganismos y plantas). Dicho de una manera sencilla, los contaminantes presentes en el agua residual son transformados en gases, agua, biomasa y los sólidos inorgánicos (tierra y arena) son retenidos en el medio filtrante, dentro del humedal.

Las plantas, en presencia de energía solar, generan oxígeno mediante el proceso de fotosíntesis y lo conducen hasta sus raíces, donde se disuelve con el agua (oxígeno disuelto), que es la zona donde se desarrollan los microorganismos, los cuales utilizan el oxígeno para su respiración. Parte del oxígeno que es aportado hacia el humedal proviene del oxígeno atmosférico. El oxígeno producido por las plantas, así como el proveniente de la atmósfera no es suficiente para asegurar un ambiente aerobio (con oxígeno), por lo que se provoca una condición predominantemente anaerobia o anóxica (Vymazal, 2008). Los microorganismos efectúan la depuración del agua, consumiendo la materia orgánica y produciendo nutrientes para las plantas.

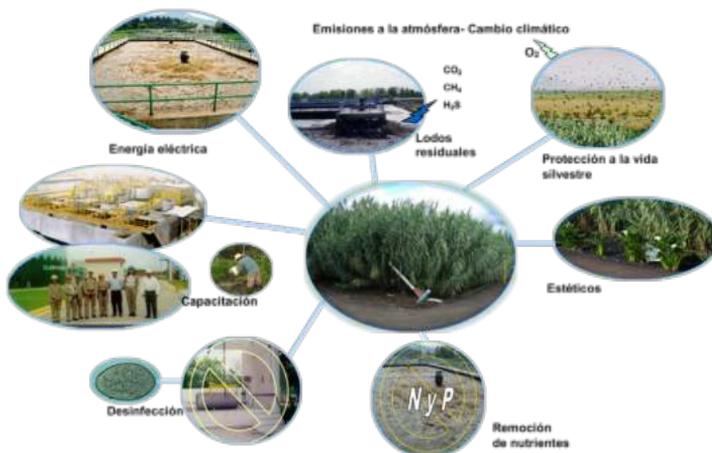
Los principales contaminantes presentes en las aguas residuales y que pueden ser reducidos o eliminados mediante los humedales de tratamiento son: carbono (materia orgánica), nitrógeno, fósforo, organismos patógenos (huevos de helmintos, bacterias, protozoarios, hongos, virus), metales pesados (cadmio, cobre, cromo, plomo, mercurio, selenio y zinc), así como materiales inertes (basuras) (Kadlec y Knight, 1996).

Comparativa tecnológica

En la Figura 7 se muestra una breve comparativa tecnológica entre los humedales de tratamiento y los sistemas electromecánicos. Los sistemas electromecánicos

requieren energía eléctrica para su funcionamiento, generan lodos residuales, generan ruido con los motores, producen aerosoles que son un riesgo para la salud, requieren de un sistema de desinfección (usualmente cloración), no eliminan la totalidad de los huevecillos de parásitos (lombrices, amibas, etc.), no remueven nutrientes (nitrógeno y fósforo), si no son diseñados para este fin, su operación es de alto costo, sus operadores requieren alta capacitación (y mayores sueldos).

Figura 7. Breve comparativa tecnológica entre humedales y sistemas electromecánicos



Los humedales de tratamiento no requieren energía eléctrica para su funcionamiento (utilizan la energía solar, no generan ruido, aerosoles ni malos olores (cuando son dimensionados y operados correctamente), combinados con lagunas de maduración no necesitan desinfección adicional, remueven nutrientes y la totalidad de huevecillos de parásitos, son estéticos, generan áreas de protección a la vida silvestre, son sencillos de operar y presentan menores costos unitarios de tratamiento.

Operación y mantenimiento

Las actividades rutinarias de operación y mantenimiento consisten en: limpieza de rejillas; desarenador y tuberías; poda y disposición de la vegetación una o dos veces por año (dentro de los estanques y la existente en los bordos y caminos de acceso); limpieza del cárcamo de bombeo (en caso de haberlo); destrucción de madrigueras y hormigueros, y registro en bitácora de las actividades realizadas. Las herramientas más comunes son tijeras de podar, machete, rastrillos para jardín, carretillas, pala y botes para transporte de residuos.

En la Figura 8 se muestran las labores rutinarias de operación y mantenimiento: a) limpieza de rejillas, b) limpieza del desarenador c) eliminación de hormigueros, d) poda de la vegetación, e) control de caudales, f) disposición de residuos.

Figura 8. Actividades de rutina de operación y mantenimiento.



Seguridad e higiene

Es de suma importancia que los operadores cuenten con equipos de seguridad e higiene para su protección como son: guantes, overoles, botas, gorras, cubrebocas, lentes de protección, jabón, y un botiquín de primeros auxilios.

Aplicaciones

Los humedales de tratamiento encuentran aplicación en el tratamiento de aguas domésticas, municipales, industriales (degradación de hidrocarburos aromáticos del petróleo, hidrocarburos aromáticos y alifáticos), tratamiento de aguas ácidas, remoción de hierro y manganeso y de otros metales pesados; tratamiento de las aguas provenientes de las actividades agrícolas, drenaje de minas, remoción de nitrógeno y fósforo como pulimento de efluentes de sistemas electromecánicos y para el tratamiento de lodos residuales (Sherwood *et al.* (1995). También pueden utilizarse para el tratamiento de efluentes de industrias de los siguientes tipos: textiles, procesadoras de alimentos, destilerías, fábricas de pulpa y papel y granjas de ganado estabulado (Kadlec y Wallace 2009).

Eficiencias de remoción de contaminantes

La eficiencia de reducción de contaminantes mediante el uso de humedales de tratamiento es muy variable, en función de su tamaño, tiempo de operación, eficacia de operación, calidad del agua a tratar, clima, objetivo del tratamiento, especie vegetal utilizada, tipo de medio filtrante, etc. Rivas y Soto (2005) citan los siguientes resultados, obtenidos en un humedal de tratamiento para 1,000 habitantes, en un clima templado y con un año de operación: demanda bioquímica de oxígeno 97%, nitrógeno total 87%, fósforo total 65%, coliformes fecales 99.99%, sólidos suspendidos totales 90% y huevos de parásitos 100%.

Reúso del agua tratada

El agua tratada con humedales de tratamiento, bien diseñados, construidos y operados, particularmente cuando son combinados con lagunas de maduración, cumple con la NOM- 001-SEMARNAT-1996 para riego de cultivos (frutales, hortalizas, maíz, etc.), para el vertido a ríos, lagos, presas y aguas costeras (protección de la vida acuática) y con la NOMM-003- SEMARNAT 1997, para riego de áreas verdes con contacto directo, indirecto u ocasional (Rivas, 2011).

En la Figura 9 se muestran actividades de reúso del agua tratada en riego de cultivos; en la Figura 10, un ejemplo de reúso en llenado de lago recreativo y en la Figura 11, el riego por aspersión en el cultivo y desarrollo de pinos (para venta en Navidad).

Figura 9. Reúso del agua tratada en riego de cultivos

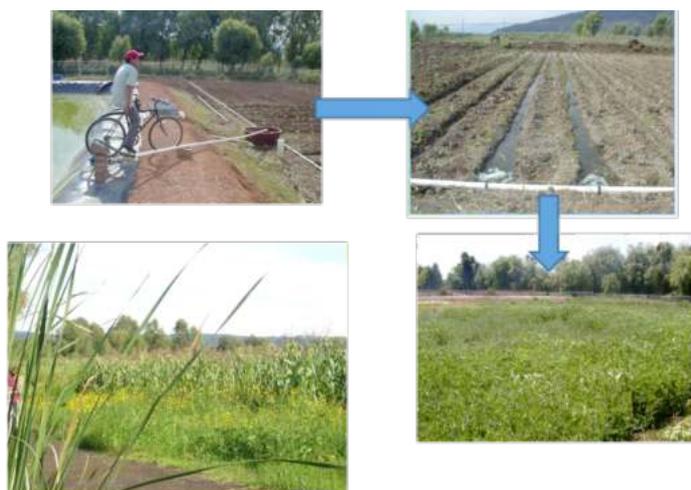


Figura 10. Reúso del agua tratada en llenado de lago recreativo



Figura 11. Riego de arbolitos para venta en Navidad



Conclusiones

Los humedales de tratamiento constituyen una alternativa tecnológica que permite obtener, a un bajo costo, un agua tratada que cumple los requerimientos normativos para diferentes tipos de reúso o para el vertido en aguas de ríos, lagos y al océano. Son sistemas estéticos, amigables con el ambiente, que cuando son bien diseñados y operados no generan malos olores, no producen ruido, no necesitan energía eléctrica para su funcionamiento, son sencillos de operar y pueden utilizarse desde nivel familiar hasta para ciudades grandes, en función de la disponibilidad de terreno.

Bibliografía

- Arias C.A., A. Cabello, H. Brix., N. H. Johansen. (2003). Removal of indicator bacteria from municipal wastewater in an experimental two-stage vertical flow constructed wetland system. *Water Science and Technology* 48 (5): 35-41.
- CONAGUA-IMTA-Fundación Gonzalo Río Arronte. (2007). Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca del Lago de Pátzcuaro. Libro Blanco. 2003-2007. Morelos, México.
- CONAGUA. (2018). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación de México.
- CONAGUA. (2020). <https://www.contralinea.com.mx/archivo-revista/2020/06/29/mexico-cementerio-de-plantas-de-tratamiento-de-aguas-819-inservibles/>
- Crites, R., C. Tchobanoglous. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill. EE.UU. 1084 p.
- EPA. (1988). *Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*. Cincinnati, OH. EE.UU.
- EPA. (2000). *Manual. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. Cincinnati, OH. EE.UU.
- Fernández, G.J., B.E. De Miguel, M.J. De Miguel., F. DM. Curt. (2004). *Manual de Fitodepuración, filtros de macrófitas en flotación*. Editado dentro del Programa Life por el Ayuntamiento de Lorca, la Obra Social de Caja Madrid, la ETSIA de la UPM y la Fundación Global Nature.
- Hammer, D.A. (1989). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Municipal, Industrial and Agricultural*. Lewis Publishers. Michigan, EE.UU. 406 p.
- Kadlec, R.H. (1999). Chemical, physical and biological cycles in treatment wetlands. *Water Science and Technology* 40 (3): 37-44.
- Kadlec, R.H., S.D Wallace. ed. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Boca Ratón, FL, USA. 1016 p.

- Knox A.K., R.A. Dahlgren, K.W. Tate., E.R. Atwill. (2008). Efficacy of Natural Wetlands to Retain Nutrient, Sediment and Microbial Pollutants. *Journal of Environmental Quality* 37: 1837-1846.
- Rico, M. y H.A. Rivas. (1992). Sistemas de tratamiento de aguas usando lechos de hidrófitas. Informe final. CNA. IMTA. México.
- Rivas H. A. (1996). Remoción de coliformes fecales en una laguna facultativa mediante el manejo de peces (Tilapia). x Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Toluca, Estado de México, del 14 al 16 de febrero.
- Rivas, H.A. (1997). Lechos de plantas acuáticas (LPA) para el tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería Hidráulica en México* 3 (12): 74-77.
- Rivas H. A., Soto, S. (2005). Evaluación de la eficiencia de tratamiento del humedal de Cucuchucho, Mich. Informe final. IMTA.
- Rivas, H.A., R.F. Pozo., S.S.I. Soto. (2005). Instalación de humedal para el tratamiento de las aguas residuales de la localidad de Santa Fe de la Laguna, Quiroga, Mich. Informe final. SEMARNAT, IMTA, Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P. México.
- Rivas H. A., Pozo R. F. (2005). Instalación, operación y transferencia de un humedal experimental de 0.5 lps en Cucuchucho, Mich. (2ª Etapa). Informe final. IMTA.
- Rivas, A., Alonso, P., Figueroa N. (2007). Use of constructed wetlands to improve the water quality of a Mexican Lake. 2nd International Congress SMALLWAT07 on Wastewater Treatment in Small Communities. Del 11 al 15 de septiembre de 2007. Sevilla, España.
- Rivas A., Q.I. Barceló., G.E. Moeller. (2011). Pollutant removal in a multi-stage municipal wastewater treatment system comprised of constructed wetlands and a maturation pond, in a temperate climate. *Water Science and Technology* 64 (4): 980-987.
- Rolim Mendonca. (2000). Editorial McGraw-Hill / 978-958-41-0090-0
- Kadlec, R.H., R.L. Knight. 1996. *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers. Boca Ratón, FL, EE.UU. 896 p.
- Rodríguez, P. de A.C. (2003). Humedales construidos. Estado del arte. (II). *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 24 (3): 42-48.
- Rousseau, D.P.L., T.M. Hooijmans. (2009). Recent advances in modelling of natural treatment systems. Conferencia Agua 2009. Cali, Colombia.
- Sherwood, C.R., R.W. Crites., E.J. Middlebrooks. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. McGraw-Hill, Inc. EE.UU. 434 p.
- Vymazal, J. (2008). Constructed wetlands for wastewater treatment: a review. *Proceedings of Taal 2007. The 12th world lake conference*. Sengupta, M. M., Dalwani, R. Editors.

Capítulo 10

Biofiltración sobre cama orgánica (BFCO)

Marco Antonio Garzón-Zúñiga^{1*}

Introducción

En este capítulo se presenta una tecnología sustentable de tratamiento de aguas residuales desarrollada para el contexto socioeconómico de zonas rurales y periurbanas para México que puede ser aplicado en general para países en vías de desarrollo y desarrollados.

Las descargas de aguas residuales generan cada vez más problemas de contaminación de los cursos de agua superficial y, en ciertos lugares, también de los acuíferos utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable. La normatividad relativa a las descargas en el medio natural se hace cada vez más exigente. Actualmente varios sistemas de tratamiento de aguas residuales permiten realizar una descarga controlada de los desechos líquidos. Desafortunadamente, por razones económicas y climáticas, además de por su complejidad, la mayor parte de los sistemas tradicionales son difícilmente aplicables a la mayor parte del contexto mexicano, en particular para zonas rurales y periurbanas, en donde las aguas residuales se vierten al medio natural (Figura 1). Por lo cual, en todo México existe una necesidad general de sistemas de tratamiento de aguas residuales que sean fáciles de operar y mantener.

Muchas de las plantas que se construyen con tecnologías convencionales no tienen el personal adecuado (calificado) para operarlas y, además, tampoco cuentan con el presupuesto para su mantenimiento, por lo cual, con el paso del tiempo los sistemas fallan por ser mal operados y al requerirse reparaciones y no haber el dinero necesario, estos entran en un estado de abandono y dejan de funcionar (Figura 2). En otros casos, no se tiene ni siquiera el presupuesto para cubrir la energía eléctrica que se necesita para hacerlos funcionar desde el principio. Un ejemplo de este tipo, que se repite frecuentemente, es la falta de dinero para

¹Instituto Politécnico Nacional CIIDIR Durango.

*Autor de correspondencia, mgarzon@ipn.mx

operar los sistemas de aireación, en las plantas de lodos activados en pequeñas y medianas comunidades. Todo esto hace que en muchas zonas rurales y algunas urbanas del país las aguas residuales se viertan al medio natural: suelos, arroyos, ríos, etc. en detrimento del medio ambiente, de la salud de los pobladores y, en muchas ocasiones, contaminando el recurso hídrico.

Figura 1.- Ejemplo de descargas de aguas residuales al ambiente en zonas rurales y periurbanas: A) descarga a cielo abierto en Morelos; B) descarga de granja porcina a barranca en Puebla, C) descarga de agua residual doméstica a arroyo en San Luis Potosí D) descarga de agua residual en zona marginada de Zacatecas E) Vertido de aguas residuales de pequeño poblado a la calle en Durango

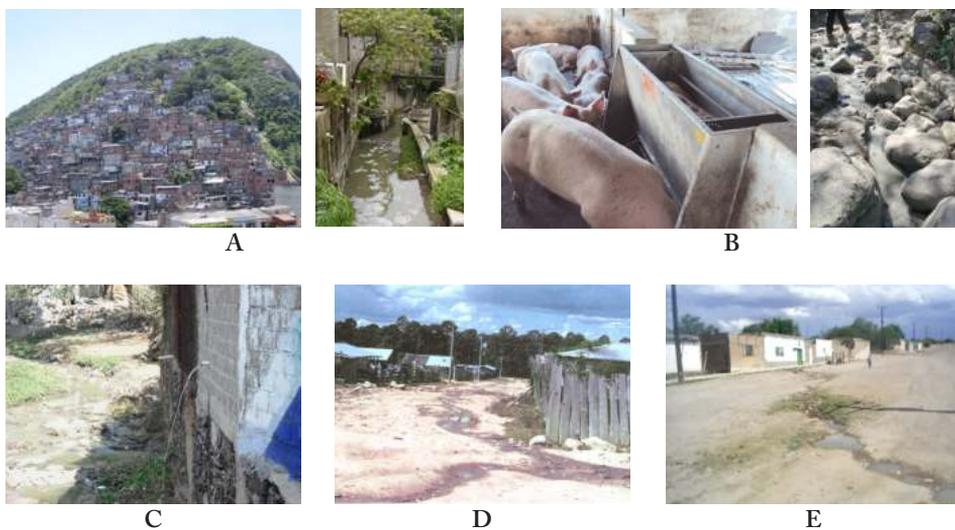


Figura 2. PTAR de la ciudad de Tepic fuera de operación y descarga de agua residual cruda al Río



Por otra parte, en vastas regiones de México la topografía del país hace difícil —y sobre todo costoso— construir sistemas de recolección y conducción de las aguas residuales para enviarlas a una planta de tratamiento. Por ello, también son necesarias alternativas para solucionar este grave problema. Para estos casos se recomienda el uso de PTAR descentralizadas, que por definición son aquellas que tratan pequeños volúmenes de agua residual, ya que no concentran el agua residual de varios puntos de generación en un solo punto (como, por ejemplo, en una ciudad), sino que el agua residual se trata en el lugar en donde se genera (como, por ejemplo, para un pequeño poblado, una colonia periurbana, un centro turístico, una escuela, etc.). En este sentido, la tecnología de biofiltración sobre cama orgánica (BFCO) se presenta como una opción viable en este contexto, ya que se trata de una tecnología no convencional de bajo costo, operación y mantenimiento. Con la gran ventaja de requerir de una mínima operación y poco mantenimiento no especializados. Además, la BFCO es un sistema que se recomienda para tratar pequeños volúmenes de agua. Estas características han sido probadas y demostradas en los sistemas puestos en operación a escala real en Canadá y Francia en los años 1990, y en México entre los años 2000 y 2010.

Esta tecnología, además de entregar agua con calidad segura para descargarla al medio ambiente, de acuerdo con las normas mexicanas e internacionales, también presenta dos aspectos muy importantes que son clave para que se pueda hacer una apropiación de la tecnología. Ellos son: 1) los sistemas de tratamiento se ponen en el lugar en donde se genera el agua residual y al ser fácil de operar y mantener estas actividades las realizan los usuarios mismos; 2) el agua residual tratada también cumple con la normativa mexicana de reúso, por lo que en muchas zonas con escasez de agua el efluente tratado puede ser utilizado incluso en algunas actividades productivas que ayudan a mejorar la situación económica, la salud de los habitantes y, por lo tanto, la calidad de vida en comunidades marginadas.

Descripción de la biofiltración sobre cama orgánica (BFCO)

Se trata de un sistema de filtración por percolación sobre una cama filtrante compuesta por un material de empaque o material filtrante natural (Figura 3), a diferencia de otros filtros que utilizan material de empaque sintético de importación (Garzón-Zúñiga *et al*, 2012).

Sobre el material filtrante orgánico se desarrolla una fina capa de microorganismos conocida como biopelícula (Figura 4).

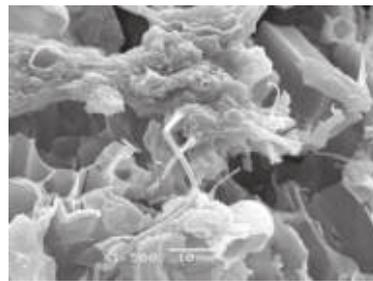
Figura 3. Materiales filtrantes orgánicos utilizados en biofiltros y ejemplo de alimentación en superficie



Figura 4. A) Astillas de madera utilizadas como material filtrante en biofiltro sobre las cuales crece la biopelícula; B) la biopelícula compuesta por diferentes grupos de microorganismos especializados en la degradación de diferentes contaminantes



A

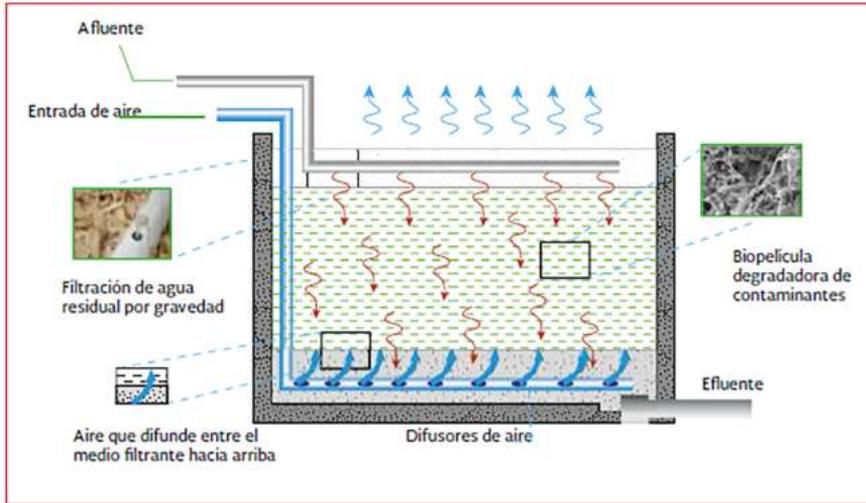


B

La acción conjunta de los microorganismos que conforman la biopelícula, junto con las propiedades fisicoquímicas del material de empaque natural, permite degradar los contaminantes simples y complejos. El agua residual se alimenta por la parte superior. Esta desciende por gravedad y a su paso por la cama filtrante los contaminantes son removidos por procesos físicos, biológicos y químicos (Figura 5).

Figura 5. Esquema de un sistema de biofiltración sobre cama orgánica.
Tomada de Garzón-Zúñiga *et al.* 2012

Ilustración 3.7 Proceso de biofiltración sobre materiales orgánicos. Tomada de Garzón *et al.*, 2005



Materiales filtrantes orgánicos y velocidad de filtración

En la BFCO el material filtrante está constituido principalmente por astillas de madera y fibras vegetales y no por productos sintéticos (plásticos). Los materiales orgánicos naturales usados en la biofiltración pueden ser obtenidos de forma local, a diferencia los materiales sintéticos que deben ser comprados con un proveedor especializado, y en muchas ocasiones importados. Lo anterior, dificulta su disponibilidad en muchas zonas y eleva su costo.

Otra característica importante de los sistemas de BFCO es que la velocidad de filtración es lenta, $\leq 2 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$. Esta baja velocidad de filtración permite establecer un tratamiento aerobio pasivo (sin inyección mecánica de aire). En la Tabla 1 se presentan ejemplos de materiales de filtración (Figura 6) utilizados, de forma exitosa, en la BFCO para tratar diferentes tipos de agua residual.

Tipo de agua residual que se puede tratar por biofiltración sobre cama orgánica

Inicialmente la BFCO se desarrolló para tratar agua residual municipal (Lens *et al.* 1994; Garzón *et al.* 2008). Sin embargo, posteriormente este sistema ha sido evaluado para tratar diversos tipos de agua residual: doméstica (casa habita-

ción), comercial (instituciones educativas), industrial (colorantes, petroquímica, alimentos) agroindustrial (granjas porcinas, rastros, producción de tequila y mezcal), agua residual de hospitales, entre otras (Tabla 1).

Tabla 1.- Ejemplos de diferentes materiales filtrantes aplicados en la tecnología de biofiltración sobre cama orgánica a distintos tipos de agua residual

Material orgánico	Tipo de agua residual tratada	Bibliografía
Turba	Doméstica	Corley et al., 2006
Fibras naturales y astillas de tabachin	Municipal	Garzón-Zúñiga et al., 2007
Mezcla (30% turba y 70% astillas de madera)	Porcina	Buelna et al., 2008
Fibra de Palma de dátil	Municipal	Riahi et al., 2009
Tabachin (<i>Caesalpinia pulcherrima</i>) y Jacaranda (<i>Jacaranda mimosifolia</i>)	Sanitaria-Comercial	Garzón-Zúñiga y Buelna, 2011
Fibra de agave (<i>Agave duranguensis</i>)	Municipal	Viguera-Cortés et al., 2013
Rice Straw Naranja (<i>Citrus X sinensis</i>) Fibra de palma de dátil	Municipal	Ghazy et al., 2016
Mezquite (<i>Prosopis</i>)	Municipal	Sosa Hernández et al., 2016
Ficus (<i>Ficus benjamina</i>)	Municipal	García Sánchez et al., 2019

Figura 6. Diferentes materiales orgánicos estudiados como material de empaque de los biofiltros



Para poder tratar tan diversos tipos de agua residual se requieren las siguientes acciones: 1) el afluente en cuestión debe ser acondicionado para hacerlo propicio a un tratamiento biológico, lo que incluye acciones como regular el pH, reducir la temperatura de algunos efluentes industriales y adicionar macro o micronutrientes; 2) en algunos casos se requiere hacer un pretratamiento para disminuir los sólidos y/o la carga orgánica; 3) el proceso de BFCO es diseñado tomando en cuenta la

carga de contaminantes orgánicos y el contenido de contaminantes específicos para determinar las condiciones adecuadas de operación; por ejemplo, tasa de aireación mecánica (si se requiere), velocidad de filtración (basada en pruebas de biodegradabilidad específicas para cada efluente), tasa de recirculación (si se requiere), etc. (Garzón-Zúñiga *et al.* 2007).

Tomando en cuenta estos aspectos, la BFCO ha permitido tratar aguas residuales agroindustriales como las de crecimiento (engorda) de animales de corral (Figura 7A) caracterizadas por grandes cantidades de materia orgánica, pero también ha permitido el tratamiento de agua residual industrial caracterizada por alta incidencia de compuestos químicos no naturales, como pueden ser la industria petroquímica (Figura 7B) o la de colorantes (Figura 7C).

Figura 7. Tipos de agua residual industrial tratada por biofiltración sobre cama orgánica. A) engorda de engorda de animales. B) industria petroquímica. C) industria de colorantes



A



B



C

En todos estos sistemas de biofiltración se han utilizado diferentes materiales de empaque naturales; por ejemplo, fibras como paja de arroz, fibra de palma de dátil, fibra de bagazo de agave, astillas de madera de diferentes especies, como *Caesalpinia pulcherrima*, *Ficus benjamina*, *Prosopis sp.*, etc.

Ventajas de la biofiltración sobre cama orgánica respecto a otras tecnologías

1. En una sola unidad (filtro) se asegura un tratamiento completo y eficiente del agua residual, que incluye un tratamiento primario con remoción de sólidos suspendidos (SS), un tratamiento secundario con remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO), un tratamiento terciario con remoción de nitrógeno (N) y fósforo (P) y desinfección con remoción de coliformes fecales (CF); permite eliminar concentraciones mayores al 90% de SS, DBO_5 , metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos; concentraciones del 80% de N y concentraciones mayores al 99% de CF y huevos de helminto (HH) (Buelna y Belanger 1990; Garzón-Zúñiga *et al.* 2008).
2. El que esta tecnología opere con una velocidad de filtración lenta la favorece para no producir lodos residuales de exceso. Lo anterior, puesto que se diseña para que la comunidad de microorganismos no se encuentre en fase exponencial de crecimiento, sino en una fase estacionaria en la que se equilibra el crecimiento con la muerte de los microorganismos (Garzón-Zúñiga *et al.* 2012). Este hecho contrasta con otras tecnologías como, por ejemplo, los lodos activados, en la cual toda la contaminación es transformada en lodos que requieren un tratamiento costoso (Figura 8).

Figura 8. Lodos biológicos generados en PTAR de lodos activados



3. Su construcción es sencilla, no requiere de equipos sofisticados de importación y puede realizarse por métodos constructivos convencionales sencillos (Figura 9) que están en función del volumen de agua a tratar, de la carga de contaminantes que contenga y de la calidad que se necesite del agua ya tratada. Sus costos de inversión son similares o inferiores a los costos de sistemas convencionales.

Figura 9. En la construcción de los sistemas de biofiltración sobre cama orgánica se pueden aplicar métodos sencillos, como el ferrocemento y tradicionales como el concreto



4. Su operación y mantenimiento son sencillos. Las principales acciones son retirar sólidos y basura del pretratamiento y supervisar el funcionamiento automatizado de la alimentación al proceso de biofiltración (Figura 10), lo que requiere poco tiempo (tres horas diarias de trabajo). Sus costos de operación y mantenimiento son hasta 90% inferiores a los sistemas convencionales de aireación mecánica.

Figura 10. Acciones de operación y mantenimiento de la tecnología de biofiltración sobre cama orgánica. A) Limpieza de pretratamiento. B) Supervisión del funcionamiento automatizado de la alimentación.



A

B

5. La superficie necesaria es 12 veces menor que la requerida por otros sistemas de tratamiento no convencionales, por ejemplo: fosa séptica + pozo de absorción o lagunas, y 5 veces menor que la de los humedales (Figura 11).
6. Es un sistema modular (Figura 12) que ofrece la ventaja de adaptarse al crecimiento de la población o de la industria. La construcción de los módulos de biofiltración es flexible y las dimensiones de estos se establecen en función de las características del agua a tratar, del caudal, de las características del terreno. El diseño modular asegura una operación fácil del sistema.

Figura 11. Diferencia de necesidad de área superficial entre sistema de lagunas y la biofiltración sobre cama orgánica



Figura 12. Módulos de biofiltración en dos plantas de tratamiento con materiales orgánicos



Desarrollo de la BFCO en el mundo y en México

Desarrollo en el mundo de la BFCO para aguas residuales

La BFCO es una tecnología que originalmente fue desarrollada y aplicada únicamente para el tratamiento de gases contaminados en los años 70 y 80. Sin embargo, esta tecnología evolucionó y empezó a ser utilizada para tratamiento de aguas residuales en los años 1990, principalmente en Bélgica y Canadá, reportándose altas eficiencias de remoción de contaminantes: $\geq 95\%$ de la DBO_5 ;

≥ 90 % de la DQO, 80 % del nitrógeno, 91 y 95% de los sólidos suspendidos totales (SST) y ≥ 99.99 % de las coliformes totales (CT) (Buelna y Belanger, 1990; Lens *et al.* 1994).

Primeros trabajos en México

En México, la BFCO, comenzó a ser estudiada en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en los años 2000, al realizarse una serie de trabajos, se evaluó la eficiencia de esta tecnología para tratar aguas residuales industriales de diferentes tipos: industria de colorantes, industria petroquímica e industria porcina (Figura 13).

Figura 13. Montaje experimental de columnas de biofiltración en el IMTA para evaluar diferentes materiales de empaque en el tratamiento de aguas residuales



Los resultados de estos trabajos demostraron excelentes eficiencias de remoción de contaminantes para el agua porcina (99% DBO₅, 96% de la DQO, 98% del NTK); para el agua de la industria de colorantes se removieron el 90% de la DQO y el 96% del colorante AO24 (Figura 14) (Garzón-Zúñiga, 2005); mientras que para el caso de la industria petroquímica se removieron exitosamente compuestos orgánicos volátiles con una eficiencia $>97\%$ de 1,2 DCE, Benceno y Tolueno, y se alcanzó una reducción de la toxicidad entre 57 y 100%, medida con tres diferentes organismos *Vibrio fisheri*, *Daphnia magna* y *Selenastrum capricornotum* (Garzón-Zúñiga *et al.* 2005).

Figura 14. Aspecto visual de la remoción del colorante AO24 por el proceso de biofiltración anaerobia / aerobia



Como resultado de estos trabajos se comprobó que la tecnología de BFCO es una alternativa potencial para el tratamiento de diversos efluentes industriales en México, ya que además de las altas eficiencias de depuración se trata de una tecnología económica comparada con los tratamientos convencionales.

Colaboración con Canadá

A través de un convenio de colaboración científica, firmado en 2005 entre el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el “Centro de Investigaciones Industriales de Quebec” (CRIQ, por sus siglas en francés), de Canadá, se realizó un proyecto de selección y evaluación de materiales orgánicos para ser utilizados en la BFCO. Otro objetivo de este proyecto fue demostrar la eficiencia de depuración de aguas residuales municipales de pequeñas poblaciones en sistemas de BFCO bajo el contexto socioeconómico y climático de México. Posteriormente, se incorporó el Instituto Politécnico Nacional, a través del CIIDIR-Durango, para la realización de nuevas investigaciones sobre nuevas aplicaciones de la BFCO en México (Figura 15).

Se hizo una preselección de materiales orgánicos de diferentes ecosistemas y se retuvieron 4 materiales para su evaluación: 1) fibra de coco (*Cocus nucifera*); 2) bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*); 3) tabachín (*Caesalpinia pulcherrima*); 4) jacaranda (*Jacaranda mimosifolia*). Mismos que fueron sometidos a una serie de pruebas en laboratorio para caracterizarlos y, en la segunda etapa del proyecto, estos materiales fueron utilizados para empacar 4 columnas de biofiltración que posteriormente fueron estudiadas en cuanto a su eficiencia para tratar aguas residuales domésticas.

Figura 15. Centro de investigaciones industriales de Quebec, Canada, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua e Instituto Politécnico Nacional. Instituciones encargadas del estudio y desarrollo tecnológico de la biofiltración sobre materiales orgánicos para tratamiento de aguas residuales



Los resultados demostraron que durante los primeros 15 a 30 días se presenta un lavado (lixiviado) de los materiales de empaque que arrastra los componentes de las maderas y fibras vegetales dando un efluente con altas concentraciones de DQO, DBO₅, turbiedad, nitrógeno y conductividad y valores bajos de pH debido al lavado de los ácidos fúlvicos. Después de este periodo de lavado de los materiales se observa una remoción efectiva en la mayoría de estos parámetros y, entre 30 y 60 días después del arranque, la remoción se estabiliza alcanzando sus máximas eficiencias. Los SST, las grasas y aceites (G y A) y los HH se removieron de forma eficiente desde el arranque de los sistemas y con respecto a los CT y CF, fueron reduciendo su concentración en el efluente progresivamente y después de 90 días de operación sus valores fueron de 1000 y menos de 1000 bacterias/100 ml respectivamente (Garzón-Zúñiga et al. 2008). En la Tabla 2 se presentan los valores promedio por contaminante del agua residual cruda, los límites de descarga correspondientes según la norma NOM-01-SEMARNAT-1996 y los intervalos de valores promedio después del tratamiento por biofiltración para los 4 materiales orgánicos tropicales y subtropicales probados.

El tratamiento por BFCO demostró ser muy eficiente con todos los medios de empaque orgánicos probados, ya que los efluentes presentaron una buena calidad respecto a todos los índices fisicoquímicos y bacteriológicos normados, lo que permite a los efluentes cumplir con los límites de descarga nacionales más exigentes que toman en cuenta la protección de la vida acuática. El único parámetro que no entra en esta categoría es el fósforo. El cual, sin embargo, sí cumple con la normativa para vertido en cuerpos de agua tipo A (uso en riego agrícola) y B (uso público urbano).

Tabla 2. Eficiencia de remoción de contaminantes en biofiltros empacados con materiales orgánicos de zonas semitropicales y templadas después de un año de evaluación

PARÁMETRO	Agua Residual Cruda	Límite de descarga según NOM-001-SEMARNAT-1996			Salida de BF empacados con 4 materiales filtrantes
		A Uso en riego agrícola	B Uso público urbano	C Protec. vida acuática	
Temperatura (°C)	20.7	N.A.	40	40	21.2 - 23.1
G y A (mg/L)	65	15	15	15	7.7 - 13.3
SST (mg/L)	200	150	75	40	2.0 - 5.3
DBOs (mg/L)	213	150	75	30	2 - 4
N-Total (mg/L)	35.6	40	40	15	1.7 - 15.1
F-Total (mg/L)	12.95	20	20	5	7.1 - 12.5
Coliform. Fecales (NMP/100mL)	5.5 E +07	1000	1000	1000	11 - 75
H. Helminto (Num. de H./lL)	8.9	1	1	1	0 - 0.4
DQO (mg/L)	555	-	-	-	88 - 94
Coliform. Totales (NMP/100mL)	1.1.37 E + 09	-	-	-	30 - 198

Un aspecto importante de los biofiltros es el hecho de que presentan una disminución considerable de los microorganismos indicadores de patógenos: huevos de helminto (HH), coliformes totales (CF) y coliformes fecales (CT).

Primer sistema de biofiltración sobre cama orgánica a escala real en México

En agosto de 2006 se firmó un convenio con una organización no gubernamental (ONG), llamada **Patronato de San Antón**, para financiar la **instalación del primer sistema de tratamiento por BFCO a escala real en México**, como resultado de un proyecto de investigación y desarrollo tecnológico mexicano. En marzo de 2007 fue inaugurada (Figura 16).

Se trata de un sistema con capacidad para tratar 20 m³/d, ubicado en una escuela secundaria federal en la ciudad de Cuernavaca. La escuela cuenta con 1,200 alumnos. Esta escuela anteriormente vertía sus aguas residuales a la barranca de Sacatierra, que a su vez desemboca en el Salto de San Antón.

En este sistema se llevaron a cabo los siguientes estudios:

1. Seguimiento de la eficiencia del sistema en la remoción de los contaminantes en condiciones y escala real.
2. Evaluación del sistema con aireación natural pasiva.

Figura 16. Inauguración en 2007 del primer sistema de tratamiento de aguas residuales de instituciones por la tecnología de biofiltración sobre cama orgánica en una escuela secundaria



Después de alcanzada la maduración y estabilización el sistema, se comenzó a aplicar un programa de investigación para optimizar la operación a escala real. En la primera etapa se probó operar sin aireación mecánica. Los resultados de eficiencia se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Eficiencias de remoción de contaminantes al operar el sistema de tratamiento de biofiltración sobre cama orgánica sin aireación mecánica en época de estiaje

Parámetro	Influyente promedio (mg/L)	Efluyente promedio (mg/L)	Remoción (%)
DBO₅	325	3.19	99.6
NTK	240	22.5	90.5%
N-NH₄⁺	209	22.2	92%
N-Total	240.5	157.5	37%
P-Total	11.70	10.40	11%
DQO	549	130	76.3%
G y A	19.85	< 9	> 56%
CF	5.50E+08	1.21E+04	99.92

Se puede observar que el sistema funciona de forma muy eficiente, removiendo el 99.6% de la DBO₅, siendo la concentración del efluente de 3.2 mg/L; el 80% de la DQO, siendo la concentración de efluente < 100mg/L y el 92% del nitró-

geno amoniacal (N-NH_4^+). Sin embargo, a pesar de remover de forma natural una alta cantidad de las CF (99.92%) la cantidad restante en el efluente aún estaba por encima del valor de la norma, por lo que se requirió incorporar un sistema sencillo de desinfección a base de pastillas de cloro.

En octubre de 2007 se solicitó la protección ante el Instituto Mexicano de la Protección Industrial (IMPI) de la tecnología de BFCO con los materiales orgánicos evaluados. En 2012 se obtuvo la patente de esta tecnología (Figura 17).

Figura 17. Obtención de patente de sistema de biofiltración sobre cama orgánica obtenida en 2012



Tratamiento de diferentes tipos de agua residual por BFCO en México

Agua Residual Municipal (Durango)

En cuanto al tratamiento de aguas residuales municipales por la tecnología de BFCO, existen varias investigaciones hechas en México, con diferentes materiales, que han evaluado la eficiencia de esta tecnología. Entre estos se encuentran los trabajos realizados por Viguera *et al.* (2013), que evaluaron el uso de fibra de agave de maguey, y el trabajo de Sosa Hernández *et al.* (2016), que evaluó la utilización de astillas de mezquite (Figura 18).

Figura 18. Planta de tratamiento de aguas residuales municipales con capacidad para 1.5 Lps o 1000 habitantes construida con material de empaque constituido por Prosopis, conocido en México como Mezquite



En la Tabla 4 se puede observar cómo el agua residual municipal (ARM) tratada por BFCO obtiene una calidad de salida que cumple con las normas de descarga de México y de USA para reuso de agua, que marcan como límite máximo permisible 30 mg/L para DBO_5 , 30mg/L SST y ≤ 1000 CF. En el caso de la fibra de agave no se alcanza el límite para las CF, pero es posible si se adiciona un dispositivo sencillo de desinfección al final del sistema.

Tabla 4. Eficiencia de remoción de contaminantes de agua residual municipal por el proceso de biofiltración sobre cama orgánica

Parámetro mg/L	Agua residual cruda promedio \pm D S (mg/L)	Después de Biofiltración promedio \pm D S (mg/L)		Eficiencia promedio de promedio \pm D S (%)	
		Agave	Mezquite	Agave	Mezquite
DBO_5	269 ± 42	≤ 30	24	$\leq 89\%$	92%
DQO	680 ± 32	128 ± 10	158	80%	78%
SST	200 ± 70	16 ± 3.2	10	92%	95
C.F	$7.5 \pm 1.8 E 06$	$7.5 E 03$	130	99%	99.9%
H.H.	$8.6 \pm 2-$	≤ 1		(3 U log) 98%	(4 U log) -

Agua residual de instituciones y centros educativos (Morelos)

El agua residual en instituciones y centros educativos tiene una composición similar al agua residual residencial, pero con la particularidad de que la mayor parte del agua se genera en los servicios sanitarios, lo que hace que su conte-

nido en parámetros como la DQO, la DBO₅ y las GyA sea menor al del agua residencial. Sin embargo, la concentración de los SST es superior (Figura 19) y el nitrógeno es entre 200 y 300% superior a la concentración de las aguas residuales municipales (Tabla 5). No obstante, el sistema de BFCO permite tratar dichas concentraciones de sólidos, de nitrógeno y demás contaminantes, obteniendo eficiencias de remoción del 97% del NTK. En la Figura 20 se observa el cambio de la calidad del agua en las diferentes etapas de la PTAR de BFCO de la escuela secundaria.

Figura 19. Escuela secundaria y agua residual generada en los baños



Figura 20. Cambio visual del agua en el tren de tratamiento de una escuela secundaria: 1) agua cruda; 2) salida de tratamiento preliminar; 3) tanque de homogenización que alimenta al biofiltro; 4) salida de biofiltro y desinfección, 5) tanque de almacenamiento para riego 6) acercamiento en cubeta del aspecto final del efluente



En la Tabla 5 se presenta la eficiencia de remoción de los contaminantes del agua residual de un sistema instalado en una escuela secundaria con capacidad para 1300 alumnos después de 6 años de funcionamiento. Se puede observar que el nitrógeno y los demás parámetros presentan altas eficiencias de remoción:

de la DBO₅ se elimina 96%, los SST 92%, la DQO 91%, las G y A 89%, los HH 100% y las CF se remueven 6 unidades logarítmicas (U log). Estas altas eficiencias permiten obtener efluente con una calidad que cumple con las normas mexicanas para reúso (NOM-001 SEMARNAT-1997) y para descarga en cuerpos de agua (NOM-003-SEMARNAT-1996) (Tabla 6).

Tabla 5. Eficiencia de remoción de contaminantes de agua residual de institutos o escuelas por el proceso de biofiltración sobre cama orgánica

Parámetro	Agua residual cruda (mg/L)	Después de Fosa Séptica (mg/L)	Después de Biofiltración (mg/L)	Después de desinfección (mg/L)	Eficiencia promedio (%)
DBO ₅	109 ± 62	61 ± 34	8 ± 9	4 ± 3	96%
SST	163 ± 83	78 ± 38	9 ± 10	12 ± 5	92%
NTK	85 ± 51	61 ± 22	1 ± 0.1	2 ± 0.1	97%
G y A	18 ± 7	10 ± 4	6 ± 4	2 ± 2	89%
CF (log CF/ 100 mL)	8.7 E 07	4.9 E 05	3.1 E 03	2.0 E 01	9.999 / 6 U log
HH (HH/SL)	5.5 ± 10	0.4 ± 0.8	0 ± 0	0 ± 0	100%
DQO	284 ± 95	145 ± 50	33 ± 15	24 ± 4	91%

Tabla 6. Comparación entre la concentración de contaminantes en el efluente del BFCO y los límites establecidos para aguas residuales tratadas por las normas mexicanas para reúso y descarga a cuerpos de agua nacionales

Parámetro	Nom-003 Límite para reúso Contacto indirecto	Nom 003 Límite para reúso Contacto directo	Nom 001 Límite para Protección a vida acuática	Efluente Biofiltro BFCO Cuernavaca
DBO ₅ (mg/L)	30	20	30	4 ± 3
SST (mg/L)	30	20	40	12 ± 5
NT (mg/L)	-	-	15	2 ± 0.1
G y A (mg/L)	15	15	15	2 ± 2
CF (log CF/ 100 mL)	1000	240	1000	2.0 E 01
HH (HH/L)	≤ 5	≤ 1	≤ 1	0 ± 0

Los efluentes con la calidad obtenida en el sistema de tratamiento de la escuela se pueden reutilizar de manera segura para tres actividades principales: riego de cultivos no alimentarios, llenado embalses en parques y jardines y actividades de construcción. Además, al agregar un sistema de desinfección adicional —por ejemplo, con cloro— para obtener una mejor desinfección (0.0 – 200 FC / 100

mL), entonces el agua puede reusarse de manera segura en actividades urbanas (incluido el riego de jardines sin restricciones, lavado de vehículos, descarga de inodoros y como agua para protección contra incendios) y riego de cultivos y llenado de embalses recreativos (Figura 21).

Figura 21. Sistema de tratamiento de biofiltración sobre cama orgánica, instalado en centro educativo que cumple con la normatividad mexicana de reuso y se utiliza en riego de áreas verde.

1) Pretratamiento enterrado. 2) Biofiltro sobre cama orgánica. 3) Efluente reusado



Agua Residual Industrial

Industria de Granjas Porcinas

Dentro de los efluentes industrializados, el más estudiado para su tratamiento por el proceso de biofiltración sobre cama orgánica, tanto en Canadá como en México, son los efluentes de la industria porcina (Figura 22). En Canadá se trabajaron los efluentes porcinos y se aplicaron sistemas a escala real en las décadas de los 90 y 2000. En México, el proceso aplicado en Canadá fue adaptado al contexto socioeconómico de esta industria en México. Estos trabajos fueron realizados en la década de los 2000 y 2010 y aplicados bajo condiciones reales, obteniendo resultados de eficiencia de remoción de contaminantes muy buenos. En la Tabla 7 se presentan los resultados del uso de un tren de tratamiento que combina un pretratamiento, un proceso biológico anaerobio y un sistema de biofiltración sobre cama orgánica (Escalante Estrada *et al.* 2019). La eficiencia de remoción de la materia orgánica, los sólidos y los patógenos es, en todos los casos, superior al 90%. En este tren de tratamiento (Figura 23) se han probado diferentes sistemas anaerobios (reactores Ralfa, biodigestores de sólidos y líquidos y filtros anaerobios) combinados con el proceso de BFCO, obteniendo en todos los casos resultados con alta eficiencia de remoción de contaminantes.

Figura 22. La industria porcina se encuentra muy extendida en México en granjas tecnificadas y de traspatio. Ejemplo de procesos: 1) corral de engorda de animales; 2) fosa de almacenamiento y sedimentación de agua residual; 3) laguna de estabilización de agua residual



Tabla 7. Eficiencia de remoción de contaminantes del efluente de la industria porcina al ser tratado en un sistema de biofiltración sobre cama orgánica

Parámetro mg/L	Agua residual cruda mg/L	Después de tratamiento anaerobio	Después de Biofiltración sobre cama orgánica aerobia	Eficiencia promedio de remoción Sedimentación (%)
DQO	10,288 ± 4,511	3,074 ± 1015	746 ± 497	92.7% ± 5%
DBO ₅	3,200 ± 700	1,236 ± 285	130 ± 128	95.9%
SST	1,855 ± 1,068	374 ± 186	123 ± 75	94% ± 4%
N-NH ₄ ⁺	1,373 ± 415	753 ± 265	182 ± 125	87% ± 7%
C.F.	8.35 E 07		85	99.9999 % 7 U log
pH	7.7 ± 0.7	8.2	6.1	

Agua residual industrial de rastros

Uno de los efluentes industriales que se encuentra en todas las ciudades y que genera graves problemas de contaminación y salud es el de los rastros, en los que se sacrifica a diferentes tipos de animales para consumo humano, principalmente reses, cerdos y aves. Estos efluentes tienen altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes proveniente de las heces fecales y orina de los animales sacrificados, así como de la sangre que llega al efluente. También tienen una elevada concentración de sólidos que deben ser removidos antes del tratamiento biológico. En la Tabla 8 se presentan los datos de eficiencia de remoción de un sistema constituido por un tratamiento anaerobio, seguido de un proceso de BFCO (Figura 24). Se aprecia que se alcanzan altas eficiencia de remoción: 96% de la DQO, 98% de

la DBO5; 92% del nitrógeno amoniacal y 99.9998% de las CF, equivalente a 5 unidades logarítmicas (Garzón-Zúñiga y Bahena Castro, 2016).

Figura 23. Línea de tratamiento de agua porcina a escala real. 1) Agua residual. 2) Laguna de sedimentación. 3) Biodigestor de sólidos y líquidos. 4) Salida de biodigestor. 5) Biofiltro sobre cama orgánica. (6) Salida del biofiltro (cubeta con agua traslúcida y coloración amarilla)

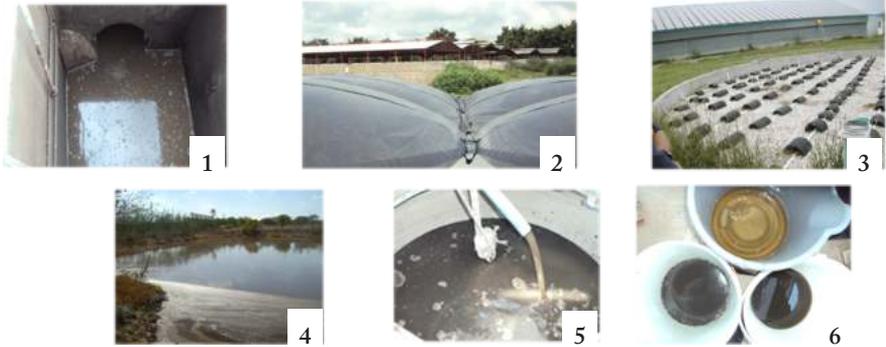


Tabla 8. Eficiencia de remoción de contaminantes del agua residual de rastro tratada por biofiltración sobre cama orgánica

Parámetro mg/L	Agua residual cruda. Después de Pretratamiento (mg/L)	Después de un tratamiento anaerobio RAFA (mg/L)	Después de un sistema de Biofiltración sobre cama orgánica (mg/L)	Eficiencia promedio de remoción (%)
DQO	5,727 ± 3,220	451 ± 108	180 ± 67	96.8%
DBO ₅	4,295	315 ± 38	45 ± 12	98.9%
CT	1.5 E 07	4.6 E 06	300	99.9998 / 5Ulog
N-NH ₄ ⁺	202	114	16	92.1%
pH	7.5	7.5	7.1	

Figura 24. A) Lavado de áreas en rastro. B) Agua residual generada en rastros. C) Sistema de biofiltración para tratamiento de agua de rastro



Conclusiones y perspectivas

La biofiltración sobre cama orgánica (BFCO) ha demostrado ser una opción sustentable para el tratamiento descentralizado de aguas residuales que permite realizar un reúso del agua tratada de forma segura, ya que la calidad del efluente cumple con las normas mexicanas e internacionales para reúso.

La tecnología es fácil de operar, por lo que los mismos usuarios pueden hacerlo y su costo de operación es mucho menor al de los sistemas convencionales. Este, puede representar un ahorro de hasta un 80 a 90%, en ciertos casos en los que no se requiere hacer una aireación mecánica.

La BFCO ha sido aplicada a muy diferentes tipos de agua residual, como doméstica, comercial, de escuela, municipal, rastro, de granja porcina, entre otras, obteniendo en todos los casos alta eficiencia de remoción de contaminantes y cumplimiento con las normas de descarga y, en todos los casos, pudiendo ser operadas por los usuarios.

Se recomienda que cada pequeña industria y grupo que genere agua residual se encargue de su tratamiento y gestión, ya que esto mejora la condición de salud de los habitantes, protege el medio ambiente y las fuentes de abastecimiento y, además, el agua tratada puede ser un insumo importante en actividades económicas en zonas de escasez de agua como, por ejemplo, el cultivo de huertos.

En México, en los últimos 20 años varias instituciones educativas han trabajado en el desarrollo de esta tecnología, como son el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, la Universidad Nacional Autónoma de México, el Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-Durango), el Instituto Tecnológico de Durango, la Universidad de Guanajuato, la Universidad de Campeche. Sin embargo, para continuar favoreciendo la aplicación de esta tecnología en diferentes zonas con características climáticas tan diversas y a diferentes tipos de agua residual, se requiere continuar realizando estudios; por ejemplo, de identificación y evaluación de materiales filtrantes naturales de las diferentes zonas, ya que, como ha sido presentado, una ventaja de esta tecnología es la de utilizar materiales de la zona donde se instala el biofiltro. También se requiere intensificar los estudios de apropiación de la tecnología en las comunidades, que permitan una operación natural y correcta de los usuarios.

Bibliografía

Buelna, G. & Bélanger, G. (1990). Biofiltration à base de tourbe pour le traitement des eaux usées des petites municipalités (Peatbased biofiltration for small municipalities' wastewater treatment). *Sci. Tech. Eau*. 23, 259–264.

- Buelna, G., Dubé, R., & Turgeon, N. (2008). Pigmanure treatment by organic bed biofiltration. *Desalination*, 231, 297–304.
- Corley, M., Rodgers, M., Mulqueen, J. & Clifford, E. (2006). The performance of fibrous peat biofilters in treating domestic strength wastewater. *J. Environ. Sci. Health Part A: Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* 41, 811–824.
- DOF. Diario Oficial de la Federación. 6 de enero de (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- DOF. Diario Oficial de la Federación (1998). Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que son reusadas en servicios para el público. DOF 21/09/1988, México D.F.
- Escalante-Estrada V. E. ; M. A. Garzón-Zúñiga; S. Valle-Cervantes & J. B. Páez-Lerma. (2019). Swine Wastewater Treatment for Small Farms by a New Anaerobic-Aerobic Biofiltration Technology. *Water Air Soil Pollut* (2019) 230:145. ISSN: 0049-6979 (impreso) 1573-2932 (en línea): <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4200-3>
- García Sánchez L., Gutiérrez-Macías T. y Estrada-Arriaga E.B. (2019). Assessment of a *Ficus benjamina* woodchip-based aerated biofilter used for the removal of metformin and ciprofloxacin during domestic wastewater treatment. *J Chem Technol Biotechnol.* 94: 1870–1879.
- Garzón-Zúñiga M. A. (2005). Biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de agua residual industrial. *Ingeniería Sanitaria y Ambiental.* (1): 76-82. Argentina. ISSN: 0328-2937.
- Garzón Zúñiga M. A. y Moeller Chávez G. (2005). Biofiltración sobre materiales orgánicos de regiones tropicales y subtropicales. *Desarrollo IMTA-CRIQ* (1ª etapa). Informe final del proyecto IMTA-TC0512.4 (1ª Etapa). p. 86.
- Garzón-Zúñiga, M.A., Lessard, P. Aubry G. & Buelna G. (2007). Aeration effect on the efficiency of swine manure treatment in a trickling filter packed with organic materials. *Wat. Sci. Tech.* 55 (10): 135 –143. ISSN: 0273-1223 (impreso) 1996-9732 (en línea).
- Garzón-Zúñiga, M.A., Tomassini-Ortiz- A.C., Moeller-Chavez G., Hornelas-Uribe Y., Buelna G., Mijaylova Nacheva P. (2008). Enhanced pathogen removal in one-site biofiltration systems over organic filtration materials. *Water Practice & Technology.* 3 (2): 1-9. doi:10.2166/wpt.2008.05
- Garzón-Zúñiga M.A. & Buelna G. (2011). Treatment of wastewater from a school in a decentralized filtration system by percolation over organic pac-

- king media *Water Science & Technology*. 64 (5): 1169-1177 doi:10.2166/wst.2011.425
- Garzón-Zúñiga, M. A., Buelna, Gerardo y Moeller-Chávez, Gabriela E. (2012). La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e industrias. *Tecnología y Ciencias del Agua*. III (3): 153 -161. Julio-septiembre de 2012.
- Garzón-Zúñiga, M.A. y Baena Castro, E. (2016). Tratamiento por biofiltración sobre material orgánico del efluente de un digester anaerobio que trata agua residual agroindustrial. Memorias del 35 Congreso de Interamericano de Ingeniería Sanitaria (AIDIS). Cartagena, Colombia 21 a 24 de agosto. Págs. 1-5.
- Ghazy M R., Basiouny M. A. and Badawy M. H. (2016). Performance of agricultural wastes as a biofilter media for low-cost wastewater treatment technology. *Advances in Research*. 7 (6) 1-13 Artículo núm. AIR27925. ISSN: 2348-0394.
- Lens, P.N., Vochten P.M., Speleers L. y Verstraete W.H (1994). Direct treatment of domestic wastewater by percolation over peat, bark and woodchips. *Water Res.*, 28, 17-26.
- Riahi, K., Mammou, A. & Thayer, B. (2009). Date-palm fibers media filters as a potential technology for tertiary domestic wastewater treatment. *J. Hazard. Mater.* 161 (2-3), 608-613.
- Sosa-Hernández D.B., Viguera-Cortés J. M. y Garzón-Zúñiga, M. A. (2016). Mesquite woodchips (*Prosopis*) as filter media in a biofilters system for municipal wastewater treatment. *Wat. Sci. Tech.* 73 (6): 1454-1462. DOI: 10.2166/wst.2015.595.
- Viguera Cortés, J. M., Viallanueva-Fierro, I., Garzón-Zúñiga, M.A., Navarro-Chaidez J.J., Hernández-Rodríguez, C. y Chairez-Hernández, I. (2013). Performance of biofilters packed with agave fiber in separation plates of municipal wastewater treatment. *Wat. Sci. Tech.* 68 (3): 599-607. ISSN: 0273-1223.

Capítulo 11

Tecnologías alternativas para el tratamiento del agua en centros urbanos

Zenaida Carolina Leyva Inzunza^{1*}

Herlys Viltres Cobas¹

Yeisy Lopez Conde¹

Alejandro Rodriguez Rodriguez¹

1. Generalidades

El tratamiento del agua es fundamental tanto para su potabilización como para su depuración. En este sentido, se han desarrollado y optimizado diferentes tecnologías basadas en técnicas de filtración, flotación, coagulación-floculación, membranas, intercambio iónico, adsorción, lodos activos, técnicas de oxidación, entre muchas otras (Gupta, 2013). Para la purificación de agua, ésta pasa por varias etapas de tratamiento, como filtración y desinfección, para la eliminación de microorganismos, contaminantes químicos artificiales, metales pesados, compuestos orgánicos, etc. En el caso del tratamiento de aguas residuales, este consiste en una serie de procesos físico-químicos y biológicos, que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua efluente de uso doméstico e industrial. La mayoría de las plantas para el tratamiento de aguas residuales se basan en procesos biológicos, como lo son los lodos activados, que son usados debido a su eficacia y costo relativamente bajo en comparación con otras tecnologías. El principal problema que presenta el tratamiento biológico es que únicamente se eliminan aquellos compuestos biodegradables. De esta forma, los compuestos no biodegradables, que generalmente son los compuestos con efectos más nocivos, permanecen en el agua y se vierten al medio, acumulándose en él. Otras técnicas, como la adsorción y las tecnologías de membranas, sí son capaces de atrapar gran cantidad de compuestos. Sin embargo, estos procesos

¹Instituto Politecnico Nacional, CICATA-Legaria, Laboratorio Nacional De Ciencia, Tecnologia y Gestion Integrada del Agua, Legaria 694, Irrigacion, 11500, Miguel Hidalgo, CDMX, Mexico

*Autora principal, carolina.leyva.inz@gmail.com

únicamente concentran a los contaminantes, ya que no los eliminan, además de ser tecnologías con costos de funcionamiento relativamente altos. En este sentido, debido a la alta concentración de sustancias no biodegradables en las aguas residuales, se requiere de una mayor inversión para que las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas sean aptas para enfrentar los difíciles desafíos planteados por los impactos del cambio climático, los cambios en la población y en especial a los contaminantes emergentes (COEs) (Richardson & Ternes, 2014).

2. Tecnología apropiada

El concepto de la tecnología apropiada en los sistemas de tratamiento de agua abarca dimensiones técnicas, institucionales, sociales y económicas. Desde un punto de vista técnico e institucional, la selección de tecnologías no apropiadas ha sido identificada como una de las principales causas de fallas en el sistema. Por ejemplo, el ambiente de las aguas residuales es hostil para el equipo electrónico, eléctrico y mecánico; su mantenimiento es un proceso sin fin, y requiere de apoyo (refacciones, laboratorios, técnicos capacitados, asistencia técnica especializada, y presupuestos adecuados). Aún en los países desarrollados, son los sistemas más sencillos, elegidos y diseñados con vista al mantenimiento, los que brindan un servicio más confiable. En los países en desarrollo, el mantenimiento debe ser la primera consideración al elegir tecnologías para las plantas de tratamiento. Para la elección se debe tener en cuenta el costo-beneficio, la infraestructura, y el aporte tecnológico (Murillo, 2016).

En general, deben ser económicamente factibles y dependen de la población a la que van a atender, así como el tipo de agua y el contaminante que se desee separar o eliminar del agua. La primera gran diferencia entre tecnologías está en función del estado de los contaminantes —si están suspendidos o disueltos—. El primer caso está en función del tamaño de partícula, por lo que las tecnologías aplicables podrían ser un tamizado, filtración, sedimentación o flotación, como tecnologías básicas; y como tecnologías más complejas serían la evaporación y cristalización, la electrodiálisis, el intercambio iónico, la ósmosis inversa, la oxidación-reducción o la precipitación química, entre otras. En el segundo caso, las tecnologías para el tratamiento variarán dependiendo de su naturaleza (orgánicos e inorgánicos). Si los sólidos disueltos son de naturaleza orgánica, se tiene que hacer la distinción si son biodegradables o recalcitrantes. Para los biodegradables, la técnica idónea sería el tratamiento biológico; en cambio, para los recalcitrantes, la más apropiada es la adsorción o una oxidación química. Por último, para eliminar microorganismos patógenos, se debe aplicar una técnica de desinfección como: cloración, ozonización, lámparas ultravioletas, etc. Se debe

aclarar que la selección de la técnica de tratamiento depende básicamente de tres factores, que son: (1) las características del vertido, (2) los requerimientos de calidad de agua y (3) los costos y la viabilidad técnica (Morató *et al.* 2009).

3. Tecnologías alternativas para el tratamiento de agua

3.1. Tecnología por membranas

La tecnología de membrana, aplicada al tratamiento de aguas, abarca un amplio espectro de procesos que van desde la microfiltración hasta la ósmosis inversa. Cada uno de estos tratamientos se selecciona según el producto y aplicación requeridos. La eficacia del funcionamiento de las membranas como elemento separador de contaminantes se ve afectada por el ensuciamiento de las mismas. La acumulación o deposición de contaminantes en su superficie favorece la formación de diferentes estructuras, que van desde una capa de gel de naturaleza biológica (bioensuciamiento) hasta la aparición de una torta que puede estar formada por constituyentes orgánicos y/o inorgánicos (Ayoob *et al.* 2008). En todos los casos, la rentabilidad en el funcionamiento de las membranas se ve afectada tanto por pérdidas en el flujo (producción) como en la capacidad de retención (calidad) del agua que se produce. El hecho de necesitar cada vez mayores flujos de permeado, producidos a menores presiones de operación, ha llevado a un constante avance en el diseño y fabricación de las membranas. Las operaciones de separación mediante membrana son ampliamente utilizadas y su uso es superior a los métodos convencionales por la capacidad de producir separaciones de forma muy eficiente a temperatura ambiente y por la relación costo/eficiencia. Una membrana separa los sólidos de acuerdo a su tamaño y selecciona ciertos iones atrayéndolos hacia sus zonas polares. En cuanto a las tecnologías de membranas, éstas se clasifican de acuerdo a la fuerza impulsora, de acuerdo a la diferencia de presión transmembrana (tamaño de poro) y a la diferencia de potencial eléctrico transmembrana (electrodialisis). Según el tamaño del poro se clasifican en microfiltración (MF), 1-0.1 μm ; ultrafiltración (UF), 0.1-0.01 μm ; nanofiltración (NF), 0.01-0.001 μm , así como en membranas selectivas semipermeables (ósmosis inversa (OI), tamaño de poro $< 0.001 \mu\text{m}$) (Figura 1a). Existen dos tipos de filtración con membrana: la filtración frontal y la filtración tangencial (*cross-flow filtration*). La filtración tangencial evita la acumulación de materia sobre la superficie del filtro (Solís *et al.* 2017) y se utiliza en microfiltración o en ultrafiltración, debido a la naturaleza de las especies que separan, y también a la estructura de la membrana; empezando la primera con la separación de partículas microscópicas o de especies biológicas —tales como las bacterias—

y la segunda para especies o fragmentos de materia más pequeña, como coloides, macromoléculas o virus. Las moléculas de masa molecular inferior a 1000 UMA se separan por nanofiltración, técnica que también permite separar iones multivalentes (con más de una valencia, como lo es el cobre) de iones monovalentes (como el cloro). La ósmosis inversa es la última técnica que permite detener casi la totalidad de las especies contenidas en un líquido, se utiliza principalmente en un medio acuoso para obtener agua ultra pura (Nunes-Pereira *et al.* 2018).

En los últimos tiempos, la aplicación de membranas para el tratamiento de aguas ha aumentado considerablemente (Tabla 1). Una de las grandes ventajas que presentan estos sistemas de filtración es que son capaces de retener un gran número de sustancias contaminantes en las aguas, entre ellos los COEs; sin embargo, no permiten la degradación de las mismas, por lo que dichos contaminantes se concentran en forma de residuos sólidos, requiriendo de un tratamiento adicional posterior, y, por tanto, un incremento en los costos del proceso (Q. S. Liu *et al.* 2010).

Figura 1. a) Representación del proceso de filtración por membrana y b) ejemplos de membranas comerciales (adaptado de diversas fuentes)

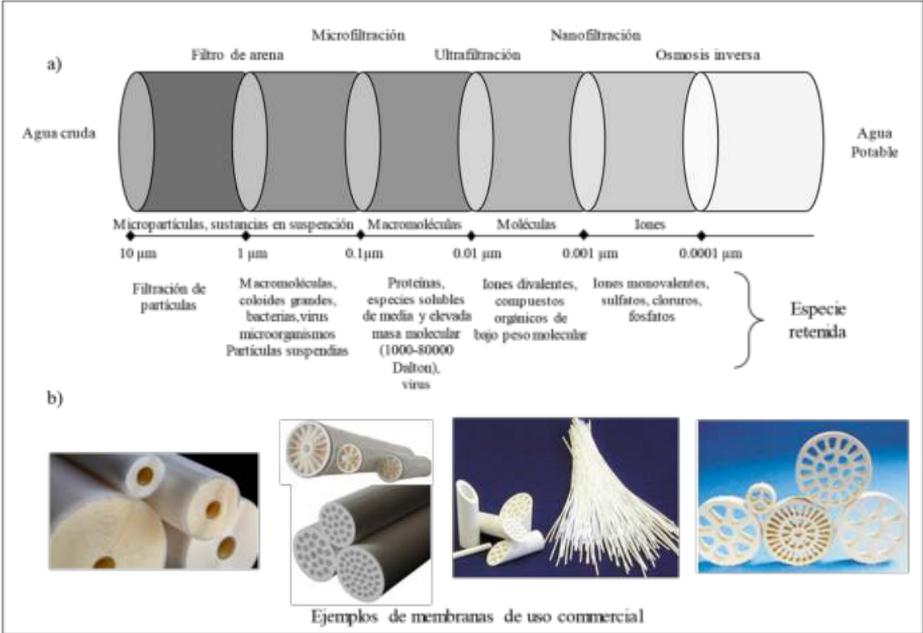


Tabla 1. Aplicaciones de los diferentes tipos de proceso de membrana, de acuerdo a su tamaño de poro (Q. S. Liu *et al.* 2010)

Proceso	Tamaño del material a retener	Fuerza motriz	Aplicación
Microfiltración	0.1-10 μm Micropartículas, microorganismo, coloides	0.1-5 bar	Esterilización por frío de bebidas y productos farmacéuticos. Aclaramiento de zumos de frutas, vinos y cerveza. Tratamiento biológico de aguas residuales. Separación de emulsiones de agua y aceite. Pre-tratamiento del agua para nano filtración y ósmosis inversa. Separación sólido-líquido para farmacias e industrias alimentarias
Ultrafiltración	1-100 nm Macromoléculas, proteínas	1-10 bar	Concentración de proteínas del suero de leche. Concentración de proteínas vegetales como avena, canola o soya. Recuperación de almidón. Tratamiento de agua. Clarificación de jugos de frutas, vinos y cerveza. Recuperación de almidón
Nanofiltración	0.1 nm-1nm sales, polivalentes, azúcares	5-20 bar	Eliminación de pesticidas de las aguas subterráneas. Eliminación de metales pesados de las aguas residuales. Reciclaje de aguas residuales en lavanderías. Ablandamiento y eliminación de nitratos
Ósmosis inversa	< 1 nm	10-100 bar	Ablandamiento, desalinización, producción de agua potable y agua ultrapura (industrias electrónicas). Concentración de solventes moleculares para industrias alimentarias y lácticas

3.1.1. Configuración de membranas

Existen equipos comerciales con diferente disposición de las membranas, para adaptarse a condicionantes diferentes. En la Tabla 2 se presentan las configuraciones más comunes (Solís *et al.* 2017).

3.1.2. Membranas cerámicas

Las membranas cerámicas son membranas hechas por sinterización de materiales inorgánicos como alúmina ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$), así como de carburo de silicio (SiC) a elevadas temperaturas de sinterización (1800-2000 °C). Son membranas de calidad y duraderas, resistentes a fluidos difíciles, y capaces de operar en un amplio espectro de condiciones. Se pueden usar en ambientes hostiles, altos niveles de solventes, intervalos de pH amplios. Se aplican en ultrafiltración y microfiltración. Por lo general, utiliza un recubrimiento de alúmina o zirconia que se aplica a la superficie interior de un soporte de cerámica. El costo de las membranas de

cerámica es mucho mayor que el de las membranas poliméricas convencionales, pero en algunas aplicaciones son la opción más viable y proporcionan una vida útil operativa más larga. Sin embargo, no son resistentes a la abrasión, pero tienen otras ventajas, como la calidad óptima del permeado, debida a la utilización de soportes de alta calidad junto con el propio proceso de impregnación de múltiples capas, que permite obtener siempre la calidad de permeado adecuada, evitando la aparición de grietas o microroturas que pudieran contaminar el permeado. Además, tiene un mínimo de ensuciamiento, debido al material cerámico, lo que también permite obtener el grado de hidrofobicidad adecuado en las membranas, de manera que se minimicen los procesos de adherencia de moléculas y bacterias, sobre la superficie activa, minimizando así los fenómenos de *fouling* o ensuciamiento. El ensuciamiento solamente se puede resolver con agresivos lavados químicos que permiten la continuidad del proceso en el tiempo; por tanto, es fundamental que los materiales de construcción de la membrana y de la planta resistan las condiciones a las que se le somete, como ocurre con las membranas cerámicas. Por otra parte, es de fácil regeneración, dado que los materiales cerámicos empleados permiten realizar limpiezas químicas de recuperación agresivas, con sosa cáustica, ácidos y otros productos específicos a elevadas temperaturas, hasta 140 °C (Qiu *et al.* 2017). De este modo, las colmataciones severas, generadas en procesos de regeneración de aguas depuradas, pueden ser recuperadas eficazmente, alargando la vida media de la membrana y minimizando el mantenimiento (bajo costo de mantenimiento). Para el tratamiento de aguas depuradas, la filtración tangencial se presta a una geometría tubular con la que se ofrece un máximo de resistencia mecánica y sistemas de hermeticidad de los módulos muy eficaces. La estructura típica de una membrana cerámica porosa corresponde a un sistema multicanal, estructuras asimétricas que constan de un soporte macroporoso (Figura 1b).

3.1.3. Membranas nanocompuestas

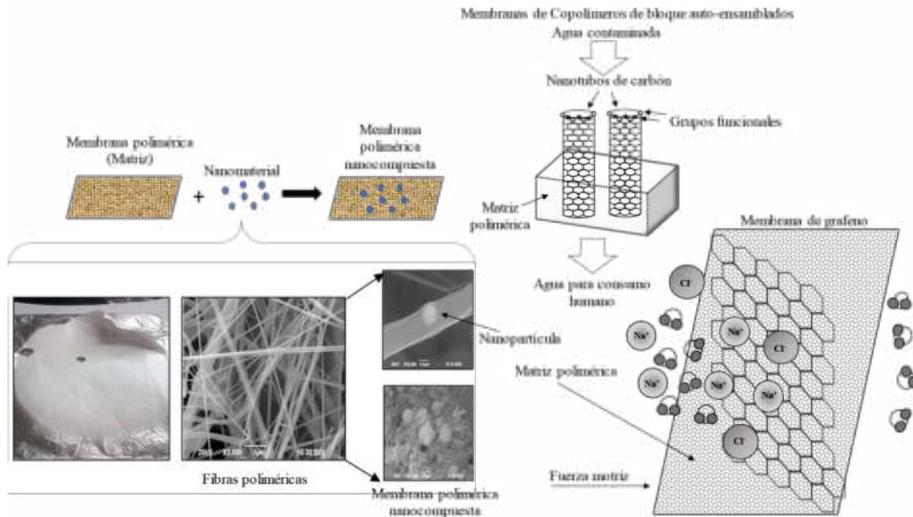
Las membranas nanocompuestas se obtienen a partir de dopar a las tradicionales membranas poliméricas con materiales inorgánicos de escala nanométrica. Dichas nanopartículas aportan un carácter hidrofílico adicional a este nuevo material, con vistas a disminuir las posibles interacciones entre los contaminantes orgánicos y la superficie de las membranas, evitando ensuciamiento, disminuyendo la demanda de energía durante el proceso, además de reducir el consumo de productos para la limpieza de la membrana. Las ventajas directas que aportan estos materiales dopantes son numerosas: incremento del flujo, aumento de la calidad del agua y, en algunos casos, en dependencia del material dopante seleccionado, proporcionan a las membranas de propiedades antimicrobianas.

Actualmente, se han empleado diferentes tipos de nanomateriales, como nanotubos de carbono (CNT), óxido de zinc (ZnO), óxido de grafeno (GO), dióxido de titanio (TiO₂), nanopartículas basadas en Ag y Cu (Figura 2), siendo los principales factores limitantes para la obtención de este tipo de membranas la aglomeración de las nanopartículas, baja compatibilidad entre los materiales dopantes hidrofílicos y la matriz orgánica, así como el desbalance permeación/selectividad que aparece producto del aumento de la permeabilidad de la membrana. En este sentido, el diseño de técnicas de síntesis para la obtención de este tipo de membranas resulta primordial para aprovechar el potencial que aportan las nanopartículas (X. Li *et al.* 2017).

Tabla 2. Configuración de membranas: ventajas y desventajas

Configuración	Ventajas	Desventajas
En espiral: Un conjunto de láminas de membrana, separadas entre sí por un soporte poroso, se enrolla alrededor de un tubo que actúa como colector de permeado. Es un diseño muy compacto, presenta una y es apropiado para aplicaciones de gran volumen. Generalmente se utiliza con membranas de nanofiltración y de ósmosis inversa	Alta relación superficie/volumen: 300-1000m ² /m ³ . Tratamiento alto de flujo. Bajo coste operativo, buena relación costo-eficiencia	Dificultad de lavado
 Tubular: Están colocadas en el interior de una carcasa rígida. La alimentación entra por el interior de las membranas y el flujo es en dirección al exterior. Poseen diámetro de tubo de 5 a 10 mm. Es apropiada para efluentes con una concentración elevada de sólidos en suspensión. Se suele utilizar para ultrafiltración.	Casi no se ensucian, fácil lavado, resistentes	Elevado costo, baja relación superficie/volumen, alto consumo energético
Fibras huecas y capilares: Constan de un elevado número de membranas con un diámetro inferior a 0.1 mm que constituyen un haz en el interior de una carcasa. Se utiliza prácticamente sólo para aplicaciones de nanofiltración y ósmosis inversa para tratar efluentes con una baja concentración de sólidos	Bajo consumo energético, elevada relación superficie/volumen: 600-30000 m ² /m ³	Difícil limpieza
Placa y marcos: Se asemeja físicamente a un filtro prensa. Las membranas se colocan sobre los marcos separadas por placas y la alimentación discurre por el espacio entre las placas y las membranas. A un lado de la membrana se concentran los sólidos y en el otro se evacúa el permeado. Esta disposición sólo se utiliza cuando la alimentación tiene una elevada viscosidad, generalmente en aplicaciones de las industrias farmacéutica y alimentaria.	Disminuyen los tiempos del ciclo de filtración, reducen el nivel residual de humedad en la torta, aumentan la homogeneidad de la torta, aguantan altas presiones de filtración, adecuado para filtraciones a altas temperaturas	Baja relación superficie/volumen

Figura 2. Ejemplos de membranas nanocompuestas (propia de los autores)



3.2. Reactores biológicos

3.2.1. Reactores biológicos secuenciales (SBR)

Entre los sistemas de depuración biológica, los reactores secuenciales de flujo discontinuo, en inglés *sequencing batch reactors* (SBR), están siendo más utilizados en el tratamiento y depuración de aguas residuales industriales. Un reactor discontinuo secuencial es un sistema de crecimiento suspendido en el que el agua residual se mezcla con un lodo biológico existente en un medio aireado (Ergas & Aponte-Morales, 2014). Es el único proceso biológico en el que se combina en un mismo tanque el proceso de reacción, aireación y clarificación. El sistema SBR consta de, al menos, cuatro procesos cíclicos: llenado, reacción, decantación y vaciado, tanto de efluente como de lodos, tal y como muestra la Figura 3a. En la primera fase, llamada llenado estático, se introduce el agua residual al sistema, bajo condiciones estáticas. El llenado puede ser dinámico si se produce durante el período de reacción. Durante la segunda fase del ciclo, el agua residual es mezclada mecánicamente para eliminar las posibles espumas superficiales y preparar a los microorganismos para recibir oxígeno. En esta segunda etapa (reacción), se inyecta aire al sistema. La etapa de reacción es un proceso cuyos resultados varían con su duración, y en la que el agua residual es continuamente mezclada y aireada, permitiendo que se produzca el proceso de degradación biológica. El tercer

ciclo, llamado etapa de decantación, genera condiciones de reposo en todo el tanque, para que los lodos puedan decantar. Durante la última fase, o fase de vaciado, el agua tratada es retirada del tanque mediante un sistema de eliminación de sobrenadante superficial. Finalmente, se puede purgar el lodo generado para mantener constante la concentración de éste (Kundu *et al.* 2013). Los tiempos de retención y las cargas varían con cada reactor y dependen en gran medida de la carga de agua residual específica. Generalmente, un sistema SBR trabaja con un tiempo de retención hidráulico de 1 a 10 días y un tiempo de retención celular de 10 a 15 días. La concentración de sólidos en suspensión se suele mantener entre 1500 y 5000 mg/L. Por su configuración y características, los SBR presentan las siguientes ventajas y beneficios:

- Bajo requerimiento de espacio, debido a que se requiere un solo tanque para realizar todo el proceso.
- Menor costo que los sistemas convencionales de tratamiento biológico, como consecuencia de la menor necesidad de terreno y de la simplicidad de los equipos.
- Mejor control del crecimiento de organismos y de problemas de decantación.
- Permite eliminación de nutrientes. Los sistemas SBR pueden ser utilizados para realizar un proceso completo de nitrificación–desnitrificación, así como para la eliminación de fósforo. Estos dos parámetros son los que suelen dar más problemas cuando se trabaja con tecnologías convencionales.
- Menor tiempo de control requerido.
- Gran flexibilidad de funcionamiento, según la duración de los ciclos y del modo de operar.
- Versatilidad para trabajar con fluctuaciones de caudal y de concentración de materia orgánica.
- Capacidad para la adaptación de los microorganismos a efluentes con elevado contenido en sales.

Los SBR se aplican en aguas residuales municipales, industria vinícola y destilerías, aguas procedentes de lixiviados de vertederos, industrias de curtidos, aguas residuales hipersalinas, industria papelera, industria láctea, aguas residuales de matadero e industria ganadera porcina, entre otras. Las aplicaciones más novedosas son las relacionadas con aguas residuales de la industria textil, de la industria azucarera y de la industria química (conteniendo compuestos fenólicos, BTX, TNT, etc.).

3.2.2. Bioreactores

a) Bioreactores de membrana (MBR)

El bioreactor de membrana (MBR) es un proceso utilizado para la separación de las fases líquidas y sólidas mediante el uso de membranas, como la microfiltración o la ultrafiltración. Se conforma por dos partes principales: a) reactor biológico, responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual; b) módulo de membranas: encargado de llevar a cabo la separación física del licor de mezcla.

Esta tecnología es referida principalmente para el tratamiento de aguas residuales. Es una combinación de un proceso de membrana, como microfiltración o ultrafiltración, con un bioreactor de crecimiento suspendido (Figura 3b). La tecnología MBR consiste en un tratamiento biológico con biomasa suspendida para depurar el agua residual, donde la biomasa es separada del agua gracias a un sistema de filtración de membrana, en lugar de la decantación. Las ventajas en comparación con los sistemas de lodos activados convencionales son una menor huella de carbono, mayor calidad del efluente, buena capacidad de desinfección y capacidad de soportar una mayor carga volumétrica (Sari Erkan *et al.* 2018). Además, las plantas depuradoras necesitan menos espacio. Las técnicas de membrana se aplican para el tratamiento de determinados efluentes y permiten la reutilización de las aguas residuales, así como la recuperación del producto retenido en la membrana para su posterior reutilización. Dado que las características de la membrana permeable deben ser específicas para un tipo concreto de contaminante, es importante la segregación de efluentes. De no ser así, se corre el peligro de obstruir la membrana (si el contaminante tiene un diámetro superior al del poro de ésta) o, en caso contrario, de no conseguir tratamiento alguno. Pueden ser aplicadas en efluentes procedentes de operaciones de tintura, de desencolado, etc.

Las ventajas que presenta un MBR frente a un tratamiento convencional de lodos activos son: la eliminación del decantador secundario, reduciendo de este modo el espacio requerido para su instalación; eliminación de los problemas derivados de la ocurrencia de sedimentaciones de lodo deficientes; obtención de efluentes de calidades equiparables a las obtenidas tras un tratamiento terciario; operación del reactor con elevadas concentraciones de sólidos (4-15 g SST/L), lo que hace reducir el espacio e incrementar las cargas volumétricas tratables; posibilidad de ampliación de plantas preexistentes sin necesidad de obra civil, y gran estabilidad frente a vertidos de alta carga contaminante. A gran escala, la tecnología MBR, aplicada a la reutilización de aguas residuales en fábricas textiles, indica el uso de RO (Ósmosis Inversa) aguas abajo, para eliminar el color

residual. El MBR proporciona un efluente de bajo SDI (*Silt Density Index* o Índice de colmatación), adecuado e inmejorable post MBR (0.04 μm poro) para la purificación aguas abajo por RO o NF sin necesidad de otro tratamiento que no sea la filtración por cartucho de seguridad (5 μm) antes de la bomba de alta presión (Aslam *et al.* 2017).

La tecnología de biorreactores MBR, que separa los lodos del agua por filtración de membranas, es una opción con buenos rendimientos para emplearse en el tratamiento de aguas urbanas.

b) Biorreactor de lecho móvil (MBBR)

El proceso de lecho móvil con biopelícula (*Moving bed Biofilm Reactor* [MBBR]) es una tecnología para el tratamiento biológico de aguas residuales en el que los microorganismos necesarios crecen como biopelícula sobre un material de soporte. Por otro lado, el biorreactor MBBR utiliza miles de portadores de biopelículas que operan en un movimiento mixto con una configuración que contiene aguas residuales aireadas. Con el asentamiento de los microorganismos sobre las superficies del medio de relleno se genera una gran superficie eficaz. La aireación del reactor se ocupa de que el fluido se mezcle de forma permanente y, con ello, se genere un contacto suficiente de las sustancias del agua residual con los microorganismos. También es posible aplicar el proceso de lecho móvil con biopelícula de forma anaeróbica; en este caso, la mezcla se realiza con ayuda de bombas o con un agitador. Tanto las fuerzas transversales dominantes en el biorreactor como las sustancias del agua residual influyen en el espesor y la composición de la biopelícula sobre el material de soporte: cuanto mayor sea el contenido de sustancias orgánicas en el agua residual, más rápidamente crecerá la biopelícula (K. Tang *et al.* 2017).

Como en todo proceso biológico, para degradar compuestos de carbono orgánicos, en el MBBR también se genera un exceso de lodo. En el proceso de biofilm la cantidad está biológicamente condicionada, pero es claramente inferior que, en un proceso de lodos activados de igual capacidad. No obstante, el agua residual ya limpia debe separarse del lodo generado después del tratamiento en el MBBR. Esto se puede realizar, por ejemplo, por sedimentación en un depósito de decantación. En caso de un vertido indirecto en otra planta de tratamiento, se puede evaluar el prescindir de una separación del lodo, si la capacidad y diseño de la planta de tratamiento lo permiten y si puede descartarse que haya procesos de sedimentación no deseados en el trayecto de transporte (S. Wang *et al.* 2020).

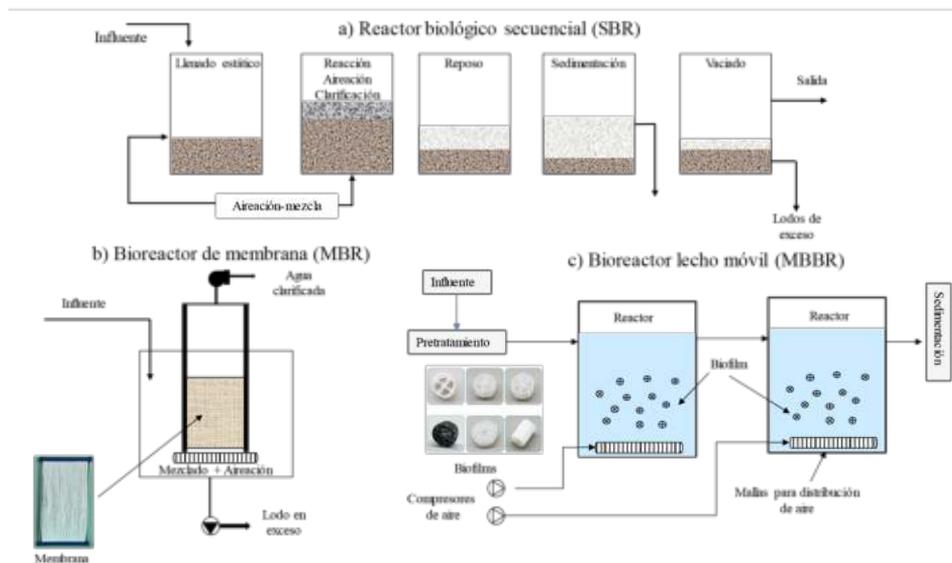
En el proceso MBBR, los microorganismos inmovilizados sobre los soportes tienen una vida sustancialmente más larga. De este modo, se establecen microor-

ganismos en la biopelícula que se han especializado en compuestos difícilmente degradables y que tienen tiempos de generación muy largos. En la Tabla 3, se hace una comparación entre los biorreactores MBR y MBBR.

Tabla 3. Comparación entre reactores MBR y MBBR (Aslam *et al.* 2017, K. Tang *et al.* 2017)

Reactor	MBR	MBBR
Funcionamiento	Utiliza una combinación de membranas para la separación y retención de sólidos	El biofilm que crece en la superficie del portador móvil se utiliza en el tratamiento de agua
Operación	Complicado	Fácil
Costo	Alto	Bajo
Costo de consumibles	Alto	N/A
Aplicaciones	Tratamiento biológico de aguas residuales y reciclaje	Plantas de alimentos y bebidas, refinerías, plantas químicas, tratamiento de agua residual, eliminación de DBO, nitrificación y desnitrificación

Figura 3. Biorreactores: a) SBR, b) MBR, c) MBBR



3.3. Procesos de oxidación avanzada

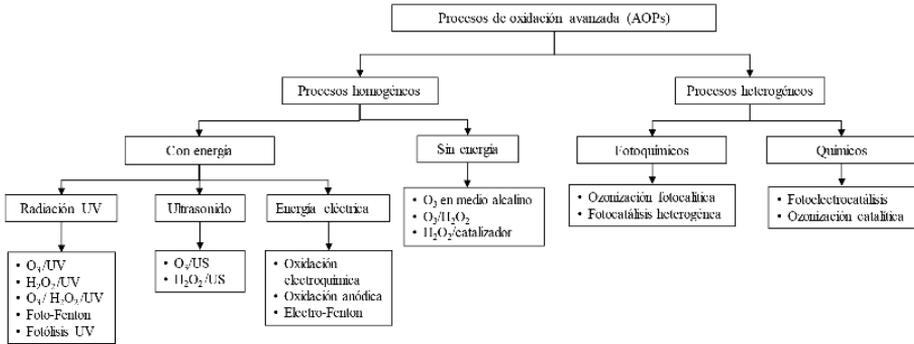
Los contaminantes orgánicos en agua son generalmente muy tóxicos, provocando daños severos a los organismos vivos expuestos a estos compuestos. Por

lo tanto, es necesario lograr una completa mineralización (convirtiéndolos en compuestos menos dañinos) de estos compuestos químicos. Una alternativa son los procesos de oxidación avanzada POA y que se pueden definir como aquellos procesos que implican la generación de radicales hidroxilos en cantidad suficiente para degradar a los compuestos orgánicos del medio.

En sus inicios, los radicales se generaban con la ayuda de uno solo o una combinación de oxidantes primarios (ozono, catalizadores, peróxido de hidrógeno, oxígeno y energía (radiación UV)). Con el tiempo, los métodos para POA aumentaron, incluyendo procesos fotocatalíticos, procesos electroquímicos, reacción de Fenton, radiación UV-vacío, efectos de ultrasonido, radiación gamma y técnicas de plasma a baja temperatura (Figura 4) (Koe *et al.* 2020). Por lo general, los POA heterogéneos requieren la adición de semiconductores/catalizadores sólidos adecuados (óxidos metálicos, catalizadores organometálicos o azufres de metales de transición) para estimular una reacción fotoquímica en la interfase líquido/sólido. Una representación esquemática de las etapas de este proceso se muestra en la Figura 5. La iluminación excita un electrón a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia. Este proceso produce un potente agente reductor y oxidante. En el agua, la foto oxidación se produce principalmente a través de radicales hidroxilos. Las combinaciones más comunes implican las de ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), radiación ultravioleta y fotocatalisis, los cuales poseen la desventaja de ser poco selectivos y los reactivos que emplean son costosos, pero es recomendable para la eliminación de contaminantes en concentraciones de 5g/L (Bajpai, 2017). Estos procesos son caros, ya que están basados en el uso de fuentes de radiación UV y reactivos oxidantes. El uso de catalizadores y radiación solar puede contribuir a abaratar estos costos, por lo que resulta más económico tratar de eliminar todos los compuestos orgánicos a través de pretratamientos convencionales y reservar su uso únicamente para las sustancias más resistentes. El mayor riesgo asociado con los POA es que su acción origina subproductos tóxicos. Por ejemplo, en los tratamientos ozono/peróxido y peróxido/UV de un agua subterránea contaminada con tricloroeteno y percloroeteno se forman los ácidos intermedios dicloroacético y tricloroacético, respectivamente, con un 1% de rendimiento.

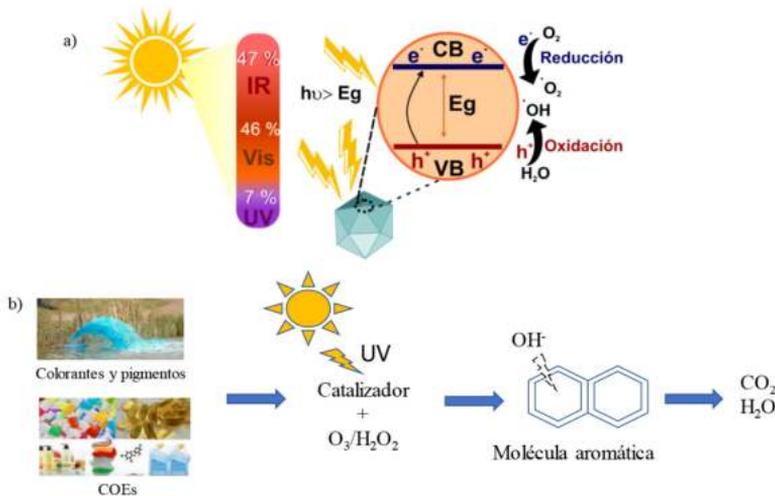
En general, los POA consisten en la aplicación de un agente oxidante (O_3 , H_2O_2 , etc.) combinado con un agente catalítico (TiO_2 , Fe^{2+} , Fe^{3+} , etc.) y la posibilidad de utilizar una fuente de energía (radiación UV, energía eléctrica y/o ultrasonidos), siendo los procesos más comunes: la fotocatalisis heterogénea con TiO_2 , el proceso Fenton y foto-Fenton, el sistema UV/ H_2O_2 , la ozonización, y la electro-oxidación (Bajpai, 2017).

Figura 4. Clasificación de los Procesos de Oxidación Avanzada



Se han reportado diversos estudios que demuestran la eficacia de los POA en el tratamiento de efluentes con COEs. Entre ellos, cabe citar los estudios realizados por Chiang et al. (2004), sobre la degradación del bisfenol-A a partir de fotocatalisis heterogénea con TiO_2 , encontrando su completa degradación y mineralización a pH 3, tras 120 minutos de reacción. En lo que se refiere al tratamiento de antibióticos, se ha investigado la aplicabilidad del proceso Fenton y foto-Fenton, entre otros sistemas, para la remoción de sulfonamidas, tetraciclinas, metronidazol y β -lactamasas (Shemer *et al.* 2006).

Figura 5. a) Etapas típicas en un proceso heterogéneo de oxidación avanzada, b) Ilustración de degradación de COEs y colorantes a través de un AOP



Ventajas de las tecnologías avanzadas de oxidación

- No sólo cambian de fase al contaminante (como ocurre en el arrastre con aire o en el tratamiento con carbón activado), sino que lo transforman químicamente.
- Generalmente se consigue la mineralización completa (destrucción) del contaminante. En cambio, las tecnologías convencionales, que no emplean especies muy fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- Usualmente no generan lodos, que a su vez requieren de un proceso de tratamiento y/o disposición.
- Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (e.g. ppb).
- No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.
- Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección.
- Generalmente, mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos (e.g. la incineración).
- Permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables y luego por métodos más económicos, como el tratamiento biológico.
- Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.

En la Figura 6, se hace una comparación de la eficiencia de los POA, respecto a otras tecnologías para la remoción de compuestos orgánicos.

Los POA son especialmente útiles como pretratamiento antes de un tratamiento biológico para contaminantes resistentes a la biodegradación o como proceso de postratamiento para efectuar un pulido de las aguas antes de la descarga a los cuerpos receptores. A continuación, se describen dos de los POA más desarrollados para remediación del agua.

a) Proceso Fenton

Este proceso consiste en la adición de sales de hierro en presencia de H_2O_2 , en medio ácido, para la formación de radicales hidroxilo (OH). A la combinación de H_2O_2 y sales de hierro se denomina reactivo Fenton. El reactivo de Fenton se clasifica como un proceso de oxidación avanzada, del cual se aprovecha su capaci-

dad de generación *in situ* de radicales hidroxilo, especie química con un elevado potencial de oxidación, que se produce en fase homogénea a partir de la descomposición de un agente oxidante (peróxido de hidrógeno) por un catalizador (metal de transición comúnmente una sal de hierro (II)). Existe una variedad de este proceso conocida como el tipo Fenton, que se compone por una solución de Fe^{+3} y otra de peróxido de hidrógeno. Una de las modificaciones del reactivo de Fenton, considerada como tecnología de vanguardia eficiente y en desarrollo, es el proceso tipo Fenton en fase heterogénea asistido con luz solar (Foto Fenton en fase heterogénea). Este proceso presenta diversas ventajas económicas y ambientales respecto al realizado en fase homogénea; por lo tanto, la reacción es más rápida y eficiente por el uso de la energía luminosa que funciona como un catalizador adicional de la descomposición de peróxido de hidrógeno y que también incrementa la capacidad catalítica del óxido de hierro (N. Wang *et al.* 2016).

Este POA puede alcanzar una significativa degradación de los contaminantes orgánicos, lográndose lo siguiente:

- a. Un cambio estructural de los compuestos orgánicos que posibilitan un eventual tratamiento biológico posterior. Incremento de la biodegradabilidad (relación DBO_5/DQO).
- b. Una oxidación parcial que se refleja en una disminución de la toxicidad del efluente.
- c. Una oxidación total de los compuestos orgánicos en sustancias inocuas que posibilitan una descarga segura del efluente sin necesidad de un posterior tratamiento. Degradación del agente orgánico contaminante.
- d. Remoción de olor y color del efluente.

En la Figura 7, se muestra como los procesos Fenton combinado da mejores resultados en la degradación de fármacos.

a) Fotocatálisis

La fotocatálisis heterogénea se emplea para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua. La mineralización de dichos compuestos depende de los materiales usados para la generación del par electrón/hueco. Los semiconductores TiO_2 , ZnO y ZnS se usan frecuentemente, al igual que las combinaciones de éstos, tal es el caso del TiO_2 con ZnO , que usa en la degradación de contaminantes fenólicos-fungicidas y colorantes (Chaturvedi & Dave, 2019). Otro ejemplo, es nano- TiO_2 y ozono para la degradación del nitrobenzeno. Esta combinación se comparó con el ozono solo y se evidenció que la ozonización catalizada era más eficiente que empleando el ozono solamente.

En esta dirección, existen nuevos materiales, como los enrejados metal-orgánicos (MOF, por sus siglas en inglés), modificados con metales que son capaces de actuar como catalizadores, permitiendo la degradación de contaminantes orgánicos bajo la luz UV/visible, convirtiéndose en una opción para ser usados en fotocatalisis. Lo anterior, que los semiconductores actuales presentan una pobre recuperación de los materiales, una rápida recombinación de pares electrón - hueco, así como una baja actividad en presencia de luz solar por el amplio bangap que poseen. Los MOF tienen ligantes orgánicos que pueden actuar como recepcionistas ligeros, activando los centros de los metales de transición a través de la transferencia de carga del ligando orgánico al metal. La degradación de la sulfametazina se estudió con Fe-MOF con Fe(II)/Fe(III) como centros con coordinación insaturada, CUS-MIL-100(Fe), logrando degradar el 100% del fármaco con una mineralización de 52% en 180 minutos, empleando la fotocatalisis heterogénea (J. Tang & Wang, 2018). En otro estudio, se investigó la eficiencia de degradación de la atrazina empleando un MOF de hierro modificado con nanoesferas de ZnO (M.MIL-100(Fe)@ZnO). Se logró una degradación de 92% del pesticida y una mineralización del mismo de 49% en solo 120 minutos (Ahmad *et al.* 2019). Moléculas de bisfenol-A se eliminaron del agua, empleando un MOF de hierro modificado con nanopartículas de paladio (Pd@MIL-100(Fe)). En esta investigación se logró degradar 65% del contaminante con una mineralización de 20% en 240 minutos (Y. Li *et al.* 2019).

Figura 6. Tecnologías para el tratamiento de contaminantes orgánicos en agua

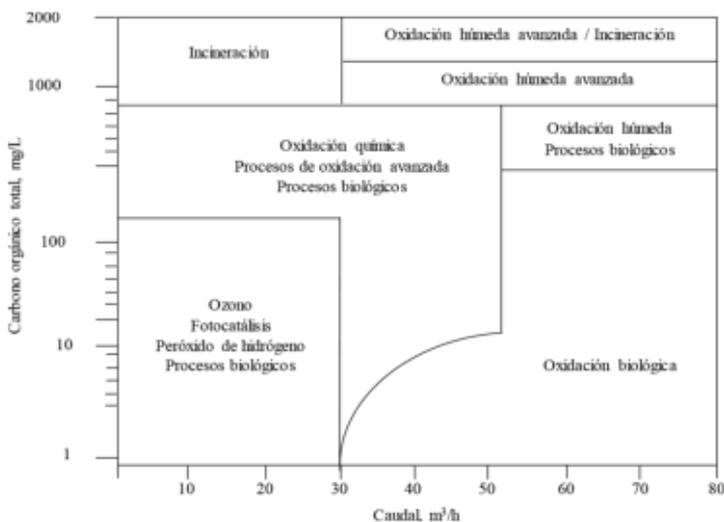
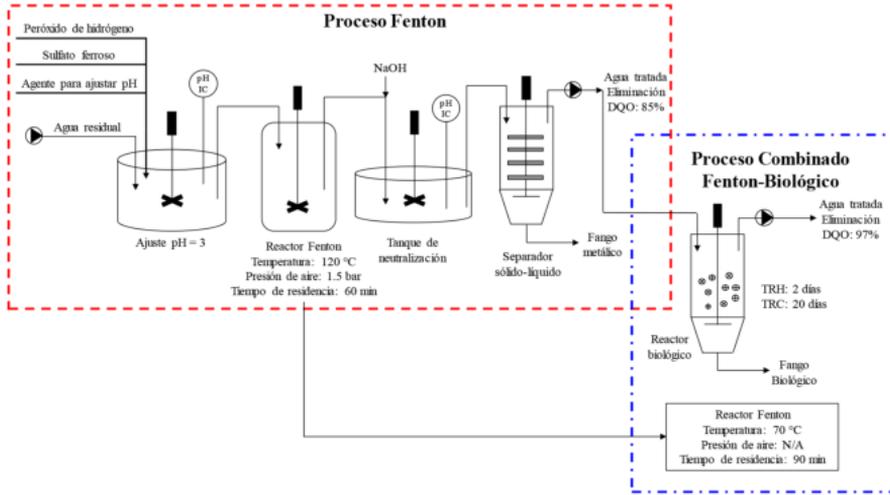


Figura 7. Tratamiento más eficaz y económico para la depuración de aguas residuales del sector farmacéutico



3.4. Nanotecnología para remediación del agua

La nanotecnología juega un rol importante en la remediación ambiental, donde las reacciones pueden tener lugar a escala iónica/atómica/molecular de una manera selectiva y con una alta eficiencia. Además, como producto del aumento significativo de la relación superficie-volumen en una nanodimensión, la capacidad de remoción del contaminante se multiplica. Se ha demostrado que los materiales basados en nanotecnología pueden conducir a una tecnología para tratamiento de agua más barata, duradera, eficiente y que satisfaga las necesidades de los países desarrollados.

La nanotecnología ha permitido el diseño y obtención de nuevos materiales para la eliminación de contaminantes indeseados del agua, como arsénico, flúor, metales pesados (cobre, zinc, plomo, cadmio, mercurio) y metaloides, compuestos orgánicos (fármacos, colorantes, clorados, fenoles), agroquímicos, flúor u otros tipos de contaminantes emergentes (Chaturvedi & Dave, 2019; Punia *et al.* 2020; Saldivar & Walsh, 2015). Los materiales funcionales empleados en la remediación del agua se pueden agrupar en cuatro clases a nano-escala: 1) nano-partículas metálicas y de óxidos metálicos, 2) zeolitas, 3) nano-estructuras de carbono y 4) dendrímeros.

Las nanopartículas se han convertido en adsorbentes atractivos, debido a que presentan una relación área superficial-volumen mayor al *bulk* y pueden ser fun-

cionalizadas con grupos químicos, lo cual incrementa la afinidad hacia compuestos específicos (P. Liu *et al.* 2019; Ma *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2021). Las nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos han sido estudiadas extensamente en aplicaciones de remediación del agua. Dentro de éstas, las que más resaltan son las de metales nobles, especialmente plata y oro, las cuales son consideradas como biocidas, y hierro nano cero-valente (NZVI, por sus siglas en inglés), empleado en el tratamiento de pesticidas. Dentro de las nanopartículas de óxidos metálicos empleadas en el tratamiento de agua subterránea se encuentran los óxidos de hierro (magnetita, hematita, goethita, etc.), aluminio, zinc, magnesio y titanio. Recientemente se ha evaluado la eficiencia de materiales basados en nanopartículas de ZVI en la remoción de contaminantes tóxicos del agua. Estas partículas se inmovilizaron en la superficie de un compuesto de grafeno-sílice para la remoción de arsénico logrando alcanzar capacidades de adsorción máxima de 45 mg/g (P. Liu *et al.* 2019). Un carbón vegetal soportado con nanopartículas de ZVI se estudió en la remoción de uranio (U(VI)) de aguas residuales. A pH 6 se logró la máxima adsorción de U(VI) de 331.13 mg/g (Zhang *et al.* 2021). También se han aplicado para la remoción nitrobenzeno, Cr(VI) (Wei *et al.* 2019,). Las nanopartículas de hierro nano cero-valente tienen un amplio espectro de aplicación para la remoción de una gran variedad de contaminantes, son ampliamente utilizadas en el tratamiento del agua contaminada debido a su fácil obtención, síntesis económica y elevada área superficial.

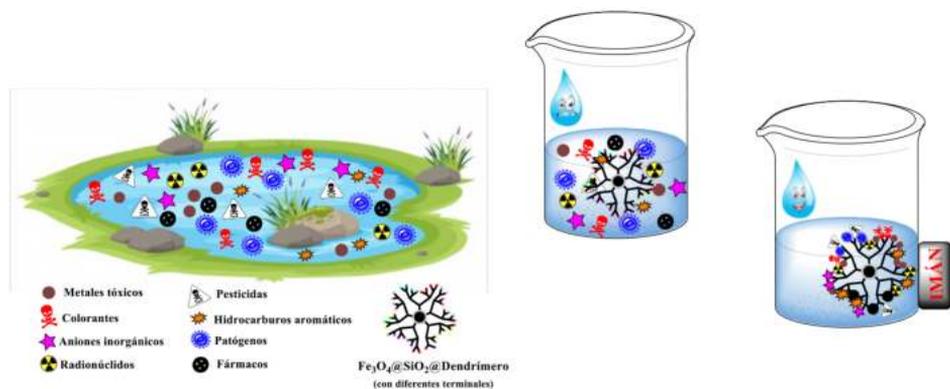
En la actualidad, en la India se han creado filtros domésticos basados en nanopartículas de plata (AgNPs) para eliminar pesticidas. Además, algunas empresas privadas han incursionado en el desarrollo de estas tecnologías para el tratamiento de agua. Ejemplos de ello son: El VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., en Finlandia (antes Blue Gold Water Technologies Ltd). En Estados Unidos se han desarrollado tabletas de cerámica porosa infundidas con plata metálica, MADIDROP+, tecnología implementada para la purificación del agua. Dichas tabletas, al ponerse en el agua los iones de plata se liberan para la desinfección de patógenos. MadiDrop+ permite el tratamiento de 10-20 litros en un día. Hasta el momento, más de 40, 000 MadiDrops han sido vendidas para 160 proyectos en 43 países, proporcionando agua segura a más de 200, 000 personas (Ehdaie *et al.* 2014).

Otra clase de nanomateriales, que ha ganado gran importancia en la última década en el tratamiento de aguas, son los dendrímeros. Los dendrímeros son polímeros hiperramificados con tamaños entre 1-20 nm y características físicoquímicas muy atractivas para ser utilizados como materiales funcionales para la purificación del agua. Presentan grupos funcionales fácilmente accesibles en la superficie, porosidad, flexibilidad de las ramas internas, presencia de cavidades fun-

cionalizadas, accesibilidad al núcleo y, sintonizables. Además, son materiales extremadamente adaptables, con respecto a su estructura, flexibilidad, porosidad o morfología, que pueden ser sintonizados a voluntad (Sharma *et al.* 2019). Estas propiedades permiten el empleo de estas estructuras como ligandos solubles en agua reciclables y con alta capacidad para la remoción de iones metálicos tóxicos, radionúclidos, aniones inorgánicos, colorantes, pesticidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, fármacos y como sensores para la detección de metales (Akbari *et al.* 2020).

La Figura 8 muestra una representación esquemática de la versatilidad de las estructuras dendríticas en la remoción de contaminantes del agua.

Figura 8. Representación esquemática de la aplicación composites con superficie dendrítica en la remediación ambiental



Comentarios

A lo largo de la historia las plantas de tratamiento de aguas residuales han sido diseñadas para la eliminación de materia orgánica y de ciertos tipos de contaminantes, especialmente los que se especifican en las normas oficiales. Sin embargo, la presencia de nuevos contaminantes, como los COEs, hace que se requiera de tratamientos avanzados. Hoy en día, se buscan tecnologías más eficientes no solo para el tratamiento de aguas residuales, sino también para agua de consumo. Los tratamientos biológicos se han catalogado como la tecnología más viable en el tratamiento de aguas residuales; sin embargo, solo generan una remoción parcial de contaminantes emergentes, los cuales en la mayoría son descargados en los efluentes de las plantas tratadoras. En los últimos años se han estudiado sistemas membranales, ya sea biológicos (MBR, MBBR) o no biológicos (ósmosis inversa,

ultrafiltración y nanofiltración) y procesos de oxidación avanzada (POA), estos sistemas son considerados como los más apropiados para remover concentraciones a nivel traza de contaminantes emergentes.

Referencias

- Ahmad, M., Chen, S., Ye, F., Quan, X., Afzal, S., Yu, H., & Zhao, X. (2019). Efficient photo-Fenton activity in mesoporous MIL-100(Fe) decorated with ZnO nanosphere for pollutants degradation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 245, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.12.057>
- Aslam, M., Charfi, A., Lesage, G., Heran, M., & Kim, J. (2017). Membrane bioreactors for wastewater treatment: A review of mechanical cleaning by scouring agents to control membrane fouling. En: *Chemical Engineering Journal* (Vol. 307, pp. 897–913). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.144>
- Ayooob, S., Gupta, A. K., & Bhat, V. T. (2008). A conceptual overview on sustainable technologies for the defluoridation of drinking water. En: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* (Vol. 38, núm. 6, pp. 401–470). <https://doi.org/10.1080/10643380701413310>
- Bajpai, P. (2017). Emerging Technologies for Wastewater Treatment. In *Pulp and Paper Industry* (pp. 93–179). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811099-7.00007-1>
- Chaturvedi, S., & Dave, P. N. (2019). Chemical Methodologies Water Purification Using Nanotechnology an Emerging Opportunities. *Chemical Methodologies*, 3(1), 115–144. <https://doi.org/10.22034/CHEMM.2018.143461.1069>
- Ehdaie, B., Krause, C., & Smith, J. A. (2014). Porous ceramic tablet embedded with silver nanopatches for low-cost point-of-use water purification. *Environmental Science and Technology*, 48(23), 13901–13908. <https://doi.org/10.1021/es503534c>
- Ergas, S. J., & Aponte-Morales, V. (2014). Biological Nitrogen Removal. In *Comprehensive Water Quality and Purification* (Vol. 3, pp. 123–149). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382182-9.00047-5>
- Gupta, V. K. (2013). Environmental Water Advances in Treatment. In *Remediation and Recyclin*. Elsevier.
- Kanakaraju, D., Glass, B. D., & Oelgemöller, M. (2018). Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: A review. En: *Journal of Environmental Management* (Vol. 219, pp. 189–207). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.103>

- Klajnert, B., & Bryszewska, M. (2001). Dendrimers: Properties and applications. En: *Acta Biochimica Polonica* (Vol. 48, núm. 1, pp. 199–208). Acta Biochimica Polonica. https://doi.org/10.18388/abp.2001_5127
- Koe, W. S., Lee, J. W., Chong, W. C., Pang, Y. L., & Sim, L. C. (2020). An overview of photocatalytic degradation: photocatalysts, mechanisms, and development of photocatalytic membrane. En: *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 27, núm. 3, pp. 2522–2565). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07193-5>
- Kundu, P., Debsarkar, A., & Mukherjee, S. (2013). Treatment of slaughter house wastewater in a sequencing batch reactor: Performance evaluation and biodegradation kinetics. *BioMed Research International*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/134872>
- Li, X., Sotto, A., Li, J., & Van der Bruggen, B. (2017). Progress and perspectives for synthesis of sustainable antifouling composite membranes containing in situ generated nanoparticles. En: *Journal of Membrane Science* (Vol. 524, pp. 502–528). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.11.040>
- Li, Y., Fang, Y., Cao, Z., Li, N., Chen, D., Xu, Q., & Lu, J. (2019). Construction of g-C₃N₄/PDI@MOF heterojunctions for the highly efficient visible light-driven degradation of pharmaceutical and phenolic micropollutants. *Applied Catalysis B: Environmental*, 250, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.03.024>
- Liu, P., Liang, Q., Luo, H., Fang, W., & Geng, J. (2019). Synthesis of nano-scale zero-valent iron-reduced graphene oxide-silica nano-composites for the efficient removal of arsenic from aqueous solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(32), 33507–33516. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06320-6>
- Liu, Q. S., Zheng, T., Wang, P., Jiang, J. P., & Li, N. (2010). Adsorption isotherm, kinetic and mechanism studies of some substituted phenols on activated carbon fibers. *Chemical Engineering Journal*, 157(2–3), 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.11.013>
- Ma, M. D., Wu, H., Deng, Z. Y., & Zhao, X. (2018). Arsenic removal from water by nanometer iron oxide coated single-wall carbon nanotubes. *Journal of Molecular Liquids*, 259, 369–375. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.03.052>
- Morató, J., Pires Carneiro, A., & Subirana, A. (2009). *Manual de tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas: Crisis del agua*. Manual de Tecnologías Sostenibles En: Tratamiento de Aguas. https://drive.google.com/file/d/0B8D2_Q6wgqIRSnJRSmU4OUZCaUU/view?usp=sharing

- Murillo, A. (2016). *Evaluación de tecnologías apropiadas para el tratamiento de agua para el consumo y uso*. Wwww.Iagua.És. <https://www.iagua.es/blags/felipe-murillo-arias/evaluacion-tecnologias-apropiadas-tratamiento-agua-consumo-y-uso>
- Nunes-Pereira, J., Lima, R., Choudhary, G., Sharma, P. R., Ferdov, S., Botelho, G., Sharma, R. K., & Lanceros-Méndez, S. (2018). Highly efficient removal of fluoride from aqueous media through polymer composite membranes. *Separation and Purification Technology*, 205, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.015>
- Pirilä, M., Saouabe, M., Ojala, S., Rathnayake, B., Drault, F., Valtanen, A., Huuhtanen, M., Brahmi, R., & Keiski, R. L. (2015). Photocatalytic degradation of organic pollutants in wastewater. *Topics in Catalysis*, 58(14–17), 1085–1099. <https://doi.org/10.1007/s11244-015-0477-7>
- Pirsaheb, M., & Moradi, N. (2020). Sonochemical degradation of pesticides in aqueous solution: Investigation on the influence of operating parameters and degradation pathway—a systematic review. *RSC Advances*, 10(13), 7396–7423. <https://doi.org/10.1039/c9ra11025a>
- Punia, P., Bharti, M. K., Chalia, S., Dhar, R., Ravelo, B., Thakur, P., & Thakur, A. (2020). Recent advances in synthesis, characterization, and applications of nanoparticles for contaminated water treatment— A review. En: *Ceramics International*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.050>
- Qiu, M., Chen, X., Fan, Y., & Xing, W. (2017). 1.11 Ceramic Membranes. En: *Comprehensive Membrane Science and Engineering* (pp. 270–297). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.12243-7>
- Richardson, S. D., & Ternes, T. A. (2014). Water analysis: Emerging contaminants and current issues. En: *Analytical Chemistry* (Vol. 86, núm. 6, pp. 2813–2848). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/ac500508t>
- Saldivar, L., & Walsh, C. (2015). Nanotecnología para el tratamiento de agua. Claves sobre la investigación en México. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 8(14), 53–69. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2015.14.52513>
- Sari Erkan, H., Bakaraki Turan, N., & Önkál Engin, G. (2018). Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. En: *Comprehensive Analytical Chemistry* (Vol. 81, pp. 151–200). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2018.02.002>
- Sharma, S. K., Viltres, H., Odio, O. F., & Reguera, E. (2019). Dendrimer-Based Hybrid Nanomaterials for Water Remediation: Adsorption of Inorganic Contaminants. En: *Nanohybrids in Environmental & Biomedical Applications* (pp. 279–298). <https://doi.org/10.1201/9781351256841-12>

- Solís, C. A., Vélez, C. A., Ramírez-Navas, J. S., Solís, C. A., Vélez, C. A., & Ramírez-Navas, J. S. (2017). Membrane technology: Ultrafiltration. En: *Entre Ciencia e Ingeniería* (Vol. 11, núm. 22). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-83672017000200026&lng=en&nr=iso&tlng=es
- Tang, J., & Wang, J. (2018). Metal Organic Framework with Coordinatively Unsaturated Sites as Efficient Fenton-like Catalyst for Enhanced Degradation of Sulfamethazine. *Environmental Science and Technology*, 52(9), 5367–5377. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00092>
- Tang, K., Ooi, G. T. H., Litty, K., Sundmark, K., Kaarsholm, K. M. S., Sund, C., Kragelund, C., Christensson, M., Bester, K., & Andersen, H. R. (2017). Removal of pharmaceuticals in conventionally treated wastewater by a polishing moving bed biofilm reactor (MBBR) with intermittent feeding. *Bioresource Technology*, 236, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.159>
- Wang, N., Zheng, T., Zhang, G., & Wang, P. (2016). A review on Fenton-like processes for organic wastewater treatment. En: *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 4, núm. 1, pp. 762–787). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.12.016>
- Wang, S., Parajuli, S., Sivalingam, V., & Bakke, R. (2020). Biofilm in Moving Bed Biofilm Process for Wastewater Treatment. En: *Bacterial Biofilms*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88520>
- Zhang, Q., Wang, Y., Wang, Z., Zhang, Z., Wang, X., & Yang, Z. (2021). Active biochar support nano zero-valent iron for efficient removal of U(VI) from sewage water. *Journal of Alloys and Compounds*, 852, 156993. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156993>

Capítulo 12

Agua y minería en Colombia: enfoque para su tratamiento

Jose Luis Marrugo Negrete^{1*}
Roberth Paternina Uribe¹
Amado Enrique Navarro Frometa²

1. Introducción

La minería en Colombia es una actividad que aporta el 1,6% del producto interno bruto (PIB) a la nación. Solo por concepto de impuesto de renta y regalías en el 2018, la minería en Colombia aportó más de 4 billones de pesos a las finanzas públicas (ANM, 2020); sin embargo, la informalidad técnica y ambiental de los títulos mineros legalmente constituidos, la falta de rigurosidad en la aplicación de normas y estándares ambientales y la extracción ilícita de minerales han ocasionado graves impactos sobre el medio ambiente, especialmente sobre los recursos hídricos del país (MME, *et al.* 2015a).

Uno de los impactos medioambientales de mayor relevancia que se generan por la actividad minera es el relativo a las aguas, ya sean superficiales o profundas. Dicho impacto se puede dar desde la demanda del recurso para el desarrollo de las actividades mineras, hasta la afectación en su calidad. Por tal razón, es de gran importancia conocer, valorar y cuantificar las alteraciones ocasionadas sobre el recurso hídrico para establecer medidas correctivas y preventivas que minimicen dichas afecciones, de tal manera que la calidad y la cantidad de las aguas no se vea comprometida (A. Toro, J.I. *et al.* 2018).

De acuerdo con la normativa minera ambiental vigente en Colombia (Decreto 2820 de 2010, Resolución 631 de 2015, Resolución 2210 de 2018 y las guías minero-ambientales desarrolladas por el Ministerio de Minas y Energía

¹Universidad de Córdoba, Carrera 6 No. 77-305, Montería, Córdoba, Colombia.

²Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Puebla, México.

*Autor de correspondencia, jmarrugo@correo.unicordoba.edu.co

y el Ministerio de Ambiente, teniendo en cuenta el artículo 278, de la Ley 685 de 2001), los diferentes elementos de las operaciones mineras deben diseñarse para evitar impactos directos sobre los recursos hídricos permanentes o fijos. Sin embargo, debido a diferentes fenómenos incidentales, accidentales o voluntarios, el recurso hídrico se ha visto afectado, principalmente por derramamiento de efluentes sólidos y líquidos procedentes de la actividad minera, fugas de piscinas de sedimentación y/o presas de lodo y otros al drenaje de aguas residuales de la propia planta de procesamiento de minerales o incluso del frente de mina.

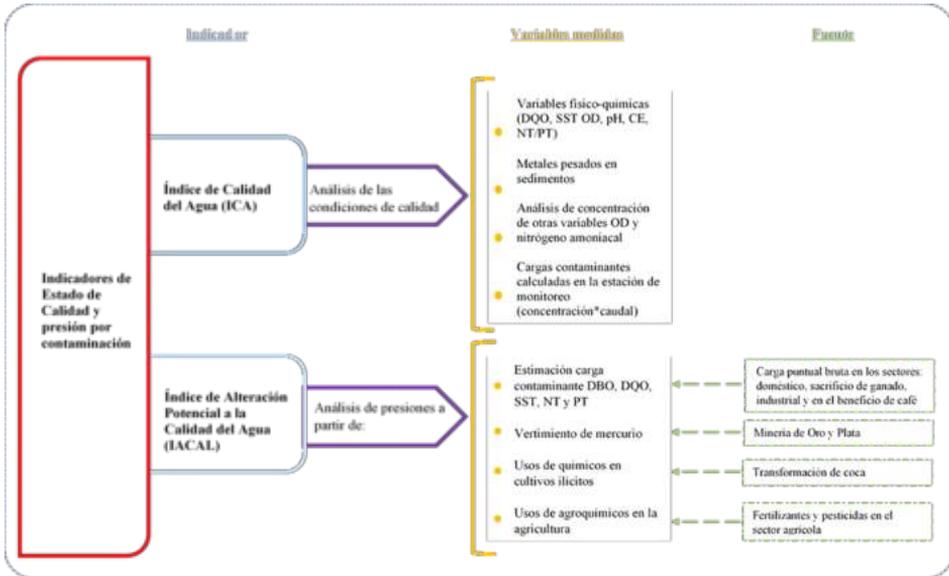
El agua y la minería se encuentran relacionadas alrededor de mundo en todos los países donde se desarrolla esta actividad, siempre buscando mejorar las prácticas de gestión e invirtiendo en nuevas alternativas que reduzcan la demanda y aumenten la oferta del recurso hídrico. Han existido casos relevantes de impactos causados por la minería en Brasil (el embalse de Samarco contaminó el Río Doce hasta el Océano Atlántico en 2015), en Perú (minería aurífera en Madre de Dios y su contaminación con Mercurio), en Chile (desbordamiento de relaves, como el de aluviones en el norte del país en 2015) y en Latinoamérica en general.

En esta sección abordaremos de manera un poco general las diferentes actividades dentro de la operación minera que generan vertimientos, las características contaminantes de los mismos, la afectación de la calidad del recurso hídrico y las alternativas de mejores prácticas para tratar las condiciones de estos.

2. Calidad de las aguas naturales

Dada la importancia de los recursos hídricos para el país, el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2015) asumió el concepto de calidad de agua planteado por la Directiva Europea Marco del Agua, que lo define como aquellas condiciones que deben darse en el agua para que esta mantenga un ecosistema equilibrado y cumpla unos determinados objetivos de calidad ecológica que van más allá de evaluar los requerimientos para un uso determinado y, por lo tanto, se asume que es necesario proteger un cuerpo de agua más como un bien ambiental que como un recurso para ser explotado y que su caracterización se hace no solo en función del uso (IDEAM, 2019). En Colombia, para evaluar la calidad del agua, se deben evaluar las condiciones de calidad de esta o índice de calidad y hacer un análisis de presiones o índice de alteraciones potenciales a la calidad del agua (ver Figura 1).

Figura 1. Procedimiento que se realiza para calcular la calidad del agua (modificada de IDEAM, 2019)



La minería, al ser una industria que depende del agua (ver Figuras 2 y 3), genera desafíos para el acceso y la protección en la calidad de esta, estableciendo problemáticas y riesgos para el desarrollo del sector minero-metalúrgico. No obstante, también otorga una oportunidad significativa para catalizar y apoyar las soluciones colectivas que contribuyen a aumentar la seguridad y el saneamiento del agua para todos.

Figura 2. Piscinas utilizadas para realizar el tratamiento de aguas cianuradas de la planta de beneficio de oro (MME *et al.* 2016)



Figura 3. Trabajo de mineros artesanales utilizando el recurso hídrico (MME *et al.* 2016)



3. Factores que inciden en el deterioro del agua

La calidad de las aguas puede verse alterada tanto por eventos naturales como antrópicos, pero su principal alteración se da por los vertimientos a los cuerpos de agua, ya sea de fuentes puntuales o difusas con o sin tratamiento, generados por la intervención del ser humano al modificar o replantear la naturaleza, así como el uso de agua para abastecimiento a la población, la industria, la ganadería, la agricultura, el sector pecuario, la minería, entre otros, en las que se ven involucrados agentes contaminantes que son aportados al recurso hídrico (IDEAM, 2019).

En la actualidad, la contaminación de las aguas es uno de los factores más importantes de análisis a nivel nacional e internacional. Esta tiene su origen en diversos factores. Todas las sustancias presentes en las aguas utilizadas por una actividad humana causarían serios problemas ambientales si se incorporasen directamente a un curso de agua no contaminado. Por ello es necesario que sean tratadas antes de su vertido, con el fin de disminuir lo más posible su carga contaminante, y que estén dentro de unos límites que se consideren adecuados (Guardianes Maipú, 2017).

En el caso de la minería, los impactos más representativos sobre la calidad del recurso hídrico se relacionan con la contaminación química, el aumento de sedimentos, la disminución de caudales y la alteración del curso (López-Sánchez, *et al.* 2017).

La transformación de las fuentes de agua ocasionada por proyectos mineros puede darse por tres vías. La primera de ellas es la generación de drenajes cuando los minerales sulfurados presentes en el suelo quedan expuestos al agua y al oxígeno del ambiente. Una segunda vía de contaminación es a través de los procesos mineros cuando se utiliza durante las operaciones unitarias (ver Figura 4) y la tercera vía de contaminación es la alteración de los sedimentos en suspensión en cuerpos hídricos (ver Figura 5), muy común en la minería de aluvión. A este problema se le suma que en algunos casos los sedimentos van acompañados de metales pesados como el mercurio, el aluminio o el zinc que se bioacumulan en la cadena trófica (Corte Constitucional de Colombia, 2019).

4. Vertimientos mineros

La industria minera es vista como una de las principales responsables de la degradación de las fuentes hídricas, suelo y aire. Esto se debe, especialmente, a que quienes manejan estos proyectos aún no tienen conciencia de los problemas ambientales que pueden ocasionar los tipos de vertimientos que se generan y

el daño irreversible que se puede causar a los cuerpos de agua que los reciben, como subproducto de esta actividad.

Dentro de la minería aurífera colombiana, el recurso hídrico puede estar afectado por el vertimiento de los frentes de explotación, por el uso de las sustancias contaminantes, como las derivadas de los hidrocarburos, grasas, aceites, explosivos (Anfo, indugel permisible y plus, pólvora blanca, etc.) y, al mismo tiempo, en la etapa de beneficio los vertimientos pueden contener elementos, compuestos químicos y sustancias contaminantes, como mercurio, cianuro, aceite, ácido nítrico, acetato de plomo, entre otras.

Por su parte, la minería de carbón también genera un impacto sobre el recurso hídrico debido a que, además de generar los mismos vertimientos mencionados con anterioridad, de la minería aurífera en su etapa de explotación, hay que tener presente la existencia de las aguas lluvias, que al entrar en contacto con las áreas de labor, materiales de extracción (carbón y estéril) o con estructuras construidas para el manejo de las explotaciones incorporan a sus caudales materiales suspendidos y materiales disueltos, contribuyendo de esta manera a la formación de aguas residuales de minería. Otra fracción no menos importante, pero que se presenta con menores volúmenes, son los residuos líquidos de minería provenientes de la planta de lavado de carbón cuando esta existe (ver Figura 6) (MME, *et al.* 2015a).

Figura 4. Captación de agua para trabajos mineros (MME *et al.* 2015a)



Figura 5. Trabajos de mineros ilegales donde realizan remoción de sedimentos en un río (MME *et al.* 2015a)



Figura 6. Aquí se muestra un sistema de tratamiento de las aguas en una mina aurífera (MME, et al. 2016)



5. Caracterización de los procesos mineros que generan vertimientos

Los métodos de extracción de los recursos minerales están determinados por las condiciones geológicas del yacimiento (tamaño, calidad, continuidad, geometría, inclinación, ubicación, profundidad, competencia del mineral y las rocas adyacentes, etc.), por el valor del recurso, y por las restricciones ambientales y legales prevalentes al momento del desarrollo del proyecto. Los sistemas de arranque y transporte, los procedimientos específicos para la extracción de los materiales y los equipos utilizados permiten distinguir diversos métodos de explotación. A continuación, se describe básicamente los procesos mineros en Colombia:

5.1. Minería aurífera

Proceso de Explotación

Minería Subterránea

Durante el ciclo de explotación del mineral, se llevan a cabo una serie de operaciones unitarias y auxiliares que componen este proceso que básicamente consiste en la extracción del oro que se encuentra en las vetas mineralizadas, como se muestra en la Figura 7 (MME, *et al.* 2015a).

Minería a cielo abierto

La minería aurífera a cielo abierto se presenta por lo general en depósitos de oro aluvial. Esta se puede dividir en dos tipos, una que recupera el oro de los sedimentos que van en el río y la otra el que fue depositado en terrazas aluviales de antiguos abanicos. El ciclo de explotación de una unidad de producción minera aluvial (sedimentos en el río) consta de varias etapas (ver Figura 8). Las que se muestran a continuación, resaltando que la tecnología principal con la que se realiza el dragado (draga de succión), tienen un uso y vertimiento de agua elevado (MME, *et al.* 2015b).

Figura 7. Procesos que se realizan durante la explotación del mineral en la explotación de oro de veta (MME, *et al.* 2015a)



Figura 8. Etapas de la explotación de oro aluvial en los sedimentos del río (MME, *et al.* 2015a)



Proceso de Beneficio

Minería Subterránea

Esta etapa del proceso minero es una de las más claves, debido a que la mayoría de los vertimientos se generan en esta (ver el esquema de beneficio en la Figura 9).

Es importante aclarar que dependiendo del tipo de proceso que se tenga en la planta de beneficio se generaran diferentes vertimientos con distintos contaminantes; por ejemplo, si el proceso se realiza en un circuito cerrado, el residuo derivado de la última etapa de concentración es diferente al que se produce en la etapa de cianuración. Este último viene con un contaminante peligroso adicional, como es el cianuro, por lo que requiere de una mayor atención y un sistema de tratamiento diferente. Por su parte, el de las fases de concentración trae consigo los elementos que contiene la roca de caja del mineral, una cantidad considerable de sólidos suspendidos y metales pesados.

Cuando los procesos no son continuos, se recomienda que se dirijan todos los vertimientos de las operaciones unitarias a un punto en común para formar uno solo y así facilitar la instalación de los sistemas de tratamiento. (MME, *et al.* 2015a).

Trituración: con esta operación lo que se busca es reducir el tamaño inicial de la roca hasta que este pueda tener un tamaño óptimo para pasar a la etapa de molienda.

Molienda: es una operación para reducción de tamaño de partículas. Esta operación se hace con el objetivo de aumentar el grado de liberación de los minerales de interés e incrementar el área superficial disponible para reacción química (Bustamante, M. O., 2009).

Clasificación: es una operación unitaria en la que se da la separación de un material con una distribución de tamaño de partículas determinadas en dos corrientes, en una predominan los tamaños gruesos y en la otra los finos. Se lleva a cabo con el fin de garantizar ciertas condiciones en un material para operaciones posteriores (Bustamante, M. O., 2009).

Figura 9. Etapas que se realizan en el proceso de beneficio de oro en la minería subterránea (MME, *et al.* 2015a)



Concentración: “Es la operación en la cual se eleva el tenor o concentración (en porcentaje) de una mena o mineral determinado, mediante el uso de equipos de separación. Produciéndose así la segregación de dos o más especies mineralógicas y generar una corriente enriquecida en un mineral de interés” (Bustamante M. O., *et al.* 2008). Vale la pena resaltar que esta es la etapa del proceso de beneficio aurífero que demanda un mayor consumo de agua y produce también un mayor vertimiento; sin embargo, a diferencia del generado en la etapa de cianuración, contiene menos sustancias peligrosas y, por ende, se hace más fácil su tratamiento.

Cianuración: es el proceso que utiliza la propiedad del oro de disolverse en una solución de cianuro de sodio, en presencia de oxígeno. Los minerales presentes en la ganga son insolubles en el cianuro, lo cual garantiza un mayor grado de recuperación de oro. Este proceso se lleva a cabo por medio de operación dinámica, ya que se somete a agitación en una serie de tanques (ver Figura 10) en los que el oro se disuelve formando un complejo con el cianuro, luego esta solución rica pasa al proceso Merrill Crowe, donde se recupera el oro. El vertimiento generado en esta etapa es de mucho cuidado debido a que el principal contaminante es el cianuro (MME, *et al.* 2015b).

Figura 10. Tanque donde se realiza el proceso de Cianuración (MME, *et al.* 2015a)



En la mayoría de las unidades de producción minera aurífera del país, las operaciones como fundición y quema de amalgama se hacen en sitios aparte de la planta de beneficio. En los lugares donde ejecutan lixiviación del oro mediante cianuración aplican el proceso de Merrill-Crowe para la recuperación de este (MME, *et al.* 2015b).

Proceso MERRIL CROWE: este es la última operación unitaria para la recuperación del oro y se subdivide a su vez en las siguientes etapas: clarificación, desoxigenación, precipitación de oro, filtrado, recirculación y fundición (MME, *et al.* 2015b).

Minería a cielo abierto

Las operaciones unitarias de beneficio para oro aluvial son clasificación y concentración (principalmente gravimétrica), pues a diferencia de los depósitos de vetas, el oro se encuentra libre y no asociado a sulfuros. Estas operaciones fueron descritas anteriormente.

5.2. Minería de carbón

Las operaciones unitarias dentro de la minería de carbón del país, además de tener una demanda de agua mucho más baja, tiene pocos vertimientos. Estos últimos sólo se generan durante la etapa de desagüe de las minas subterráneas y en las operaciones a cielo abierto se producen vertimiento de las aguas de escorrentía de los botaderos y frentes de explotación. Por su parte, en las etapas de beneficio solo se producen con el lavado del carbón (MME, *et al.* 2015b).

Proceso de Explotación

Minería a cielo abierto

En la minería de superficie de carbón, se llevan a cabo las operaciones unitarias que se muestran en la Figura 11. (MME, *et al.* 2015b).

En la minería de carbón a cielo abierto los vertimientos son generados por las aguas de escorrentía en infiltración de los botaderos de estéril y del frente de explotación.

Minería subterránea

Durante el ciclo de extracción de carbón, se llevan a cabo casi las mismas operaciones unitarias que en la minería de oro: arranque, cargue y transporte; sostenimiento, ventilación y desagüe (MME, *et al.* 2015a).

Figura 11. Ciclo de extracción del carbón- Minería a Cielo abierto (MME, *et al.* 2015a)



Proceso de beneficio

Minería a cielo abierto

A continuación, en la Figura 12 se muestran las etapas de beneficio del carbón, haciendo énfasis que solo la etapa de lavado genera un vertimiento (ver Figura 13).

Figura 12. Etapas que se realizan en el proceso de beneficio del carbón (MME, *et al.* 2015a)



Figura 13. Planta de lavado de carbón visitada en estudio del 2015 (MME, *et al.* 2015a)



Las operaciones unitarias son: trituración, tamizado o clasificación por tamaño, lavado, secado y mezcla de carbones. De todas estas operaciones solo el lavado genera un vertimiento: “este se realiza con el fin de disminuir el porcentaje de cenizas e impurezas para minimizar los impactos ambientales negativos asociados con la combustión del carbón. El proceso puede ser en húmedo, según tamaño y forma, o en seco, según las diferencias en densidad y fricción” (MME, *et al.* 2015b).

Minería subterránea

Las etapas de beneficio del carbón subterráneo son las mismas que para el carbón explotado mediante minería a cielo abierto.

6. Contaminantes presentes en los vertimientos

Uno de los grandes problemas al que se enfrenta cualquier país que mantenga actividades mineras es el de preservar su medio ambiente, debido a las sustancias químicas contaminantes que resultan como residuo en las operaciones mineras. Durante varios trabajos de campo, la Universidad de Córdoba, con el apoyo de

instituciones públicas, ha establecido cuáles son las sustancias contaminantes que exceden la normatividad colombiana en lo que este tema concierne.

Minería aurífera

Tabla 1. Contaminantes presentes en los vertimientos

Zona Minera	Contaminantes en las descargas
Antioquia	Mercurio, sólidos suspendidos totales, sulfuro, cianuro, arsénico, hierro, cadmio, zinc, cobre y plomo
Sur de Bolívar	Mercurio, sólidos suspendidos totales, hierro, zinc, cobre, cromo cianuro, arsénico, cadmio, plomo y sulfato
Caldas	Mercurio, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, arsénico, cadmio, hierro, plomo, zinc, cobre
Cauca	Mercurio, sólidos suspendidos totales, cianuro, cadmio, cobre, zinc, hierro, plomo
Chocó	Mercurio, sólidos totales, sólidos sedimentables, hierro

Fuente: MME, et al. 2015a.

Minería carbón

Tabla 2. Contaminantes presentes en los vertimientos

Zona Minera	Contaminantes en las descargas
Cundinamarca	Sólidos suspendidos totales, sulfatos
Boyacá	Mercurio, hierro, sólidos suspendidos totales
Amagá	Sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables

Fuente: MME, et al. 2015a.

Debemos tener en cuenta que, en Colombia, los valores límites permisibles relacionadas con vertimientos generados por las unidades de producción minera, están regidos en la Resolución 0631 de 2015.

7. Mejores prácticas para el tratamiento de los vertimientos mineros

Para proponer estrategias, acciones o tecnologías para mejorar los efluentes líquidos procedentes de minería, ha sido necesaria la revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas con trabajo de campo. Se tomó como referencia las prácticas y tecnologías a nivel nacional e internacional que estén encaminadas a optimizar el manejo de vertimientos en cada uno de los procesos mineros y establecer, así,

alternativas con mejores resultados enmarcados dentro del uso eficiente y eficaz del recurso hídrico.

Para mejorar la calidad de los vertimientos generados, se presentan las siguientes estrategias:

Control de Vertimientos
<ul style="list-style-type: none">• Los efluentes provenientes de drenajes de bocaminas o de plantas de beneficio deben ser recolectados en pozas de sedimentación (o tecnología equivalente) para reducir la concentración de sólidos suspendidos y de otros contaminantes por debajo de los LMP (GIZ y ARMA, 2014).
Prevención de drenaje ácido de mina
<ul style="list-style-type: none">• Identificar los diferentes minerales y elementos que se asocian a los depósitos y determinar si se están produciendo drenaje ácido.
Neutralización de vertimientos
<ul style="list-style-type: none">• Efluentes de minas con pH menor a 6 deben ser neutralizados. La técnica más utilizada y recomendada para este fin es la adición de cal, por su bajo costo y alta eficiencia (GIZ y ARMA, 2014).
Cumplimiento de la normatividad ambiental
<ul style="list-style-type: none">• Realizar periódicamente monitoreos de calidad fisicoquímica de los vertimientos de acuerdo con los parámetros establecidos en la Resolución 0631 de 2015.
Prevención de la contaminación de las aguas de mina
<ul style="list-style-type: none">• En explotación subterránea, evitar la entrada de agua desde la bocamina hacia el socavón.
Prevención y monitoreo del estado de las tuberías
<ul style="list-style-type: none">• Realizar inspección periódica a las tuberías de conducción de aguas desde el interior del socavón.
Homogenización de caudales de descarga
<ul style="list-style-type: none">• Se recomienda el uso de tanques de igualación de caudal, que permitan homogenizar la descarga, y no presentar rangos amplios en la calidad fisicoquímica del vertimiento.
Tratamiento de aguas domésticas
<ul style="list-style-type: none">• Implementar como mínimo trampa de grasas y un tanque séptico.

Manejo y recuperación de aguas pluviales

- Instalar sistemas de canalización y/o almacenamiento de aguas lluvias (Ministerio del Medio Ambiente y ECOCARBON, 1998).

Tratamiento de lixiviados en el botadero de estériles

- Instalar un sistema de recolección y tratamiento de las aguas de escorrentía (Ministerio del Medio Ambiente y ECOCARBON, 1998).

Sistema de reutilización de agua para humectación del carbón

Eliminación de metales pesados en los efluentes

- **Precipitación química:** La precipitación química consiste en la formación del hidróxido metálico correspondiente mediante el ajuste del pH a través de la adición de compuestos básicos como hidróxido sódico (NaOH), hidróxido cálcico (Ca (OH)₂) o cal (CaO), y es el método más ampliamente utilizado para la eliminación de metales disueltos en el agua residual (Izquierdo, 2010). Este método es empleado para la eliminación de los siguientes metales pesados: cromo, hierro, mercurio, cadmio y plomo.

Para una correcta precipitación de los metales se recomienda la aplicación de una mezcla rápida al inicio de la operación seguida de una disminución de la velocidad de agitación que favorezca la floculación. Como consecuencia de la precipitación, se forma un fango con elevadas concentraciones de metal que debe retirarse y gestionarse adecuadamente como residuo peligroso (Izquierdo, 2010).

- **Humedales artificiales:** Los humedales construidos se han clasificado en dos tipos: humedales de flujo superficial y humedales de flujo subsuperficial.
 - **Humedales artificiales de flujo superficial:** En un humedal artificial de flujo superficial, la vegetación está parcialmente sumergida en el agua, y su profundidad varía entre 1 y 4.5 metros. Este tipo de sistemas consta en general de canales o tanques con una barrera natural o artificial para prevenir la percolación del agua. Algunos de estos sistemas se diseñan de manera que haya retención completa del agua residual que se aplica a través de percolación y la evapotranspiración. Las bacterias adheridas a las plantas tratan el agua residual a medida que esta fluye a través de la vegetación y por medio de procesos físicos y químicos (Cites, R. y Tchobanoglous, G., 2000).
 - **Humedales artificiales de flujo subsuperficial**
 - **Humedales de flujo horizontal:** En este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad de agua es de entre 0,3 y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie) y con cargas de alrededor de 6 g DBO/m² día (García, J. y Corzo, A., 2008).

- **Humedales de flujo vertical:** Esta tipología de humedales fue desarrollada en Europa como alternativa a los humedales horizontales para producir efluentes nitrificados. En general los sistemas verticales se combinan con horizontales para que sucedan de forma progresiva los procesos de nitrificación y desnitrificación y se consiga así eliminar nitrógeno (García, J. y Corzo, A., 2008).
- **Carbón activado:** consiste en la construcción de una batería de columnas homogéneas de carbón activado con las cuales se puede obtener remociones superiores al 90% de elementos metálicos como mercurio, plomo, zinc, etc. Las propiedades más importantes a resaltar dentro del carbón activado para la remoción de metales pesados son (MME y UPME, 2007): 1. Capacidad de adsorción 2. Velocidad de adsorción. 3. Resistencia mecánica 4. Características reactivas 5. Distribución granulométrica.
- **Proceso de Precipitación- Cristalización:** el pH de la solución tiene un gran efecto en la eliminación de los metales pesados. El pH óptimo debe estar entre 9,0 y 9,1, para que la eficiencia en la eliminación de metales pesados se pueda lograr por encima de 92% y 95% cuando las concentraciones de metales pesados son entre 10 y 20 mg/L. Este proceso se utiliza para la eliminación de cobre, plomo, níquel y zinc en aguas residuales industriales (Zhou et al. 1999).
- **Prevención de generación de residuos peligrosos:** Los combustibles deben ser almacenados como mínimo a 100 m de cualquier cuerpo de agua fresca, con diques de contención de derrames que deberán ser construidos con materiales resistentes a los hidrocarburos. Los equipos también deben ser reparados a mínimo 100 m de cualquier cuerpo de agua. Al finalizar las estructuras de diques colocar trampas de grasa para mantener buenas condiciones de funcionamiento (FEDESARROLLO y MGE, 2014).
- **Gestión del riesgo de vertimientos:** Establecer un enfoque de gestión del riesgo hacia la prevención de la contaminación del agua, sobre cualquier cuerpo o drenaje hídrico en inmediación del proyecto (ANM, 2014).

8. Conclusiones

En la búsqueda de la optimización de los procesos mineros, en aras de hacerlos más eficientes y sostenibles con el medio ambiente, nos encontramos con una variedad de tecnologías para el tratamiento de los efluentes producidos. Estas, en su mayoría serán de ayuda para evitar la contaminación que se pueda generar durante la operación minera por estos vertimientos —como, por ejemplo, la afectación al suelo, a los cuerpos de agua, a los animales— que repercuten directamente en la salud de la población aledaña, ya que dichos cuerpos de agua contaminados pueden ser fuentes principales de consumo o actividades económicas primarias.

Las unidades de producción minera no realizan los mismos procesos unitarios, las características fisicoquímicas de los minerales varían, las sustancias químicas utilizadas no siempre son las mismas y así los contaminantes también

van a variar; por lo tanto, él o la combinación de varios tratamientos para el mejoramiento de la calidad de estas aguas residuales será específica de cada unidad de producción minera.

Existen estrategias que pueden aplicarse para la disminución de la contaminación con mercurio, siendo, en primer lugar, el tratamiento integral de los residuos mineros (sólidos y líquidos) y, en segundo lugar, la caracterización de los materiales auríferos para establecer el mejor proceso de extracción del material precioso sin utilizar la amalgamación. En este último se debe hacer énfasis, debido a que en el país se debe cumplir la normatividad establecida de eliminación del uso del mercurio en procesos extractivos mineros y actividades industriales, de acuerdo con la Ley 1658 de 2013, por lo cual en la actualidad no se debe usar este elemento.

Por último, hay que tener en cuenta el factor económico. Esto, debido a que el costo para el tratamiento de estas aguas suele resultar alto y no siempre termina siendo el más eficiente, por lo que se debe realizar un análisis fisicoquímico a las aguas residuales a tratar y al cuerpo receptor, para así poder determinar el tratamiento acorde a los contaminantes que presenta y las concentraciones de estos para que no exceda los límites permisibles establecidos en la normatividad de vertimientos mineros.

9. Recomendaciones

Con el fin de mantener las condiciones de calidad del agua, es necesario implementar estrategias tanto gubernamentales como para las personas de manera individual. Se hará énfasis en aquellas actividades y pequeños cambios que debemos realizar en las operaciones mineras que nos permitan disminuir las afectaciones que se están causando a este recurso.

- Evitar la desviación de los cauces naturales de las fuentes hídricas para el abastecimiento de agua en los entables mineros.
- Realizar una caracterización de los tipos de yacimientos, para establecer cuál o cuáles son los mejores procesos para la recuperación del mineral que le proporcionen mayores beneficios a los mineros o a las empresas mineras interesadas, con la finalidad de cumplir la legislación minero ambiental vigente en el país.
- Mejorar la calidad de los vertimientos mineros antes de esparcir a las fuentes hídricas, mediante la aplicación de tratamientos que reduzcan la carga contaminante y evitar la llegada de los residuos sólidos. Para el tratamiento de estas se propone la utilización de procesos mecánicos (físicos), biológicos y químicos que permitan eliminar los contaminantes presentes en el agua residual.

- Para la eliminación del mercurio y dar cumplimiento a los convenios internacionales a los que pertenece Colombia, es necesario que se amplíen los conocimientos técnicos para la separación eficiente de los minerales en el sector; es decir, capacitar a todas las personas que sean responsables o intervengan en cada una de las etapas del proceso en el tema tanto técnico como de los efectos ambientales y de salud que se pueden generar con la utilización de dicho elemento.
- La actividad minera no puede dejarse de lado, al momento de formular cualquier plan que involucre el ordenamiento del recurso hídrico, por lo cual es necesario que estos actores mineros sean tomados en cuenta, ya que estos pueden suministrar la información y la experiencia para establecer metas armónicas y reales de calidad de los cuerpos de agua constituidas en los PORH (Planes de ordenamiento del Recurso Hídrico) y los POMCA (Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas).

10. Agradecimientos

Los autores dan sus agradecimientos al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación y a la Universidad de Córdoba por su apoyo financiero a través de contrato 849 de 2018. Asimismo, agradecemos al Ingeniero Camilo Gómez Úsuga por sus aportes en la revisión del presente documento.

11. Bibliografía

- A. Toro, J.I. García de los Ríos-Cobo, O. Fadón, R. Cabrera y P. Acebes (2018). Impactos ambientales en minería metálica. Obtenido de: <https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/265811-Impactos-ambientales-en-mineria-metalica.html>
- Agencia de Cooperación Alemana (GIZ) y Autoridad Regional Ambiental de Arequipa (ARMA) (2014). Buenas Prácticas de Gestión Ambiental para la pequeña minería y minería artesanal. Arequipa, Perú.
- Agencia Nacional De Minería (ANM), (2014). Caja de herramientas para la implementación del plan de gestión social.
- Agencia Nacional De Minería (ANM), (2020). Tomado de <https://www.eltiempo.com/mas-contenido/impuestos-que-paga-la-mineria-en-colombia-549052>
- Bustamante, M. O. (2009). Mineralurgia. Notas de Clase. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.
- Bustamante, M. O., Gaviria, A. C., & Restrepo, O. J. (2008). Concentración de Minerales. Notas de curso. Medellín: Universidad Nacional. Facultad de Minas.

- Crites, R. y Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. Tomo 2, McGraw-Hill Interamericana, S.A. Bogotá.
- Corte Constitucional de Colombia, (2019). *Expertos Nacionales e Internacionales para Sentencia T 445 de 2016 Investigación científica y sociológica respecto a los impactos de la actividad minera en los ecosistemas del territorio colombiano*.
- FEDESARROLLO y Sector de la Minería de Gran Escala (MGE) (2014). *Minería y medio ambiente en Colombia*. Bogotá, 18 de junio de 2014. URL: <http://hdl.handle.net/11445/335>.
- García, J. y Corzo, A., (2008). *Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. URI: <http://hdl.handle.net/2117/2474>
- Guardianes Ambientales Municipalidad de Maipú, (2017). *Factores que contaminan el agua*. Tomado de <http://guardianesmaipu.gob.ar/2017/04/29/factores-que-contaminan-el-agua/>
- IDEAM (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM: 452 pp.
- IDEAM (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Instituto de hidrología, meteorología y estudio ambientales-IDEAM. Bogotá, D.C.
- Izquierdo Sanchis, Marta (2010). *Eliminación de Metales Pesados en Aguas Mediante Bioadsorción. Evaluación de Materiales y Modelación del Proceso*. Universidad de Valencia. España.
- López-Sánchez, López Sánchez, & Medina, (2017) *La prevención y mitigación de los riesgos de los pasivos ambientales mineros (PAM) en Colombia: una propuesta metodológica*. Tomado de <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/entramado/article/view/393>
- Ministerio de minas y energía (MME), Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), y Universidad de Córdoba. (2016). *Identificación y caracterización de las unidades de básicas de beneficio en 261 municipios*. http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Identificacion_Caracterizacion_Unidades_Basicas.pdf
- Ministerio de minas y energía (MME), Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), y Universidad de Córdoba. (2015a). *Incidencia real de la minería del carbón, del oro y del uso del mercurio en la calidad ambiental con énfasis especial en el recurso hídrico - diseño de herramientas para la planeación*, 663. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Ministerio de minas y energía (MME), Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), y Universidad de Córdoba. (2015b). “Guía de orientación para el minero sobre el correcto manejo de vertimientos para la minería de metales preciosos y de carbón”.
- Ministerio del Medio Ambiente y ECOCARBON, (1998). Guía ambiental minería subterránea del carbón. Santa Fe de Bogotá, D.C. Agosto de 1998. Recuperado del 26 del 10 de 2015 de: http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/gestion/guias/min_sub/contenid/medidas.htm#24.
- Ministerio de minas y energía (MME) y Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2007). Producción Más Limpia en la Minería del Oro en Colombia. Mercurio, Cianuro y otras sustancias. URI: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/921>.
- Zhou, P., Huang, J. C., Li, A. W. F., y Wei, S. (1999). Heavy metal removal from wastewater in fluidized bed reactor. *Water Res.*, 33(8), 1918–1924.

Capítulo 13

El papel de las tecnologías electroquímicas en el saneamiento de aguas residuales para su gestión sostenible

Yolanda Reyes-Vidal¹
Fabricio Espejel-Ayala¹
Irma Robles-Gutiérrez¹

1. Introducción

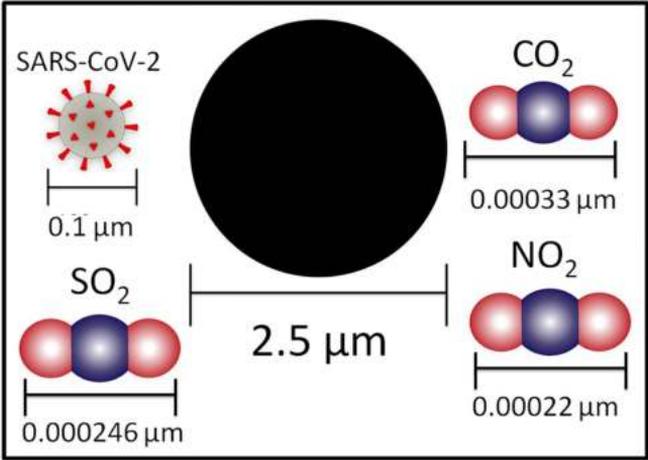
Sin duda, el año 2020 se ha convertido en un periodo de grandes retos y será recordado como un parteaguas donde surgieron nuevas formas de vivir en un mundo tan acelerado. La sociedad debe adaptarse a estos y a los venideros sucesos que traerán mayores impactos negativos al medio ambiente, a la misma sociedad y a la economía (Phillips *et al.* 2020). Si bien, el progreso significa prosperidad y satisfacción, también trae consigo efectos, como la generación de contaminación ambiental en los ecosistemas aéreos, en el suelo y en los acuíferos. Los agentes tóxicos pueden ser prácticamente invisibles (Figura 1), pero con efectos devastadores, casi en comparación con el coronavirus causante de la enfermedad del COVID-19 (Hassan Shakil *et al.* 2020). A esta problemática se suma —y no se puede dejar de lado— una situación de preocupación en nuestro planeta, como son los efectos negativos del cambio climático, relacionados con la variación del clima que perdura por un periodo prolongado y que trae consigo el aumento de la temperatura de la tierra (calentamiento global), así como una serie de manifestaciones climáticas solo vistas hace millones de años. Por ejemplo, en algunos lugares la época de lluvia significa inundaciones mientras que, en otros lugares, las sequías son severas y por largos periodos de tiempo. Estos ejemplos no dejan de ser fenómenos naturales, los cuales van desde la formación de una gota de

¹Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Parque Tecnológico Querétaro s/n, Sanfandila, Pedro Escobedo, Querétaro, C.P. 76703, México.

^{*}Autor de correspondencia, mreyes@cideteq.mx

lluvia, hasta la generación de un huracán en algún lugar del océano. Aún más, se integran a una variedad de eventos naturales y ciclos biogeoquímicos, con efectos multiplicados a todos los integrantes del planeta (Forster *et al.* 2020). Entonces surge la interrogante: ¿todos los integrantes del planeta estamos destinados a la adaptación de tales cambios o la extinción? En el caso de los seres humanos se consideran los procesos de adaptación y resiliencia, entendida como la capacidad que pueden tener para adaptarse y superar las adversidades.

Figura 1. Representación del tamaño del virus SARS-CoV-2 en comparación con algunos contaminantes atmosféricos (las imágenes no están a escala)



Así, desde hace muchos años, y por características de la especie humana, el hombre ha fomentado el quehacer científico y tecnológico partiendo de su curiosidad intrínseca. La observación de los fenómenos naturales le llevó al hombre primitivo a imaginar, en sus precarios conocimientos, el cómo podría funcionar el mundo. La observación de las estrellas le permitió predecir los sucesos naturales que se presentaban como promedio cada 365 días. Cuando se sentaron las bases de la ciencia y la filosofía, la generación de conocimiento fue tal que, de imaginar lo grande o lo más pequeño, surgieron ideas, teorías, máquinas y muchas cosas que conocemos ahora.

En la actualidad, es relativamente fácil tener acceso a fuentes de conocimiento, cientos de bases de datos y a la información de tecnologías para resolver diversos problemas. No obstante, aún existe una brecha para reducir el acercamiento de la sociedad a toda esa cantidad de información. Y, más ahora con

las nuevas formas de comunicación que se han implementado, asociadas a los protocolos de distanciamiento social por la pandemia del coronavirus. Entonces, este trabajo tiene como objetivo acercar los avances científicos y tecnológicos de tres aplicaciones de la electroquímica: los procesos de oxidación avanzada asistidos por electroquímica, la electrocoagulación y las tecnologías electroquímicas microbianas. La misión de este trabajo es que el lector cuente con una referencia accesible para conocer el papel de la electroquímica en el tratamiento de aguas contaminadas para obtención de agua de reúso o en procesos de tratamiento de agua para consumo humano. En el trabajo se proporcionarán definiciones útiles para el entendimiento de los procesos y se describirán aspectos técnicos importantes en el diseño de las tecnologías. Asimismo, se presentarán los beneficios que puede recibir la sociedad por la implementación de tales tecnologías electroquímicas en sus entornos cercanos, y algunos casos en que pueden apoyar con la disponibilidad de agua en zonas de alta marginación donde el recurso es escaso.

1.1 El CIDETEQ

El Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ) con 29 años de existencia, se ubica en el municipio de Pedro Escobedo, a 40 kilómetros del centro de Querétaro, y forma parte de la red de Centros Públicos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), una entidad federal que conduce las acciones en investigación y desarrollo tecnológico a nivel nacional. El CIDETEQ es el único Centro Público CONACYT que tiene una especialidad científico-tecnológica definida como la electroquímica, y está integrado por una comunidad comprometida en la generación de conocimiento básico y aplicado, que le permite la creación de tecnología, en tres ejes temáticos: salud, energía y agua/ambiente. Algunos de los procesos desarrollados están siendo actualmente usados en la industria de la galvanoplastia, aeronáutica y en la solución de problemáticas ambientales locales y regionales. En el CIDETEQ se considera a la electroquímica como una rama de la ciencia que analiza los fenómenos fisicoquímicos asociados a las reacciones químicas asistidas por energía eléctrica. La investigación realizada en CIDETEQ permite no solo determinar cómo “un electrón salta de un lado a otro”, sino que también genera ideas y proyectos tecnológicos, como aquellos usados para el tratamiento de aguas residuales, para la obtención de agua segura, para el tratamiento de suelo contaminado y para la generación de energía limpia, por mencionar algunos. Uno de los retos para los años siguientes es promover la apropiación del conocimiento por parte de la sociedad, haciendo que la sociedad reciba beneficios de la ciencia y tecnología desarrollada en CIDETEQ. En específico, dentro el eje temático de agua/

ambiente, se buscará que los sistemas de tratamiento de aguas permitan que las comunidades accedan a agua segura y limpia (Medel *et al.* 2020); el uso de pilas de combustible (Ledesma-García *et al.* 2007), o de celdas fotovoltaicas (Manriquez *et al.* 2006), para generar formas de energía limpia. Así, se contribuirá en uno de los temas de la agenda pública gubernamental a nivel nacional e internacional: el suministro de agua. Es decir, a los grandes retos y problemas en el país, CIDETEQ se suma a través de sus propuestas de solución para fomentar el desarrollo sustentable y sostenible. Con esto, se busca que la electroquímica se consolide como una rama de la ciencia que aporta soluciones novedosas y significativas. A nivel internacional, ese objetivo ha tenido importante presencia, ya que en el año 2019 se otorgó el premio Nobel de química al estadounidense John B. Goodenough, al británico Stanley Whittingham y al japonés Akira Yoshino, por el desarrollo de las baterías de iones de litio, una aplicación electroquímica para la obtención de energía. Para enfocar el término electroquímica, este se considera como la rama de la química que se dedica a estudiar las relaciones que existen entre la química y los fenómenos eléctricos, especialmente dadas por reacciones que ocurren en la superficie de un conductor eléctrico por la influencia de un conductor líquido.

Finalmente, retomando el compromiso que se tiene con el cuidado del planeta, en el CIDETEQ se han estudiado procesos para el tratamiento de agua. Las tecnologías existentes van desde los métodos biológicos-fisicoquímicos y, por supuesto, los electroquímicos. De tal forma que las tecnologías electroquímicas permiten atender algunos de 17 objetivos del Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU. Esta nueva agenda mundial expone que todos los habitantes del planeta en participación con los diferentes niveles de gobierno deberían contribuir a la protección del planeta y el aseguramiento de la prosperidad, así como a la erradicación de la pobreza. De manera directa, el desarrollo de los procesos electroquímicos puede incidir en el Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento, y en el Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. Tan solo como datos, que deberían crear conciencia al respecto, se tiene que la escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial y se prevé que este porcentaje aumente, porque más de 1700 millones de personas viven actualmente en cuencas fluviales en las que el consumo de agua supera la recarga y casi el 80% de las aguas residuales producidas tanto por industrias como de forma doméstica se tiran a ríos y mares, con mínimo tratamiento. Actualmente, la pandemia de la COVID-19 ha recrudecido los problemas asociados a la disponibilidad de agua, pues, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, el lavado de manos es una acción efectiva para reducir la propagación del virus; sin embargo, tres de cada diez personas no tienen acceso a agua potable y seis de cada diez personas no tienen acceso a

una instalación básica para realizar el lavado de manos, ni acceso a servicios de saneamiento e higiene. Así, por ejemplo, a través de procesos electroquímicos se pueden generar sanitizantes que limpian el agua antes de su distribución masiva a la población, y procesos que permitan el tratamiento de los efluentes para la obtención de agua de reúso. La obtención de energía principalmente de combustibles fósiles ha traído problemas de contaminación muy fuertes, como los asociados al cambio climático. Si no se cambian las formas de obtener energía a aquellas que provengan de fuentes renovables y que se consideren limpias, existe un grave riesgo de continuar contaminando gravemente el planeta. La forma energética más común, y que aún deja sin acceso a un 13% de la población, es la electricidad; sin embargo, es vital para enfrentar el desarrollo de una sociedad y más ante la situación de la pandemia. En este aspecto de producción de energía existen procesos electroquímicos acoplados a sistemas biotecnológicos que ofrecen una alternativa para la obtención de energía eléctrica y otras formas de energía, como biogás. A través de la lectura de este capítulo, el lector podrá conocer cómo se han desarrollado estos procesos.

2. La electrocoagulación

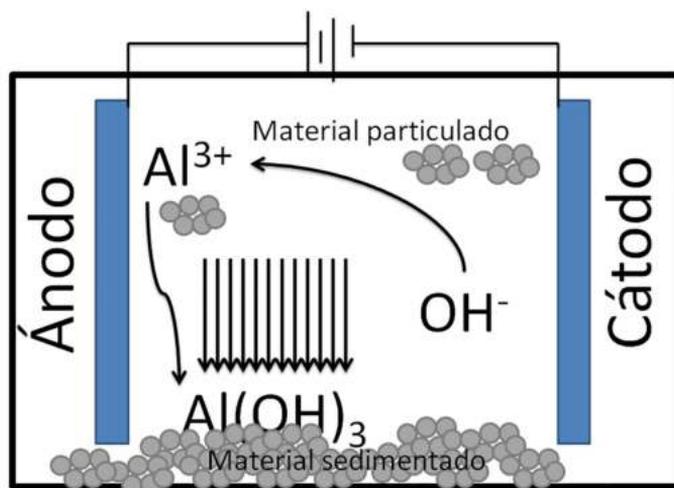
La electroquímica se deriva de dos palabras: electricidad y química. En el contexto de la física y de la química, la electroquímica se entiende como la generación de una reacción química a partir del paso de una corriente eléctrica en una celda (entiéndase como un dispositivo que contiene agua u otro solvente); o bien, la generación de una corriente eléctrica debido a una reacción química. Ambos procesos suceden con ayuda de un par de electrodos. Los electrodos pueden ser materiales metálicos constituidos por hierro, acero, aluminio o cobre, entre otros. Además, existen otros materiales que no son metálicos pero que pueden ser usados como electrodos. La característica común es que sean conductores de electricidad. De esta manera, al sumergir dos electrodos, uno llamado cátodo y otro ánodo, en agua u otro solvente que contenga sustancias químicas disueltas, puede haber flujo de corriente eléctrica (siempre que haya una fuente de corriente). La serie de reacciones que pueden llevarse a cabo es extensa y va desde la denominada química fina, pasando por fenómenos de corrosión de metales, hasta el tratamiento de aguas. El presente trabajo se centra en esto último. En específico, a continuación se describirá la tecnología de electrocoagulación.

Las aguas residuales contienen dos tipos principales de contaminantes o materia: la disuelta y la suspendida. La primera implica que por sus características químicas permite que se disuelva dándole (o no), color al agua. Por ejemplo, al disolver café soluble en agua, esta adquiere el característico color del café.

Por otro lado, se podría agregar azúcar o sal a un vaso de agua, agitar por unos segundos y hacer que se disuelva sin que se note que el agua contiene azúcar o sal. Por otro lado, la materia suspendida, como su nombre lo indica, se encuentra formando una suspensión de partículas muy pequeñas en el agua que no se ven a simple vista, pero que hacen que ésta se vuelva turbia. Por ejemplo, la leche es una suspensión de partículas de proteínas y grasas muy pequeñas en agua. El agua residual contiene una gran cantidad de material particulado y suspendido, además de disuelto, generado por los propios desechos humanos, principalmente. A este material particulado se le llama coloides, los cuales tienen mismas cargas electrostáticas. Se sabe que si dos partículas tienen la misma carga electrostática, éstas se repelen. Es decir, nunca se unirán formando una partícula más grande. En tratamiento de aguas se requiere esto último: que las partículas se aglomeren y formen una más grande para que, por efecto de la gravedad, caigan al fondo del sistema que contiene al agua residual (por ejemplo, un tanque en una planta de tratamiento).

Para lograr esto último se lleva a cabo la coagulación, que consiste en la desestabilización de las cargas electrostáticas de una partícula. Esta desestabilización de las cargas se logra adicionando una partícula de carga diferente para que ahora las partículas se junten formando una más grande, la cual se precipitará separándose del agua. Tradicionalmente, en tratamiento de aguas se suelen usar sales de hierro o aluminio para el tratamiento de aguas residuales o para potabilización, respectivamente. Sin embargo, este proceso implica la generación de las sales mencionadas, su transporte y dosificación en las plantas de tratamiento. Todo lo anterior presenta una serie de desventajas, así como costos adicionales al tratamiento ocasionado por el transporte de las sales utilizadas. Es aquí cuando la electrocoagulación tiene una ventaja respecto a la coagulación convencional (Vong y Garey, 2014). En la electrocoagulación las sales de hierro o aluminio se generan *in situ*, es decir, en el lugar donde se realiza el tratamiento del agua. En este caso, un electrodo de aluminio o de hierro se disuelve cuando la corriente eléctrica pasa por este. De esta manera, el electrodo comienza a liberar los denominados iones del material que lo constituyen (hierro o aluminio). Debido al desgaste del electrodo, a este se le denomina electrodo de sacrificio. En el otro electrodo también se generan sustancias químicas llamadas iones OH, los cuales interactúan con el aluminio, o hierro, para formar hidróxidos que permiten la generación de partículas más grandes ya descritas y mejor conocidas como flóculos. Por último, estos flóculos precipitan al fondo (sedimentación) logrando su separación del agua (Figura 2).

Figura 2. Representación del proceso de electrocoagulación con un electrodo de aluminio



3. Procesos electro-Fenton

El proceso Fenton se basa en la generación de una especie química altamente oxidante, el radical hidroxilo ($\bullet OH$), que se obtiene como producto de la reacción del promotor hierro (II) con peróxido de hidrógeno (H_2O_2). El hierro facilita el rompimiento de la molécula de peróxido de hidrógeno, con lo que se obtiene el radical $\bullet OH$, cuyo potencial de oxidación está sólo por debajo del agente oxidante flúor, pero con la ventaja de que los productos obtenidos son menos tóxicos.

El peróxido de hidrógeno, comúnmente conocido como agua oxigenada, es una sustancia tóxica y corrosiva. Una de las alternativas para obtener el peróxido de hidrógeno *in situ* es mediante la reacción electroquímica de reducción de oxígeno, al imponer en un cátodo la energía necesaria para promover esta reacción. Esta opción facilita el proceso Fenton, al tener disponible el reactivo, con lo que se reduce el riesgo de manipularlo. Cuando el peróxido de hidrógeno se genera por esta vía, y se combina con hierro, el proceso ahora se conoce como electro-Fenton, y ha sido foco de interés de distintos grupos de investigación en México y en el mundo.

La reacción electroquímica consiste en imponer una diferencia de potencial en un par de electrodos que se encuentren inmersos en una solución conductora, mejor conocida como electrolito, lo que facilita el transporte de electrones. Esta diferencia de potencial promoverá que el oxígeno presente en el electrolito se reduzca a peróxido de hidrógeno en la superficie del cátodo. Paralelamente, ocurre

la oxidación del agua en el ánodo. Las reacciones electroquímicas permiten que al imponer una diferencia de potencial específica se favorezca la reacción de interés, esto se logra conociendo el sistema, con estudios electroquímicos previos (García-Rodríguez *et al.* 2016; Peralta-Hernández *et al.* 2006, 2005). El proceso electro-Fenton ha sido ampliamente utilizado para investigar la degradación de contaminantes presentes en agua, estudiando los parámetros que interfieren en el proceso, así como distintas configuraciones de reactores, y diversos contaminantes (Robles *et al.* 2017). Entre los parámetros identificados de mayor importancia, destaca en primer lugar el pH del agua. Es bien conocido que el proceso Fenton presenta mejores eficiencias en pH entre 3-5, con lo que se mantiene el hierro en solución, ya que a mayores valores de pH puede precipitar y formar lodos, que debieran disponerse de manera adecuada después del tratamiento. Por otro lado, se ha observado en innumerables reportes de la literatura que el proceso electro-Fenton es altamente eficiente en sistemas sin flujo; sin embargo, con el fin de implementar el proceso en sistemas reales, debería funcionar adecuadamente en sistemas con flujo, y con ello ser más viable técnicamente.

Además de lo anterior, es de suma importancia el material del electrodo donde se produce el peróxido de hidrógeno. Materiales conductores como metales preciosos se han empleado con éxito en la reducción de oxígeno; sin embargo, el foco de atención se ha centrado en materiales de costos más accesibles, que presenten adecuada conductividad electrónica y por tanto sean susceptibles de soportar la reacción electroquímica, destacando para este fin los materiales carbonosos. Los materiales carbonosos comerciales se encuentran disponibles en una gran variedad de presentaciones, desde carbón vítreo, grafito, tela, fieltro, espumas, e incluso carbón activado. Se sabe que las estructuras atómicas mayormente ordenadas, como el carbón vítreo, permiten mayores eficiencias, aunque también ha sido posible encontrar métodos para mejorar las propiedades conductoras de los materiales carbonosos cuyas estructuras atómicas son poco ordenadas. Este método consiste en dar un pretratamiento al material carbonoso con agentes ácidos, lo que promueve la formación de grupos funcionales superficiales oxigenados, lo que ayuda a producir peróxido de hidrógeno. Para este fin, se ha logrado con éxito la implementación de telas de grafito previamente tratadas en una solución ácida al 10% (Zárate-Guzmán *et al.* 2018). Con este material como cátodo ha sido posible alcanzar concentraciones de peróxido de hidrógeno superiores a los 100 mg/L en sistemas sin flujo, mientras que en sistemas con flujo, ya sea en modo continuo o recirculación, la eficiencia disminuye al reducir el tiempo de residencia, pero esto no ha representado un problema al modular la concentración de hierro en el sistema. Otro material carbonoso que se ha implementado con éxito es el carbón activado, este material es el mejor adsorbente

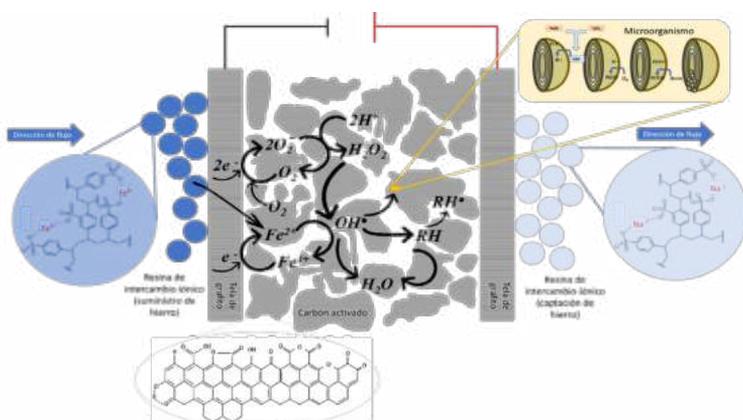
por naturaleza, al tener una elevada área superficial (Bañuelos *et al.* 2015, 2014, 2013; Robles *et al.* 2020b)

Relacionado con lo anterior, la dosis de concentración $H_2O_2:Fe$ ha sido otro parámetro de interés, aunque se ha encontrado que una relación 10:1 favorece la eficiencia del proceso, pero hay que destacar que esto depende fuertemente de la sinergia entre todos los factores. Así, el hierro es susceptible de precipitar en niveles de pH superiores a 5, con el objeto de que esto no represente una limitante. En el grupo de investigación se han implementado resinas de intercambio iónico. Estas resinas permiten retener el hierro en el sistema, de este modo se suministran de manera constante (García-Rodríguez *et al.* 2017; Ramírez *et al.* 2010). En sistemas con flujo se pretende, además, evitar la liberación de hierro al agua tratada. Con este enfoque se observaron excelentes resultados al colocar un empaque con resina de intercambio iónico en la entrada (el que suministra), y otro empaque con resina a la salida (el que retiene); con esto se asegura que se mantiene el hierro dentro del sistema (Fernández *et al.* 2018). Una mejora adicional, se vio al invertir el sentido de flujo después de un tiempo calculado específicamente, para retener el hierro dentro el sistema, y al mismo tiempo fue necesario intercambiar la polaridad de los electrodos; es decir, que el peróxido de hidrógeno se genere en el electrodo opuesto, por períodos alternados de tiempo (Robles *et al.* 2020a). Complementario a lo anterior, es importante mencionar que la transferencia electrónica se facilita por medio del uso de un electrolito (solución salina), que debe tener una conductividad electrónica, por lo que se utilizan sales que ayudan en mejorarla. Esto no representa un problema en sistemas de agua real, ya que se ha visto que las aguas residuales presentan una conductividad que es apta para los sistemas electro-Fenton, los valores rondan entre 500 a 1500 $\mu S/cm$, que se asocian a la presencia de sólidos disueltos.

Con el fin de comprender el efecto que tienen los factores que intervienen en el proceso Fenton, el grupo de trabajo ha utilizado soluciones de agua colorida (colorantes sintéticos), con lo que fue posible validar la eficiencia del proceso. Una vez que se validó la eficiencia del proceso con colorantes, un avance en el tema ha sido la implementación de soluciones sintéticas de compuestos emergentes como triclosán, las eficiencias superan el 90% (García-Espinoza *et al.* 2019). Otro estudio complementario donde se trató agua residual sintética de tipo doméstica, que contenía microorganismos patógenos como *E. coli* y huevos de helmintos, permitió validar la eficiencia del proceso electro-Fenton en la desinfección de agua residual, al lograr la completa inactivación de los patógenos antes mencionados (Robles *et al.* 2020a). Una imagen representativa de los sistemas utilizados se puede ver en la Figura 3.

Por otro lado, al utilizar agua residual real el reto ha sido mayor, ya que se ha observado que la carga orgánica afecta el proceso al fijarse en la superficie del electrodo, lo que limita su eficiencia. Un estudio reciente con agua residual real proveniente de la industria tequilera permitió entender el efecto que tiene la materia orgánica. Su composición limita la eficiencia y, por ende, se requiere en principio una mayor energía para reducir el oxígeno. Aún con esta limitante se lograron eficiencias de degradación superiores al 85% mediante el proceso electro-Fenton (Castillo-Monroy *et al.* 2020).

Figura 3. Representación de componentes que integran un sistema electro-Fenton, adaptado de Robles *et al.* 2020a



Como se ha expuesto anteriormente, en el CIDETEQ se ha estudiado el proceso electro-Fenton, desde lo más fundamental, hasta aplicaciones en sistemas para el tratamiento de agua real. El avance más reciente es el desarrollo de un sistema de tratamiento de agua real sanitaria, que incorporó un proceso electro-Fenton a un sistema de pretratamiento biológico, en un prototipo descentralizado y autónomo, que no requiere conexión al drenaje ni a la red eléctrica. El pretratamiento biológico se encarga de degradar la materia orgánica, mientras que el proceso electro-Fenton se encarga de la desinfección, con lo que se obtiene agua que puede ser reutilizada en el funcionamiento del sanitario. Este desarrollo tecnológico, que se ubica en un nivel 5 de TRL (nivel relativo de la tecnología, por sus siglas en inglés), permitió incorporar procesos en un módulo independiente que pretende ser utilizado en lugares que no cuentan con acceso a drenaje (para más información, puede consultar: <https://www.youtube.com/watch?v=53bzb69IYWM&t=176s>).

A partir de lo antes mencionado, es posible resaltar que el estudio de proceso electro-Fenton ha permitido comprender que los factores que intervienen están fuertemente relacionados entre sí; es decir, no es conveniente separar la contribución de cada uno y por tanto decir que uno de ellos es más importante que otro. Por ejemplo, se conoce que el pH ácido promueve mayores eficiencias, pero si se controla la forma en que se dispone del hierro en el sistema, es posible lograr eficiencias igualmente elevadas en sistemas con agua a pH 7.

Otro reto identificado ha sido el uso de agua real. Aunque se simulen las condiciones del agua mediante la incorporación de compuesto químicos, se ha visto que al “validar” las condiciones identificadas como óptimas en agua sintética, la eficiencia no es la misma. Esto se asocia a la presencia de altas concentraciones de materia orgánica de composición variada, que implica un mayor reto para degradarla. Las altas cargas orgánicas limitan la eficiencia del sistema y, por tanto, la reacción electroquímica se ve limitada y menos eficiente. La alternativa más simple a este problema es dar un pretratamiento al agua real, y así se considera que los sistemas electroquímicos resultan más convenientes como tratamiento de tipo terciario, y de desinfección.

4. Tecnologías electroquímicas microbianas

La biotecnología es una disciplina que respalda grandes descubrimientos científicos, a través del uso de microorganismos (bacterias, hongos, algas, nemátodos) o unidades biológicas (plantas, proteínas, enzimas, virus, material genético) para la obtención de productos que permitan satisfacer demandas de la sociedad. Esta disciplina ha contribuido desde la antigüedad a la producción de vino y cerveza, pasando por el descubrimiento de la penicilina hasta los avances modernos en genética y cientos de procesos para la obtención de productos, como los bioenergéticos, desarrollo de bioprocesos para el tratamiento de residuos en agua, aire o suelo, y recientemente las vacunas para combatir al SARS-CoV-2. Además, en los últimos años se han multiplicado las áreas multidisciplinarias, en las que se hace uso de las ventajas de las células vivas en varias aplicaciones científicas para ofrecer productos novedosos e innovadores. Así, el campo de la electroquímica ha venido incorporando a microorganismos, proteínas, enzimas y material genético (ADN) para catalizar las reacciones electroquímicas en los electrodos o en una celda electroquímica; por ejemplo, para el diseño de biosensores que permitan la detección de parámetros asociados a enfermedades como la glucosa en el control de la diabetes, o la integración de plataformas miniatura para la obtención de dispositivos alimentados con fluidos corporales, o el desarrollo

de sensores para transmitir en lugares remotos usando corriente producida por microorganismos adaptados a condiciones extremas (Rabaey y Verstraete, 2005).

El primero en observar un fenómeno electroquímico por acción de microorganismos fue Potter, en el año de 1910, cuando observó que la bacteria *Escherichia coli* podía completar su ciclo metabólico sobre un electrodo. Años después, se construyó el primer dispositivo que integró una celda electroquímica y el desarrollo de una biopelícula de microorganismos sobre los electrodos, recibiendo el nombre de celda de combustible microbiana. Durante la década de 1960, los fenómenos de respiración metabólica microbiana, acoplados a un electrodo como receptor de electrones, fueron estudiados con más detalle en el contexto del proceso de la corrosión biológica. A mediados de los años 90, se integran principalmente a las celdas de combustible microbianas y a las celdas de electrolisis microbiana, en los denominados sistemas bioelectroquímicos (SBE), para atender dos de los problemas ambientales de mayor impacto: tratamiento de efluentes y energía. En el primer punto, se busca la provisión de agua segura sin elementos tóxicos para la salud de quien la consume, así como la obtención de agua tratada para su reuso. Mientras tanto el segundo aspecto se refiere a la generación de diversas formas de energía limpia y renovable. Este enfoque parece ser el más prometedor para los SBE: la producción de energía sostenible y tratamiento de aguas residuales (Arends *et al.* 2012; Logan *et al.* 2006).

Actualmente, la International Society for Microbial Electrochemistry and Technology (ISMET), donde se encuentran agrupados los principales investigadores sobre el tema, reconoce que “Tecnologías Electroquímicas Microbianas (TEM)” del término en inglés “Microbial Electrochemical Technology” es el nombre adecuado para nombrar al conjunto de tecnologías que integran a la biotecnología y la electroquímica para ofrecer una nueva plataforma de procesos que permitan la obtención de diversos productos en campos como: la electroquímica microbiana, la bioelectroquímica, la electromicrobiología, y la electrobiotecnología, entre otros.

Para explicar a las TEM, podemos recurrir a los dos primeros sistemas integrados que fueron reconocidos dentro de este campo: las *celdas de combustible microbianas* (CCM) y las *celdas de electrolisis microbianas* (CEM). Estas configuraciones tienen como base una celda electroquímica con dos electrodos (ánodo y cátodo), que pueden usar la imposición de una diferencia de potencial en el caso de las CEM; o bien, estar conectadas a una resistencia para las CCM. Los materiales y diseño de los electrodos son variables de alta relevancia, incluyendo materiales de diversa naturaleza, como metales (oro, plata, cobre, acero inoxidable) hasta materiales de base carbón (feltro, tela) y algunos adicionados con nanopartículas o recubrimientos de platino. En el caso de los diseños, pueden ser materiales en placa, hilos, varillas, cepillos, o diseños especiales para soportar el

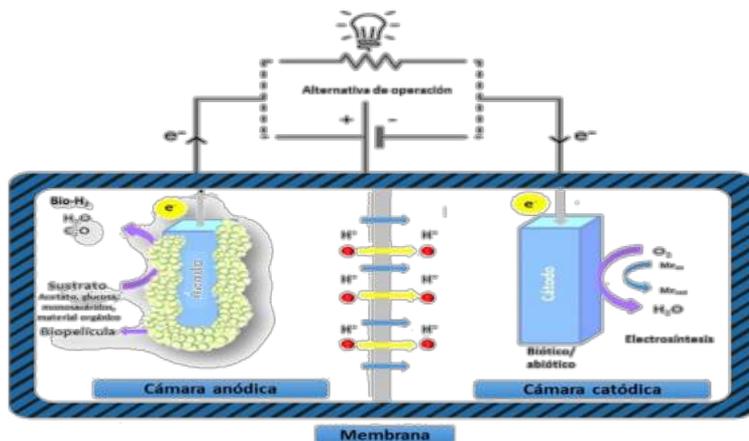
crecimiento microbiano. La celda electroquímica convencional usa una solución conductora o electrolito, pero en estas configuraciones (TEM) en vez de esta solución se pueden usar aguas residuales o aguas que presenten compuestos tóxicos susceptibles de removerse. Este cambio es una de las principales ventajas señaladas para las TEM, porque las aguas “sucias”, colocadas al inicio del proceso en la celda, pueden convertirse en “aguas tratadas” debido a la disminución en los parámetros o remoción de los componentes (Logan *et al.* 2006; Logan y Rabae, 2012).

La disposición de los electrodos (ánodo y cátodo) dentro de la celda electroquímica permite diferenciar entre la cámara anódica y la cámara catódica, que pueden estar separadas por una membrana intercambiadora de iones o un puente salino; o bien, pueden ser celdas de una sola cámara al no existir separación en las mismas. En ambas configuraciones es muy importante resaltar que las reacciones electroquímicas son promovidas (catalizadas) por la presencia de microorganismos que se adhieren a la superficie de los electrodos, a través de la formación de una biopelícula. Esta biopelícula está formada por compuestos llamadas polisacáridos, que son excretados por los mismos microorganismos para establecer ambientes que les permitan desarrollar sus funciones metabólicas primarias, como la respiración celular. Así, por ejemplo, dependiendo del tipo de microorganismo y productos que se deseen obtener, la cámara anódica puede permanecer en condiciones anaerobias (sin oxígeno) para la producción de biogás, mientras que la cámara catódica puede tener presencia de oxígeno y por tanto la obtención de agua e hidrógeno (cuando las cámaras están separadas). Algunas configuraciones han acoplado cámaras parcial o totalmente abiertas que permiten el establecimiento de consorcios microbianos en las diferentes zonas de la celda y, por tanto, la presencia de microorganismos aerobios o anaerobios y sus variantes fisiológicas (Logan *et al.* 2006).

Considerando los productos obtenidos en las diferentes configuraciones de TEM, especialmente aquellos enfocados al área ambiental, se tiene la obtención de formas de energía renovable y limpia como hidrógeno, biogás y bioelectricidad. Esta última forma de energía es considerada una de las más atractivas en el campo científico de la electroquímica microbiana porque surge del establecimiento de diversos microorganismos que encontraron en las superficies de los electrodos un aceptor de electrones similar al que naturalmente están acoplados, como el oxígeno o formas iónicas como los nitratos o sulfatos. La superficie de los electrodos, al ser conductiva, puede recoger los electrones y llevarlos por el circuito externo (conectado a una resistencia) hasta la otra cámara. Así, este flujo de electrones es considerado una forma de electricidad. Aunque es necesario integrar otros dispositivos a las TEM para recolectar la electricidad producida, dicha forma energética resulta bastante interesante porque se puede considerar

limpia y renovable, al obtenerse por la participación de microorganismos que están produciendo electrones de manera natural y en algunos casos, alimentándose de sustratos sin costo asociado y que están presentes en aguas residuales (Mohanakrishna *et al.* 2021) (Figura 4).

Figura 4. Configuración y variables en la tecnologías electroquímica microbianas



El otro aspecto de alta relevancia ambiental y tecnológica es el desarrollo de procesos que, a la par de obtener formas de energía, pueden hacer un tratamiento de aguas residuales o contaminadas. Esta ventaja se obtiene al usar en vez de la solución “electrolítica” a diversos efluentes, tanto industriales como domésticos, que son usados como sustrato o “alimento” de los microorganismos establecidos en los electrodos de la celda electroquímica. Cuando los microorganismos usan los componentes de las aguas residuales hacen que los parámetros asociados a estos disminuyan y, por tanto, el carácter contaminante de los mismos. Por ejemplo, en aguas residuales de la industria de los alimentos y bebidas se encuentran altas concentraciones de material orgánico, como carbohidratos que son fácilmente incorporados al metabolismo de los microorganismos, con la consecuente formación de electrones, que se recogen en los ánodos. Así, el consumo del contenido orgánico puede verse reflejado en la disminución de parámetros como la demanda química de oxígeno, que se relaciona con la calidad contaminante del efluente. En algunos otros casos, se obtiene el ajuste de parámetros como pH, demanda biológica de oxígeno o material disuelto, que en conjunto permiten obtener efluentes que se consideran, dependiendo de la legislación que aplique, como un agua tratada y que puede ser reusada en ciertas aplicaciones (Mohanakrishna *et al.* 2021). De las más recientes aplicaciones, se

tiene que las TEM pueden usarse con éxito en la remoción de contaminantes emergentes presentes en aguas residuales, como algunos antibióticos (sulfametoxazol, tetraciclina, ceftriaxona, cefazolina), fármacos (esteroides y hormonas como 17β -estradiol, 17α -etinil-estradiol) y otros compuestos (bisfenol A, carbamazepina, diclofenaco, cloranfenicol, nitrofurazona), que otros procesos no pueden remover o degradar (Reyes-Vidal *et al.* 2021).

Hasta aquí se han expuesto las ventajas de las TEM, donde los microorganismos representan una parte vital para el desarrollo de los mismos. Según la ISMET, estos microorganismos reciben dos nombres principalmente: electroactivos y exoelectrogénicos, usando como bacterias modelo a los género *Geobacter* y *Shewanella*, con un despliegue reciente de especies del género *Pseudomonas*, que parece convertirse en el tercer modelo de microorganismos electroactivos con amplia aplicación en las TEM. Para resumir el papel de los microorganismos en las TEM, es que estos se encargan de degradar (oxidar) la materia orgánica, entregando electrones extracelularmente (Schröder *et al.* 2015). Así pues, las TEM se pueden considerar sistemas donde los microorganismos funcionan como catalizadores para convertir la energía química a energía eléctrica. Pero muchas aplicaciones de las TEM están restringidas a proyectos de investigación a escala de laboratorio, ya que la generación de corriente eléctrica es demasiado baja para diseñar un proceso viable. Para optimizar y avanzar en las técnicas electroquímicas microbianas es necesario una comprensión holística de los posibles mecanismos de intercambio de electrones extracelulares (Kracke *et al.* 2015). El conocimiento acerca de cómo algunos microorganismos tienen la capacidad de transportar sus electrones a través de la pared celular y así tener una interacción electrónica con su medio ambiente se conoce desde hace un siglo. Las posibilidades de aplicación para las interacciones electrodo-bacterias incluyen la producción de electricidad, tratamiento de residuos y aguas residuales, biorremediación y la producción de productos valiosos, abriendo así un amplio campo de investigación (Chiranjeevi y Patil, 2020; Mohanakrishna *et al.* 2021).

La electroquímica convencional distingue sus procesos, materiales y aplicaciones de la interfase con la biología utilizando el prefijo bio para indicar la participación del componente biológico. Así, entre los ejemplos de estas aplicaciones se tienen a las celdas biocombustibles, biosensores, bioelectrocatalizadores y, por supuesto, la bioelectroquímica. Para definir a la bioelectroquímica se toma en cuenta su etimología con los prefijos: bio y electro, indicando que es una rama de investigación científica para el estudio de los procesos biológicos mediante técnicas electroquímicas. En otra definición puede considerarse como la rama de la investigación científica que estudia los fenómenos eléctricos resultantes de procesos que implican partículas cargadas eléctricamente pertenecientes a

sistemas biológicos. La electroquímica microbiana es el estudio y la aplicación de la interacción entre microorganismos y conductores de electrones, representados por electrodos físicos (por ejemplo, aquellos hechos de grafito o de metales) y materiales conductores de origen natural tales como óxidos metálicos (Schröder *et al.* 2015).

En diversos ambientes se encuentran microorganismos como las bacterias que poseen la habilidad de transferir extracelularmente los electrones desde sus procesos metabólicos de respiración, ya que con el fin de adaptarse a las diferentes condiciones ambientales han desarrollado una enorme variedad de cadenas de transporte de electrones. Estas bacterias juegan un papel importante en los ciclos geoquímicos, que son fundamentales en procesos de biorremediación y están siendo altamente consideradas para los procesos bioelectroquímicos de las TEM. Algunas bacterias tienen la capacidad de interactuar con minerales sólidos, por ejemplo, Fe (III) o Mn (IV), y pueden obtener energía usando esos minerales como aceptores de electrones para su proceso de respiración (Kracke *et al.* 2015; Lovley, 2012).

5. Perspectivas

Después de lo expuesto en este capítulo, queda claro que la electroquímica es una disciplina científica con importantes contribuciones para el desarrollo sustentable y sostenible, y, por tanto, que aporta a la sociedad actual y futura. Este efecto se logrará en conjunto, con los avances científicos y tecnológicos que logre desarrollar, así como con la formación de recursos humanos altamente calificados que promuevan el uso de tecnologías limpias para el bienestar social. Hacer del agua un recurso accesible, limpio y seguro para la sociedad es un reto que los científicos que usan las herramientas electroquímicas pueden visualizar para la formación científica de las generaciones venideras. El desarrollo de procesos electroquímicos, como electrocoagulación, electro-Fenton, y la integración de microorganismos a las celdas electroquímicas representan una alternativa al tratamiento de agua, con la posibilidad de adaptarse a problemas reales como lo es la desinfección, eliminación de metales pesados, y eliminación de materia orgánica disuelta. Si bien el desarrollo de investigación básica ha permitido conocer con mayor detalle los sistemas electroquímicos, el siguiente paso es incrementar el nivel relativo de la tecnología (del término en inglés “Technology Readiness Level, TRL”, un concepto que permite medir el grado de madurez de una tecnología. La meta integral de los avances descritos en el presente capítulo es desarrollar productos tecnológicos a escalas prototipo e industrial.

Agradecimientos

Y.R.V. agradece el apoyo del programa de Cátedras de CONACYT. Y.R.V, F.E.A. y I.R.G agradecen al proyecto 246052 del Fondo CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética. Y.R.V. agradece a proyecto 258159 del Fondo Ciencia Básica CB-2015-01. F.E.A. agradece al proyecto 255456 del Fondo Ciencia Básica CB-2015-01. I.R.G. agradece al proyecto 285309 del Fondo Ciencia Básica CB-2016-01. Los autores agradecen a la Dra. Myriam Solís López por su valiosa revisión del capítulo.

Referencias

- Arends, J.B.A.; Verstraete, W. (2012). *100 years of microbial electricity production: Three concepts for the future*. *Microb. Biotechnol.* 5, 333–346.
- Bañuelos, J.A.; El-Ghenymy, A.; Rodríguez, F.J.; Manríquez, J.; Bustos, E.; Rodríguez, A.; Brillas, E.; Godínez, L.A. (2014). *Study of an Air Diffusion Activated Carbon Packed Electrode for an Electro-Fenton Wastewater Treatment*. *Electrochim. Acta* 140, 412–418.
- Bañuelos, J.A.; García-Rodríguez, O.; Rodríguez-Valadez, F.J.; Manríquez, J.; Bustos, E.; Rodríguez, A.; Godínez, L.A. (2015). *Cathodic polarization effect on the electro-Fenton regeneration of activated carbon*. *J. Appl. Electrochem.* 45, 523–531.
- Bañuelos, J.A.; Rodríguez, F.J.; Manríquez, J.; Bustos, E.; Rodríguez, A.; Cruz, J.C.; Arriaga, L.G.; Godínez, L.A. (2013). *Novel electro-fenton approach for regeneration of activated carbon*. *Environ. Sci. Technol.* 47, 7927–7933.
- Castillo-Monroy, J.; Godínez, L.A.; Robles, I.; Estrada-Vargas, A. (2020). *Study of a coupled adsorption/electro-oxidation process as a tertiary treatment for tequila industry wastewater*. *Environ. Sci. Pollut. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11031-4>
- Chiranjeevi, P.; Patil, S.A. (2020). *Strategies for improving the electroactivity and specific metabolic functionality of microorganisms for various microbial electrochemical technologies*. *Biotechnol. Adv.* 39, 107468.
- Fernández, D.; Robles, I.; Rodríguez-Valadez, F.J.; Godínez, L.A. (2018). *Novel arrangement for an electro-Fenton reactor that does not require addition of iron, acid and a final neutralization stage. Towards the development of a cost-effective technology for the treatment of wastewater*. *Chemosphere* 199, 251–255.
- Forster, P.M.; Forster, H.I.; Evans, M.T.; Gidden, M.J.; Jones, C.D.; Keller, C.A.; Lamboll, R.D.; Le Quéré, C.; Rogelj, J.; Rosen, D.; Schleussner, C.F.;

- Richardson, T.B.; Smith, C.J.; Turnock, S.T. (2020). *Current and future global climate impacts resulting from COVID-19*. Sci. Rep. 10, 913-919.
- García-Espinoza, J.D.; Robles, I.; Gil, V.; Becerril-Bravo, E.; Barrios, J.A.; Godínez, L.A. (2019). *Electrochemical degradation of triclosan in aqueous solution. A study of the performance of an electro-Fenton reactor*. J. Environ. Chem. Eng. 7, 103228.
- García-Rodríguez, O.; Bañuelos, J.A.; Godínez, L.A.; Arredondo Valdez, H.C.; Zamudio, E.; Ramírez, V.; Rodríguez-Valadez, F.J. (2017). *Iron Supported on Ion Exchange Resin as Source of Iron for Fenton Reagent: A Heterogeneous or a Homogeneous Fenton Reagent Generation?* Int. J. Chem. React. Eng. 15, 0026.
- García-Rodríguez, O.; Godínez, L.A.; Rodríguez-Valadez, F.J.; Bañuelos, J.A.; El-Ghenymy, A.; Brillas, E. (2016). *Use of a carbon felt-iron oxide air-diffusion cathode for the mineralization of Malachite Green dye by heterogeneous electro-Fenton and UVA photoelectro-Fenton processes*. J. Electroanal. Chem. 767, 40-48.
- Hassan Shakil, M.; Haque Munim, Z.; Tasnia, M.; Sarowar, S. (2020). *COVID-19 and the environment: a critical review and research agenda*. Sci. Total Environ. 745(25), 141022.
- Kracke, F.; Vassilev, I.; Krömer, J.O. (2015). *Microbial electron transport and energy conservation - The foundation for optimizing bioelectrochemical systems*. Front. Microbiol. 6, 00575.
- Logan, B.E.; Hamelers, B.; Rozendal, R.; Schröder, U.; Keller, J.; Freguia, S.; Aelterman, P.; Verstraete, W.; Rabaey, K. (2006). *Microbial fuel cells: Methodology and technology*. Environ. Sci. Technol. 40, 5181-5192.
- Logan, B.E.; Korneel, R. (2012). *Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies*. Science. 337, 680-690.
- Lovley, D.R. (2012). *Electromicrobiology*. Annu. Rev. Microbiol. 66, 391-409.
- Manríquez, J.; Hwang, S.-H.; Cho, T.J.; Moorefield, C.N.; Newkome, G.R.; Godínez, L.A. (2019). *Sensitized Solar Cells based on Hexagonal Dyes of Terpyridine-Ruthenium(II): Effect of the Electropolymerization of Dyes during their Performance in Solar Cells*. ECS Trans. 3, 1-5.
- Medel, A.; Treviño-Reséndez, J.; Brillas, E.; Meas, Y.; Sirés, I. (2020). *Contribution of cathodic hydroxyl radical generation to the enhancement of electro-oxidation process for water decontamination*. Electrochim. Acta 331, 135382.
- Mohanakrishna, G.; Al-Raoush, R.I.; Abu-Reesh, I.M. (2021). *Integrating electrochemical and bioelectrochemical systems for energetically sustainable treatment of produced water*. Fuel 285, 119104.
- Peralta-Hernández, J.M.; Meas-Vong, Y.; Rodríguez, F.J.; Chapman, T.W.; Maldonado, M.I.; Godínez, L.A. (2006). *In situ electrochemical and photoelectrochemical generation of the fenton reagent: A potentially important new water treatment technology*. Water Res. 40, 1754-1762.

- Phillips, C.A.; Caldas, A.; Cleetus, R.; Dahl, K.A.; Declet-Barreto, J.; Licker, R.; Delta Merner, L.; Ortiz-Partida, P.; Phelan, A.L.; Spanger-Siegfried, E.; Talati, S.; Trisos, C.H.; Carlson, C.J. (2020). *Compound climate risks in the COVID-19 pandemic*. Nat. Clim. Change. 10, 586-588.
- Peralta-Hernández, J.M.; Mejía, S.; Godínez, L.A.; Meas-Vong, Y.; Palomar, M.; Pandalai, S.G. (2005). *Fenton and electrochemical approaches for water purification technologies*. Appl. Anal. Chem. Environ. Res. 661, 101-130.
- Rabaey, K.; Verstraete, W. (2005). *Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation*. Trends Biotechnol. 23, 291-298.
- Ramírez, J.; Godínez, L.A.; Méndez, M.; Meas, Y.; Rodríguez, F.J. (2010). *Heterogeneous photo-electro-Fenton process using different iron supporting materials*. J. Appl. Electrochem. 40, 1729-1736.
- Reyes-Vidal, Y.; Pérez-García, J.; Bacame-Valenzuela, J.; Hernández-Posadas, R. (En prensa); Presencia de contaminantes tipo productos farmacéuticos y de cuidado personal en aguas residuales y las alternativas bioelectroquímicas para su remoción, En: Santacruz de León, G., Alarcón Herrera, M.T. (Eds.), **Contaminantes Emergentes En México: Perspectivas Tecnológicas y Delimitaciones Jurídicas**.
- Robles, I.; Becerra, E.; Barrios, J.A.; Maya, C.; Jiménez, B.; Rodríguez-Valadez, F.J.; Rivera, F.; García-Espinoza, J.D.; Godínez, L.A. (2020a). *Inactivation of helminth eggs in an electro-Fenton reactor: Towards full electrochemical disinfection of human waste using activated carbon*. Chemosphere 250, 126260.
- Robles, I.; Moreno-Rubio, G.; García-Espinoza, J.D.; Martínez-Sánchez, C.; Rodríguez, A.; Meas-Vong, Y.; Rodríguez-Valadez, F.J.; Godínez, L.A. (2020b). *Study of polarized activated carbon filters as simultaneous adsorbent and 3D-type electrode materials for electro-Fenton reactors*. J. Environ. Chem. Eng. 8, 104414.
- Robles, I.; Rodríguez-Valadez, F.J.; Castaño, E.; Godínez, L.A. (2017). *Study of the influence of the operational parameters on the photoelectro-Fenton performance of an industrial wastewater treatment prototype using Orange II as a model pollutant*. Sustain. Environ. Res. 27, 24-31.
- Schröder, U.; Harnisch, F.; Angenent, L.T. (2015). *Microbial electrochemistry and technology: Terminology and classification*. Energy Environ. Sci. 8, 513-519.
- Vong, Y.M.; Garey, D.G. (2014). Wastewater Treatment by Electrocoagulation, En: Kreysa, G.; Ota, K.; Savinell R.F. (Eds.). **Encyclopedia of Applied Electrochemistry**. 2117-2122.
- Zárate-Guzmán, A.I.; Manríquez-Rocha, J.; Antaño-López, R.; Rodríguez-Valadez, F.J.; Godínez, L.A. (2018). *Study of the electrical properties of a packed carbon bed for its potential application as a 3D-cathode in electrochemical processes*. J. Electrochem. Soc. 165, E460-E465.

Capítulo 14

Tecnologías adsorbentes para la gestión sostenible del agua

Nahum Andrés Medellín Castillo^{*1,5}
Verónica Ávila Vázquez²
Lázaro Adrián González Fernández¹
Raúl Ocampo Pérez³
Erika Padilla Ortega³
Roberto Leyva Ramos³
Paola Elizabeth Díaz Flores⁴
Miguel Mauricio Aguilera Flores^{2,5}
Thalía Stephanie Cadena González³

Introducción

En este capítulo se describen algunas tecnologías de tratamiento de agua que emplean materiales adsorbentes para la eliminación de diversos contaminantes del agua. Dada la importancia de este recurso natural para el desarrollo de las actividades industriales y vitales de los seres vivos, su purificación o tratamiento constituye una necesidad primordial en todo el mundo. Además, el agua debe tener cierta calidad que solo se puede conseguir, en la mayoría de los casos, con tratamiento terciarios o avanzados.

Por mucho tiempo, la adsorción ha sido impulsada por diversos autores por ser una tecnología de fácil implementación y operación, y por los bajos costos que se pueden tener en su instalación, operación y mantenimiento, por ser una tecnología sostenible. Hasta el momento, existe una gran variedad de materiales adsorbentes que se emplean o se han estudiado para la remoción de contaminantes del

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

²Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, Instituto Politécnico Nacional.

³Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

⁴Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

⁵Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

*Autor de correspondencia, nahum.medellin@uaslp.mx

agua. Diversos materiales se han empleado de manera exitosa en la purificación del agua, y otros prometen ser materiales eficientes en el tratamiento del agua.

También, se describen algunos aspectos importantes sobre la adsorción en donde se resalta la importancia de esta tecnología como parte de la gestión sostenible del agua.

La importancia del agua para la vida

Antes de abordar el tema de las tecnologías de tratamiento de agua basadas en el uso de materiales adsorbentes o procesos de adsorción es necesario considerar los temas que se describen a continuación a fin de tener un mejor entendimiento. Es importante tener una perspectiva sobre la importancia del agua y su sostenibilidad.

El agua potable, producida a partir de las fuentes de aguas dulces, es uno de los recursos fundamentales para la conservación de la biodiversidad en el planeta; además, es un recurso natural esencial para la supervivencia humana que afecta de manera directa en su calidad de vida. A nivel mundial, las aguas dulces constituyen un recurso escaso, amenazado y en peligro; y en diversos reportes sobre los balances hídricos se ha estimado que en el planeta solamente el 0.007% de las aguas dulces se encuentran disponibles para su uso directo por la población, lo que refleja que en años futuros gran parte de la humanidad tendrá problemáticas relacionadas con el agua.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha declarado que, en todo el mundo, al menos 2 mil millones de personas se abastecen de una fuente de agua potable que está contaminada, transmitiendo enfermedades como la diarrea, el cólera, la disentería, la fiebre tifoidea y la poliomielitis, principalmente. Cada día mueren alrededor de 3,900 niños a causa del contacto directo con agua contaminada, lo que constituye la segunda causa de muerte infantil en el mundo, después de las enfermedades respiratorias, por lo que la gestión del agua tendrá que mejorarse para garantizar el abastecimiento y la calidad del agua.

En el caso de México, de la totalidad de habitantes del país, el 70% vive en zonas urbanas, el 89% cuenta con servicio de agua potable, y el 77% tiene servicio de alcantarillado, lo que indica que casi la totalidad de los habitantes de las zonas urbanas cuentan con estos servicios, y quienes no disponen de ellos son las comunidades indígenas o rurales, siendo el sector más marginado y a su vez con la menor capacidad para enfrentar los problemas derivados de esta carencia. Lo anterior, refleja el gran desafío que se tiene en México y en el mundo para asegurar en el presente y en el futuro el suministro de agua potable para toda la humanidad.

Objetivos y metas de desarrollo sostenible

Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Figura 1), y sus 169 metas, inciden en las causas estructurales de la pobreza, combaten las desigualdades y generan oportunidades para mejorar la calidad de vida en un marco de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2020).

Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2020)



En este sentido, los ODS 3, 6 y 14 planteados en la Agenda 2030 son enfocados a temas de agua en los que se considera que las tecnologías de tratamiento y saneamiento juegan un papel importante para que se puedan cumplir, principalmente en los ODS de salud y bienestar, y de agua limpia o saneamiento, obteniendo un recurso de mejor calidad.

Gestión sostenible del agua

La gestión sostenible del agua (GSA) se relaciona con el equilibrio entre el medio ambiente, la economía y la sociedad, pero con un enfoque en la gestión del agua, de manera que se logre satisfacer la demanda actual del recurso hídrico para todo ser humano, sin comprometer su suministro en futuras generaciones (Russo y col. 2014). Una situación de gran preocupación en relación al agua es su disponibilidad y calidad, ya que esta es limitada en varias regiones del mundo, de tal forma que tan solo 3 de cada 10 personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros, y 6 de cada 10 carecen de acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura (Naciones Unidas, 2020), de ahí surge la

necesidad de una GSA en la que estén representados todos los usuarios en el consumo del recurso (Figura 2).

Algunas de las acciones que se llevan a cabo para la GSA en la sociedad son: la gestión de la demanda, asignación y uso eficiente del recurso en las diferentes actividades (domésticas, industriales, agrícolas, entre otras); el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías para la prevención y control de la contaminación del agua y mejora en su calidad; la gestión de recursos económicos para cubrir costos de infraestructura, distribución, suministro, tratamiento, entre otros; y una buena gobernanza fuera de intereses políticos y sociales (Russo y col. 2014). Estas acciones permitirían, principalmente, minimizar los problemas de contaminación del agua y reducir el número de casos de enfermedades y muertes que derivan del contacto que tiene la población con agua contaminada.

Figura 2. Relación de la gestión sostenible del agua y el desarrollo sustentable



Contaminación del agua

La contaminación del agua es una problemática común y de gran importancia de atender, debido al riesgo a la salud que puede representar su consumo. Existen varias fuentes de contaminación del agua, pero se pueden clasificar en dos categorías principales: fuentes directas e indirectas. Las primeras incluyen los efluentes de industrias, refinerías, fábricas e instalaciones de disposición de residuos, entre otras; que liberan directamente desechos y subproductos nocivos en el agua sin tratarlos. Las segundas se relacionan con contaminantes que ingresan al suministro de agua de los sistemas subterráneos y de la atmósfera a través del agua de lluvia (lluvias ácidas). Los principales contaminantes del agua son, entre otros, los fluoruros, los metales pesados, y los llamados contaminantes emergentes.

Contaminación por arsénico y fluoruro

La exposición a altos niveles de arsénico se atribuye a diversas causas, como el consumo de agua contaminada o su uso en el riego de cultivos alimentarios y para procesos industriales, así como al consumo de tabaco y de alimentos contaminados. La exposición prolongada al arsénico puede causar intoxicación crónica. Los efectos más característicos son la aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel (Figura 3) (Organización Mundial de la Salud, 2018).

El arsénico inorgánico está naturalmente presente en altos niveles en las aguas subterráneas de diversos países, entre ellos las de Argentina, Bangladesh, Chile, China, Estados Unidos y México. El arsénico es una de las 10 sustancias químicas que la OMS considera más preocupantes para la salud pública, por ello definió un valor guía de 10 $\mu\text{g/L}$ para la calidad del agua potable, sirviendo de base para la reglamentación y normalización en otros países (Organización Mundial de la Salud, 2018). En México, el límite establecido es de 25 ppb de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud, 2000).

Figura 3. Problemas de salud asociados con el consumo de arsénico y fluoruro

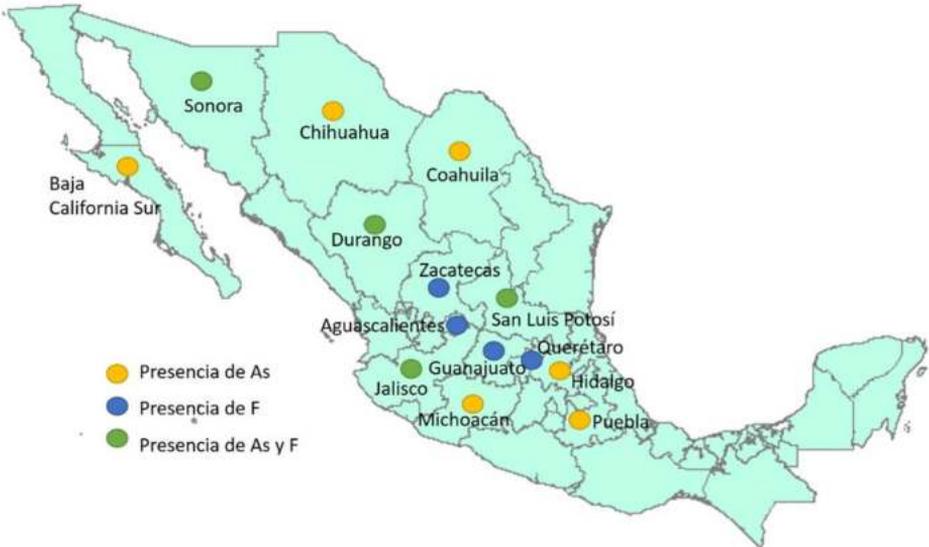


La contaminación del agua destinada al consumo humano por fluoruros es un problema mundial relevante que se presenta en varias regiones de Asia, Norte de África, China y México (Zendehdel y col. 2017). El nivel recomendado de fluoruros en el agua potable debe estar entre 0.8 y 1.2 mg/L, pero cada localidad decide sobre el nivel apropiado para su población, ya que depende de las condiciones climáticas, el consumo de agua y fluoruro a través de otras fuentes. La OMS (2006) estableció que el límite superior recomendado en el agua potable es de 1.5 mg/L y no debe superar los 4 mg/L. En México, el límite permisible en agua para uso y consumo humano es de 1.5 mg/L (Secretaría de Salud, 2000).

El consumo de agua con una baja concentración entre 0.5 y 1.5 mg/L ayuda a la prevención de la caries dental y a la mineralización de ciertos tejidos; pero

por debajo de 0.5 mg/L, la incidencia de caries aumenta considerablemente. La fluorosis dental puede ser ocasionada por la ingesta de agua con concentraciones entre 1.5 y 4.0 mg/L y se caracteriza por un manchado moteado del esmalte dental (Figura 3). La fluorosis esquelética tiene consecuencias más serias y es causada por un prolongado consumo de agua con altos niveles de flúor (entre 4 y 15 mg/L) (Qasemi y col. 2018). En la Figura 4 se pueden observar los estados del país que presentan problemas de contaminación por la presencia de fluoruros y arsénico en fuentes de agua.

Figura 4. Entidades federativas de México que presentan problemas de contaminación por la presencia de Flúor (F) y Arsénico (As) en fuentes de agua



Contaminación por metales pesados

Bajo ciertas condiciones ambientales, los metales pueden acumularse a niveles tóxicos y causar daños al ambiente y a la salud. De los metales más usuales, el mercurio, el plomo, el cadmio y el cromo se consideran tóxicos; mientras que otros, como el cobre, el níquel, el cobalto y el zinc, no tanto, pero su uso extenso y niveles crecientes en el medioambiente son un grave problema. Los radionúclidos, como el uranio, poseen una alta toxicidad y radioactividad, y representan una grave amenaza, incluso en pequeñas concentraciones. Las especies metálicas movilizadas y liberadas al medio ambiente por las actividades tecnológicas de los seres humanos tienden a persistir indefinidamente, circulando y even-

tualmente acumulándose a lo largo de la cadena alimentaria, lo que representa una seria amenaza para el medio ambiente, los animales y los seres humanos (Vijayaraghavan y Yun, 2008). De allí la importancia de poderlos eliminar adecuadamente de los cuerpos de agua.

Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes suelen aparecer en aguas residuales, ríos y acuíferos. Las fuentes de emisiones son variadas, siendo las principales la agricultura, la ganadería y una gestión inadecuada de los residuos tóxicos por parte de la actividad humana. Su presencia en el agua no es algo nuevo, pero sus efectos sobre el ser humano y la biodiversidad no se han conocido hasta los últimos años. Entre estos contaminantes se encuentran (Peña-Guzmán y col. 2019): medicamentos; pesticidas o plaguicidas; productos de higiene personal (perfumes, protectores solares, maquillaje); nanopartículas de plata, oro y óxidos metálicos; drogas ilegales; disruptores endocrinos; aditivos industriales; y microplásticos.

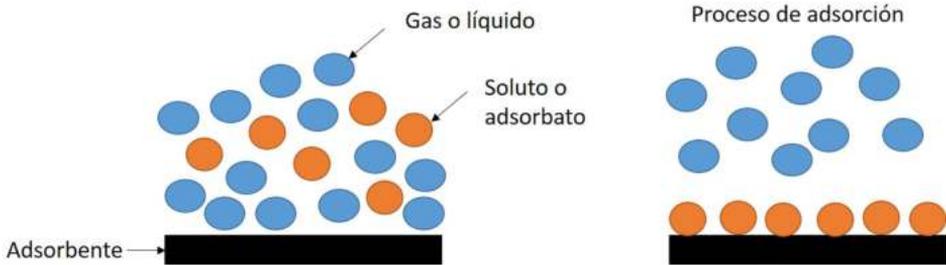
Legislación o normatividad

En varios países se están introduciendo regulaciones ambientales más estrictas con respecto a los contaminantes que se descargan en agua. Las guías de la OMS para la calidad del agua de consumo son consideradas la herramienta principal para la elaboración y actualización de las normas nacionales. En México, se encuentran vigentes normas y leyes que establecen los límites admisibles de contaminantes y requisitos sanitarios que deben poseer las aguas según su uso. Específicamente, la NOM-127-SSA1-1994 es la que regula las características bacteriológicas, físicas y organolépticas, químicas y radioactivas del agua para consumo humano (Secretaría de Salud, 2000). Esta norma es la más importante, y de mayor uso en todos los organismos operadores del país, ya que regula los parámetros de calidad en agua potable. La salud pública es de suma importancia y cumplir con la regulación de esta norma debe ser un trabajo de gestión entre los distintos organismos de la administración.

Adsorción

La adsorción es un fenómeno superficial que involucra la acumulación preferencial de una sustancia (adsorbato o soluto) contenida en un líquido o gas sobre la superficie de un sólido (adsorbente), normalmente poroso (Figura 5).

Figura 5. Esquema representativo del proceso de adsorción



Importancia de la adsorción. Revistas y asociaciones científicas

Las tecnologías basadas en procesos de adsorción son cada vez más utilizadas y generan una gran cantidad de investigaciones e interés por la comunidad científica, tanto internacional como en México. En ese sentido, hay muchas revistas de alto impacto y prestigio, así como asociaciones que se dedican a publicar e investigar sobre esta temática. Más de 100 revistas en todo el mundo se dedican, por completo o en su mayoría, a la publicación de resultados de investigaciones alrededor de la adsorción (Figura 6).

Figura 6. Ejemplos de revistas con publicaciones en temas de adsorción. Adsorption (Springer) y Adsorption Science and Technology (SAGE)



En México, por ejemplo, la temática es de gran interés para la comunidad científica. Tanto es así, que en diversas revistas de química ambiental, analítica e ingeniería química dedican muchos espacios a este particular. Las revistas como el *Journal of the Mexican Chemical Society* y la *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, por solo citar algunas, dedican sus publicaciones a la divulgación del conocimiento científico generado en torno al tema. Además, se tiene un registro de dos asociaciones que reúnen a parte del gremio científico dedicado a la adsorción, las cuales son la Asociación Mexicana de Adsorción y la Asociación Mexicana de Carbono (Figura 7).

Adsorbentes

La búsqueda de nuevos materiales y técnicas utilizables como alternativa para el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos industriales y de minería se ha constituido como un desafío de los últimos tiempos. El incremento de la industria de manufactura y metal-mecánica exige la extracción exhaustiva de metales pesados y diversos materiales como materia prima, lo que conlleva a una elevada presencia de metales y otros contaminantes, trayendo como consecuencia que los ambientes acuáticos presenten concentraciones de éstos que exceden los criterios de calidad de agua.

Figura 7. Asociaciones mexicanas enfocadas a los procesos de adsorción



Dentro de las características fundamentales que distinguen a un buen adsorbente están su alta porosidad, su gran superficie de contacto y que presente sitios específicos de adsorción. La mayoría de los adsorbentes que se han utilizado en el control de la contaminación tienen estructura porosa, lo que aumenta el área superficial y, en consecuencia, la velocidad de adsorción. Un buen adsorbente será aquel que presente área superficial suficientemente grande y que requiera menor tiempo para alcanzar el equilibrio de adsorción, por lo que generalmente se prefieren para la eliminación de contaminantes adsorbentes con gran área superficial y alta velocidad de adsorción.

Desde un punto de vista comercial, los adsorbentes más usados son el carbón activado, zeolitas, sílica gel y la alúmina activada (Figura 8) (Leyva Ramos, 2007). La búsqueda de nuevos materiales y técnicas utilizables como alternativa para el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos industriales y de minería se ha constituido como un desafío de los últimos tiempos.

En el procesamiento de alimentos y bebidas (tales como jugos de frutas, miel, jarabes edulcorantes, aceites y grasas vegetales y bebidas alcohólicas), el carbón activado se emplea para remover color y olor. Además, es utilizado en la purificación de productos farmacéuticos, tales como antibióticos, vitaminas y esteroides, los cuales se separan del caldo de fermentación por medio de adsorción (Rodríguez-Reinoso, 1997).

Desafortunadamente, los métodos tradicionales como la precipitación, el intercambio iónico, la coagulación o la ósmosis inversa no son efectivos a bajas concentraciones del contaminante en disolución, tornándose altamente costosos y de bajo rendimiento a condiciones reales (Veglio y col. 2003).

Figura 8. Adsorbentes comerciales más usados: carbón activado, zeolitas, sílica gel y alúmina activada (de izquierda a derecha)



Estudios recientes han establecido el uso de adsorbentes alternativos que emplean materiales de origen biológico o biosorbentes como bacterias, algas y hongos, residuos industriales, agrícolas y urbanos, debido a su gran viabilidad, bajo costo y alta eficiencia de remoción. Además de las algas marinas (Figura 9), las levaduras son quizá los segundos biomateriales más prometedores dentro de los biosorbentes en función de su rentabilidad y aplicabilidad para la descontaminación de aguas residuales (Ahluwalia y Goyal, 2007).

El uso de materiales adsorbentes en diferentes aplicaciones ambientales se ha incrementado exponencialmente en los últimos años. La gran mayoría de los adsorbentes “tradicionales” tienen capacidades de adsorción muy bajas por compuestos orgánicos no ionizables y, sobre todo, por aniones, y por esta razón no se usan eficientemente en la remoción de estos compuestos en solución acuosa (Leyva Ramos, 2007).

Figura 9. Algunos tipos de algas marinas utilizadas como biomasa adsorbente



Tecnologías de tratamiento de agua que emplean adsorbentes

Entre las diversas tecnologías de purificación y reúso del agua, la adsorción es un método rápido, barato, universal y aplicable. El tratamiento del agua y su reciclaje son las mejores alternativas para obtener agua segura para las actividades cotidianas del ser humano. Para ello, existen diversos métodos, siendo los más importantes la ósmosis inversa, el intercambio iónico, la electrodiálisis y la adsorción. La adsorción se considera como universal, ya que es aplicada para la eliminación de contaminantes solubles e insolubles y biológicos con eficiencias del 90–99%. Esta tecnología puede utilizarse para la proteger la fuente del agua, la recuperación del agua potable, industrial y otros propósitos de gestión sostenible.

En la literatura existen cientos de publicaciones del empleo de materiales adsorbentes en los procesos de adsorción, de los cuales algunos están en desarrollo o se han aplicado exitosamente o en la purificación del agua. El desarrollo de adsorbentes-tecnologías de adsorción de bajo costo ha llevado a un amplio interés por la investigación en esta área. Las tecnologías de tratamiento de agua basadas en los procesos de adsorción han sido sugeridas como alternativas de fácil implementación y de bajo costo para los países en vías de desarrollo por la OMS, por lo que han sido aplicadas de manera exitosa en diversas regiones del mundo, incluyendo procesos industriales y domésticos.

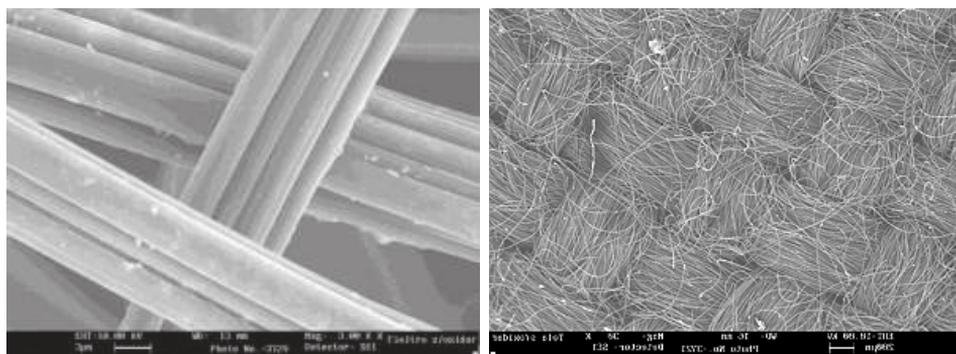
A continuación, se muestran una serie de ejemplos del uso de diversos materiales adsorbentes en la remoción de contaminantes del agua por medio de tecnologías de adsorción.

Carbones activados para su empleo en el tratamiento de agua

Los carbones activados son materiales adsorbentes muy versátiles que se pueden aplicar en agua y aire, debido a sus formas y composición química. Tiene aplicaciones diversas en la industria alimenticia, farmacéutica, química, petroquímica, minera y automotriz. En los últimos años, una gran variedad de carbones activados granulares se han usado en el tratamiento de agua y en efluentes industriales y domésticos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos. Estos materiales son excelentes adsorbentes para purificar, decolorizar, declorar y deodorizar. En la práctica, se emplean solo cinco tipos de materiales carbonáceos para la producción comercial de carbón activado a escala industrial, siendo en orden de importancia en términos de su producción: madera 130,000 toneladas al año (t/a); carbón de piedra 100,000 t/a; lignito 50,000 t/a; cáscara 35,000 t/a; y turba 34,000 t/a.

Existen diferentes formas de carbón activado. Las más usadas son los carbones activados granulares, seguidos por los carbones en polvo, pero recientemente se ha desarrollado una nueva presentación de carbón activado: las fibras de carbón activado (FCA) (Figura 10). Las FCA son formas modernas de materiales porosos de carbón y tienen algunas ventajas sobre las formas tradicionales. Las FCA se desarrollaron en los años 70, carbonizando fibras de rayón. Estas son excelentes adsorbentes gracias a su baja caída de presión, y a su elevada área específica interna, flexibilidad mecánica y alta capacidad de adsorción.

Figura 10. Fibras de carbón activado empleadas en el tratamiento de agua



Las FCA tienen varias ventajas en comparación con los carbones granulares, ya que tienen una superficie interna totalmente microporosa (poros muy pequeños) y además son materiales conductores de la electricidad. Se han utilizado para remover contaminantes del agua, tales como: cadmio, plomo, zinc, colorantes, pentaclorofenol (plaguicida) y algunos contaminantes emergentes como residuos de fármacos. Las capacidades de adsorción que se han determinado en estas formas de carbón activado oscilan entre los 10 y 15 mg/g para metales pesados y de alrededor de 500 mg/g para compuestos orgánicos. Particularmente, la remoción de compuestos orgánicos y microcontaminantes por medio de adsorción sobre carbones activados en su forma de polvo o granular es comúnmente utilizada para el desarrollo de tratamientos de aguas contaminadas o agua potable, pero tienen la desventaja de que el proceso de tratamiento suele ser lento en la velocidad de adsorción y, además, su forma física limita su manejo.

Carbonizados de hueso para la remoción de diversos contaminantes del agua

Los carbonizados de huesos de animales representan una alternativa de adsorción versátil, debido a la diversidad de contaminantes que pueden eliminarse de las soluciones acuosas, entre los que se encuentran los metales pesados, los aniones y los contaminantes orgánicos. Estos materiales pueden ser sintetizados a partir de huesos de animales como cerdo, pollo, vaca, pescado, oveja, entre otros (Tabla 2).

Los carbonizados de huesos contienen hidroxiapatita (70-76%), carbono amorfo (9-11%), carbonato de calcio (7-9%), sulfato de calcio (0.1-0.2%), Fe_2O_3 (<0.3%) y cenizas (<3%). La temperatura de síntesis de estos materiales suele variar entre 350 y 1000 °C; sin embargo, se ha encontrado una mayor efectividad como adsorbente en temperaturas de 500 a 800 °C (Alkurdi y col. 2019).

El carbón de huesos se considera uno de los adsorbentes con bajo impacto negativo en el ambiente y la salud humana, en comparación con otros adsorbentes como los carbones activados de madera. Además, su capacidad de regeneración lo convierte en un prometedor adsorbente ecológico (Alkurdi y col. 2019).

Tradicionalmente, el hueso carbonizado se ha aplicado en la industria azucarera para decolorar las soluciones de azúcar en el proceso de refinación. Sin embargo, en los últimos años se ha convertido en un material novedoso debido a sus aplicaciones en electroquímica, catálisis y, principalmente, remediación ambiental.

Los carbonizados de hueso se han empleado para eliminar contaminantes del agua, especialmente flúor y arsénico, y diversos metales pesados. Sin embargo, también se han utilizado en la remoción de compuestos orgánicos emergentes, como residuos farmacéuticos en los cuales se han obtenido capacidades de adsorción adecuadas. Las capacidades de adsorción del carbonizado de

hueso han demostrado el potencial que tienen estos materiales para la remoción de contaminantes del agua, ya que son superiores o muy competitivas con las de adsorbentes convencionales como la alúmina y los carbones activados.

Residuos agroindustriales como materia prima para la obtención de hidrocarbones

Los residuos agroindustriales son materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social. El problema al que se enfrentan los residuos agroindustriales es que no existe una clara conciencia ambiental para su manejo, además de que falta capacidad tecnológica y recursos económicos para darles un destino final, así como una legislación específica para promover la gestión de este tipo de residuos que asegure un buen manejo, desde su generación hasta su disposición final. Aún en nuestros días, esta problemática no es exclusiva de México, sino que prevalece a nivel mundial.

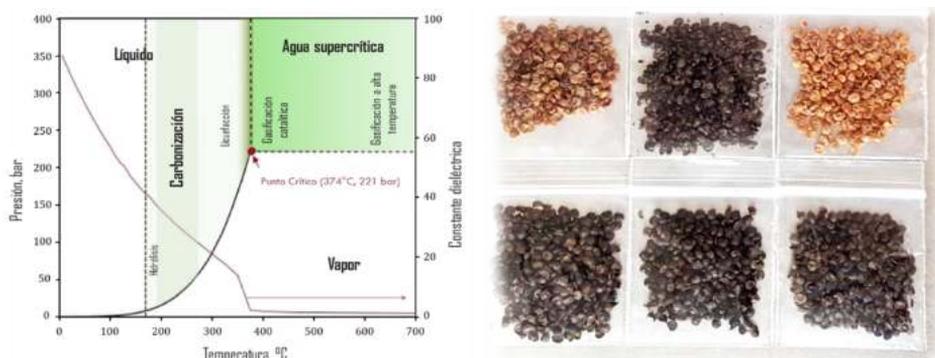
Tabla 2. Empleo de diversos carbonizados de hueso para la remoción de contaminantes del agua

Hueso	Contaminante	Temperatura de síntesis (°C)	pH	Dosis (mg/L)	Capacidad de adsorción (mg/g)	Referencia
Bovino	Flúor	700	7	100	18.5	Rejas-Mayorga y col., 2015
Vacuno	Cromo	450	1	800	4.8	Hyder y col., 2015
Comercial	Cadmio	-	4.8	337	64	Cheung y col., 2001
Comercial	Arsénico	-	10	0.5	0.08	Chen y col., 2008
Comercial	Niqueloso	-	7	100	3.2	Reynel-Avila y col., 2015
Cerdo	Cobalto	800	7	500	18.37	Pan y col., 2009
Oveja	Mercurio	800	3	80	8	Dawlet y col., 2013

Por ser la materia orgánica su principal componente, en la práctica se les denomina “residuos orgánicos”. En México se producen alrededor de 80 millones de toneladas de materia seca proveniente de 20 cultivos, de los cuales 60 millones de toneladas corresponden a residuos primarios, obtenidos al momento de la cosecha, entre los que están: hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, así como cáscara de algodón. El resto, 15 millones de toneladas, corresponde a residuos secundarios obtenidos del procesamiento post-cosecha, entre los que están: ba-

gazo de caña de azúcar, mazorcas de maíz, bagazo de maguey o agave, huesos de aguacate, así como pulpa de café. Una propuesta para revalorizar estos residuos es la aplicación de la carbonización hidrotermal (Figura 11). Este proceso es una técnica de conversión termoquímica atractiva, debido a su capacidad para transformar la biomasa húmeda en energía y productos de valor agregado. En este método, la degradación térmica de la biomasa tiene lugar en la región subcrítica del agua, generalmente a una temperatura relativamente baja (180–250 °C) y presión autogenerada. A partir de este proceso es posible la producción de materiales con un alto contenido de carbono fijo y una amplia variedad de grupos funcionales que potencian la eliminación de contaminantes del agua a bajo costo. Finalmente, entre los contaminantes que pueden ser removidos por estos materiales se destacan los colorantes, bisfenoles, amonio, contaminantes emergentes y metales pesados.

Figura 11. Diagrama presión-temperatura del agua para la identificación de la región de operación del tratamiento hidrotermal e hidrocarburos obtenidos a partir de semillas de chile jalapeño



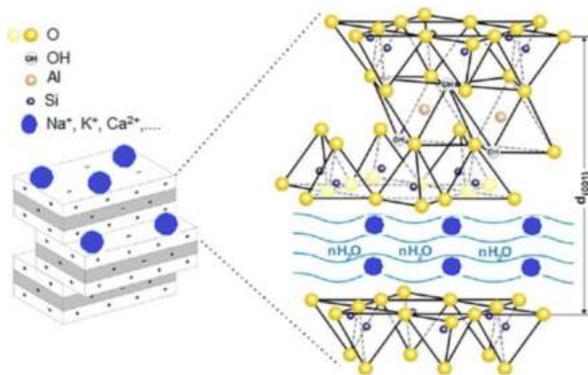
Remoción de metales pesados tóxicos en aguas, aplicando arcilla naturales

Las arcillas son minerales naturales ampliamente disponible en la naturaleza, las cuales tienen propiedades interesantes, que permiten ser aplicadas en procesos de purificación del agua; por ejemplo, en la adsorción de metales pesados provenientes de desechos mineros. Éstas son consideradas un recurso natural invaluable, y están formadas por láminas de dimensiones nanométricas y las láminas están compuestas de óxidos de silicio y óxidos e hidróxidos de aluminio, principalmente (Figura 12). Cuando se colocan las arcillas en una solución contaminada por metales pesados, los cuales en agua se encuentran como cationes (positivos), los cationes interlaminares de las arcillas se intercambian por los

metales en solución; es decir, un ion del metal entra al espacio interlaminar de la arcilla y un catión interlaminar es liberado a la solución.

Por tal motivo, diferentes arcillas han sido aplicadas con gran éxito para la descontaminación de aguas, por ejemplo, se han utilizado para la adsorción de $Zn(II)$, $Cd(II)$, $Pb(II)$, $Cu(II)$ y $Ni(II)$, metales que comúnmente se encuentran en elevadas concentraciones en los desechos de diferentes industrias, y que son muy dañinos para la salud. El $Cd(II)$ y el $Pb(II)$ son de los metales más tóxicos, después del mercurio, y crean daños irreversibles a órganos como el estómago, pulmones y riñones. Dependiendo de la cantidad de cationes interlaminares con que cuente la arcilla, esta podrá remover compuestos tóxicos, por lo que se desea encontrar arcillas con elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC). Una desventaja de las arcillas es que todas sus propiedades pueden variar según el origen de estas y del yacimiento del cual se extraen. Estos materiales naturales han sido empleados exitosamente en la purificación del agua y en los últimos años se han utilizado como base de otros materiales adsorbentes que poseen mayores capacidades de remoción de metales pesados u otros compuestos, estabilidad en medios acuosos y diferentes propiedades mecánicas o fisicoquímicas. Entre estos materiales destacan los nanocompuestos e híbridos.

Figura 12. Estructuras química de las arcillas laminares

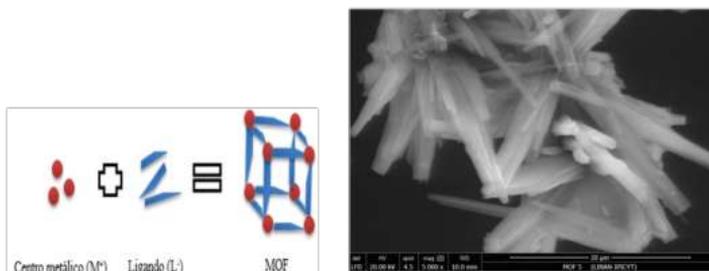


Adsorbentes novedosos. Estructuras metal orgánica (MOF, Metal organic framework)

Los MOF son compuestos cristalinos formados por un catión metálico (M^+ : $Zn(II)$, $Cu(II)$, $Ni(II)$, $Cr(III)$ o $Fe(III)$,) coordinado con moléculas orgánicas o inorgánicas por enlaces covalentes (ligandos L^- : carboxilato aniónico, un imidazol o un fosfonato) (Figura 13), dependiendo del ligando seleccionado, los MOF pueden

presentar propiedades de luminiscencia, quiralidad, óptica y, por lo tanto, ser empleados en diversas aplicaciones como lo es la catálisis, adsorción, absorción, separación de hidrocarburos, almacenamiento de hidrógeno o de dióxido de carbono, y dosificación de fármacos (Falcaro y col. 2014).

Figura 13. Formación de MOF y Estructura del MOF 5



Los MOF son materiales cristalinos que pueden poseer alta porosidad y grandes áreas específicas (6,000-10,000 m²/g), diversidad topológica y estructuras estéticas. Pueden ser diseñados con una estructura objetivo, con propiedades y función específica, siendo características que le brindan ventajas deseables para su uso como adsorbentes y, por lo tanto, en aplicaciones de tratamiento de agua. Se estima que se han reportado más de 20,000 estructuras de MOF distintas. En la Tabla 3 se presentan algunos ejemplos de MOF empleados para la remoción de contaminantes del agua.

Tabla 3. MOF empleados en la remoción de diversos contaminantes del agua

Contaminante	MOF	Referencia
Selenio	NU-1000	Howarth y col., 2015
Arsénico	ZIF-8	Kobielska y col., 2018
Ciprofloxacina	NPC-700 derived from ZIF-8	Li y col., 2017
Azul de metileno	HKUST/GO	Li y col., 2013
Mercurio	LMOF-263	Rudd y col., 2016
Plomo	MOF-5	Rivera y col., 2016
Cromo	TMU-30	Maleki y col., 2015
Fluoruro	[Ce(L1) _{0.5} (NO ₃)(H ₂ O) ₂]2DMF Eu ₃ (L ₂) ₂ (-OH)(DMF) _{0.22} (H ₂ O) _{5.78} MIL-96(Al)	Ma y col., 2017
ReO ₄ ⁻	SCU-100	Li y col., 2018
Th ⁴⁺	UiO-66-(COOH) ₂	
Eu ³⁺	HKUST-1@H ₃ PW ₁₂ O ₄₀	

En comparación con los adsorbentes convencionales, los MOF han presentado altas capacidades de remoción independientemente de las condiciones iniciales que se empleen en los tratamientos. Sin embargo, la estabilidad de los MOF ha sido limitada en su uso en aplicaciones prácticas para el tratamiento de agua, debido a que las moléculas del agua penetran fácilmente en la estructura del MOF interactuando con los iones metálicos y destruyendo su estructura. A pesar de ello, son una alternativa prometedora y competitiva en el uso de materiales convencionales para el tratamiento de agua.

Conclusiones

En este capítulo se presentó la importancia del agua como un recurso natural e indispensable para la supervivencia de la biodiversidad y ser humano, y los problemas que se enfrentan tanto en el ambiente como en la salud humana, derivados de una falta de calidad, saneamiento y tratamiento del agua. Esto conlleva al gran desafío de desarrollar tecnologías que impulsen una gestión sostenible del agua para lograr el acceso universal, adecuado y equitativo a agua potable segura y asequible, tanto en las generaciones presentes como las futuras.

Una de las tecnologías prometedoras es la aplicación de procesos de adsorción a través de materiales de bajo costo, compatibles con el ambiente y con alta eficiencia para eliminar los contaminantes del agua. Estos materiales incluyen: carbón activado, alúmina activada, zeolitas naturales, sílica gel, biosorbentes, carbonizados de hueso de animales, estructuras metal orgánica o MOF, entre otros; que si bien ofrecen distintas ventajas, cada uno amplía la gama de contaminantes que pueden ser eliminados de este medio, lo que da un paso adelante en su aplicación en el tratamiento y saneamiento del agua para la mejora de su calidad.

La selección del material que se quiera usar como adsorbente dependerá de la naturaleza del agua a tratar, la compatibilidad del contaminante para ser adsorbido, su disponibilidad, costo, facilidad de manipulación, y capacidad para utilizarse en varios ciclos de tratamiento.

La diversificación de contaminantes evaluados en los distintos materiales presentados va desde la remoción de aniones (fluoruros, arsénico), metales pesados (plomo, cadmio, mercurio, arsénico), compuestos orgánicos (fármacos, colorantes), pesticidas (glifosato), entre otros; por lo que el desarrollo de materiales adsorbentes con mejores características es una tendencia científica y tecnológica importante, la cual se debe seguir desarrollando, a través de la investigación, para lograr que su desempeño a escala industrial sea prometedor.

Agradecimientos

Al Dr. Rogelio Flores Ramírez, por la revisión interna técnica del capítulo cuyas aportaciones fueron importantes para mejorar su calidad.

Proyectos CONACYT-PN3947-2018; Ciencia Básica 286990-2018.

Referencias

- Ahluwalia, S.S., Goyal, D. (2007). *Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater*. *Bioresour. Technol.* 98(12): 2243-2257.
- Alkurdi, S.S.A.; Al-Juboori, R.A.; Bundschuh, J.; Hamawand, I. (2019). *Bone char as a green sorbent for removing health threatening fluoride from drinking water*. *Environ. Int.* 127: 704-719.
- Chen, Y.N.; Chai, L.Y.; Shu, Y.D. (2008). *Study of arsenic(V) adsorption on bone char from aqueous solution*. *J. Hazard. Mater.* 160(1): 168-172.
- Cheung, C.; Porter, J.; McKay, G. (2001). *Sorption kinetic analysis for the removal of cadmium ions from effluents using bone char*. *Water Res.* 35(3): 605-612.
- Dawlet, A.; Talip, D.; Mi, H.Y.; MaLiKeZhaTi (2013). *Removal of Mercury from Aqueous Solution Using Sheep Bone Charcoal*. *Procedia Environ. Sci.* 18: 800-808.
- Falcaro, P.; Ricco, R.; Doherty, C.M.; Liang, K.; Hill, A.J.; Styles, M.J. (2014). *MOF positioning technology and device fabrication*. *Chem. Soc. Rev.* 43(16): 5403-6176.
- Howarth, A.J.; Katz, M.J.; Wang, T.C.; Platero, A.E.; Chapman, K.W.; Hupp, J.T.; Farha, O.K.; (2015). *High efficiency adsorption and removal of selenate and selenite from water using metal-organic frameworks*. *J. Am. Chem. Soc.* 137: 7488-7494.
- Hyder A.H.M.G.; Begum, S.A.; Egiebor, N.O. (2015). *Adsorption isotherm and kinetic studies of hexavalent chromium removal from aqueous solution onto bone char*. *J. Environ. Chem. Eng.* 3(2): 1329-1336.
- Kobielska, P.A.; Howarth, A.J.; Farha, O.K.; Nayak, S. (2018). *Metal-organic frameworks for heavy metal removal from water*. *Coord. Chem. Rev.* 358: 92-107.
- Leyva, R. (2007). *Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida*. Capítulo cinco en *Sólidos Porosos. Preparación, Caracterización y Aplicaciones*, 1ª Edición, Ed. Universidad de los Andes, Uniandes, Bogotá, Colombia.
- Li, J.; Wang, X.; Zhao, G.; Chen, C.; Chai, Z.; Alsaedi, A.; Hayat, T.; Wang, X. (2018). *Metal-organic framework-based materials: superior adsorbents for the capture of toxic and radioactive metal ions*. *Chem. Soc. Rev.* 47: 2322-2356.

- Li, L.; Liu, X.L.; Geng, H.Y.; Hu, B.; Song, G.W.; Xu, Z.S. (2013). *A MOF/graphite oxide hybrid (MOF: HKUST-1) material for the adsorption of methylene blue from aqueous solution*. J. Mater. Chem. A. 1: 10292-10299.
- Li, S.; Zhang, X.; Huang, Y. (2017). *Zeolitic imidazolate framework-8 derived nanoporous carbon as an effective and recyclable adsorbent for removal of ciprofloxacin antibiotics from water*. J. Hazard. Mater. 321: 711-719.
- Ma, A.; Ke, F.; Jiang, J.; Yuan, Q.; Luo, Z.; Liu, J.; Kumar, A. (2017). *Two lanthanide-based metal-organic frameworks for highly efficient adsorption and removal of fluoride ions from water*. Cryst. Eng. Comm. 19: 2172-2177.
- Maleki, A.; Hayati, B.; Naghizadeh, M.; Joo, S.W. (2015). *Adsorption of hexavalent chromium by metal organic frameworks from aqueous solution*. J. Ind. Eng. Chem. 28: 211-216.
- Naciones Unidas (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Organización Mundial de la Salud [OMS] (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf?ua=1
- Organización Mundial de la Salud [OMS] (2018). *Arsénico*. Notas descriptivas. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Pan, X.; Wang, J.; Zhang, D. (2009). *Sorption of cobalt to bone char: Kinetics, competitive sorption and mechanism*. Desalin. 249(2): 609-614.
- Peña-Guzmán, C.; Ulloa-Sánchez, S.; Mora, K.; Helena-Bustos, R.; Lopez-Barrera, E.; Alvarez, J.; Rodríguez-Pinzón, M. (2019). *Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature*. J. Environ. Manage. 237: 408-423.
- Qasemi, M.; Afsharnia, M.; Zarei, A.; Farhang, M.; Allahdadi, M. (2018). *Non-carcinogenic risk assessment to human health due to intake of fluoride in the groundwater in rural areas of Gonabad and Bajestan, Iran: A case study*. Hum. Ecol. Risk Assess. 25(5): 1-12.
- Reynel-Avila, H.E.; Mendoza-Castillo, D.I.; Bonilla-Petriciolet, A.; Silvestre-Albero, J. (2015). *Assessment of naproxen adsorption on bone char in aqueous solutions using batch and fixed-bed processes*. J. Mol. Liq. 209: 187-195.
- Rivera, J.M.; Rincón, S.; Youssef, C.B.; Zepeda, A. (2016). *Highly efficient adsorption of aqueous Pb (II) with mesoporous metal-organic framework-5: an equilibrium and kinetic study*, J. Nanomater. 2016: 9.
- Rodríguez-Reinoso, F. (1997). *Activated carbon: structure, characterization, preparation and applications*. Chapter two in Introduction to carbon technologies, 1st. Edition, Ed. Harry Marsh, Edward A. Heintz, Francisco Rodríguez-Reinoso, Universidad de Alicante, Alicante, España.

- Rojas-Mayorga, C.; Bonilla-Petriciolet, A.; Sánchez-Ruiz, F.J.; Moreno-Pérez, J.; Reynel-Ávila, H.E.; Aguayo-Villarreal, I.A.; Mendoza-Castillo, D.I. (2015). *Breakthrough curve modeling of liquid-phase adsorption of fluoride ions on aluminum-doped bone char using micro-columns: Effectiveness of data fitting approaches*. *J. Mol. Liq.* 208:114-121.
- Rudd, N.D.; Wang, H.; Fuentes-Fernandez, E.M.A.; Teat, S.J.; Chen, F.; Hall, G.; Chabal, Y.J.; Li, J. (2016). *Highly efficient luminescent metal-organic framework for the simultaneous detection and removal of heavy metals from water*. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8: 30294-30303.
- Russo, T.; Alfredo, K.; Fisher, J. (2014). *Sustainable Water Management in Urban, Agricultural, and Natural Systems*. *Water* 6: 3934-3956.
- Secretaría de Salud (2000). *Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Recuperado de https://siapa.gob.mx/sites/default/files/norma_oficial.pdf
- Veglio, F.; Beolchini, F.; Prisciandaro, M. (2003). *Sorption of copper by olive mill residues*. *Water Res.* 37(20): 4895-4903.
- Vijayaraghavan, K.; Yun, Y.S. (2008). *Bacterial biosorbents and biosorption*. *Bio-technol. Adv.* 26(3): 266-291.
- Zendehdel, M.; Shoshtari-Yeganeh, B.; Khanmohamadi, H.; Cruciani, G. (2017). *Removal of fluoride from aqueous solution by adsorption on NaP:HAp nanocomposite using response surface methodology*. *Process Saf. Environ.* 109: 172-191.

*Tecnologías para la gestión
sostenible del agua*

Editado en noviembre de 2021

La Red Temática Gestión de la Calidad y Disponibilidad del Agua ha desarrollado, desde 2018, acciones para que el diálogo entre las disciplinas y actores de la gestión del agua se convierta en una fuente motriz para el conocimiento y la introducción de las tecnologías para tal fin en la práctica social. En este empeño se ha contado siempre con el apoyo del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (CONCyTEP) y de AM Editores. Gracias a ello, se publica este libro.

Sin pretender abarcar todas las posibilidades de las tecnologías para la gestión sostenible del agua, se pretende motivar el interés de los lectores en las mismas, sin emplear un exceso de términos o consideraciones técnicas. La población objetivo de este libro abarca un amplio universo de la gente que todos los días se relaciona con el agua. Es un punto de partida para que la curiosidad acucie al lector a seguir conociendo más. En definitiva, la apropiación social del conocimiento de estas tecnologías solamente se logrará a través de la difusión y el diálogo.

Este libro pretende ser una puerta de entrada al conocimiento, aprovechamiento, comprensión y educación alrededor del manejo de uno de los recursos naturales que más necesitamos y que menos cuidados recibe.



Gobierno de Puebla
Hacer historia. Hacer futuro.



Secretaría
de Educación
Gobierno de Puebla

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

ISBN 978-607-437-578-7



9 786074 375787