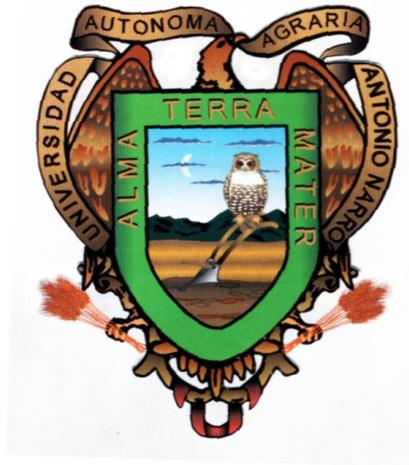


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO EN SUELOS DE LA COMARCA LAGUNERA

POR

CARMEN JANETH RAMÍREZ HERNÁNDEZ

MONOGRAFIA

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL

TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

MARZO DEL 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO EN SUELOS DE LA COMARCA
LAGUNERA

MONOGRAFIA:
QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ REVISOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR EL COMITÉ REVISOR:

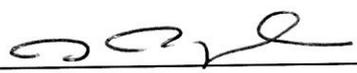
Asesor principal:


MC. MIGUEL ANGEL URBINA MARTINEZ

Asesor:


ING. RUBEN MUÑOZ SOTO

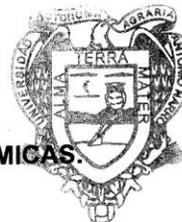
Asesor:


DR. JOSE LUIS REYES CARRILLO

Asesor Suplente:


DR. ALFREDO OGAZ


DR. FCO. JAVIER SANCHEZ RAMOS
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS.



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

MARZO DEL 2014.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO EN SUELOS DE LA COMARCA
LAGUNERA.

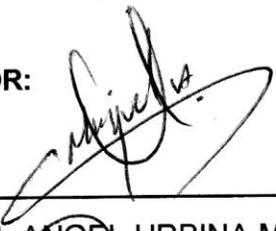
MONOGRAFÍA:

QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

APROBADA POR:

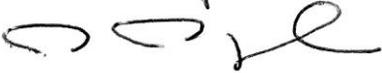
Presidente:


MC. MIGUEL ANGEL URBINA MARTINEZ

Vocal:


ING. RUBEN MUÑOZ SOTO

Vocal:


DR. JOSÉ LUIS REYES CARRILLO

Vocal suplente:


DR. ALFREDO OGAZ


DR. FCO. JAVIER SANCHEZ RAMOS
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONOMICAS



Coordinación de la División de
Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

MARZO DEL 2014.

AGRADECIMIENTOS:

Quisiera dar las gracias a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por la oportunidad brindada para poder concluir con una etapa más de mi formación académica.

También a mis maestros de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que les debo gran parte de mis conocimientos y que fueron parte de mi formación académica.

Doy las gracias al M.C. Miguel Ángel Urbina Martínez por su amistad y por compartir conmigo su tiempo y su experiencia.

A mis maestros del departamento de Biología la Ing. Elba Aguilar, el Dr. José Luis Reyes, el Ing. Joel Limones, la M.C. Cynthia Ruedas, la Ing. Amanda Jaramillo, el Ing. Castañeda y la M.C. Rubí Muñoz que fueron parte importante a lo largo de esta etapa y por brindarme sus conocimientos y amistad.

A los laboratoristas Silverio, Norma y Juan Carlos del departamento de suelos, por su tiempo, y por apoyarme con la realización de las diferentes prácticas.

A las secretarias Norita y la Señora Betty por siempre atenderme con gusto y orientarme en cualquier trámite, gracias.

A mis compañeros de generación por su apoyo y amistad en estos años, en donde compartimos buenos y malos momentos, apoyándonos los unos a los otros.

"Todas la verdades son fáciles de entender una vez que han sido descubiertas, la clave es descubrirlas." (**Galileo**)

DEDICATORIAS:

Quiero dedicar el siguiente trabajo a Dios, por llenarme de bendiciones durante toda mi vida.

A mi padre Gabriel Ramírez por haberse sacrificado de esa manera (yéndose a trabajar lejos) por mí, por mis hermanas y mi madre, para que tuviéramos una mejor calidad de vida, créame que su sacrificio valió la pena aunque lo extraño. Gracias por siempre estar al pendiente, no desatenderse nunca y por todo su amor. Lo amo mucho.

A mi mamá Argelia Hernández, por ser además de la mejor mamá, la mejor cocinera, enfermera, jardinera, chofer y amiga, por todo su inmenso amor, por tenerme tanta confianza, por siempre apoyarme en mis fracasos y logros, por todos esos consejos y por todos los sacrificios que hizo para que este sueño fuera posible. Este logro también es suyo, la amo.

También a mis hermanas, Alejandra Ramírez y Gabriela Ramírez por ser más que mis hermanas mis amigas, mis cómplices, mi alegría, por haberme ayudado cuando se los pedía y por hacer de los momentos difíciles un poco más alegres y de los alegres, mucho más alegres, gracias. Las amo.

A mi amiga Nancy por estos años de amistad donde pasamos infinidad de momentos llenos de alegría, por todas esas veces que reímos hasta que la pansa nos doliera. Gracias por ser mi incondicional, mi cómplice, por todas esas aventuras y gracias por siempre estar conmigo en los momentos difíciles. Te quiero mucho y siempre estarás en mi corazón.

A Carlos por ser mi primer mejor amigo. Te quiero mucho, por tu forma de ser, por todas las veces que me hiciste reír, por estar conmigo en los momentos tristes tratando de alegrarme y gracias por hacer de estos años, los mejores de mi vida.

A mi amiga Mayrita por esa amistad tan linda que tenemos, por todas esas comidas deliciosas que hemos tenido en estos años y por engordar conmigo. Gracias por siempre brindarme tu apoyo en los malos momentos y por todos esos momentos alegres que me diste. Te quiero mucho.

A Fer por siempre estar a nuestro lado (me refiero al de Mayra, Nancy y el mío), por nunca dejarnos solas. Por tu amistad, todas las risas y las aventuras que pasamos, te quiero amigo, gracias.

RESUMEN.

En varios países de América Latina, entre ellos México; por lo menos cuatro millones de personas beben en forma permanente agua con niveles de arsénico, que ponen en riesgo su salud pública. Las concentraciones de arsénico en el agua, sobre todo en el agua subterránea, presentan niveles que llegan en algunos casos hasta 1 mg/l. en otras regiones del mundo como India, Bangladesh, China y Taiwán el problema es aún mayor (Dante *et al.*, 2005). La contaminación de agua subterránea provocada por arsénico (As) es un serio problema de salud (Benítez *et al.*, 2008).

La exposición de arsénico puede causar una variedad de problemas en la salud de las personas. Esto es de relevancia absoluta tal, que la organización mundial de la salud (OMS) ha fijado como límite máximo para aguas de consumo humano una concentración de 10 µg /L. (Dante *et al.*, 2005).

Entre las regiones en México más afectadas por el problema del hidroarsenicismo es la llamada Comarca Lagunera que se encuentra en el centro norte de México entre los 103° 45' y los 102° de longitud oeste y entre los 25° 15' y los 26° 15' de latitud norte; comprende el noreste del estado de durango y el suroeste del estado de Coahuila (Arreguim *et al.*, 2004) (figura 4). Tiene un clima muy seco, templado la mayor parte del tiempo y con invierno benigno. La lluvia, deficiente en todas las estaciones, ha dado lugar a una vegetación característica del desierto (Marín, 2005). En donde la contaminación del agua, subterránea principalmente, ha causado serios problemas en los mantos freáticos y en la salud humana (HACRE) (Astolfi, 1971).

Puesto que el problema del hidroarsenicismo ha llegado a escalas mayores, la legislación mexicana ha tenido que intervenir de manera importante para la regulación de la presencia de este metaloide, decretando leyes y reglamentos para establecer el límite máximo permisible del arsénico en el agua. (NOM-127-SSA1-1994).

Palabras claves: *Hidroarsenicismo, nanofiltración, remoción, arsénico, HACRE.*

ÍNDICE GENERAL		PÁG
AGRADECIMIENTO		I
DEDICATORIA		II
RESUMEN		III
PALABRAS CLAVES		III
ÍNDICE GENERAL		IV
ÍNDICE DE CUADROS		VI
ÍNDICE DE FIGURAS		VII
Introducción		1
Antecedentes		2
	a) Situación mundial del agua	2
	b) Situación del agua en México	3
	c) Administración del agua en México	5
Situación en la Comarca Lagunera (Coahuila y Durango)		8
	a) Ubicación geográfica de La Comarca Lagunera	8
Marco jurídico		9
	a) NOM-127-SSA1-1994	13
	b) Modificación a la NOM-127-SSA1-1994	22
	c) Reglamento para el uso, explotación y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la zona conocida como Comarca Lagunera y que establece la reserva de agua potable respectiva	26
El arsénico y sus características		34
	a) El arsénico en el agua natural	35
	b) Efectos del arsénico en el hombre	35
Antecedentes del arsénico en la Comarca Lagunera		38
	a) Antecedentes ambientales	39
	b) Antecedentes sanitarios	39
Situación actual en La Comarca Lagunera		39
Alternativas para la remoción de arsénico usados en La Comarca Lagunera		41
Métodos para la remoción de arsénico en el agua		43
	a) Oxidación-reducción	44
	b) Separación sólido-líquido	44
	c) Precipitación	44
	d) Adsorción	44
	e) Separación física	44
	f) Procesos de remoción biológica	44
	g) Coagulación-filtración	44
	h) Coagulación-adsorción	46

	i)	Intercambio iónico	47
	j)	Alúmina activada	48
	k)	Hierro y manganeso	49
	l)	Hidróxido férrico granular	50
	m)	Hierro con filtración directa	50
	n)	Ablandamiento con cal	50
	o)	Ósmosis inversa y nanofiltración	51
	p)	Electrodialisis inversa	53
Fitorremediación			53
	a)	Helecho (<i>Pteris vittata</i>)	53
	b)	Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	54
Biorremediación in situ			54
Conclusión			56
Bibliografía			57

ÍNDICE DE CUADROS		PÁG
Cuadro 1	Normas Oficiales Mexicanas y Normas Mexicanas relacionadas con el sector agua	9
Cuadro 2	Cumplimiento gradual anual del comportamiento del límite máximo permisible para el arsénico (As)	22
Cuadro 3	Concentración de arsénico en pozos y su comparación con la Norma Mexicana en el año 2000 y 2005	23
Cuadro 4	Técnicas empleadas para la remoción de arsénico	43
Cuadro 5	Aspectos a tener en cuenta para su uso eficiente de las membranas	53

ÍNDICE DE FIGURAS		PÁG
Figura 1	Distribución mundial de aguas con arsénico	2
Figura 2	Acuíferos sobre-explotados en México	5
Figura 3	Regiones hidrológicas y divisiones estatales	6
Figura 4	Mapa de la Región Lagunera	8
Figura 5	Escala de toxicidad del arsénico (As)	36
Figura 6	Esquema típico de coagulación/floculación/sedimentación	45

Introducción.

En varios países de América Latina como Argentina, Chile, México, El Salvador; Nicaragua, Perú y Bolivia, por lo menos cuatro millones de personas beben en forma permanente agua con niveles de arsénico, que ponen en riesgo su salud en tal magnitud que en algunos países se ha convertido en un problema de salud pública. Las concentraciones de arsénico en el agua, sobre todo en el agua subterránea, presentan niveles que llegan en algunos casos hasta 1 mg/L. En otras regiones del mundo como India, Bangladesh, China y Taiwán el problema es aún mayor. En India existen alrededor de 6 millones de personas expuestas, de las cuales más de 2 millones son niños. En Estados Unidos más de 350.000 personas beben agua cuyo contenido es mayor que 0,5 mg/L de arsénico, y más de 2,5 millones de personas están siendo abastecidas con agua con tenores de arsénico mayores a 0,025 mg/L (Dante et al., 2005).

En general, en América Latina la presencia del arsénico en el ambiente y específicamente en las fuentes de agua captadas para consumo humano se debe a factores naturales de origen geológico (Argentina, Chile, México, Perú) (Sancha et. al., 1998), así como a actividades antropogénicas que involucran la explotación minera y refinación de metales por fundición (Bolivia, Chile y Perú), procesos electrolíticos de producción de metales de alta calidad como cadmio y cinc (Brasil), y en menor proporción en la agricultura el empleo de plaguicidas arsenicales orgánicos (México). En México la presencia de arsénico se debe a que está dentro del cinturón volcánico, con suelos ricos en arsénico que contaminan los mantos freáticos. Otra posible fuente de contaminación es el uso de plaguicidas órgano arsenicales empleados desde antes de 1945 (Castro, 2006).

En forma más localizada, el grupo de riesgo son los trabajadores de la industria minero metalúrgica. La población más afectada es la que se encuentra dispersa en el área rural, la cual consume agua sin ningún tratamiento y desconoce el riesgo al que está expuesta. Para esta población, se requiere que las autoridades de salud, ambiente y de saneamiento planifiquen los servicios de aprovisionamiento de agua y, entre otras actividades, promuevan e intervengan en la ejecución de programas de prevención y control de riesgos del consumo del agua de bebida con niveles de arsénico superiores a los recomendados. Los programas deben involucrar la participación de las autoridades, comunidad y sistemas locales de salud. No se han demostrado efectos del arsenicismo en la salud reproductiva humana. Sin embargo, se conoce que el arsénico puede pasar la placenta, pero para conocer sus efectos genotóxicos se requieren más estudios. Los niños son más sensibles que los adultos a la toxicidad por el arsénico y son los más afectados por esta enfermedad (Castro, 2006).

ANTECEDENTES.

Situación mundial del agua

La contaminación de agua subterránea provocada por arsénico (As) es un serio problema de salud pública de importancia a nivel mundial debido a su poder carcinógeno y neurotóxico (Benítez et al., 2008). La contaminación de agua por arsénico (As) ha sido un serio problema en muchos países del mundo, se conoce que este elemento es acumulable en el organismo y puede causar efectos letales a la salud (Palomo et al., 2007). A nivel mundial, millones de personas están en riesgo de padecer los efectos adversos de la exposición al As. La mayor parte de la exposición peligrosa proviene del agua de bebida extraída de pozos excavados en zonas con sedimentos ricos en As. No sólo el agua de bebida puede representar un riesgo, sino también la ingesta de As a través de alimentos, suelo e inhalación de aire contaminado sobre todo en zonas mineras preparar las comidas con aguas arsenicales aumenta el contenido de arsénico en un 10 a 30% para la mayoría de los alimentos, y en 200 a 250% para legumbres y granos, que absorben casi toda el agua de cocción. Además, la irrigación de cultivos con esta agua puede aumentar sustancialmente el contenido de As en el arroz y otras verduras. Se ha detectado agua rica en As en Estados Unidos, Chile, México, Bolivia, Perú, Camboya, China, Vietnam, Bangladesh, Bengala, Tailandia, Nepal, y Ghana (Benítez et al., 2008).



Figura 1.- Distribución mundial de aguas con arsénico

Fuente: Smedley P. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochem 17 (2002).

Los organismos vivos están expuestos a especies tóxicas de arsénico provenientes de alimentos y aguas. La exposición de arsénico puede causar una variedad de problemas en la salud de las personas. Esto es de relevancia absoluta tal, que la organización mundial de la salud (OMS) ha fijado como límite máximo para aguas de consumo humano una concentración de 10 µg /L. El arsénico puede encontrarse en ambientes naturales bajo diferentes estados de oxidación y, la movilidad y toxicidad dependen en gran medida de la forma en que se encuentran. En aguas subterráneas está predominante como As (III) y As (V). Lógicamente, también puede entrar en la cadena alimentaria humana a través de plantas y animales causando graves problemas de salud. Por lo anteriormente expuesto, se entiende la importancia no sólo de la determinación del contenido total de As, sino de la detección y determinación de las distintas formas bajo las cuales puede estar presente dicho elemento. En el pasado, la concentración máxima permitida en aguas de consumo humano por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) era de 50 µg/L, mientras que a partir de 2001 organismos internacionales como la misma EPA y la OMS adoptaron un nuevo estándar referente a la máxima concentración permitida para As de 10 µg/L (Dante et al., 2005).

Situación del agua en México

México tiene una superficie de aproximadamente 2, 000,000 km², y una población del orden de 100, 000,000 de habitantes. La ubicación de la población y de los principales polos de desarrollo industrial está inversamente relacionada con la disponibilidad del agua. El clima en la parte norte de México es árido a semi-árido, y es en esta zona donde se encuentran las ciudades más grandes del país, así como las principales concentraciones de actividad industrial y agrícola. Sin embargo, esta región apenas cuenta con menos de la tercera parte de los recursos hidráulicos del país. Por lo tanto, el agua subterránea juega un papel esencial en la economía de México, ya que para dos terceras partes de México, el agua subterránea es la principal fuente, y en ocasiones la única fuente, de agua. En las zonas semiáridas de México, la agricultura de riego intensiva se caracteriza por una alta inversión de recursos para poder mantener un aceptable margen de producción, competitividad y calidad de los productos generados. Con el propósito de valorar y asegurar en el largo plazo la integridad ecológica de los recursos naturales, durante las últimas dos décadas se ha puesto un mayor énfasis en el

costo ambiental que esto representa, ya que en diversas zonas del planeta se registran problemas severos de contaminación. En todos los países el agua subterránea es una reserva importante de agua potable; sin embargo, en varias regiones del planeta este recurso hídrico está contaminado hasta el punto en que ya no reúne las condiciones establecidas en las normas actuales para su consumo humano (Ongley, 1997).

El mayor uso del agua subterránea ocurre en las zonas áridas y semiáridas del centro, norte y noroeste, donde el balance extracción-recarga es negativo y refleja las condiciones de sobre explotación en numerosos acuíferos.

Este hecho amenaza la sustentabilidad de las actividades económicas apoyadas en estas fuentes de abastecimiento, ya que no sólo se agota el recurso sino que en algunas se ha afectado la calidad del agua y se encarece su aprovechamiento. En México el abastecimiento de agua subterránea tiene un papel fundamental para todos ámbitos de la sociedad ya que su utilización abarca la agricultura, la industria y la población (Palomo et al., 2007).

De los 653 acuíferos identificados por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua, según diversos autores 102 acuíferos están siendo sobre-explotados. En estos acuíferos la recarga es de unos 9.0 km³/año y la extracción de 13.9 km³/año, representando la recarga el 65% de la extracción total. En estos acuíferos sobreexplotados se extrae el 51% del total a nivel nacional. El usuario más importante del agua subterránea es el sector agrícola, que utiliza un 70% de las extracciones, seguido a buena distancia por los usos público-urbano e industrial, que representan alrededor del 22% del bombeo total y poco más del 6%, respectivamente (Marín, 2002; Arreguim et al., 2004; Cantú et al., 2004).

En la República Mexicana se ha identificado este problema en diferentes regiones que incluyen a los estados de Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo y Morelos, donde se rebasó el límite máximo permisible de 0.030 mg As/L establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127SSA-1-1994 para el año 2004, lo que representa problemas de moderados a graves para la salud pública. La norma mexicana para el arsénico ha sido más estricta cada año desde el 2000 cuyo límite era de 0.05 mg/L, en el 2004 el límite fue de 0.030 mg/L, y en el 2005 el límite se estableció en 0.025 mg/L (Fuentes, 2005).

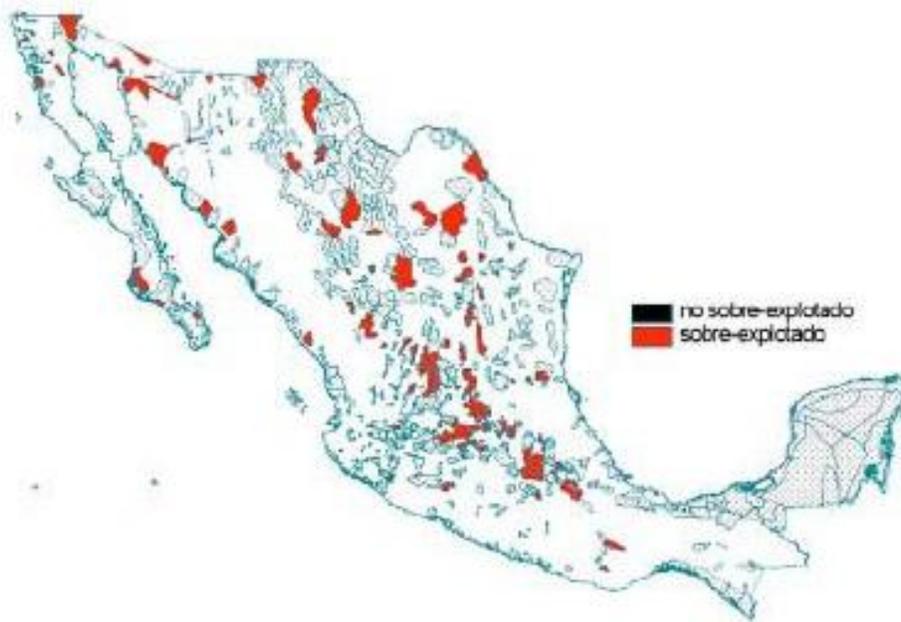


Fig. 2 Acuíferos sobre-explotados en México

Administración del agua en México

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos reconoce desde 1917 a la nación como propietaria del agua y autoriza al Ejecutivo Federal a administrar estos recursos y otorgar concesiones para el uso del agua. La Comisión Nacional del Agua (CNA) es la entidad responsable por la administración del agua en México. Cuando fue creada, existían una oficina estatal, y seis oficinas regionales. Actualmente, se está viviendo un proceso de fusión entre las oficinas estatales y regionales. La misión de la CNA es “Administrar y preservar las aguas nacionales, con la participación de la sociedad, para lograr el uso sustentable del agua”. Para una mejor administración, México ha sido dividido en 13 regiones administrativas, las cuales no obedecen a ningún criterio técnico. La figura muestra dichas regiones (Marín, 2005).



Fig. 3 Regiones hidrológicas y divisiones estatales

La Ley Nacional de Aguas ha venido a reconocer normativamente el principio técnico de la unidad de gestión y del ciclo hidrológico determinando un tratamiento jurídico basado en la unidad de cuenca hidrológica donde la coordinación y la concertación entre la autoridad y los usuarios a partir del programa nacional hidráulico es uno de los elementos más importantes. Según la Ley, la cuenca, conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión del recurso hidráulico.

La LAN también define a la Comisión Nacional del Agua como la “autoridad federal única en materia de agua del país”. Uno de los órganos de apoyo de los Consejos de Cuenca son los Comités Técnicos del Agua Subterránea. Un aspecto interesante, y que debilita tremendamente tanto a los Consejos de Cuenca como a los COTAS, es la falta de participación de las instituciones de educación superior en estos grupos de trabajo. A diferencia de países desarrollados como los Estados Unidos, o España, donde los académicos participan de manera activa con estos grupos, en México la ausencia de la academia es notable. En caso de persistir los actuales patrones de aprovechamiento del agua subterránea, habrá acuíferos sobre explotados a niveles críticos, en los que posiblemente ya no será posible garantizar un desarrollo sustentable basado en el aprovechamiento del agua subterránea.

México tiene que empezar un agresivo programa de exploración de sus recursos hidrogeológicos. No es posible que hoy en día solo hayan sido estudiados menos de la tercera parte de sus acuíferos. Esto presenta una gran oportunidad para que el sector académico pueda participar en la solución de estos problemas, sin embargo, esto no será posible, si no se cuenta con el apoyo correspondiente del gobierno, en particular a través de la creación de centros de investigación dedicados al estudio del agua, plazas para hidrogeólogos y recursos para realizar investigación en temas relacionados al agua (Marín, 2005).

Existen regiones en la República Mexicana donde por las características geológicas prevalentes sus acuíferos contiene arsénico disuelto en el agua. Este elemento constituye parte de una gran cantidad de minerales, y naturalmente, a través de procesos geoquímicos las sales que contienen arsénico se solubilizan en los acuíferos. Como se mencionó anteriormente, en la República Mexicana se ha detectado arsénico en concentraciones por arriba de los límites que marcan los correspondientes criterios de calidad del agua, en acuíferos de los estados de Aguascalientes, Coahuila, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas, principalmente.

La presencia de arsénico en los acuíferos de México está registrada y documentada principalmente en cuatro estados de la República: Coahuila, Chihuahua, Durango e Hidalgo. A concentraciones elevadas el arsénico tiene efectos nocivos en la salud humana, en consecuencia se establece un valor referencial de la concentración límite que el agua potable puede contener para su uso seguro, este límite máximo permisible en México se encuentra especificado en la norma de salud ambiental que implanta la calidad del agua potable, NOM-127-SSAI-1994 Salud Ambiental - Agua para uso y consumo humano. – Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización (Vega, 2001).

Situación en la Comarca Lagunera (Coahuila y Durango)

Ubicación geográfica de la Comarca Lagunera

La región de la Laguna se encuentra en el centro norte de México entre los 103° 45' y los 102° de longitud oeste y entre los 25° 15' y los 26° 15' de latitud norte; comprende el noreste del estado de Durango y el suroeste del estado de Coahuila (Arreguim et al., 2004) (figura 4). Tiene un clima muy seco, templado la mayor parte del tiempo y con invierno benigno. La lluvia, deficiente en todas las estaciones, ha dado lugar a una vegetación característica del desierto (Marín, 2005).

En esta región existen zonas en que el hidroarsenicismo crónico es endémico y donde; incluso, han surgido brotes agudos en el sector urbano de la ciudad de Torreón, Coahuila, donde se notificaron 40 casos graves y una defunción en 1962 (Albores et al., 1979).

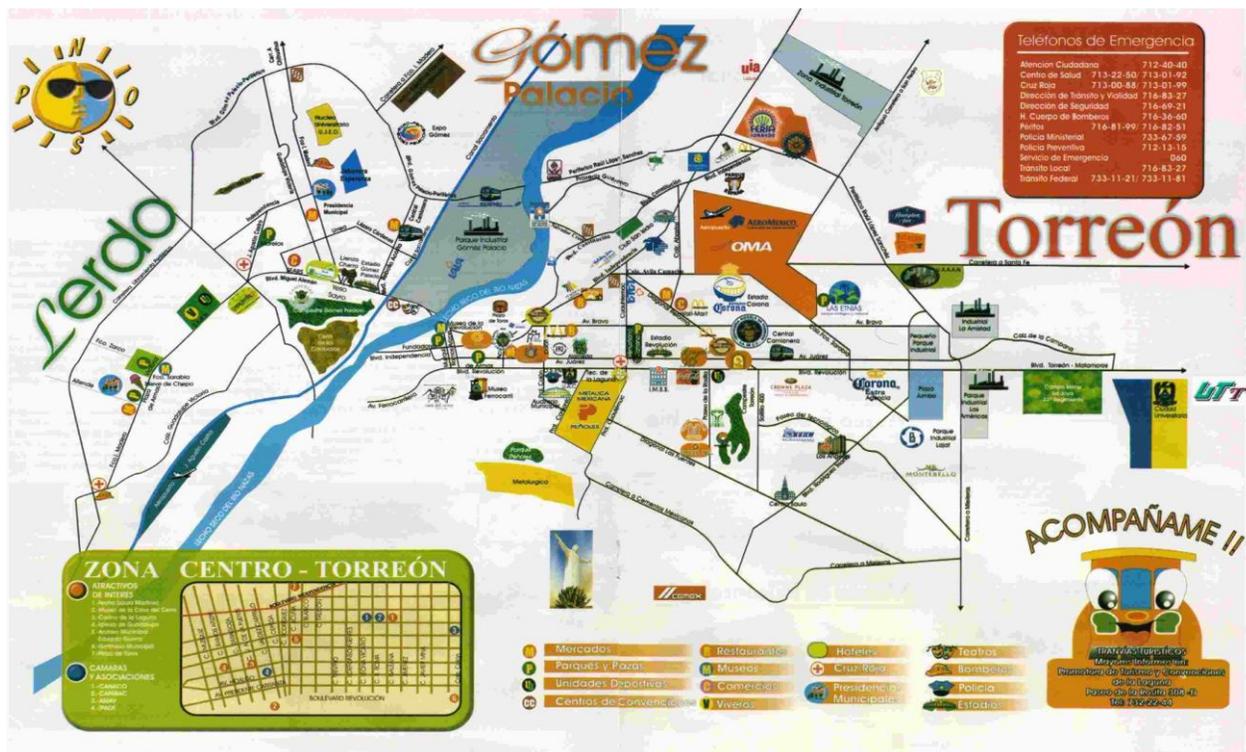


Fig. 4 Mapa de la Región Lagunera

Marco jurídico

Existen diversas normas y leyes que regulan todo lo relacionado con el sector agua en México. Las cuales son mencionadas a continuación.

Cuadro 1. Normas Oficiales Mexicanas y Normas Mexicanas relacionadas con el sector agua.

Grupo	Identificador	Descripción
SEMARNAT	NOM-001-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Fue publicada en el DOF el día 6 de enero de 1997 y entró en vigor al día siguiente. Esta norma se complementa con la aclaración publicada en el mismo medio de difusión del día 30 de abril de 1997.
SEMARNAT	NOM-002-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Se publicó en el DOF el día 3 de junio de 1998 y entró en vigor al día siguiente.
SEMARNAT	NOM-003-SEMARNAT-1997	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Se publicó en el DOF el día 21 de septiembre de 1998 y entró en vigor al día siguiente.
SEMARNAT	NOM-083-SEMARNAT-2003	Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Se publicó en el DOF el día 20 de octubre de 2004 y entró en vigor a los sesenta días naturales posteriores de su publicación.
SEMARNAT	NOM-022-SEMARNAT-2003	Establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. Se publicó en el DOF el día 10 de abril de 2003 y entró en vigor a los sesenta días naturales posteriores de su publicación. Existe un acuerdo que adiciona la especificación 4.43 a la Norma Oficial Mexicana NOM-022- Semarnat-2003, que establece las especificaciones para la preservación,

		conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. Se publicó en el DOF el día 7 de mayo de 2004 y entró en vigor al día siguiente.
SEMARNAT	NOM-141-SEMARNAT-2003	Establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. Se publicó en el DOF el día 13 de septiembre de 2004 y entró en vigor a los sesenta días naturales posteriores de su publicación.
CONAGUA	NOM-011-CONAGUA-200	Conservación del recurso agua. Establece las especificaciones y el método para de terminar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Se publicó en el DOF el día 17 de abril de 2002. Entró en vigor el 17 de junio de 2002.
CONAGUA	NOM-001-CONAGUA-1995	Sistemas de alcantarillado sanitario–Especificaciones de hermeticidad. Se publicó en el DOF el día 11 de octubre de 1996. Entró en vigor el 8 de febrero de 1997.
CONAGUA	NOM-002-CONAGUA-1995	Toma domiciliaria para abastecimiento de agua potable– Especificaciones y métodos de prueba. Se publicó en el DOF el día 14 de octubre de 1996. Entró en vigor el 12 de abril de 1997.
CONAGUA	NOM-003-CONAGUA-1996	Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos. Se publicó en el DOF el día 3 de febrero de 1997. Entró en vigor el 4 de mayo de 1997.
CONAGUA	NOM-004-CONAGUA-1996	Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general. Se publicó en el DOF el día 8 de agosto de 1997. Entró en vigor el 3 de febrero de 1998.
CONAGUA	NOM-005-CONAGUA-1996	Fluxómetros–Especificaciones y métodos de prueba. Se publicó en el DOF el día 25 de julio de 1997. Entró en vigor el 21 de enero de 1998.
CONAGUA	NOM-006-CONAGUA-1997	Fosas sépticas prefabricadas– Especificaciones y métodos de prueba. Se publicó en el DOF el día 29 de enero de 1999 y entró en vigor al día siguiente.
CONAGUA	NOM-007-CONAGUA-1997	Requisitos de seguridad para la construcción y operación de tanques para agua. Se publicó en el DOF el día 1 de febrero de 1999. Entró en vigor el 1 de junio de 1999.

CONAGUA	NOM-008- CONAGUA- 1998	Regaderas empleadas en el aseo corporal– Especificaciones y métodos de prueba. Se publicó en el DOF el día 25 de junio de 2001. Entró en vigor el 22 de diciembre de 2001.
CONAGUA	NOM-009- CONAGUA- 2001	Inodoros para uso sanitario. Especificaciones y métodos de prueba. Se publicó en el DOF el día 2 de agosto de 2001. Entró en vigor el 30 de noviembre de 2001.
CONAGUA	NOM-010- CONAGUA- 2000	Válvula de admisión y válvula de descarga para tanque de inodoro. Especificaciones y métodos de prueba. Se publicó en el DOF el día 2 de septiembre de 2003. Entró en vigor el 29 de febrero de 2004.
CONAGUA	NOM-013- CONAGUA- 2000	Redes de distribución de agua potable. Especificaciones de hermeticidad y métodos de prueba. Se publicó en el DOF el día 4 de febrero de 2004. Entró en vigor el 3 de junio de 2004.
CONAGUA	NOM-014- CONAGUA- 2000	Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada. Se publicó en el DOF el 18 de agosto de 2009. Entró en vigor a los sesenta días naturales posteriores de su publicación.
CONAGUA	NOM-015- CONAGUA- 2000	Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua. Se publicó en el DOF el 18 de agosto de 2009. Entró en vigor a los sesenta días naturales posteriores de su publicación.
Salud	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. Se publicó en el DOF el día 18 de enero de 1996, y entró en vigor a los noventa días naturales posteriores de su publicación.
Salud	NOM-013- SSA1-1993	Requisitos sanitarios que debe cumplir la cisterna de un vehículo para el transporte y distribución de agua para uso y consumo humano. Se publicó en el DOF el 12 de agosto de 1994. Entró en vigor al día de siguiente.
Salud	NOM-014- SSA1-1993	Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento públicos y privados. Se publicó en el DOF el 12 de agosto de 1994. Entró en vigor al día siguiente.
Salud	NOM-179- SSA1-1998	Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público. Se publicó en

		el DOF el día 24 de septiembre de 2001. Entró en vigor al día siguiente.
Salud	NOM-230-SSA1-2002	Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Se publicó en el DOF el día 12 de julio de 2005. Entró en vigor a los sesenta días naturales posteriores de su publicación.
Normas Mexicanas	NMX-AA-120-SCFI-2006	Establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas. Se publicó en el DOF el día 06 de julio de 2006 y entró en vigor a partir de la fecha de su publicación.
Normas Mexicanas	NMX-AA-147-SCFI-2008	Servicios de agua potable; drenaje y saneamiento-Tarifa- Metodología de Evaluación de la tarifa. Se publicó en el DOF el día 21 de abril de 2009 y entró en vigor a los sesenta días naturales posteriores de su publicación.
Normas Mexicanas	NMX-AA-148-SCFI-2008	Agua potable, drenaje y saneamiento – Eficiencia- Metodología para evaluar la calidad de los servicios. Parte 1.- Directrices para la evaluación y la mejora del servicio a los usuarios. Se publicó en el DOF el día 21 de abril de 2009 y entró en vigor a los sesenta días naturales posteriores de su publicación.
Normas Mexicanas	NMX-AA-149/1-SCFI-2008	Agua potable, drenaje y saneamiento - Eficiencia - Metodología para evaluar la eficiencia de los prestadores de servicio de agua potable, drenaje y saneamiento. Parte 1 - Directrices para la gestión de los prestadores de servicio de agua residual y para la evaluación de los servicios de agua residual. Se publicó en el DOF el día 21 de abril de 2009 y entró en vigor a los sesenta días naturales posteriores de su publicación.
Normas Mexicanas	NMX-AA-149/2-SCFI-2008	Agua potable, drenaje y saneamiento – Eficiencia - Metodología para evaluar la eficiencia de los prestadores de servicios de agua potable, drenaje y saneamiento. Parte 2.- Directrices para la gestión día 21 de abril de 2009 y entró en vigor a los sesenta días naturales posteriores de su publicación.

NOM-127-SSA1-1994

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".

INDICE

0. INTRODUCCION

1. OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

2. REFERENCIAS

3. DEFINICIONES

4. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD DEL AGUA

5. TRATAMIENTOS PARA LA POTABILIZACION DEL AGUA

6. BIBLIOGRAFIA

7. CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES

8. OBSERVANCIA DE LA NORMA

9. VIGENCIA

0. Introducción

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas.

Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización.

1. Objetivo y campo de aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

2. Referencias

NOM-008-SCF1-1993 "Sistema General de Unidades de Medida".

3. Definiciones

3.1 Ablandamiento: Proceso de remoción de los iones calcio y magnesio, principales causantes de la dureza del agua.

3.2 Adsorción: Remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de forma tal que son separadas de la solución.

3.3 Agua para uso y consumo humano: Aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos al ser humano.

3.4 Características bacteriológicas: Son aquellas debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales.

3.5 Características físicas y organolépticas: Son aquellas que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio.

3.6 Características químicas: Son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana.

3.7 Características radiactivas: Son aquellas resultantes de la presencia de elementos radiactivos.

3.8 Coagulación química: Adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.

3.9 Contingencia: Situación de cambio imprevisto en las características del agua por contaminación externa, que ponga en riesgo la salud humana.

3.10 Desinfección: Destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.

3.11 Filtración: Remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada.

3.12 Floculación: Aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos.

3.13 Intercambio iónico: Proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se pone en contacto.

3.14 Límite permisible: Concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

3.15 Neutralización: Ajuste del pH, mediante la adición de agentes químicos básicos o ácidos al agua en su caso, con la finalidad de evitar incrustación o corrosión de materiales que puedan afectar su calidad.

3.16 Osmosis inversa: Proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltos en el agua, en el cual por medio de altas presiones se fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniéndose en dicha membrana los iones y moléculas de mayor tamaño.

3.17 Oxidación: Introducción de oxígeno en la molécula de ciertos compuestos para formar óxidos.

3.18 Potabilización: Conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua a fin de mejorar su calidad y hacerla apta para uso y consumo humano.

3.19 Precipitación: Proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas sedimentables del agua, por efecto gravitacional.

3.20 Sistema de abastecimiento: Conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obras de captación, plantas cloradoras, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, cárcamos de bombeo, líneas de conducción y red de distribución.

4. Límites permisibles de calidad del agua

4.1 Límites permisibles de características bacteriológicas

El contenido de organismos resultante del examen de una muestra simple de agua, debe ajustarse a lo establecido en la Tabla 1.

Bajo situaciones de emergencia, las autoridades competentes deben establecer los agentes biológicos nocivos a la salud a investigar.

TABLA. 1

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml 2 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

4.2 Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.

TABLA. 2

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

4.3 Límites permisibles de características químicas

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

TABLA. 3

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE	CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20	Cromo total	0.05
Arsénico	0.05	Dureza total (como CaCO ₃)	500.00
Bario	0.70	Nitratos (como N)	10.00
Cadmio	0.005	Nitritos (como N)	0.05
Cianuros (como CN ⁻)	0.07	Plomo	0.025
Cloro residual libre	0.2-1.50	Sodio	200.00
Cloruros (como Cl ⁻)	250.00	Sólidos disueltos Totales	1000.00
Cobre	2.00	Sulfatos (como SO ₄ ⁼)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50	Zinc	5.00

Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

4.4 Límites permisibles de características radiactivas

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

TABLA. 4

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Radiactividad alfa global	0.1
Radiactividad beta global	1.0

5. Tratamientos para la potabilización del agua

La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe fundamentarse en estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.

Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad, cuando los contaminantes biológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua enlistados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4.

5.1 Contaminación biológica

5.1.1 Bacterias, helmintos, protozoarios y virus.- Desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz ultravioleta.

5.2 Características físicas y organolépticas

5.2.1 Color, olor, sabor y turbiedad.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, adsorción en carbón activado u oxidación.

5.3 Constituyentes químicos

5.3.1 Arsénico.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.2 Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo.- Intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.3 Cloruros.- Intercambio iónico, ósmosis inversa o destilación.

5.3.4 Dureza.- Ablandamiento químico o intercambio iónico.

5.3.5 Fenoles o compuestos fenólicos.- Adsorción en carbón activado u oxidación con ozono.

5.3.6 Hierro y/o manganeso.- Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.7 Fluoruros.- Ósmosis inversa o coagulación química.

5.3.8 Materia orgánica.- Oxidación-filtración o adsorción en carbón activado.

5.3.9 Mercurio.- Proceso convencional: coagulación-floculación-precipitación-filtración, cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l. Procesos especiales: en carbón activado granular y ósmosis inversa cuando la fuente de abastecimiento contenga hasta 10 microgramos/l; con carbón activado en polvo cuando la fuente de abastecimiento contenga más de 10 microgramos/l.

5.3.10 Nitratos y nitritos.- Intercambio iónico o coagulación floculación- sedimentación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos.

5.3.11 Nitrógeno amoniacal.- Coagulación-floculación-sedimentación-filtración, desgasificación o desorción en columna.

5.3.12 pH (potencial de hidrógeno).- Neutralización.

5.3.13 Plaguicidas.- Adsorción en carbón activado granular.

5.3.14 Sodio.- Intercambio iónico.

5.3.15 Sólidos disueltos totales.- Coagulación-floculación-sedimentación-filtración y/o intercambio iónico.

5.3.16 Sulfatos.- Intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.17 Sustancias activas al azul de metileno.- Adsorción en carbón activado.

5.3.18 Trihalometanos.- Aireación u oxidación con ozono y adsorción en carbón activado granular.

5.3.19 Zinc.- Destilación o intercambio iónico.

5.3.20 En el caso de contingencia, resultado de la presencia de sustancias especificadas o no especificadas en el apartado 4, se deben coordinar con la autoridad sanitaria competente, las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas involucrados en la contingencia, para determinar las acciones que se deben realizar con relación al abastecimiento de agua a la población.

7. Concordancia con normas internacionales

Al momento de la emisión de esta Norma no se encontró concordancia con normas internacionales.

8. Observancia de la Norma

Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que distribuya agua para uso y consumo humano. La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud y a los gobiernos de las entidades federativas en coordinación con la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia.

9. Vigencia

La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor con carácter de obligatorio, al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

México, D.F., a 30 de noviembre de 1995.- El Director General de Salud Ambiental, Gustavo Olaiz Fernández.- Rúbrica.

Fecha de publicación: 22 de noviembre de 2000

Modificación de 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.

En el año 2001 se le hizo una importante modificación a la norma antes mencionada, quedando los límites máximos permisibles de arsénico bajo los siguientes valores, considerándose en límite del año 2005 (0.025 mg/L) hasta el año 2010.

Año	Límite permisible de arsénico (mg/L)
1994	0.050
2001	0.045
2002	0.040
2003	0.035
2004	0.030
2005	0.025
2010	0.025

Cuadro 2. Cumplimiento gradual anual del comportamiento del límite máximo permisible para el arsénico (As)

Fuente: Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y elaboración propia

El cuadro siguiente muestra los niveles de concentración de arsénico en 63 pozos que abastecen a la Comarca Lagunera, comparados con la norma mexicana que aplicaba en año 2000 y con la que aplica en la actualidad.

Cuadro 3 Concentración de arsénico en pozos y su comparación con la norma mexicana en el año 2000 y 2005 (Huerto et al. 1999) (Fuentes, 2005)

Ubicación	As mg/L	NOM- 127- 2000 (0.05 mg/L)	NOM- 127- 2005 (0.025 mg/L)	Ubicación	As mg/L	NOM- 127- 2000 (0.05 mg/L)	NOM- 127- 2005 (0.025 mg/L)
Pozo 1 R. Blanco	0.0207	Cumple	Cumple	Pozo 6	0.0963	No cumple	-----
Pozo 2 R. Blanco	0.0159	Cumple	Cumple	pozo 7	0.0778	No cumple	-----
El Coronel	0.0277	Cumple	No cumple	Pozo Sacrificio 1	0.2312	No cumple	-----
Vicente Suárez	0.0121	Cumple	Cumple	Pozo Sacrificio 4	0.2246	No cumple	-----
22 de Febrero	0.0125	Cumple	Cumple	V. Carranza	0.0536	No cumple	-----

Morelos	0.0128	Cumple	Cumple	Pozo 1 Agrícolas	0.0512	No cumple	-----
Poanas	0.0495	Cumple	No cumple	Pozo 2 Agrícolas	0.0283	Cumple	No cumple
San Ramón	0.0637	No cumple	-----	Pozo 3 Agrícolas	0.0285	Cumple	No cumple
Transporte	0.0411	No cumple	-----	Pozo 4 Agrícolas	0.0359	Cumple	No cumple
La Torreña	0.043	No cumple	-----	Pozo Malvinas 1	0.0235	Cumple	Cumple
Pozo 1	0.0211	Cumple	Cumple	Pozo Malvinas 2	0.0774	No cumple	-----
Pozo 3	0.021	Cumple	Cumple	Pozo Malvinas 3	0.0285	Cumple	No cumple
Pozo 4	0.0207	Cumple	Cumple	Pozo Virginias	0.0745	No cumple	-----
Pozo 11	0.0362	Cumple	No cumple	Pozo El Fresno	0.0151	Cumple	Cumple
Pozo 12	0.0148	Cumple	Cumple	P. 1 San Felipe	0.0291	Cumple	No cumple
Pozo 13	0.0146	Cumple	Cumple	P. 2 San Felipe	0.0181	Cumple	Cumple
Pozo 16	0.0162	Cumple	Cumple	P. 3 San Felipe	0.0055	Cumple	Cumple
Pozo 6	0.0077	Cumple	Cumple	P. 4. San Felipe	0.0155	Cumple	Cumple
P. 8 interestatal	0.0444	cumple	No cumple	Pozo Luján	0.0109	Cumple	Cumple
Pozo 9	0.0298	Cumple	No cumple	P. San Antonio B III	0.0096	Cumple	Cumple
Pozo 15	0.0355	Cumple	No cumple	Pozo la Joya	0.0134	Cumple	Cumple
Salamanca	0.1966	No cumple	-----	Pozo san Agustín	0.022	Cumple	Cumple

San Jacinto	0.0253	Cumple	Límite	P. Nuevo Mieleras	0.0296	Cumple	No cumple
León Guzmán	0.0313	Cumple	No cumple	Pozo San Isidro	0.0394	Cumple	No cumple
P. 3 Torreón	0.0482	Cumple	No cumple	Pozo 1 Coyote	0.0084	Cumple	Cumple
Pozo 59	0.0278	Cumple	No cumple	P. 3223 Coyote	0.0119	Cumple	Cumple
Pozo 30	0.0538	No cumple	-----	T. Caballo Blanco	0.0242	Cumple	Cumple
Pozo 29	0.0301	Cumple	No cumple	Toma ej. Las Vegas	0.0716	No cumple	-----
Pozo 2	0.0581	No cumple	-----	P. 18 interestatal	0.0389	Cumple	No cumple
Pozo 3 Matamoros	0.0729	No cumple	-----	P. 10 San Felipe	0.0594	No cumple	No cumple
Pozo 4 Matamoros	0.0884	No cumple	-----	P. San Antonio B 1	0.0136	Cumple	Cumple
Pozo 5	0.022	Cumple	Cumple				

Fuente: Estudios de Comisión Nacional del Agua, 2009

Reglamento para el uso, explotación y aprovechamiento de las aguas del subsuelo en la zona conocida como Comarca Lagunera y que establece la reserva de agua potable respectiva.

Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 13 de agosto de 1991

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.

CONSIDERANDO

Que por Decretos Presidenciales publicados en el Diario Oficial de la Federación, de fechas 27 de abril de 1949, 28 de octubre de 1952, 6 de diciembre de 1958 y 17 de abril de 1965, se declararon vedas para el alumbramiento de aguas del subsuelo en los municipios de los Estados de Coahuila y Durango, que conforman la denominada Comarca Lagunera y zonas adyacentes

Que desde principios de la década de los años treinta, la necesidad de agua para todos los usos en esta región motivó la construcción de pozos en gran escala, de tal manera que el número de éstos en operación ascendió de setecientos sesenta en 1936, a tres mil doscientos en 1979, para después decrecer gradualmente a tres mil sesenta en 1989, de los cuales alrededor de dos mil doscientos treinta se utilizan actualmente para riego de terrenos agrícolas;

Que los estudios realizados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la Comisión Nacional del Agua, han confirmado que la extracción superó a la recarga de aguas subterráneas, provocando el vaciado gradual del almacenamiento del acuífero, cuyo espejo de aguas se abatió de cincuenta a ciento veinticinco metros en ciertas zonas, durante los últimos cuarenta años;

Que el abatimiento de los niveles del agua subterránea ha provocado la disminución del gasto de los pozos y de la eficiencia de sus equipos de bombeo; el aumento de consumo de energía eléctrica y de su costo de operación; y el deterioro gradual de la calidad del agua subterránea, al grado de que, en la actualidad, sólo se encuentra agua de calidad apta para consumo humano en una estrecha faja localizada a lo largo del Río Nazas;

Que de persistir esta situación, el descenso del espejo del agua al ritmo actual, hasta de tres metros por año en algunas zonas, tendrá una repercusión cada vez más grave sobre el abrevadero de ganado y la agricultura de riego por bombeo, actividades que juegan un papel relevante en la economía de la Comarca Lagunera;

Que en respuesta a la inquietud manifestada por los habitantes de la Comarca Lagunera por la conservación y el incremento de su nivel de desarrollo, y teniendo en cuenta las limitaciones físicas impuestas por la naturaleza, el Ejecutivo Federal a mi cargo tuvo a bien disponer la formulación y la instrumentación del "Programa Nueva Laguna", puesto en marcha el 22 de septiembre de 1989, encomendando la coordinación, el seguimiento y la evaluación de sus acuerdos y acciones al Consejo de Concertación Regional, en el que todos los sectores usuarios del agua tienen la oportunidad de participar, a través de sus representantes, en la solución

de los problemas que les afectan;

Que en los términos del artículo 36 del Reglamento de la Ley de fecha 29 de diciembre de 1956, en Materia de Aguas del Subsuelo, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 27 de febrero de 1958, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos hizo del conocimiento de los usuarios interesados, el anteproyecto del presente Reglamento, para que expresaran sus puntos de vista, habiendo manifestado en consenso general, la necesidad de preservar las aguas subterráneas mediante el cumplimiento de las disposiciones propuestas en ese documento;

Que en cumplimiento de uno de los acuerdos básicos del "Programa Nueva Laguna" y como parte del Consejo de Concertación Regional, en fecha 6 de marzo de 1990 se instaló el Comité de Supervisión Hidráulica denominado "Grupo de Trabajo para el Uso y Aprovechamiento del Agua" ("Grupo del Agua"), integrado por representantes de los diferentes sectores usuarios del agua, con la finalidad de definir, mediante consenso, las mejores opciones de solución a los problemas hidrológicos de la región, dentro de un estricto apego a los ordenamientos legales vigentes;

Que durante 1990 se llevó a cabo un intenso proceso de concertación, en el que inicialmente la Comisión Nacional del Agua expuso la problemática del agua subterránea a las diferentes organizaciones de usuarios.

Posteriormente, presentó al "Grupo del Agua", el primer anteproyecto de Reglamento, que después de ser analizado por sus integrantes, fue objeto de numerosas observaciones y sugerencias, mismas que fueron consideradas en la formulación de las versiones subsecuentes del anteproyecto; y

Que en el presente ordenamiento y al margen de las diferentes corrientes ideológicas y políticas, se recogen las propuestas planteadas por los agricultores, ganaderos, industriales, comerciantes y habitantes de las áreas urbanas y rurales de la Comarca Lagunera, he tenido a bien expedir el siguiente:

ARTÍCULO PRIMERO.- El presente Reglamento es de interés público y tiene por objeto el control de la extracción y utilización de las aguas del subsuelo en la zona conocida como Comarca Lagunera, a fin de presentar los mantos acuíferos, evitando el constante deterioro de la calidad del agua subterránea y garantizando el abastecimiento del vital líquido para todos los usos.

ARTÍCULO SEGUNDO.- La aplicación de este Reglamento compete a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la Comisión Nacional del Agua ("La Comisión"), la cual promoverá la participación de las autoridades

estatales y municipales que tengan competencia en la zona, para la vigilancia y cumplimiento de las disposiciones que se establecen en este ordenamiento.

ARTÍCULO TERCERO.- El ámbito de aplicación del presente Reglamento abarca la región comprendida en la poligonal definida por los vértices que a continuación se indican:

Vértice	Nombre del poblado	Municipio	Latitud	Longitud o Sitio Geográfico
I	El Refugio	Lerdo, Dgo.	25°26'03"	103°45'12"
II	Cañón de Carboneras	Lerdo, Dgo.	25°27'23"	103°33'28"
III	Cañón de Picardías	Lerdo, Dgo.	25°18'25"	103°29'30"
IV	Alto de Palomillo	Viesca, Coah.	25°14'09"	103°11'30"
V	Venustiano Carranza	Viesca, Coah.	25°21'00"	102°57'30"
VI	Cerro de Santiago	San Pedro, Coah.	25°57'20"	102°57'10"
VII	Tlahualilo	Tlahualilo, Dgo.	26°06'50"	103°26'05"
VIII	El Jaboncillo	Mapimí, Dgo.	26°01'24"	103°42'35"
IX	Dinamita	G. Palacio, Dgo.	25°42'58"	103°39'30"
X	Cerro del Piloncillo	Lerdo, Dgo.	25°33'50"	103°35'45"
XI	Salamanca	Lerdo, Dgo.	25°30'56"	103°41'56"

La poligonal descrita comprende totalmente al municipio de Matamoros, y parcialmente a los de Torreón, Viesca, San Pedro de las Colonias y Francisco I. Madero, del Estado de Coahuila, asimismo abarca todo el Municipio de Gómez Palacio y parte de los Municipios de Tlahualilo de Zaragoza, Mapimí y Lerdo, del Estado de Durango.

ARTÍCULO CUARTO.- El volumen máximo autorizado de atracción del acuífero en la zona reglamentada será de seiscientos millones de metros cúbicos por año.

ARTÍCULO QUINTO.- Se establece una zona de reserva de agua subterránea en parte de los municipios de Torreón, en el Estado de Coahuila, y de Gómez Palacio y Lerdo, en el Estado de Durango, con el objeto de dar una protección especial a la porción del acuífero que todavía contiene agua de calidad apta para consumo humano. Esta zona de reserva estará comprendida en la poligonal definida por los vértices que a continuación se indican:

VÉRTICE	NOMBRE DEL POBLADO	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD
A	SANTA FE	TORREÓN, COAH.	25°33'52'	103°19'48"
B	ZARAGOZA	TORREÓN, COAH.	25°31'26"	103°21'16"
C	SECTOR I ZARAGOZA	TORREÓN, COAH.	25°29'32"	103°21'22"
D	EL REFUGIO	LERDO, DGO.	25°26'03"	103°45'12"
E	SAN JACINTO	LERDO, DGO.	25°28'45"	103°44'11"
F	SALAMANCA	LERDO, DGO.	25°30'56"	103°41'56"
G	FILADELFIA	G. PALACIO, DGO.	25°37'11"	103°28'53"
H	EL CASTILLO	G. PALACIO, DGO.	25°40'18"	103°25'36"
I	LA CONCHA	TORREÓN, COAH.	25°38'00"	103°22'55"
J	ANA	TORREÓN, COAH.	25°35'56"	103°22'55"

Dentro de dicha zona únicamente se permitirá la operación de los pozos actuales que cuenten con permiso y sólo se autorizarán por "La Comisión" nuevos aprovechamientos destinados a la atención de servicios públicos, para usos domésticos y abastecimiento de agua a poblaciones.

ARTÍCULO SEXTO.- "La Comisión" deberá:

I. Aplicar un programa para reducir las extracciones del acuífero, en los términos del artículo 4o. de este ordenamiento;

II. Participar concertadamente con todos los organismos y asociaciones de los sectores usuarios, en programas orientados a incrementar la productividad y la eficiencia en el uso del agua; y

III. Actualizar el estudio geohidrológico, a fin de complementar las bases técnicas para definir la política de operación del acuífero, promoviendo a este efecto, la participación de los distintos sectores usuarios.

ARTÍCULO SEPTIMO.- Si como resultado del estudio a que se refiere el artículo anterior, se determinará la necesidad de reducir las extracciones autorizadas, ésta se llevará a cabo en forma gradual dentro de un lapso no mayor de cinco años.

Cada 2 años se revisará la política de reducción de extracciones de acuerdo al comportamiento que muestre el acuífero.

ARTÍCULO OCTAVO.- "La Comisión" promoverá la aportación de recursos de los gobiernos federales, estatales y municipales, así como de los sectores usuarios, a través de Convenios de Concertación, con objeto de emprender acciones orientadas a la preservación y mejor aprovechamiento del acuífero. El "Grupo del Agua" participará en la vigilancia del ejercicio de los recursos aportados por las partes.

ARTÍCULO NOVENO.- No podrán construirse pozos para la extracción de aguas subterráneas, ni modificarse las características o usos de los existentes, sin contar con la asignación o concesión de aguas y el permiso de construcción de obras expedido previamente por "La Comisión", de lo cual se informará oportunamente al "Grupo del Agua".

ARTÍCULO DECIMO.- "La Comisión" elaborará el padrón de usuarios y el censo de las obras de alumbramiento y de los brotes de agua del subsuelo, para conocer el comportamiento del acuífero y regular su uso, explotación y aprovechamiento.

ARTÍCULO DECIMO PRIMERO.- "La Comisión" podrá autorizar nuevos aprovechamientos de agua subterránea para usos domésticos, servicios públicos urbanos, abrevaderos, industriales y otros, conforme a las disposiciones legales aplicables y a la normatividad técnica que ella dicte al respecto, considerando la opinión del "Grupo del Agua". En su caso, podrá autorizar la transferencia de derechos y los cambios de uso del agua que sean pertinentes. Las autorizaciones para nuevos aprovechamientos de las aguas comprendidas en la zona de reserva que se establece en el presente Reglamento, se otorgarán conforme a lo dispuesto en el último párrafo del artículo quinto.

ARTÍCULO DECIMO SEGUNDO.- Las asignaciones, concesiones o permisos para la extracción de aguas subterráneas para servicios públicos urbanos, estarán sujetas a que el agua resulte apta para consumo humano, o sea económicamente viable su potabilización, y serán otorgadas previa solicitud y a nombre de los organismos administradores de los sistemas de abastecimiento o de los fraccionamientos en que sean los colonos quienes presten el servicio.

ARTÍCULO DECIMO TERCERO.- Las asignaciones, concesiones o permisos que sean otorgados para nuevos aprovechamientos con fines industriales, o para incrementar el volumen autorizado de agua a los existentes, deberán cumplir los requisitos siguientes:

- I. Instalar sistemas que garanticen el uso eficiente del agua, conforme a las normas técnicas que al respecto dicte "La Comisión";
- II. Descargar aguas residuales cuyas características satisfagan las normas técnicas vigentes en la materia; y
- III. Demostrar, en el caso de usuarios industriales de aguas nacionales ya establecidos en la zona objeto del Reglamento, que están al corriente en el pago de las cuotas que señala la Ley Federal de Derechos.

ARTÍCULO DECIMO CUARTO.- Las concesiones y permisos para aprovechamiento de aguas del subsuelo y construcción de las obras respectivas con fines agrícolas, estarán sujetos a las siguientes condiciones:

- I. No se autorizarán perforaciones para nuevos aprovechamientos,
- II. Sólo se permitirá la reposición de pozos en un radio de cien metros y dentro del mismo predio o ejido; y
- III. Sólo se permitirá la relocalización de pozos en el mismo predio o ejido, o cuando se realice de la zona de reserva de agua potable, definida en el artículo tercero de este ordenamiento, a otro sitio localizado fuera de ésta.

ARTÍCULO DECIMO QUINTO.- Las condiciones de operación y las características de los pozos que se autoricen, como nuevos aprovechamientos o en sustitución de otros ya existentes, serán fijadas por "La Comisión", en cada caso, con base en los gastos de extracción aprobados y tomando en cuenta las condiciones geohidrológicas y la calidad del agua existentes en el sitio de ubicación. Para reducir la posibilidad de que los pozos extraigan volúmenes de agua mayores a los autorizados, "La Comisión" fijará los diámetros del ademe y de la tubería de succión de acuerdo con la tabla siguiente:

CAUDAL AUTORIZADO	DIÁMETRO MÁXIMO DEL ADEME		DIÁMETRO MÁXIMO DE LA BOMBA	
	Centímetros	Pulgadas	Centímetros	Pulgadas
Litro por segundo				
0.1 – 4	15.24	6	5.8	2
5 – 15	20.32	8	10.16	4
16 – 35	25.40	10	15.24	6
36 – 60	30.48	12	20.32	8
61 – 80	35.56	14	25.40	10

ARTÍCULO DECIMO SEXTO.- El espaciamiento mínimo entre los pozos existentes y los nuevos, será determinado por "La Comisión", en cada caso, en función de las condiciones locales de explotación del acuífero y del caudal de extracción del nuevo aprovechamiento.

ARTÍCULO DECIMO SEPTIMO.- Para el cumplimiento de las disposiciones contenidas en este Reglamento, "La Comisión" realizará las visitas de inspección que juzgue convenientes, a efecto de verificar el estado de las obras, los cultivos, el uso a que se destinen las aguas y, en general, las condiciones de extracción y operación. En la vigilancia de la aplicación del presente ordenamiento, "La Comisión" podrá apoyarse en el "Grupo del Agua", conforme a las bases que para ello determine.

ARTÍCULO DECIMO OCTAVO.- Los usuarios de las aguas subterráneas en la zona reglamentada, están obligados, en los términos de la Ley Federal de Aguas, a permitir las visitas de inspección y otorgar al personal de "La Comisión" todas las facilidades que se requieran para el exacto cumplimiento del presente Reglamento.

TRANSITORIOS

PRIMERO.- El presente Reglamento entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

SEGUNDO.- Para efectos del artículo décimo, "La Comisión" elaborará un padrón provisional de usuarios, dentro de un período de treinta días hábiles contados a partir de la fecha de entrada en vigor del presente Reglamento.

TERCERO.- Los usuarios que cuenten con permiso y, por omisión, no figuren en el padrón provisional, así como los que hayan adquirido derechos sobre un aprovechamiento mediante compra del predio en el que está ubicado, sin haber solicitado la autorización correspondiente a "La Comisión", serán inscritos en el mismo, si en el transcurso de trescientos sesenta y cinco días naturales siguientes a la fecha de entrada en vigor de este Reglamento, exhiben ante la misma su permiso vigente.

CUARTO.- A partir de la fecha en que entre en vigor el presente Reglamento, "La Comisión" abrirá un período de regularización y comprobación, con una duración de dieciocho meses, al término del cual, se definirán los volúmenes autorizados de todos los aprovechamientos registrados en el padrón provisional, integrándose el padrón definitivo de los usuarios de las aguas subterráneas.

QUINTO.- El padrón definitivo será publicado en el Diario Oficial de la Federación, dentro de los noventa días naturales siguientes a la fecha en que termine el período de regularización.

SEXTO.- A partir de la fecha de entrada en vigor del presente Reglamento, se otorga un plazo de ciento ochenta días naturales para que sean instalados y puestos a funcionar, a satisfacción de "La Comisión", los medidores totalizadores volumétricos por cuenta de los usuarios, salvo causa de fuerza mayor debidamente comprobada. Una cantidad equivalente al costo de adquisición del medidor, podrá ser acreditada contra el pago de derechos federales sobre agua.

SEPTIMO.- "La Comisión" actualizará el estudio geohidrológico dentro de un plazo no mayor de dieciocho meses, contados a partir de la fecha de publicación del presente ordenamiento, considerando para ello los volúmenes de extracción registrados en los medidores durante el ciclo anual.

Hecho en la Ciudad de México, Distrito Federal, a los doce días del mes de agosto del año de mil novecientos noventa y uno.

El arsénico (As) y sus características

El arsénico es un metaloide (Benítez et al., 2008) tóxico y un carcinógeno, ampliamente distribuido en el ambiente como componente natural en rocas sedimentarias, rocas volcánicas y también en aguas geotermales, en algunos casos es dispersado durante actividades antropogénicas. En el medio natural el As es encontrado en compuestos de azufre y óxidos, y se distribuye a través del agua como un proceso milenario de la erosión de las rocas y del suelo (Marín, 2005).

Las mayores fuentes de exposición de As es la ingesta de agua contaminada. Se conoce que la toxicidad crónica de este elemento en el agua de bebida causa efectos dañinos a la salud. La Organización Mundial de Salud (OMS) lo ha clasificado como una sustancia carcinógena y el valor guía establecido por esta organización se ha reducido de 0.05 a 0.01 mg/L de As total.

Este mismo límite se estableció en Estados Unidos y Japón, sin embargo, otros países, algunos de ellos con graves problemas de contaminación arsenical, continúan con el límite de 0.05 mg/L. En México la concentración máxima permisible establecida por la NOM-127-SSA1-1994 a partir del año 2005 es de 0.025 mg/L (Cantú et. al., 2004).

El arsénico se encuentra distribuido en la corteza terrestre, ocupando el vigésimo lugar entre los elementos más abundantes. Es un constituyente natural de ciertas rocas y formaciones minerales como la arsenopirita y minerales de sulfuro. A través de un proceso de erosión, desintegración y disolución de las rocas llega a contaminar los mantos acuíferos donde se le encuentra como sales inorgánicas de arsenito (As III) y arsenato (As V), siendo mucho más tóxico el primero. Al no tener sabor ni olor, de estar presente en el agua de bebida, puede consumirse inadvertidamente originando habitualmente el llamado hidroarsenicismo crónico (Cartas geográficas Cetenal, 1976). Su fuente más importante y que permite su presencia en el agua subterránea es la erosión de minerales que lo contienen, especialmente los vidrios volcánicos. De hecho, frecuentemente se lo encuentra asociado a oro, cobre y plomo. Su distribución varía con la profundidad y en sentido horizontal. El agua extraída de perforaciones en suelos con alta concentración de As no necesariamente contiene altas concentraciones del mismo. El contenido depende de la forma química del As presente en el suelo y la composición del agua en cuestión, en particular su alcalinidad y los contenidos en sales de Calcio y Magnesio. En general las aguas blandas (pobres en calcio y magnesio) y alcalinas (por su riqueza en bicarbonato de sodio) son las que poseen más As. El mecanismo que controla la disolución del As es una combinación de factores de velocidad de flujo (hidráulicos) y reacciones físico-químicas con la superficie del mineral (Benítez, 2008).

La toxicidad del arsénico es compleja, depende de la vía de exposición, de la forma química, del estado de la valencia y de la concentración a la que se hace la exposición. Así, por ejemplo, las sales inorgánicas trivalentes son más tóxicas que las pentavalentes (Fuentes, 2004).

El arsénico en el agua natural

El arsénico es un elemento no metálico presente en la naturaleza formando un 0,00005% de la corteza terrestre, el cual se presenta en sus formas orgánica o inorgánica. Su principal vía de dispersión en el ambiente es el agua. Aun si se considera la sedimentación, la solubilidad de los arsenatos y arsenitos es suficiente para que este elemento se transporte en los sistemas acuáticos. La concentración del arsénico en aguas naturales frescas es muy variable y probablemente depende de las formas de arsénico en el suelo local. En los sistemas acuáticos el arsénico se puede presentar en cuatro estados de oxidación bajo condiciones normales siendo las más comunes sus estados trivalentes (arsenitos) y pentavalentes (arsenatos). Las condiciones que favorecen la oxidación química y biológica inducen el cambio a especies pentavalentes y, a la inversa, aquellas que favorecen la reducción cambiarán el equilibrio al estado trivalente. Los arsenatos tienen mayor capacidad de ionización debido a la presencia del doble enlace, la molécula que al perder el ion hidrógeno por la disociación, queda con carga negativa formando varios aniones. En agua con alto nivel de oxígeno, el As+5 (como H₃AsO₄) es estable, existiendo las especies antes mencionadas, en un rango de pH de entre 2 a 13 (Cantú et al., 2004).

Efectos del arsénico en el hombre

Se conoce que las principales rutas de exposición de las personas al arsénico son la ingesta e inhalación, que es acumulable en el organismo por exposición crónica y a ciertas concentraciones ocasiona afecciones como: alteraciones de la piel (relajamiento de los capilares cutáneos y la dilatación de los mismos) con efectos secundarios en los sistemas nervioso, irritación de los órganos del aparato respiratorio, gastrointestinal, y hematopoyético y acumulación en los huesos, músculos y piel, y en menor grado en hígado y riñones.

Existe evidencia epidemiológica que personas con ingestión prolongada de arsénico inorgánico, vía agua de bebida, es la hiperqueratosis palmo-plantar cuya manifestación principal es la pigmentación de la piel y callosidades localizadas en las palmas de las manos y pies. La presencia de arsénico en agua, su grado de contaminación y la incidencia de enfermedades de piel en Argentina y México se describen en diferentes estudios. Resultados con animales de laboratorio indican que el arsénico inorgánico trivalente es más tóxico que el pentavalente debido a

que los compuestos pentavalentes tienen menor efecto en actividades enzimáticas, pero in vivo éstos pueden ser reducidos a compuestos trivalentes. La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación, estructura química y solubilidad en el medio biológico (OMS, 2010).

Arsina > As+3 inorgánico > As+3 orgánico > As+5 inorgánico > As+5 orgánico > compuestos arsenicales y arsénico elemental.

Fig. 5.- La escala de toxicidad del arsénico de manera decreciente

Fuente: Organización Mundial de la Salud, 2010

La toxicidad del As+3 es 10 veces mayor que la del As+5 y la dosis letal para adultos es de 1-4 mg As/Kg. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América, USEPA, clasifica al arsénico como cancerígeno en el grupo A debido a la evidencia de sus efectos adversos sobre la salud. La exposición a 0,05 mg/L puede causar 31,33 casos de cáncer de la piel por cada 1 000 habitantes y ha considerado bajar el límite máximo de aceptación de 0,050 mg/L, al de 0,010 - 0,020 mg/L. El Centro Internacional de Investigaciones sobre cáncer lo ha clasificado en el grupo I porque tienen pruebas suficientes de la carcinogenicidad para seres humanos. La eliminación natural del organismo humano es por vía urinaria, heces, sudor y epitelio de la piel (descamación). La exposición continua a través del agua para consumo humano ocasiona lesiones cutáneas características, tales como pigmentación, hiperqueratosis plantar y papilar, así como la presencia de carcinomas en la piel (OMS, 2010).

Algunos estudios de toxicidad del arsénico indican que muchas de las normas actuales basadas en las guías de la OMS son muy altas, y plantean la necesidad de reevaluar los valores límites basándose en estudios epidemiológicos. Por ejemplo, en Taiwán estiman que el límite se debe reducir de 0,02 hasta 0,0005 mg/L, en otros casos al parecer deberían aumentarse dichos valores, de acuerdo a las condiciones regionales. En América Latina ha podido apreciarse que a niveles similares de arsénico en diferentes condiciones (climatológicas, de nutrición y otros) el nivel de afectación es diferente. Los cambios metabólicos del arsénico ocurren esencialmente en el hígado, donde los tioles endógenos tienen un papel crítico en la conversión del As+3 y As+5. Al parecer el glutatión (GSH) actúa como agente reductor. Las formas de As+3 resultantes pueden metilarse (oxidación y formación de metilarsénico - As+5) al aceptar este grupo funcional de la S-adenosilmetionina (ASM). El probable producto final de la metilación continua es el dimetilarsenato (DMA). Las especies de metilarsénico (As+3) y As+3 intermedias en el proceso pueden ser tóxicas e inhibir por ejemplo a la glutatión

reductasa (GR), enzima clave en el metabolismo del GSH y cuya acción (GR) es crítica para mantener las reacciones redox propias de las células. En el organismo humano el As+3 y As+5 tienen diferentes mecanismos de acción. El As+5 muestra un comportamiento parecido al del fosfato, pero difiere con este en la estabilidad de sus ésteres. Los ésteres del ácido fosfórico son estables lo que permite la existencia del ácido desoxirribonucleico (ADN) y la adenosina 5-trifosfato (ATP), en cambio los ésteres ácidos de As+5 son hidrolizables. Las enzimas pueden aceptar al arsenato e incorporarlo en compuestos como el ATP, pero los compuestos análogos formados se hidrolizan inmediatamente. Por ello, el arsenato puede inactivar el metabolismo oxidativo de la síntesis del ATP. En contraste, el As+3 tiene alta afinidad con los grupos tioles de las proteínas, lo cual puede inactivar una variedad de enzimas, como la piruvato deshidrogenasa y 2-oxoglutarato deshidrogenasa. En cambio, el monometilarsenato (MMA) y el dimetilarsenato (DMA) no forman enlaces fuertes con las moléculas biológicas humanas. Esto explica por qué su toxicidad aguda es menor que la del arsénico inorgánico. Aún no se ha establecido la cinética relacionada con la toxicidad del arsénico inorgánico, incluido el cáncer.

La explicación más aceptable es la inducción a una anomalía cromosómica sin actuar directamente con el ADN. El arsénico inorgánico ingerido es absorbido por los tejidos y luego se elimina progresivamente por mutación. Su excreción ocurre en la orina a través de los riñones. Cuando la ingestión es mayor que la excreción, tiende a acumularse en el cabello y en las uñas. (Ochoa, et al., 2009).

La sensibilidad de las personas a los efectos tóxicos del arsénico inorgánico varía, dependiendo entre otros de la genética, metabolismo, dieta, estado de salud y sexo. Estos factores deben considerarse en la evaluación de riesgos a la exposición de arsénico. Las personas con mayor riesgo son las que tienen poca capacidad para metilar arsénico y por lo tanto lo retienen más. En este caso, los más vulnerables son los niños y las personas con un estado nutricional deficiente. (Fuentes, 2005).

Entre los efectos nocivos no carcinogénicos de este metaloide los más comunes asociados a su ingestión son los que se presentan en piel: hiperpigmentación, hipopigmentación e hiperqueratosis; daños al sistema cardiovascular, alteraciones renales y hepáticas, desarrollo de neuropatías periféricas y encefalopatías, y su capacidad de disruptor endocrino relacionado con el desarrollo de diabetes. Por otro lado, existe información epidemiológica suficiente para relacionar la exposición aérea ocupacional al arsénico y el desarrollo de cáncer broncogénico. También los estudios epidemiológicos indican la asociación entre la ingestión de arsénico inorgánico y el desarrollo de carcinomas de la piel. Posteriormente se ha reconocido la relación entre la presencia de arsénico en el agua de varias regiones

y el aumento en la presencia y mortandad por cánceres de vejiga, pulmón, riñón y cáncer hepático en la población potencialmente expuesta (Vega, 2001).

Antecedentes en la Comarca Lagunera

Los primeros antecedentes de la contaminación con arsénico datan de 1962, cuando se notificaron 40 casos graves y una defunción en el sector urbano de Torreón, Coahuila.

Los estudios sobre arsénico se iniciaron en la Región Lagunera, entre los estados de Durango y Coahuila. En esa zona se encontró envenenamiento crónico con arsénico de carácter endémico y brotes extremos que afectaron a seres humanos y animales. Un estudio sobre contaminación con arsénico en 128 pozos de agua en 11 distritos detectó en un rango de 0,008 a 0,624 mg/L que más de 50% de las muestras tuvieron niveles mayores de 0,05 mg/L. Se estimó que alrededor de 400.000 individuos estuvieron expuestos al arsénico a través del agua de bebida, con concentraciones mayores de 0,05 mg/L. Estas evidencias permiten suponer que en el mediano plazo puede representar un problema de salud pública.

De esos grupos, un total de 489.634 habitantes enfrentan un riesgo individual carcinogénico máximo del orden de $4,5 \times 10^{-2}$ – $5,7 \times 10^{-2}$; un total de 609.253 enfrentan un riesgo entre $5,2 \times 10^{-3}$ y $4,1 \times 10^{-2}$ (11). En la Región Lagunera se ha encontrado además de otros signos y síntomas de arsenicismo, un 0,7% de prevalencia de la enfermedad de pie negro. Con el fin de establecer un sistema de vigilancia epidemiológica en esta región, se realizó el proyecto “Identificación de Indicadores Tempranos de Riesgo para la Salud Derivados de la Exposición al Arsénico”, que involucraron la evaluación del riesgo genotóxico y excreción urinaria de porfirinas y de derivados metilados de arsénico. Teniendo como propósito orientar las decisiones para establecer medidas de control del arsenicismo. En la actualidad, en México y Argentina, con el apoyo de la OPS, se está desarrollando un estudio socioeconómico del impacto del arsénico en la salud pública y se está estudiando la viabilidad de las alternativas de remoción del arsénico en las fuentes de agua de bebida (Castro, 2006).

El Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE), es una enfermedad producida por el consumo sistemático de agua (como bebida y en la preparación de alimentos) con concentraciones mayores de 0,01 ppm (partes por millón) de As en aguas de bebida. Se caracteriza por la presencia de lesiones en piel y alteraciones sistémicas cancerosas y no cancerosas (Benítez, 2008). Por las manifestaciones cutáneas, pueden describirse cuatro períodos clínicos de la intoxicación, los cuales no pueden delimitarse categóricamente ya que se imbrican entre sí.

El primero es una hiperhidrosis palmoplantar; el segundo, una hiperqueratosis de las mismas zonas con trastornos vasculonerviosos locales; el tercero, una melanodermia difusa más visible en el tronco y el cuarto, el estado maligno de algunas de estas lesiones (Astolfi, 1971).

En México, sin duda la región geográfica más afectada por el hidroarsenicismo lo constituye la Comarca Lagunera. En Torreón ocurrió un brote agudo en 1962 donde se notificaron 40 casos graves y una defunción.^{2, 3} Aunque en forma mucho más controlada, el problema persiste hasta la actualidad en varios municipios manifestándose como hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE), (García et al. 2003).

A) Antecedentes Ambientales

En la Comarca Lagunera el valor promedio de arsénico encontrado en el agua de acuerdo a los estudios realizados en los años ochenta fue 8 veces superior a la norma de la OMS y 60 veces más alto que el valor encontrado en las zonas no afectadas.

B) Antecedentes Sanitarios

En México en 1958 se reconoció que en la Comarca Lagunera se encontraba una zona de hidroarsenicismo crónico. En las poblaciones rurales de los municipios de Francisco I. Madero y San Pedro de las Colonias en Coahuila, y Tlahualilo, Durango, se realizaron entre los años setenta y ochenta, algunos estudios epidemiológicos que mostraron una alta incidencia de estados patológicos atribuibles al arsénico: lesiones en la piel y enfermedades vasculares periféricas (Palomo et al., 2007) En el año de 1986, la Universidad Autónoma de Coahuila evaluó el estado de salud de una muestra de 5,903 habitantes de la Comarca Lagunera, de los cuales 204 (3.4%) presentaron lesiones relacionadas con el arsénico y 15 (0.2%) presentaron lesiones cancerosas, todos ellos del municipio de Francisco I. Madero (Vega, 2001).

Situación actual en la Comarca Lagunera

Debido a los altos niveles de concentración de arsénico que presenta el agua potable de Torreón, Coahuila, llegando a 0.070 microgramos por litro, la salud de unas 70 mil personas se encuentra amenazada. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM), el límite para no poner en riesgo la salud de las personas es de 0.025 microgramos por litro de agua, la Organización Mundial de la Salud (OMS) lo establece en los 0.010 microgramos, mientras que en 19 de los 78 pozos para el suministro de agua potable en Torreón se han detectado más de los 0.025 microgramos de arsénico por litro. Raymundo Rodríguez, gerente de saneamiento

del Sistema Municipal de Agua y Saneamiento (Simas), dijo que actualmente se valoran alternativas para evitar que se siga consumiendo agua con altas concentraciones de arsénico. Por su parte el investigador y toxicólogo Gonzalo García explicó que el subsuelo de la Comarca Lagunera es rico en calcio, arsénico y flúor, y que estos elementos emergen con más facilidad en la perforación de pozos de agua a mayor profundidad. "Anteriormente, los agricultores sacaban agua a 10, 20 metros de profundidad, es agua que se recarga rápido con la avenida del río (Nazas), entonces era agua joven, que tenía pocos años, no tenía mucho tiempo en contacto con el subsuelo", dijo. El médico señaló que actualmente el agua se está extrayendo a profundidades de hasta 500 metros por lo que en muchos casos es agua que tiene cientos o miles de años en el subsuelo y en consecuencia con mayores concentraciones de arsénico y otras sales. De los efectos en la salud se ha demostrado que en áreas muy expuestas va desde un cuadro clásico de hidroarsenicismo con lesiones en pies, manos con callosidades, cambios en la pigmentación, hasta lesiones precancerosas y cáncer de piel. Hace unas semanas se entregaron los resultados del estudio realizado durante un año por personal del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, en el que se analizaron las alternativas para la remoción del arsénico del agua; y actualmente, autoridades de los tres niveles de Gobierno analizan implementar en Torreón una medida emergente para evitar la ingesta de agua con altos niveles de arsénico.

Para la Comisión Nacional del Agua (CNA), la solución de fondo para evitar daños a la salud de los torreonenses es evitar la sobreexplotación de los mantos acuíferos en la región. Óscar Gutiérrez, director regional de la CNA, dijo que como medida urgente para enfrentar el problema de las altas concentraciones de arsénico es necesaria la instalación de filtros en los pozos de agua o bien, mientras se logra una solución definitiva para evitar la contaminación por arsénico, se analizan alternativas como el que en cada hogar se cuenten con filtros purificadores de agua. En San Pedro la situación es semejante: El gerente del Sistema Municipal de Agua y Saneamiento (Simas), Gerardo Bilbao Marcos, informó que los niveles de arsénico de todos sus pozos están por arriba de la Norma Oficial Mexicana, de acuerdo a los resultados que se obtuvieron en el último muestreo que se realizó el mes pasado. Bilbao Marcos comentó que con este muestreo se estableció que el pozo de Caballo Blanco tiene el nivel más alto con 0.056 miligramos de arsénico por litro de agua (mg/l), cuando la Norma Oficial Mexicana marca que el máximo debe ser 0.025 mg/l. El pozo Gato es el que tiene el nivel más bajo con 0.027 mg/l, el pozo Jaboncillo tiene 0.052 mg/l y el pozo Leal tiene 0.049 mg/l, mientras que los pozos de Aguas Claras y Frontera tienen 0.052 y 0.044 respectivamente (Siglo de Torreón, 2010). Estudios anteriores demostraron que existe un desprendimiento de arsénico en las tuberías de distribución de agua potable donde existían antecedentes de pozos con

concentraciones elevadas de arsénico >0.05 mg/L. Los efectos a la salud provocados al ser humano por ingestión y contacto con arsénico han provocado que las autoridades mexicanas cancelen los pozos que presentan este metaloide y busquen otras alternativas de abastecimiento. Sin embargo, a pesar de que las concentraciones de los pozos son inferiores a la norma mexicana actual para el arsénico, el abastecimiento del agua se lleva a cabo en las mismas tuberías que fueron utilizadas para abastecer a las comunidades antes de conocerse los efectos negativos del arsénico en el ser humano. Las incrustaciones se localizaron en tuberías de hierro colado y galvanizado que tienen antigüedad hasta de 50 años (Fuentes, 2004).

En la Comarca Lagunera se han detectado varias fuentes de abastecimiento cuya concentración de arsénico total excede el límite máximo permisible establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de agua para uso y consumo humano ($25 \mu\text{g/L}$) y sobrepasa el valor guía de la OMS ($10 \mu\text{g/L}$) (Martin, 2010).

En Los acuíferos de la Comarca Lagunera la recarga que se registra es de 519 millones de metros cúbicos y una extracción de mil 10 millones de metro cúbicos, es decir; se extrae el doble de lo que la naturaleza recarga al año y por lo tanto los niveles de los acuíferos siguen en descenso gradualmente. A partir de la década de los 70 ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados, de 32 en 1975, aumentó a 80 en 1985, y de 97 en 2001 a 104 en el 2005 (Planeta Azul, 2010).

Alternativas para remoción de As del agua en la Comarca lagunera

Una alternativa que se ha explorado en la región para el tratamiento del agua y que ha dado buenos resultados es la ósmosis inversa. Sin embargo, hay algunos factores que dificultan su instalación; entre ellos, el costo de operación, afectado en buena medida por el consumo de energía eléctrica y la necesidad de remineralizar el agua. La nanofiltración se plantea como una alternativa a la ósmosis inversa ya que ha demostrado ser eficaz para la remoción del arsénico V, aunque no es el caso para el arsénico III. Las membranas de nanofiltración requieren menor presión de operación que la ósmosis inversa, lo que implica el uso de motores de menor potencia y por lo tanto menor consumo de energía para tratar el mismo tipo de agua. El permeado contiene mayor cantidad de sólidos disueltos totales que el agua osmosada (principalmente iones monovalentes), por lo que la remineralización puede no ser necesaria o requiere dosis menores de reactivos para lograr que el agua sea estable (no corrosiva).

La explotación del agua subterránea en el acuífero principal de la Comarca Lagunera, ha provocado el descenso progresivo de los niveles piezométricos y

esto a su vez, la migración de aguas subterráneas con concentraciones de arsénico superiores a la establecida por la Norma Oficial Mexicana vigente (NOM-127-SSA1-1994) para uso y consumo humano.

Como una alternativa para el control de dicho avance se implementaron en 1991 y 2000, dos programas de recarga artificial mediante embalses de infiltración construidos sobre el río Nazas. El agua utilizada para la recarga artificial provino de la presa Francisco Zarco, la cual se condujo a través del canal Sacramento y se derivó por los canales de desfogue (3+500 y 11+420), para descargar finalmente a los embalses de infiltración. En cada caso se seleccionó una red de pozos para la observación y el monitoreo del experimento.

El balance de masas del experimento de 1991 muestra que se derivaron 3.4 Mm³ del canal Sacramento, de los cuales se estima se infiltraron 3.2 Mm³, durante 18 días. El balance de masas del experimento del 2000 muestra que el volumen vertido al sistema de embalses ascendió a 5.1 Mm³, de los cuales se estima se infiltraron 3.7 Mm³ al embalse No. 1 y 1.4 Mm³ en el embalse No. 2. La duración del evento fue de 65 días.

El balance se efectuó considerando la precipitación ocurrida durante el experimento y cuyos valores ascienden a 66.2 mm y la evaporación registrada fue de 160 mm. Los resultados obtenidos en los estudios llevados a cabo por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua muestran que el experimento de recarga artificial vía embalses de infiltración es viable técnicamente y que los sitios son adecuados, ya que poseen características hidrogeológicas apropiadas, áreas libres, y cuenta con la infraestructura hidráulica necesaria para el manejo y conducción del agua a los embalses de infiltración (Martin, 2010).

Métodos para la remoción de As en el agua

En general, el tratamiento de agua potable está orientado a remover color, turbiedad y microorganismos de origen fecal. Esta remoción se logra a través de una combinación adecuada de procesos: coagulación-floculación- sedimentación-filtración y desinfección. Pero cuando se desea remover elementos químicos del agua, como el arsénico, es necesario recurrir a métodos más complejos, como los señalados en el cuadro:

Cuadro 4. Técnicas empleadas para la remoción de arsénico

Óxido reducción
Separación sólido líquido
Coagulación- Adsorción con sales de hierro y aluminio
Intercambio iónico
Alúmina activada
Hierro y manganeso
Hidróxido férrico granular
Hierro con filtración directa
Ablandamiento con cal
Osmosis inversa y nanofiltración
Electrodiálisis inversa
Procesos biológicos

Fuente: elaboración propia.

Existen diferentes tecnologías para remover arsénico del agua con eficiencias que van desde 70 hasta 99%. Los métodos de coagulación – floculación y ablandamiento con cal, son los más usados en grandes sistemas y no exclusivamente para remover el arsénico. En pequeños sistemas pueden ser aplicadas el intercambio iónico, alúmina activada, osmosis inversa, nanofiltración y electrodiálisis inversa. Las tecnologías emergentes son las de arena recubierta con óxidos de hierro, hidróxido férrico granular, empaques de hierro, hierro modificado con azufre, filtración con zeolita, adición de hierro con filtración directa y remoción convencional de hierro y manganeso. La eficiencia del proceso elegido depende de la concentración inicial, estado de oxidación del arsénico y el pH. A continuación se describirán algunos métodos para remover arsénico (Esparza, 2010).

Oxidación/Reducción: Mediante este proceso se oxida el arsenito a arsenato para mejorar su remoción en procesos complementarios. Se puede usar cloro dióxido de cloro, ozono y permanganato de potasio.

La oxidación catalítica del As⁺³ es posible en presencia de óxido de cobre, carbón activado y radiación UV. Uno de los inconvenientes de este proceso es el tiempo de reacción. También es posible su oxidación biológica y por medio de la acción catalítica de la luz.

Separación sólido/líquido: Los procesos de precipitación, coprecipitación, adsorción e intercambio iónico pueden transferir el arsénico de la fase disuelta a la fase sólida. En algunos casos el sólido que provee la superficie de adsorción es grande y fijo, ej. Granos de resina de intercambio iónico, y es requerida una separación adicional. Los sólidos formados in situ (a través de precipitación o coagulación) deben ser separados del agua por sedimentación ó filtración.

Precipitación: El arsénico disuelto es transformado en un sólido de baja solubilidad y removido por sedimentación y filtración, por ej. La precipitación del arsenato de calcio; también durante la coagulación y floculación pueden coprecipitar algunos compuestos disueltos como el arsénico, para luego ser removidos por filtración.

Adsorción: Diversos materiales sólidos incluyendo flóculos de hidróxido de hierro y aluminio pueden adsorber el arsénico por un mecanismo de adsorción de las superficies y de esta manera es removido del agua.

Separación física: Algunas membranas sintéticas pueden actuar como un filtro molecular para remover el arsénico y otros compuestos particulados disueltos, ya que pueden ser permeables a ciertos compuestos disueltos, pero excluye a otros.

Procesos de remoción biológica: La actividad bacteriana puede jugar un papel catalizador importante en varios de los procesos de remoción de arsénico, pero se conoce poco sobre la viabilidad del uso de la remoción biológica para eliminar el arsénico en agua.

Coagulación/Filtración: En las plantas de tratamiento de agua, el As ⁺⁵ puede ser removido en forma efectiva tanto por coagulación con sulfato de aluminio o hierro, como por los procesos de ablandamiento con cal y soda. Los coagulantes señalados se hidrolizan formando hidróxidos, sobre los cuales el As ⁺⁵ se adsorbe y coprecipita con otros iones metálicos.

Los coagulantes más comunes son las sales metálicas. Entre ellas podemos mencionar:

- Sulfato de aluminio, hidróxido de aluminio o de cobre.
- Sales de hierro: cloruro férrico, sulfato férrico, hidróxido férrico.
- Cal o cal hidratada. Opera en un rango de pH mayor a 10,5 y en algunos casos requiere un tratamiento secundario para lograr una calidad de agua consistente. Este proceso se conoce como ablandamiento con cal y depende fuertemente del valor de pH.

Los factores que afectan la eficiencia del proceso son:

- Tipo y dosis de coagulante.
- Tiempo de mezcla. pH (se reduce la eficiencia a valores muy bajos o muy altos).
- Estado de oxidación y concentración del arsénico y relación de concentración entre As (III) y As (V).
- Temperatura
- Presencia de otros solutos inorgánicos (tales como sulfatos, fosfatos, carbonatos y calcio).

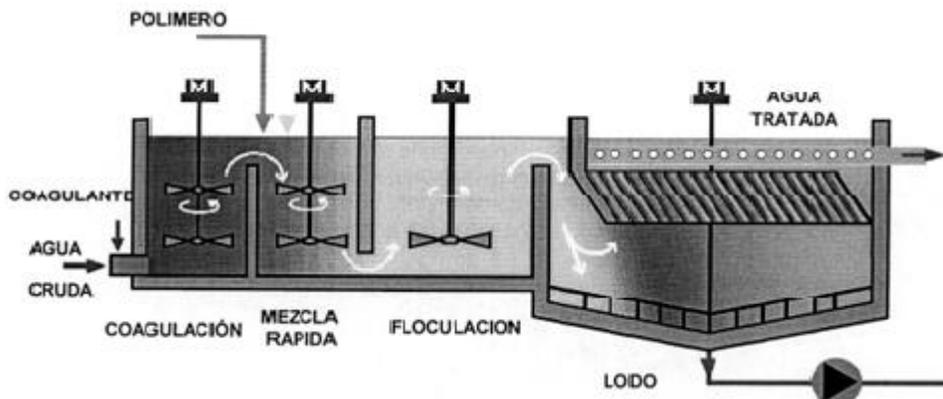


Fig. 6.- Esquema típico de Coagulación / Floculación / Sedimentación

Los equipos involucrados son en general sistemas de dosificación con el correspondiente mecanismo de mezclado con el agua a tratar que puede ser o bien un mezclador estático, una cámara de coagulación seguida eventualmente por una de floculación rápida y/o lenta y una batea de sedimentación (con o sin placas paralelas). La dosificación puede automatizarse en función de variables tales como el caudal, pH, potencial de oxidación-reducción, etc. Posteriormente, mediante la filtración se puede eliminar el As remanente, obteniéndose de esta forma agua apta para ser destinada al consumo humano. La filtración convencional es la separación de partículas sólidas al atravesar un medio que retiene estas partículas. Este medio puede contener de diversos materiales, siendo los más utilizados: arena, antracita, granate, carbón activado, telas filtrantes (Marín, 2002).

La eficiencia de filtración dependerá de:

- Tipo de medio filtrante
- Tasa de filtración (caudal por unidad de superficie)
- Tiempo de contacto o volumen por unidad de caudal
- Sistema de contralavado (puede ser con agua solamente o con agua y aire)

Los filtros pueden operarse en forma manual o automatizada con contralavados programados en función del ensuciamiento o tiempo transcurrido.

En lugar de una filtración posterior a la sedimentación, se puede mejorar la eficiencia de retención de sólidos con membranas de microfiltración. El proceso se completa con las correspondientes tratamiento final del agua (ajuste final de pH, desinfección, etc.) y de los barros generados.

La coagulación- adsorción con sales de hierro ó aluminio es el método de tratamiento más documentado tanto para la remoción de arsénico, como de los compuestos disueltos y suspendidos del agua, (arsénico, turbiedad, hierro, manganeso, fosfato y flúor). Con este método también se pueden obtener reducciones significantes de olor, color y precursores de trihalometanos. Sin embargo las condiciones óptimas para remoción del arsénico van a depender de las características del agua y las condiciones del proceso de tratamiento. Debido a la dificultad de remover As +3, por coagulación, se requiere de su oxidación a As+5. En rangos de pH alto y bajo, la eficiencia de este método disminuye significativamente. El sulfato de aluminio es el coagulante más usado en el tratamiento del agua debido a su bajo costo y manejo relativamente sencillo, aunque también se usan otros productos como el sulfato ferroso y férrico, clorosulfato férrico, cloruro férrico, alumbre, y carbonato de magnesio. Estas sales se hidrolizan en el agua formando hidróxidos de hierro y aluminio, los cuales

forman flóculos gelatinosos que se aglutinan facilitando el proceso de separación de los materiales disueltos y coloidales (Benítez, 2008).

Intercambio iónico. En la remoción de arsénico, las resinas de intercambio aniónico requeridas son de base débil y fuerte. Las de base fuerte pueden remover el arsenato del agua produciendo un efluente con menos de 0,001 mg/L de arsénico. Este método no remueve el arsenito y permite la diferenciación analítica entre las especies de arsénico.

Los principales interferentes del proceso son el sulfato y los sólidos disueltos totales y el hierro y manganeso pueden provocar la obstrucción del lecho. Cuando se presentan estos parámetros en concentraciones altas el agua requiere un pretratamiento. La remoción del arsénico es relativamente independiente del pH y la concentración inicial de este afluente y es casi completa (85-100%). Las ventajas de las resinas de intercambio iónico son su fácil regeneración con cloruro de sodio, su amplio rango de pH, y el mejoramiento de la calidad del agua por la remoción de cromato, selenato, nitrato y nitrito. Este método es relativamente costoso y la regeneración de la resina produce salmueras ricas en arsénico. Las tecnologías más modernas de intercambio iónico son las de lecho empacado con regeneración en contracorriente, que minimizan el exceso de regenerante y aumentan la eficiencia de cada regeneración. Los nuevos desarrollos tienden a buscar resinas cada vez más específicas pero se debe prestar mucha atención a las fugas que puedan ocurrir y la disposición del efluente de regeneración y de la resina (EPA, 2010).

En el diseño se debe considerar:

- pH
- Otras especies iónicas (sulfatos, cloruros, hierro, etc.)
- Capacidad de intercambio (gr As /L de resina)
- Tipo, concentración y tipo de inyección de regenerante
- Cantidad de regenerante por ciclo
- Ensuciamiento de resinas por materia orgánica o particulada
- Posibilidad de reuso de regenerante
- Un sistema de intercambio iónico involucra el siguiente equipamiento:
- Columna de intercambio (que contiene la resina y el correspondiente cuadro de válvulas de maniobras)
- Sistema de regeneración con soda cáustica (que debe ser calefaccionado en función de la temperatura de regeneración)
- Sistema de efluentes (Benítez, 2008).

Alúmina activada. La técnica es efectiva para el tratamiento de agua con alto contenido de sólidos disueltos, sin embargo el selenio, flúor, cloro y sulfato, a niveles altos, pueden competir por los sitios de adsorción con el arsénico. La alúmina activada es altamente selectiva para As^{+5} , lo que constituye un problema para su regeneración (pérdida del 5 al 10% de la capacidad de adsorción/ciclo), siendo la eficiencia de remoción del arsénico es mayor del 95%.

La remoción del arsenato ocurre bajo condiciones moderadamente ácidas (pH 5.5-6), donde las superficies de la alúmina están protonadas. Este método es ineficiente para la remoción completa de arsenito debido al carácter no iónico en ese rango de pH. Las aguas con alto contenido de sólidos, hierro y manganeso, requieren antes un pretratamiento para evitar la obstrucción del medio. Por lo general este método es recomendado para el tratamiento de aguas subterráneas debido a la alta carga de sólidos que pueden tener las aguas superficiales. Como en el agua subterránea el 20-50% del arsénico esta en forma de arsenito se requiere un proceso previo de oxidación, que puede ser efectuado con hipoclorito de sodio. Si el agua tiene hierro, este se oxidará propiciando la formación de compuestos insolubles de hierro que adsorben el arsénico que pueden separarse del agua mediante filtración por arena, el arsénico restante soluble residual es adsorbido por la alúmina activada (Vega, 2001).

Los factores que influyen en el diseño y eficacia de este sistema son:

- Otros iones que compiten en afinidad al medio (sulfatos, cloruros, fluoruros, sílice, hierro, etc.). Algunos aniones, que actúan en altas concentraciones como inhibidores.
- pH
- Tiempo de contacto de lecho (conocido como Empty Bed Contact Time o EBCT)
- Ensuciamiento del medio con particulado o materia orgánica
- Degradación de la capacidad del medio luego de las regeneraciones
- Estado de oxidación del arsénico.

La ventaja principal del uso de alúmina activada es que constituye un procedimiento relativamente bien conocido y está disponible comercialmente.

Los principales problemas para aplicación de esta técnica en pequeñas instalaciones son:

- La necesidad de reajustes del pH del agua cruda y tratada.
- La regeneración de la alúmina agotada con hidróxido de sodio (que produce lejías muy contaminantes que deben ser tratadas previos a su deposición).
- La necesidad de mano de obra especializada (Benítez, 2008).

Hierro y manganeso. La geoquímica del arsénico revela que altas concentraciones de arsénico con frecuencia están asociadas a altas concentraciones de Fe (II) y Mn (II). Las fuentes de agua que contienen hierro y/o manganeso y arsénico pueden ser tratadas con procedimientos convencionales para la remoción de Fe/Mn. Estos procesos pueden reducir significativamente el arsénico removiendo el hierro y el manganeso de la fuente de agua, basándose en los mecanismos que ocurren con la adición de hierro. Cuando la concentración natural de Fe/Mn no es suficiente para alcanzar el nivel necesario para la remoción de arsénico, este puede ser adicionado. La oxidación para remover Fe⁺² y Mn⁺², conduce a la formación de hidróxidos que remueven el arsénico soluble por reacciones de coprecipitación y adsorción. La producción de especies oxidadas de Fe-Mn y la precipitación seguida de los hidróxidos son análogas a la coagulación “in situ” (la cantidad de Fe o Mn removidos se traduce como la dosis de coagulante). Con Fe⁺² o Mn⁺² sin oxidar no se produce la remoción de arsénico. Cada 1 mg/L de Fe⁺² removido es capaz de adsorber 83% de un afluyente de 0,022 mg/L de As⁺⁵, produciendo un efluente de 0,0035 mg/L arsénico. La precipitación de 3 mg/L de Mn (II) podría producir un efluente con 0,00375 mg/L de arsénico residual, en un afluyente con 0,012 mg/L. Para el agua subterránea con alto contenido de hierro disuelto, el tratamiento tradicional de aireación y filtración con arena frecuentemente ofrece la reducción de arsénico al nivel sugerido por las normas existentes. Al adicionar un oxidante a un reactor con agua contaminada con sulfato ferroso donde se presentan los procesos que contiene un transportador inerte de granos de arena de cuarzo, se obtiene la remoción del hierro y la de otros metales y no metales entre ellos el arsénico en concentraciones residuales debajo de 0,0005 mg/L. Esta remoción de arsénico se mejora con la disminución del pH, Las condiciones de tratamiento óptimas son la adición simultánea de sulfato ferroso y peróxido de hidrogeno y el control del pH, menor que 7. La ventaja de este método es que no genera residuos, solamente gránulos con una densidad de aproximadamente 3 Kg/L (EPA, 2010).

Hidróxido férrico granular. El hidróxido férrico granular es ligeramente cristalino, acondicionando una suspensión de hidróxido de hierro, de forma irregular, cuyos granos alcanzan hasta un tamaño de 2 mm. Las superficies de las partículas del hidróxido de hierro granular adsorben As⁺⁵, en procesos independientes del pH, disminuyendo la capacidad de adsorción con el incremento de este (aunque se han obtenido buenos resultados a pH 8). Comparando con la alúmina activada, esta técnica es mucho más eficiente ya que la carga es diez veces mayor (promedio de carga alrededor de 2 g As/Kg de peso seco). Además del arsénico también adsorbe carbonato, silicato, fluoruro y fosfato. Al comparar este método con el de floculación, se ha demostrado que este ofrece alta confiabilidad operacional, mínimo de energía y bajos niveles de inversión en la planta con la desventaja de niveles de producción relativamente costosos (Benítez, 2008).

Hierro con filtración directa. Este proceso consiste en la adición de hierro (coagulación) seguida por filtración directa (sistema de microfiltración), removiendo consistentemente el arsénico hasta 0.002 mg/L. Los parámetros críticos son las dosis del hierro, la potencia del mezclado, el tiempo de retención y el pH (EPA, 2010).

Ablandamiento con cal. El ablandamiento con cal es un proceso similar a la coagulación con sales metálicas. La cal Ca (OH)₂ se hidroliza y reacciona con el ácido carbónico para formar carbonato de calcio, el cual actúa como el agente adsorbente en la remoción de arsénico. Este proceso es típicamente usado solo con aguas muy duras y con tratamiento a pH en el rango de 10 a 12. Esta técnica no es apropiada para sistemas pequeños debido al alto costo

La remoción (pruebas de jarras) de arsénico As⁺⁵ del agua (río, pozo y corriente) con una concentración desde 0,1 a 20 mg/L es de 40-70% para un rango de pH 9 a 10 incrementa la eficiencia de la remoción cuando el ablandamiento con cal es seguido por coagulación con hierro. El ablandamiento con cal a un rango de pH de 10,6-11,4 mostró una alta remoción de As⁺⁵ hasta 95% en un agua con una concentración inicial de 12 mg/L de arsénico.

El mecanismo principal en la remoción del arsénico mediante el ablandamiento es la adsorción del arsénico dentro del hidróxido de magnesio que se forma durante el ablandamiento. También la remoción del arsenato es excelente a pH >11, y más pobre a pH < de 10. La remoción de arsénico se mejora con la adición de hierro. Pero el carbonato disminuye el efecto. La remoción de arsénico disminuye en presencia de cantidades traza de ortofosfato especialmente a pH <12. Con este método la remoción del As⁺³ es pobre, con densidades de sorción del arsenito en un orden de magnitud menor que para el arsenato (Esparza, 2004).

Ósmosis inversa y nanofiltración. Proporciona eficiencias de remoción del orden del 95% cuando la presión de operación está a 1 psi ideal (75 a 250 psi). La remoción del arsénico es independiente del pH y de la presencia de otros solutos. La membrana requiere que el agua a tratar no contenga cantidades excesivas de material coloidal, en especial materia orgánica. En la nanofiltración, la eficiencia de remoción del arsénico alcanza al 90%. La remoción de contaminantes inorgánicos incluyendo el arsénico se logra usando sistemas de osmosis inversa de alta (400 psi) y baja presión (200 psi), con capacidad de tratar 1,82 L/s de agua. Estos sistemas remueven As+5 entre e 91-98% en reactores de alta presión y entre 77-87% en reactores de baja presión. La eficiencia de remoción para el As+3 en los sistemas de alta presión es de 63-70%, y en los de baja presión 12- 35%. Con diferentes tipos de membrana las remociones de As+3 y As+5 varían entre el 46 al 75% para concentraciones iniciales de As+3 de 0,04-1,3 mg/L. A concentraciones de 0,11-1,9 mg/L con el mismo tipo de membrana, se obtiene mayor eficiencia en la remoción del As+5 (98-99%). La efectividad de las membranas de nanofiltración y osmosis inversa para remover As+3 y As+5 en un rango de operación de 40-400 psi, en muestras de aguas sintéticas y naturales es entre 96-99%, esta separación se atribuye al alto peso molecular del arsenato y arsenito, en lugar de la repulsión por la carga, por lo tanto estas membranas son ideales para aguas subterráneas donde predomina el As+3 ya que no requerirían de una oxidación previa. Las variaciones en el pH (4-8) no afectan la remoción de las formas de arsénico. Cuando se trabajó con membranas de acetato-celulosa, el rango de pH debe ser entre 5-6.5 para evitar su deterioro por la hidrólisis del polímero.

La remoción de arsénico es independiente de la presencia de otros solutos, y puede obtener mejores resultados a bajas temperaturas. Finalmente las membranas de nanofiltración a presiones de operación de 40-120 psi, resultan tan eficientes como las de osmosis inversa a presiones de 200-400 psi. Las principales desventajas son: Las bajas tasas de recuperación de agua (10-20%), la necesidad de operar a presiones bastante altas, costos de operación altos, el agua tratada tiene muy bajos niveles de sólidos disueltos, lo que le confiere características corrosivas y bajos niveles de micronutrientes importantes para la salud humana. La diferencia de presión entre ambos lados de la membrana, se denomina Presión Osmótica. La ósmosis inversa se produce cuando se ejerce presión para invertir el flujo osmótico normal. Tal proceso constituye la base para tratar el agua cruda con alto tenor de arsénico. Así, aplicando presión el agua es forzada a pasar a través de la membrana semipermeable desde el lado más concentrado (agua cruda), hacia el lado menos concentrado (agua tratada), quedando retenidos en la membrana, por su tamaño, los iones del arsénico. Los equipos de ósmosis inversa cuentan con una bomba de alta presión, que impulsa el agua contaminada a los tubos donde están ubicadas las membranas

(construidas de acetato de celulosa o poliamidas) y membranas de película delgada. De estos tubos, el agua tratada, aproximadamente un 50% de la que entra va un depósito para consumo y el resto que es el rechazo (concentrado), sale de la planta de tratamiento, a fin de ser eliminado de la forma más conveniente. La eficiencia en la remoción de As de los equipos de ósmosis inversa, puede llegar al 98% .En el mercado existe disponible una gran variedad de equipos de ósmosis inversa que van desde equipos individuales, hasta aquellos para proveer de agua potable a localidades de hasta 300.000 habitantes, pasando por toda una gama intermedia. El mayor inconveniente que presentan estos equipos, es el costo ocasionado por el consumo periódico de reactivos y la reposición de membranas al cabo de 3 ó 4 años. A través del tratamiento por ósmosis inversa, se produce la retención de todas las sales presentes en el agua a tratar, por lo cual es recomendable que al agua obtenida luego del tratamiento es necesario efectuar una mezcla con el agua no tratada a fin de lograr los valores aptos para un agua de consumo humano (Castro, 1998).

Los principales factores que intervienen en el funcionamiento de una planta de ósmosis inversa son:

a.- Presión: Tiene relación directa con el volumen de agua tratada que se obtiene y el del agua de rechazo que se genera.

b.- Temperatura: Su incremento tiene efecto sobre el caudal y la calidad del agua tratada. A mayor temperatura, mayor contenido salino en el agua tratada. Por cada grado centígrado que disminuye la temperatura del agua a tratar se debe incrementar un 3% la presión a ejercer.

c.- Calidad del agua cruda: Determina la presión osmótica, ya que la misma está relacionada con el tipo y concentración de sales presentes. Para altas concentraciones de As, será necesario entonces aplicar una presión mayor.

d.- Presencia de agentes oxidantes (cloro) La presencia de los mismos en el agua a tratar, deterioran irreversiblemente la vida útil de las membranas. En consecuencia es necesaria su eliminación utilizando carbón activado o bisulfito de sodio antes de su ingreso al equipo de ósmosis inversa.

Cuadro 5. Aspectos a tener en cuenta para un uso eficiente de las membranas

Aspecto	Membranas de poliamida	Membranas de acetato celulosa
Actividad biológica	Debe estar controlada durante la operación de manera que la cantidad y calidad del agua producto no sea afectada	Idem
Cloro/Bromo	El contenido total en el agua a tratar debe ser menor de 0.1 ppm	El contenido en el agua a tratar debe ser menor de 0.1 ppm
Químicos	El agua a tratar debe estar libre de oxidantes fuertes.	Idem
pH	En operación continua debe ser mayor de 2 pero menor de 10 a 45	En operación continua debe ser mayor de 4 pero menor de 7

Electrodiálisis inversa. Su eficiencia de remoción es de hasta un 80%. En un efluente de 0.021 mg/L de arsénico se obtuvo una concentración residual de 0,003 mg/L. El porcentaje de recuperación del agua tratada es de 20 a 25% con respecto al afluente, esto es un problema para regiones que tienen escasez de agua. Esta técnica no es competitiva con respecto a los métodos de osmosis inversa y nanofiltración, en cuanto a costos y eficiencia del proceso (EPA, 2010).

Fitorremediación

Helecho (*Pteris vittata*)

Un equipo de científicos de la Universidad de Florida descubrió un helecho que absorbe arsénico del suelo contaminado. Esta es la primera planta que se ha encontrado que hiperacumula arsénico, es decir puede usarlo como parte de su alimentación. El helecho cuyo nombre científico es *Pteris vittata*, se cultiva fácilmente y prefiere los climas soleados y el suelo alcalino, esto último favorece la absorción del metaloide, ya que el arsénico puede ser extraído más fácilmente en condiciones alcalinas. El helecho no simplemente absorbe arsénico sino que lo hace con gran eficiencia. En las pruebas realizadas se encontraron niveles de hasta 200 veces superiores a las concentraciones medidas en los suelos

contaminados donde creció el helecho. En un sitio contaminado por madera tratada con solución de cromo, cobre y arsénico, el suelo presento una concentración de 38.9 mg/K de arsénico, mientras que el helecho presento 7526 mg/K de arsénico. En pruebas realizadas utilizando suelo artificial contaminado con arsénico, las concentraciones del metaloide en las hojas del helecho alcanzaron 22630 mg/K de arsénico, significando esto que el 2.3% de la planta estaba compuesta por arsénico. Un hecho sorprendente es que el helecho aun acumula arsénico en suelos que contienen niveles normales de arsénico de menos de 1 mg/K. Por ejemplo, una planta de helecho presentó 136 mg/K en las hojas el suelo solo tenía 0.47 mg/K de arsénico. Según lo observado, la planta crece y se desarrolla mucho mejor en suelos que contienen arsénico que en suelos sin este último, aunque todavía no han concluido que la planta necesita de arsénico para vivir. Debido a que el helecho acumula el 90% del arsénico en sus hojas y tallos, la estrategia sería hacer crecer la planta en lugares contaminados, luego cosechar las hojas y los tallos y transferirlas a una instalación autorizada para residuos peligrosos. Lo que todavía permanece sin resolver es porque el helecho acumula arsénico, las investigaciones futuras se enfocarán sobre cómo la planta lo toma, distribuye y detoxifica el arsénico (Sandoval, L., 2000).

Nopal (*Opuntia ficus indica*)

Una especie vegetal de gran abundancia y adaptabilidad como es el nopal puede ser de gran utilidad para proporcionar información acerca de la afectación por iones metálicos pesados en los cultivos, además, al ser una planta suculenta, es posible que acumule una cantidad importante de iones metálicos tóxicos, existiendo un gran potencial de fitorremediación en esta planta para regenerar el suelo contaminado por metales pesados. El nopal es utilizado como alimento en humanos y como forraje en ganado, se encuentra presente en la región y se puede cosechar en cualquier época del año, además se encuentra en todo tipo de terreno y concentra una gran cantidad de agua del subsuelo. Por otro lado, el nopal es conocido por su alto contenido en iones metálicos: Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Zn²⁺ (Gurrieri et al. 2000).

Biorremediación in situ

Las técnicas de biorremediación consisten básicamente en el aprovechamiento de los procesos microbianos naturales que se producen en un acuífero o en el suelo, mediante los cuales los contaminantes son utilizados por los microorganismos como fuente de alimento o de energía para poder desarrollar sus actividades vitales.

La aplicación de tecnología permite favorecer o amplificar la capacidad natural de

los microorganismos para transformar o degradar los contaminantes, mediante la creación de un ambiente propicio para su desarrollo. El ambiente más favorable para la mayor parte de los microorganismos, entre los que se incluyen bacterias, hongos y algas es el siguiente:

_.Temperatura: 15-45 °C

– pH entre 5,5 y 8,5

– Relación de nutrientes carbono: nitrógeno: fósforo de 120:10:1

– Presencia de agentes oxidantes y/o reductores que permitan las reacciones metabólicas de los microorganismos.

Además de estas condiciones, para que la biorremediación sea efectiva es necesario que los microorganismos sean los apropiados para el contaminante y que dichos contaminantes no sean tóxicos para los microorganismos (McCullough et al., 1999).

Conclusión

La revisión presente indica que la transferencia de tecnología relacionada con agua de bebida y saneamiento básico en los países en vías de desarrollo tiene un especial abordaje, en el cual hay que considerar el entendimiento y aceptación de la tecnología propuesta por parte de la comunidad y la capacidad de ésta para financiar su implementación. En el caso específico del agua de bebida, se debe tener en cuenta las características de las fuentes, su adecuación y forma de distribución y/o consumo y las variantes de la tecnología que se debe aplicar a situaciones específicas donde se consideren las características propias del lugar. Otro de los aspectos importantes es la existencia de personal capacitado para apoyar en el desarrollo del proyecto y posterior mantenimiento y control del mismo. Se debe tener en cuenta el costo/beneficio que introduce la tecnología propuesta, la misma que de un modo muy claro debe solucionar un problema social, de salud pública o de desarrollo de la comunidad intervenida.

En los países de Latinoamérica existe experiencia y capacidad para el desarrollo de tecnología, limitada por la carencia de recursos financieros, facilidades y sobre todo políticas de estado que faciliten y orienten el desarrollo de la tecnología que conlleve a la solución efectiva de problemas o satisfacción de las necesidades existentes. La población más afectada es la que se encuentra dispersa en el área rural lo que claramente podemos observar en la Comarca Lagunera, que consume agua sin ningún tratamiento y desconoce el riesgo al que está expuesto. Para esa población se requiere que las autoridades de salud, planificación y servicios de agua, entre otras, promuevan y ejecuten programas de prevención y control de riesgos del consumo del agua con niveles de arsénico superiores a los establecidos por las normas de calidad del agua de bebida. Los programas deben involucrar la participación de autoridades, comunidad y sistemas locales de salud.

Es necesario desarrollar estudios piloto en forma permanente y sostenida hasta lograr una solución definitiva que pueda ser recomendada para su implementación en los programas nacionales de remoción de arsénico en el agua de bebida. Se requieren algunos estudios que vayan más allá del trabajo a escala de laboratorio, estudios epidemiológicos, y aprovechar las experiencias existentes en América Latina. Como también desarrollar una capacidad analítica confiable y comparable para que se puedan lograr resultados confiables de los estudios desarrollados en campo y laboratorio. Además de concientizar a todos los sectores de la población, llámense comunidad, empresas o autoridades del hecho de que si el problema del hidroarsenicismo sigue ganando terreno como ha sucedido hasta hoy sin que se le ponga un límite, sin que se logre erradicar; entonces estaremos hablando de resignarnos a que el agua con la calidad requerida para consumo en La Comarca La se acabará más pronto de lo previsto.

Bibliografía

Albores A., M. E. Cebrián, I. Téllez, B. Valdez. Estudio comparativo de hidroarsenicismo crónico en dos comunidades rurales de la región lagunera de México 4 Bol Of Sund Pamm 86(3), 1979.

Arreguim Cortés, F.I., P. Martínez Austria, V. Trueba, 2004, “El Agua en México y su Perspectiva Científica y Tecnológica”, en El Agua en México: una vista desde la academia, B. Jiménez Cisneros, L.E. Marín, O. Escolero Fuentes, y J. Alcocer (Eds.), Academia Mexicana de Ciencias, México, D.F., México, 403 p.

Astolfi, E. Estudio de arsénico en el agua de consumo: Hidroarsenicismo crónico regional endémico. 1971 Prensa Médica Argentina 58: 1342- 1343,

Benítez R.; Jorge A. Álvarez, Miguel O. Dahbar, Silvia I. Rivero. 2008. Alternativas tecnológicas a tener en cuenta para la toma de Decisiones frente a la Problemática del arsénico en el Agua de bebida Programa Nacional de Minimización de Riesgos por Exposición a Arsénico en Agua de Consumo – Res. Ministerial 253/01 Ministerio de Salud de la Nación

Cantú, M. y H. Garduño, 2004, “Administración de Derechos del Agua: de regularización a eje de la gestión de los recursos hidráulicos”, en El Agua en México: una vista desde la academia, B. Jiménez Cisneros, L.E. Marín, O.

Cartas Geográficas Cetenal, GISB85, GISB86, G13B87, G13D15, G13D16, G13DI7, GISD25, G13D26, G13D27, Comisión de Estudios del Territorio Nacional, México, D.F., 1976.

Castro de Esparza M. L. Tercer Seminario Internacional sobre Evaluación y Manejo de las Fuentes de Agua de Bebida contaminadas con Arsénico. Remoción del arsénico en el agua para bebida y biorremediación de suelos Universidad de Chile. Santiago, Chile, del 08 al 11 de noviembre de 2004.

Castro De Esparza M. L., María W. de M. XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Abatimiento de Arsénico en Aguas Subterráneas para zonas Rurales. Noviembre de 1998

Castro de Esparza M.L. Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública. 2006. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS-SB/SDE/OPS) La Molina, Lima, Perú.

Dante M. L.; José A. G. Determinación de arsénico en aguas: diferentes técnicas y metodologías. Área de química analítica. Facultad de química bioquímica y

farmacia. Universidad Nacional de San Luis, Argentina. Escolero Fuentes, y J. Alcocer (Eds.), Academia Mexicana de Ciencias, México, D.F., México, 403 p.

Fuentes D. M. 2000. Análisis de la acumulación de arsénico en la red de distribución de agua potable en la Comarca Lagunera. Informe elaborado para la Unidad de Agua Potable y Saneamiento de la Comisión Nacional del Agua.

Fuentes D. M.* Arsénico, elemento de las incrustaciones en las redes de distribución de agua potable en el norte de México y su desprendimiento. 2005. García J.J., Olivas G., Hernández M.C., Sanmiguel M.F., González N. Alteraciones electroneuromiográficas en pacientes con hidroarsenicismo crónico regional endémico en la Comarca Lagunera. Revista Mexicana de Medicina Física y Rehabilitación 2003; 15:75-78.

Gutiérrez O. C.1, G. O. Flores2. Proyectos de recarga artificial de acuíferos en la Comarca Lagunera, México. 1Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.*Ingeniero Bioquímico Industrial, maestría en Ingeniería Ambiental de la UNAM.

Gurrieri S., Miceli L., Lanza C.M., Tomaselli F., Bonomo R.P., y Rizzarelli E. 2000 Chemical characterization of Silician Prickly pear (*Opuntia ficus indica*) and perspectives for the storage of its juice. J. Agric. Food Chem. 48, 5424-5431

[http://water.epa.gov/aboutow/ogwdw/agua/contams.cfm\(11/noviembre/2010\)](http://water.epa.gov/aboutow/ogwdw/agua/contams.cfm(11/noviembre/2010))

[http://www.planetaazul.com.mx/www/2007/07/17/secan-acuiferos-en-region-norte/\(21/noviembre/2010\)](http://www.planetaazul.com.mx/www/2007/07/17/secan-acuiferos-en-region-norte/(21/noviembre/2010))

[http://www.siglodetorreon.com.mx\(18/octubre/2010\)](http://www.siglodetorreon.com.mx(18/octubre/2010))

[http://www.who.int/research/es/2010\(08/noviembre/2010\)](http://www.who.int/research/es/2010(08/noviembre/2010))

Huerto D. Rubén, López L. Rogelio. 1999. Niveles de concentración de Arsénico en pozos para agua potable en la Comarca Lagunera. Informe elaborado para la Gerencia de Construcción de la Comisión Nacional del Agua. pp Anexo 1

McCullough, J., Hazen, T.C., Benson, S.M., Metting, F.B., and Palmisano, A.C. 1999. Bioremediation of Metals and Radionuclides...What it is and how it works. Office of Biological and Environmental Research of the U.S. Department of Energy's Office of Science. NABIR primer LBNL-42595.

Marín, L., E., 2002, "Perspectives on Mexican Ground Water Resources", Ground Water, Vol. 40 No.6, p.570-57.

Marín, S., L., E., El Agua en México: Retos y Oportunidades. 2005. Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, México, D.F., México.

Martín D. Alejandra. Remoción de arsénico mediante nanofiltración en la Comarca Lagunera, México. 29 de Septiembre de 2010.

Ochoa R. J., A. V. Lozano, A. L. Santana, L. G. Reza, A. R. Sánchez, D. F. Escajeda, A. V. Flores, L. T. Ortiz, D. M. G. Piñeyro, M. O. Reynoso, F. F. Luna, A. H. García, C. del R. Díaz, J. C. Renova, L. Raúl O. Domínguez. 2009. Arsenicismo subagudo y crónico. Estudio retrospectivo en 44 pacientes• Dermatología Revista Mexicana; 53(2):63-69

Ongley E. D. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 55. Roma. p 41-58.

Palomo R. M., J. Guillermo M. R. y Uriel F. V. Desarrollo Sustentable de los Recursos Naturales al Disminuir Riesgos de Contaminación en Actividades Agropecuarias. 2007. INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). Matamoros Coahuila (México). CULCyT//Mayo–Junio.

Sancha A. M.; O`Ryan R.; Marchetti.; Ferreccio C. 1998. Análisis de Riesgo en la Regulación Ambiental de Tóxicos: Caso del Arsénico en Chile. XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Lima – Perú

Sandoval, L., “Estabilización y disposición de residuos que contienen Arsénico”, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2000

Vega G., S. 2001. Riesgo sanitario ambiental por la presencia de arsénico y fluoruros en los acuíferos de México. Comisión Nacional del Agua, Gerencia del Saneamiento y Calidad del Agua, México DF

