

UN REPASO GENERAL DEL TRATAMIENTO DE ARSÉNICO; INQUIETUDES Y APLICACIONES PARA LOS SISTEMAS DE PEQUEÑA Y MUY PEQUEÑA ESCALA

Larry Henke. 2009. Agua Latinoamérica, Fort Lowell, Tucson, Arizona, EE.UU., 9(1):14-18.
www.produccion-animal.com.ar

Volver a: [Agua de bebida para ganado](#)

INTRODUCCIÓN

El arsénico continúa siendo uno de los elementos químicos que mayor daño causan al medio ambiente a nivel mundial. Se encuentra en altas concentraciones en Taiwán, China, Argentina, Chile, México, partes de Europa, en los Estados Unidos y, más notablemente, en Bengala Occidental, India y su país vecino Bangladesh.

Desde mediados de los años 1980, millones de personas han sido expuestas a niveles peligrosos de arsénico en su agua potable, incitando un alto nivel de actividad en todos los esfuerzos de salud pública para el tratamiento y prevención de enfermedades relacionadas con el arsénico. Tan sólo en Bangladesh, más de 120 millones de personas han sido expuestas a niveles de arsénico mayores que el Nivel Máximo de contaminante (MCL, en inglés) de 0.010 ppm establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (US EPA), lo cual presenta una emergencia potencial de salud a una escala sin precedentes.

QUÍMICA

El arsénico se encuentra dentro del Grupo 15 (V) de la tabla periódica de elementos junto con el nitrógeno y fósforo. Es considerado un metaloide y, como tal, posee propiedades metálicas al igual que no metálicas. En su forma pura es un metal quebradizo, gris, pero en la naturaleza se encuentra con mayor frecuencia con otros metales, tales como el hierro, cobre, plata y níquel, y en combinación con oxígeno y azufre.

Su número atómico es 33 y su peso atómico es 74.9, haciéndolo más pesado que el hierro, níquel y manganeso, pero más liviano que la plata, plomo y oro. Tiene cuatro estados comunes de reducción-oxidación, -3, 0, +3 y +5, pero sus formas más inorgánicas son los estados +3 y +5, al estar en combinación con el oxígeno como arsenito o arsenato.

El arsénico es utilizado en la producción de pesticidas, como revestimiento protector para la madera y en industrias tales como la electrónica, la industria del vidrio, y manufactura de papel.

ESTUDIOS GEOLÓGICOS

Los estudios de los mecanismos geológicos que movilizan el arsénico de la tierra hacia el agua siguen siendo investigados.

Aunque pueden existir rutas inorgánicas, tales como en el caso del agua altamente acídica de los residuos mineros, se han encontrado bacterias que pueden reducir el arsénico inorgánico (As⁵) a la forma más soluble (As³). De tal manera, el arsénico oxidado es movilizado de minerales estables al agua subterránea.

El arsénico es el vigésimo elemento más común en la corteza terrestre, décimo cuarto en el mar y décimo segundo en el cuerpo humano. El arsénico se encuentra en forma natural en más de 150 minerales, uno de los cuales es la arsenopirita, la cual contiene tanto hierro como azufre; otra forma en la que ocurre es realgar (As₂S₃).

EL ARSÉNICO COMO VENENO

Los efectos del arsénico en el cuerpo humano han sido conocidos por más de cuatro mil años; su legado como sustancia tóxica, tanto intencionalmente como accidentalmente, ha sido documentado en relatos ficticios e históricos. El arsénico tiene una reputación bien merecida por sus malas obras, pero también tiene un historial medicinal favorable.

Hipócrates utilizó las sales de arsénico para "curar" varias aflicciones, incluyendo el cáncer, úlceras, reumatismo, tuberculosis, asma y enfermedades venéreas, dándole una curiosa ironía a su juramento: "Antes que nada, no hay que hacer daño". Las sales de arsénico y tónicos tales como las soluciones de Fowler, De Valagin y Donovan fueron inventadas en los años 1700s para curar un amplio espectro de dolencias, el uso de las cuales continuó hasta ya bien entrado el siglo veinte. Aún hoy en día, el arsénico tiene un uso en el tratamiento de la leucemia y el cáncer del colon.

Como veneno agudo, el arsénico posee una dosis letal mediana, o que es letal 50 por ciento de las veces (DL50) igual a 763 mg/kg por ingestión de la sustancia pura. Las demás formas de arsénico tienen toxicidades mayores o menores; por ejemplo, una DL50 de 15 mg/kg para el trióxido de arsénico; 1.5 mg/kg para la arsina y dosis DL50 mayores para varias formas orgánicas.

Los niveles de concentración para el envenenamiento crónico son generalmente mucho menores para el arsénico inorgánico (DL50 = 10-20 mg/kg) y mucho más altos para las formas orgánicas (DL50 = 700-2.600 mg/kg). El arsénico se combina fácilmente con moléculas orgánicas para formar arseno-azúcares o formas metiladas de arsénico (arsénico mono- o di-metilado: MMA o DMA). Al ser ingerido, el organismo humano produce una reacción bioquímica con el arsénico inorgánico para formar dimetilarsénico, el cual puede entonces ser excretado del organismo.

Concentraciones mayores de arsénico abruma a los mecanismos de rechazo del organismo y el arsénico puede entonces interferir con la respiración celular reemplazando el fósforo en el trifosfato de adenosina (ATP). ATP es una sustancia química esencial que controla el almacenamiento y uso de energía en todas las células vivas, de plantas o animales.

Cuando el arsénico reemplaza al fósforo, el mecanismo de control de energía celular es interrumpido y la célula muere, resultando en una falla de órganos y posiblemente la muerte del organismo. Este es tan sólo un ejemplo del efecto del arsénico en los seres vivos y los investigadores están estudiando muchas otras rutas del arsénico que pueden ocurrir en los organismos vivos.

Las exposiciones agudas resultan en síntomas rápidamente identificables: aflicciones gástricas y pulmonares, vómito y diarrea con sangre; los efectos crónicos no son tan pronunciados desde un principio, pero son mucho más insidiosos. Los efectos tempranos de una exposición prolongada podrían no ser notados. Puede ser que la persona no presente ningún síntoma hasta por cinco años.

Los efectos de nivel crónico son determinados por la edad, género y peso del individuo, entre otros factores. Después de más o menos cinco años, el individuo puede presentar un oscurecimiento de la piel o manchas oscuras en las manos y los pies.

Después de 10 años de estar expuesto a bajos niveles de arsénico, éste puede producir enfermedades internas tales como la diabetes o puede atacar la estructura celular del sistema neurológico; el hígado, los riñones o la vejiga y otros órganos pueden ser destruidos o pueden contraer cáncer.

RUTAS DE EXPOSICIÓN

Las rutas inadvertidas de exposición incluyen las exposiciones ambientales a pesticidas y herbicidas. Hasta los años 1940s los principales pesticidas y herbicidas contenían arsénico y muchos campos de golf aún utilizan sustancias químicas a base de arsénico.

Otra ruta común de propagación es la ceniza, el humo o aserrín de la madera tratada con arsenato cromado de cobre (CCA). Aunque la madera tratada a presión con CCA fue voluntariamente limitada a usos no residenciales después del año 2003, muchas estructuras antiguas tienen tablas que han sido tratadas con esta sustancia química.

La producción de madera tratada con CCA continúa para aplicaciones industriales. La quema de esta madera es ilegal en todos los estados, pero la gente sigue quedando expuesta a través del manejo o el corte de la madera. Aunque los niños pueden ser expuestos al jugar en estructuras de madera que ha sido tratada con CCA, los resultados de pruebas demuestran que hay muy poca razón para preocuparse; la mayor parte de la exposición puede ser limitada lavándose las manos.

La exposición a través de la ruta alimenticia es a menudo preocupante; el arsénico se ha encontrado en una amplia variedad de productos alimenticios, desde los mariscos hasta el arroz y otros granos, al igual que la lechuga, rábanos, champiñones, vino, y hasta en los dulces. Sin embargo, en muchos alimentos, el nivel de arsénico es muy bajo y su consumo es nada más ocasional, por lo que la exposición total es relativamente baja.

Con mayor frecuencia se encuentra presente en los alimentos como arsénico orgánico y los seres humanos pueden procesar y eliminar de mejor manera las formas orgánicas de este elemento. Aún así, el arroz cocido en agua que contiene arsénico puede añadirle este elemento a una dieta que ya tiene un alto contenido de arsénico a través del agua potable; el agua potable es la ruta de mayor inquietud.

TRATAMIENTO MÉDICO

La atención médica rápida es esencial si se sospecha un envenenamiento agudo por arsénico. Aunque existen varios tratamientos disponibles, se requiere la estabilización de las funciones corporales.

A menudo el paciente deberá recibir un lavado gástrico, extrayendo la sustancia tóxica del aparato digestivo. Además, las funciones renales y neurológicas deberán ser monitoreadas y apoyadas. En algunos casos se ha utilizado de manera exitosa la hemodiálisis, terapia quelante y medicamentos tales como el dimercoprol.

La intoxicación crónica puede ser más difícil de tratar, dependiendo de la duración de la exposición. El primer paso, y probablemente el más importante para ayudar a aquellas personas que han sido expuestas crónicamente al

arsénico, es buscar fuentes alternas de agua. Si esto no es posible, puede eliminarse el arsénico del agua potable y del agua para cocinar.

Ya que ha progresado el envenenamiento hasta la etapa donde sus efectos ya pueden notarse, el prospecto de salud a largo plazo es poco alentador. Cuando una población completa ha sido afectada, las consecuencias a largo plazo para la salud son catastróficas.

DETECCIÓN Y MEDICIÓN

Los oficiales de salud pública reconocieron desde un principio la necesidad de contar con análisis de agua rápidos y precisos, especialmente en las áreas remotas. Los fabricantes de sistemas analíticos respondieron elaborando mejores métodos y equipos para llevar a cabo pruebas de campo, lo cual resultó en varios métodos que, aunque no son equivalentes a los métodos de laboratorio, sí son rápidos y relativamente fiables. Aún existe la necesidad de examinar millones de pozos de tubo (aunque no se conoce cuántos pozos existen, se calcula que tan sólo en Bangladesh hay más de 10 millones de pozos).

Una tira de prueba comúnmente utilizada en el campo puede ser utilizada para detectar la presencia de arsénico en los pozos, llevando a cabo pruebas de seguimiento más precisas cuando se considere necesario. Varias pruebas utilizadas en el mercado dependen de la conversión del arsénico presente en una muestra de agua a arsina, la cual a su vez cambia el color de un pequeño parche indicador de bromuro de mercurio. Este parche puede ser leído visualmente y comparado con un conjunto de normas utilizando un instrumento electrónico para mayor precisión.

La prueba es muy sencilla, requiriendo poca capacitación y toma poco más de media hora para que ocurra la reacción química. Pruebas de detección rápidas, móviles, pueden llevarse a cabo por parte de personal de campo; sin embargo, hay que ejercer cuidado para evitar lecturas falsas positivas o negativas.

Los estudios realizados en Asia han mostrado tasas de error del dos al cinco por ciento, lo cual no es aceptable para la salud pública. Las lecturas falsas positivas pueden ser una causa de alarma en la comunidad, especialmente cuando no hay ninguna otra fuente de agua fácilmente disponible para la población. Es necesario capacitar y supervisar cuidadosamente al personal de campo, ya sea por parte de un profesional o un voluntario que tenga el conocimiento adecuado.

La 'norma de oro' para la detección y cuantificación de arsénico sigue siendo el AAS o MS-ICP donde los límites de detección y el margen de error puede ser menores que 1.0 pg/L. En el caso del Método 200.8 de la US EPA, una detección ICP-MS de 0.4 pg/L, con el Método 1632, es posible obtener límites de AAS de dos nanogramos por litro.

Estas pruebas se llevan a cabo con instrumentos de laboratorio que son muy caros de obtener y operar, requieren operadores bien capacitados y toma mucho tiempo llevar a cabo las pruebas e interpretar los resultados. Sigue existiendo la necesidad de elaborar métodos más precisos para llevar a cabo pruebas de campo.

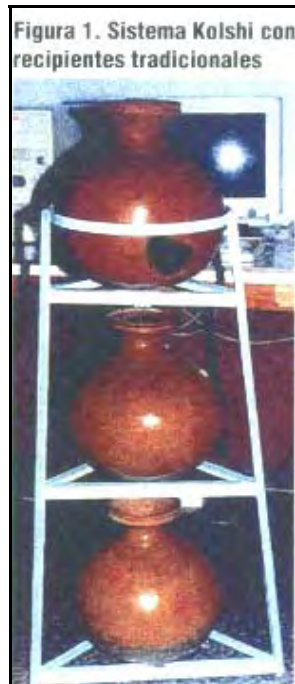
TRATAMIENTO DEL AGUA

El tratamiento del agua es un enfoque principal de la salud pública. Las tecnologías de tratamiento de arsénico reconocidas incluyen la coagulación/ precipitación, co-precipitación y filtración de hierro-arsénico, contención a través de elementos de adsorción, intercambio iónico y membranas.

Los esfuerzos por encontrar un método sencillo, a prueba de falsas maniobras, económico, efectivo y fiable han sido explorados alrededor del mundo.

La Fundación Grainger ofreció un premio de un millón de dólares (US\$ 1,000,000), el cual fue ganado por un catedrático de la Universidad George Mason, quien diseñó un sistema de proceso por tandas que utiliza materiales fácilmente disponibles en las zonas rurales de India y Bangladesh. El Dr. Abul Hassam, originario de Bangladesh, arregló tres jarras o "Kolshi" que contenían arena de ríos locales, hierro molido (hierro de cero valencia) y pedacitos de ladrillo.

Este sistema está siendo ahora distribuido a lo largo de la región. Las Figuras 1 y 2 ilustran varios otros procesos de tratamiento comúnmente utilizados.



COAGULACIÓN / PRECIPITACIÓN

La coagulación/precipitación a través de la adición de sales de aluminio o hierro o por suavizado de cal, son métodos generalmente reservados para las plantas municipales de tratamiento de agua de gran magnitud. Cada uno de estos métodos requiere un alto nivel de capacitación de los operadores, la adición continua de sustancias químicas cuya cantidad puede variar al mismo tiempo que cambia la composición del agua, y puede tener implicaciones de productos residuales.

Entre los productos químicos coagulantes, aquéllos que son a base de hierro parecen ser los más efectivos en reducir los niveles de arsénico por debajo del nivel máximo de contaminante (MCL) de 10 µg/L, promulgado por la US EPA. Estas tecnologías no son tan apropiadas para los pequeños sistemas debido al nivel de participación del operador.

ELEMENTOS DE ADSORPCIÓN

En los países en vías de desarrollo o en las pequeñas comunidades, se ha enfocado la atención en los elementos de adsorción. Algunos de estos elementos son materiales poco comunes que se encuentran restringidos a una localidad específica, como por ejemplo las raíces secas del jacinto, el yute, la arcilla laterita, aserrín, residuos de naranja y pulpa de papel periódico.

La ceniza suelta de las plantas de carbón ha sido estudiada a pesar de que la ceniza suelta puede por sí misma tener un alto contenido de arsénico. Entre los elementos propuestos y que han sido examinados se encuentra una amplia variedad de carbones activados formados de varias fuentes, desde carbón, hasta leña y huesos, y algunas formas de biomasa como mazorcas de maíz, semillas de frutas y algas marinas. Aunque el carbón activado puede reducir los niveles de partículas de arsénico, es muy costoso e introduce problemas de desecho de residuos.

El hierro es un componente central de varios elementos de adsorción efectivos. Se han utilizado revestimientos de hierro en arenas, glauconitas, carbón y otras sustancias. Además, se han propuesto y examinado con distintos grados de éxito, los siguientes elementos: hidróxido de hierro amorfo, carbón procesado y hierro de cero valencia (como en el sistema 3-Kolshi antes descrito) y carbón seguido por lana de acero.

Muchos de los métodos más exóticos de adsorción que utilizan materiales o procesos raros o de alto costo pueden ser imprácticos para remover el arsénico del agua potable en sí, pero pueden ser instrumentales para obtener un entendimiento más profundo del arsénico y de tal manera pueden llevar a la elaboración de métodos más novedosos en el futuro. En algunos casos, los elementos de adsorción pueden ser utilizados en residencias particulares. Las resinas de intercambio iónico de base fuerte han sido también utilizadas exitosamente en pequeños sistemas.

Se aplican las mismas inquietudes de los iones competitivos tales como el sulfato y los nitratos junto con las sustancias de ensuciamiento como el hierro y manganeso. Los niveles elevados de sulfato o SDTs pueden limitar la efectividad del intercambio iónico.

OXIDACIÓN Y CO-PRECIPITACIÓN CON HIERRO

Cuando el agua subterránea contiene hierro natural, la oxidación y co-precipitación seguidas por la filtración pueden ser una manera económica de remover ambos contaminantes. La regla general para la proporción de hierro a arsénico es de 20:1. Los oxidantes incluyen el cloro, ozono y permanganato de potasio; el oxígeno por sí solo a pesar de ser a menudo suficiente para el hierro por sí solo, no puede oxidar el arsénico.

El reactivo de Fenton (hierro y peróxido de hidrógeno) ha sido demostrado como un posible método para los pequeños sistemas. En todo caso, el uso de elementos apropiados de filtrado es necesario para seguir el paso de oxidación. La co-precipitación oxida el hierro y el arsénico de Fe_2 a Fe_3 y de As_3 a As_5 ; se ligan entre sí y luego se extraen de la corriente de agua.

Los elementos de filtro varían desde simples arenas de filtrado, arena verde de manganeso, arenas revestidas con hierro y glauconita y elementos cerámicos. Los filtros son configurados en diseños tradicionales con un retrolavado intermitente basado en el tiempo, volumen o pérdida de presión.

MEMBRANAS

Las membranas son un método comprobado para la remoción de arsénico y tanto la ósmosis inversa como la nanofiltración son métodos comprobados. Aunque la ultrafiltración (UF) y la microfiltración (MF) pueden ser utilizadas en algunos casos, el rendimiento de la membrana puede ser mejorado con el pre-tratamiento apropiado del agua cruda con química de coagulación, prefiltración y suavizado.

Además, el pre-tratamiento puede limitar el ensuciamiento que disminuye los tiempos de operación y la duración de la membrana. Las membranas pueden ser más costosas, aunque para los sistemas de muy pequeña escala éstas pueden ser una solución económica.

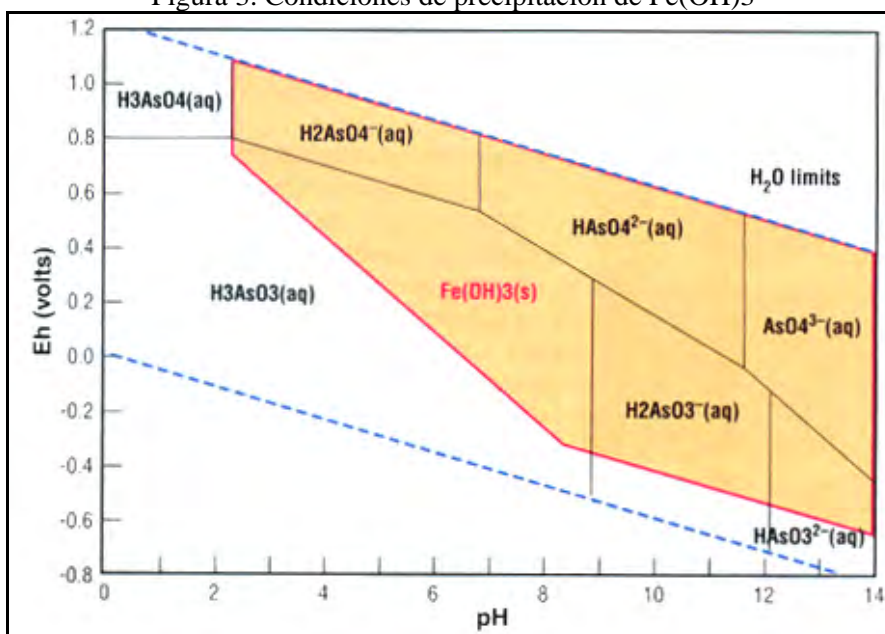
PREDICCIÓN DE LA REMEDIACIÓN DE ARSÉNICO

Los pequeños sistemas son por lo general bastante sensibles al costo. Las pequeñas comunidades y los pequeños suministros de agua pública a menudo no cuentan con la autoridad de impuestos y bonos de los usuarios de agua de sistemas municipales o industriales de mayor escala, de tal manera que las consideraciones de diseño se convierten en un desafío mayor.

Es esencial diseñar el tratamiento de arsénico de una manera cuidadosa, incorporando el monitoreo y los pasos de aseguramiento, y tomando en cuenta los costos de inicio e instalación, costos subsiguientes de las sustancias químicas, capacitación de los operadores y desecho de residuos. En las comunidades más pequeñas el operador tiene a menudo otras obligaciones que requieren una atención más inmediata.

Un análisis completo del agua consiste a menudo en determinar tanto las cantidades totales de arsénico como de las especies (As_3 y As_5), junto con los factores contribuyentes tales como el hierro, manganeso, dureza, sólidos disueltos totales (SDT) y factores asociados como el sulfato, nitratos y fósforo. El pH, potencial de reducción-oxidación (PRO), temperatura del agua y alcalinidad pueden afectar la selección del tratamiento apropiado. La Figura 3 indica los rangos de pH y Eh para las varias especies de arsénico y puede ayudar a determinar si los niveles de pH u oxidación son suficientes.

Figura 3. Condiciones de precipitación de $Fe(OH)_3$



Las pruebas pueden llevarse a cabo en dos etapas: la primera para ayudar a determinar la opción de tratamiento adecuada y la segunda para reducir las opciones y asegurar la remoción de arsénico. Los siguientes son aquellos parámetros que se consideran esenciales, aunque no todos son requeridos para algunos métodos de tratamiento: alcalinidad; aluminio (Al); arsénico (As); arsenita (As[III]); arsenato (As[V]); calcio (Ca); cloro (Cl); fluor (F); hierro (Fe); hierro (Fe²⁺); hierro (Fe³⁺); magnesio (Mg); manganeso (Mn); nitrato (NO₃); nitrito (NO₂); ortofosfato (PO₄); potencial de reducción oxidación (PRO/Eh); pH; silicio (Si); sulfato (SO₄); sólidos disueltos totales (TDS); dureza total; carbón orgánico total (COT) y turbidez.

Por ejemplo, si se selecciona el intercambio iónico, entonces deberán notarse los iones competitivos de sulfato, nitrato y cloro. En el caso del alumbre activado, entonces deberán considerarse el aluminio, manganeso y hierro.

Para los procesos de membrana, cualquier agente ensuciante como la turbidez, hierro, COT y dureza deberá ser medido. Los estudios comparativos para elevar el potencial de reducción oxidación con cloro o permanganato o los trabajos comparativos que utilizan pequeñas columnas pueden ser informativos.

PRUEBAS PILOTO

Los estudios comparativos de laboratorio pueden ser útiles en determinar si un proceso seleccionado puede funcionar, pero la mejor manera de averiguar esto es llevando a cabo un estudio piloto.

Las pruebas piloto deberán llevarse a cabo en el sitio, utilizando el mismo proceso que fue seleccionado. Un método de oxidación y la química y elementos de pre-tratamiento, un pequeño sistema de membranas, o una columna pequeña de intercambio iónico, pueden ofrecernos un mejor entendimiento del funcionamiento.

Las pruebas utilizando frascos junto con otros estudios de laboratorio más sofisticados que se llevan a cabo en el sitio y en tiempo real pueden determinar si los niveles de arsénico son reducidos a menos del nivel máximo de contaminante (MCL.) Las pruebas de campo para el arsénico deberán respaldarse con pruebas certificadas de laboratorio para asegurar el cumplimiento.

Las pruebas piloto, pruebas comparativas y exámenes de laboratorio para el agua le añaden al costo total de un sistema de tratamiento instalado, pero las consecuencias son demasiado graves como para saltarse cualquier paso en el diseño de tratamiento del arsénico. En contraste con los problemas de contenido de hierro, manganeso y dureza del agua, el arsénico representa un peligro a la salud pública e individual, cuyas consecuencias podrían no ser evidentes hasta mucho tiempo después de la exposición inicial y/o prolongada. Las consecuencias de un mal funcionamiento son demasiado serias, tanto para el diseñador como para aquellas personas que están obligadas a beber el agua contaminada.

ACERCA DEL AUTOR

El Sr. Larry Henke es un consultor independiente de tratamiento del agua que reside en el área de Minneapolis, Minnesota, proporcionando servicios para aplicaciones de filtrado y desinfección industrial y sistemas pequeños no comunitarios y sistemas públicos comunitarios de agua potable. Habiéndose graduado de la Universidad de Minnesota, el Sr. Henke tiene más de veinte años de experiencia en la industria de tratamiento del agua. El Sr. Henke es miembro de la "American Water Works Association" (Asociación Estadounidense de Obras Hídricas) y la "National Ground Water Association" (Asociación Nacional del Agua Subterránea), y además forma parte del Comité de Revisión Técnica de la revista Agua Latinoamérica. Contacto: (612) 599-7477 o lrhenke@msn.com

[Volver a: Agua de bebida para ganado](#)