

Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz

• Oscar Raúl Mancilla-Villa* •
Universidad de Guadalajara, México

*Autor de correspondencia

• Ana Laura Bautista-Olivas •
Universidad de Sonora, México

• Héctor Manuel Ortega-Escobar • Carlos Ramírez-Ayala •
Colegio de Postgraduados, México

• Amada Laura Reyes-Ortigoza •
Universidad Nacional Autónoma de México

• Héctor Flores-Magdaleno •
Colegio de Postgraduados, México

• Diego Raymundo González-Eguiarte • Rubén Darío Guevara-Gutiérrez •
Universidad de Guadalajara, México

Resumen

Mancilla-Villa, O. R., Bautista-Olivas, A. L., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Reyes-Ortigoza, A. L., Flores-Magdaleno, H., González-Eguiarte, D. R. & Guevara-Gutiérrez, R. D. (septiembre-octubre, 2014). Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 97-109.

El desarrollo de la actividad agrícola depende, entre otros factores, de la cantidad y calidad del agua disponible para riego. La calidad varía ampliamente de acuerdo con la cantidad y tipo de sales que contenga, ya que algunos elementos, como el boro (B), son tóxicos para las plantas. En Puebla, Tlaxcala y Veracruz son destinadas a la agricultura de riego más de un millón de hectáreas y por ello resulta imperante conocer la calidad del agua en cuanto al contenido del boro. En este estudio se llevó a cabo una investigación para conocer la conductividad eléctrica (CE), el pH y el contenido de B de estas muestras de agua, con tres recorridos y muestreos de agua en 2009, 2010 y 2011; se colectaron 91 muestras de agua por cada muestreo. La determinación de B se realizó por el método de la azometina-H, en el Laboratorio de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados. Las concentraciones de B en las muestras de agua fueron bajas, menores de 1 mg L⁻¹, en 76 de las 91 colectas de cada muestreo. En 15 muestras de agua se encontraron contenidos altos de B, mayores a 5 mg L⁻¹. De las muestras de agua analizadas, 83.5% se recomienda para uso agrícola sin ninguna restricción, mientras que 16.5% de los ríos y cuerpos de agua no es recomendable para usos agrícola, doméstico o de recreación debido a la peligrosidad y riesgos de toxicidad por B en cultivos y en humanos.

Palabras clave: agua superficial, límites permisibles de boro, toxicidad en cultivos, agua residual.

Abstract

Mancilla-Villa, O. R., Bautista-Olivas, A. L., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Reyes-Ortigoza, A. L., Flores-Magdaleno, H., González-Eguiarte, D. R. & Guevara-Gutiérrez, R. D. (September-October, 2014). Content of Boron in Surface Water in Puebla, Tlaxcala, and Veracruz. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 97-109.

The development of agriculture depends on the quantity and quality of water available for irrigation, among other factors. Quality varies widely according to the quantity and type of salts it contains, since some elements such as boron (B) are toxic for plants. In Puebla, Tlaxcala and Veracruz over one million hectares are used for irrigation agriculture, and therefore it is imperative to know the quality of water with respect to boron contents. Therefore, this study conducted an investigation to determine the electrical conductivity (EC), pH and B content in these waters based on three samplings, performed in 2009, 2010 and 2011. A total of 91 samples were taken for each sampling. B content in water was determined in the hydro-sciences laboratory of the Postgraduates College using the Azomethine-H method. Concentrations of B in the water were low and less than 1 mg L⁻¹ for 76 of the 91 samples collected for each sampling. High contents of B, above 5 mg L⁻¹, were found in 15 samples. Of the waters analyzed, 83.5% is recommended for agricultural use without restriction, while 16.5% is not recommended for agricultural, domestic or recreational uses due to the dangers and risk of toxicity from B in crops and in humans.

Keywords: Surface water, permissible limits of boron, toxicity in crops, sewage.

Recibido: 17/04/13
Aceptado: 25/01/14

Introducción

El boro (B) es un elemento esencial y potencialmente tóxico para las plantas cuando excede apenas ligeramente el nivel óptimo. Se encuentra en casi toda el agua natural y es uno de los constituyentes más tóxicos del agua de riego. Su concentración varía desde algunas trazas hasta varias partes por millón (Gupta, Jame, Cambell, Leyshon, & Nicholaichuk, 1985; Keren & Miyamoto, 1990; Singh & Singh, 1983; Verma, 1983; Elefteriou, 2001).

La toxicidad del B se presenta en concentraciones arriba de 1.25 mg l⁻¹ para la mayoría de las plantas (Fox, 1968; Gupta, 1983; Gupta et al., 1985; Munns & Tester, 2008; Ortega & Cintora, 2005; Richard, 1968; Ryan, Miyamoto, & Stroehlein, 1977; Singh & Randhawa, 1980; Verma, 1983; Brady & Weil, 2002). Las plantas pueden crecer normalmente en cultivos sobre arena con trazas de boro (0.03-0.04 mg l⁻¹) y se presenta toxicidad cuando la concentración llega a 1 mg l⁻¹ (Richard, 1968; Richards, 1973; Ayers & Westcot, 1989) y es suficiente para ocasionar sensibilidad en plantas de limón y naranjo, en tanto que la alfalfa logra desarrollo máximo si el agua de riego posee de 1 a 2 mg l⁻¹ (Kelley, 1963; Brady & Weil, 2002).

El agua superficial natural rara vez contiene niveles tóxicos de B, pero el agua de manantiales y pozos puede contener concentraciones tóxicas, principalmente en la cercanía de fallas tectónicas y en zonas geotérmicas (Carrera et al., 2011; Velázquez & Pimentel, 2006). La

clasificación del agua para uso agrícola con base en el contenido de B se presenta en el cuadro 1.

En humanos y animales, el B es un elemento nutricional benéfico, si no esencial, y es posible que su deficiencia pueda derivar en riesgos potenciales a la salud (Coughlin, 1998). Las frutas, vegetales y nueces son fuente de B en la dieta humana y una ingesta diaria aceptable es de 0.3 mg kg⁻¹ de peso (Murray, 1998). Los límites máximos permitidos de B en el agua potable varían con las diversas normativas que existen al respecto.

Para México, la norma oficial de agua para uso y consumo humano (SSA, 1996) no incluye valores de referencia para el B y los criterios ecológicos de calidad del agua (Sedue, 1989) indican un máximo permisible de 1 mg l⁻¹ (1 000 µg l⁻¹) para uso público urbano, valor que coincide con el indicado por la Directiva Europea (Weinthal, Parag, Vengosh, Muti, & Kloppmann, 2005). La Organización Mundial de la Salud lo sitúa en 500 µg l⁻¹ (WHO, 2008), aunque actualmente revisa este límite de concentración de B y provisionalmente lo marca en 2.6 mg l⁻¹ (WHO, 2010). Los problemas sanitarios asociados con un consumo excesivo de B van desde daños al sistema digestivo (estómago, intestino), hígado, riñones y cerebro hasta la muerte (Selinus, 2004; WHO, 2008).

El B es un elemento ubicuo, que entra en las aguas superficiales y subterráneas a través de dos vías principales: intemperismo de rocas que contienen boro (borosilicatos del tipo turmalina

Cuadro 1. Clasificación de las aguas de riego con base en el contenido de boro.

Clase de agua	Grupo de cultivos		
	Sensibles	Semitolerantes	Tolerantes
	mg l ⁻¹		
Excelente	< 0.33	< 0.67	< 1.00
Buena	0.33 - 0.67	0.67 - 1.33	1.00 - 2.00
Aceptable	0.67 - 1.00	1.33 - 2.00	2.00 - 3.00
Insegura	1.0 - 1.25	2.00 - 2.50	3.00 - 3.75
No recomendable	> 1.25	> 2.50	> 3.75

Fuente: Scofield, 1936; Wilcox, 1948.

y axinita) y aguas residuales, donde el B se deriva de productos de limpieza y residuos de industrias de pinturas y barnices, textiles, curtido de pieles y electrónica, entre otras (Dyer & Caprara, 2009; Velázquez, Pimentel, & Ortega, 2011). Las aguas residuales derivadas de diferentes sistemas pueden alcanzar las corrientes de agua superficial y subterránea, y provocar un problema de contaminación (Wolf, Held, Eiswirth, & Hötzl, 2004; Schmidt, 2007).

Una fuente adicional de B en el agua superficial es el agua de drenaje agrícola (Seiler, 2007), tal como se ha detectado en las zonas áridas del oeste de Estados Unidos (Lemly, Finger, & Nelson, 2009). En áreas de vulcanismo activo, donde el agua subterránea es influenciada por elevadas temperaturas (~200 °C), el B se encuentra regularmente en concentraciones que pueden alcanzar los 150 mg l⁻¹ (Morell, Pulido-Bosch, Daniele, & Cruz, 2008). La relación del B con áreas de vulcanismo es de relevancia en México, considerando que se han reconocido unas 2 332 manifestaciones geotérmicas, de las cuales aproximadamente 27 se localizan en los estados de Puebla y Veracruz (Iglesias, Arellano, & Torres, 2005).

En trabajos previos sobre calidad del agua en las cuencas de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, se ha encontrado que el B se adiciona a las aguas superficiales a través de las descargas de aguas residuales en la red hidrográfica, en tanto que el agua subterránea puede contener altas concentraciones de B de origen geotérmico (Velázquez & Pimentel, 2006; Can *et al.*, 2011). Estas concentraciones de B pueden representar un peligro potencial de toxicidad para los cultivos de la zona y problemas sanitarios en la población si tales fuentes se utilizan para consumo humano.

A pesar de su importancia ambiental, a la fecha se desconoce la distribución del B en las fuentes de aguas superficiales de Puebla, Tlaxcala y Veracruz; no se cuenta con datos sobre el aporte relativo de B a las aguas subterráneas y superficiales a partir de fuentes naturales y antropogénicas. A partir de estos antecedentes, en el presente trabajo se

planteó como objetivo analizar la distribución del B en las aguas superficiales de los estados mencionados y su potencial efecto tóxico en los cultivos y en la salud humana, esto último a través de los límites máximos permisibles establecidos por la normativa mexicana para distintos usos del agua.

Materiales y métodos

Lugar de estudio

El área de estudio se encuentra en el estado de Puebla y la parte centro-norte del estado de Veracruz, México (figura 1). El agua muestreada es utilizada para riego agrícola y uso doméstico; los ríos, manantiales y embalses muestreados en Puebla fueron Atoyac, Izúcar, Salado y Chiahutla. En Veracruz, Blanco, San Miguel, Chocamam, Coscomatepec, Pescados, Consolapa, Alseseca, Tlapacoyan, Filobobos, Nautla, Tecolutla, Cazonas, Tuxpan, Tempoal, Pánuco, Tampico, Nogales, Ojo de Agua, Puente de Dios, El Carmen y Pancho Pozas. Las coordenadas geográficas del cuadrante del área de estudio son 22° 00' latitud norte y 97° 00' longitud oeste, hasta 18° 00' latitud norte y 99° 00' longitud oeste. Los sitios de muestreo se encuentran en altitudes desde 1 hasta 3 000 m.

La zona de estudio donde se realizó el recorrido de campo que se llevó a cabo para coleccionar las muestras de agua se inició en los límites de Puebla con Tlaxcala, y continuó por la parte sur de Puebla, posteriormente se recorrió la parte centro-norte de Veracruz y finalmente se terminó en la presa de Necaxa en Puebla. Para recolectar muestras de agua se llevaron a cabo tres muestreos en época de estiaje en la estación de otoño de 2009, 2010 y 2011. Las muestras de agua se colocaron en recipientes de polipropileno, con capacidad de 0.5 l, lavados previamente tres veces, dos con agua destilada y la tercera vez con agua desionizada. Se cuidó que el llenado de la botella fuera total, eliminando en lo posible las burbujas de aire introducidas con el agua, para reducir con ello las posibles reacciones

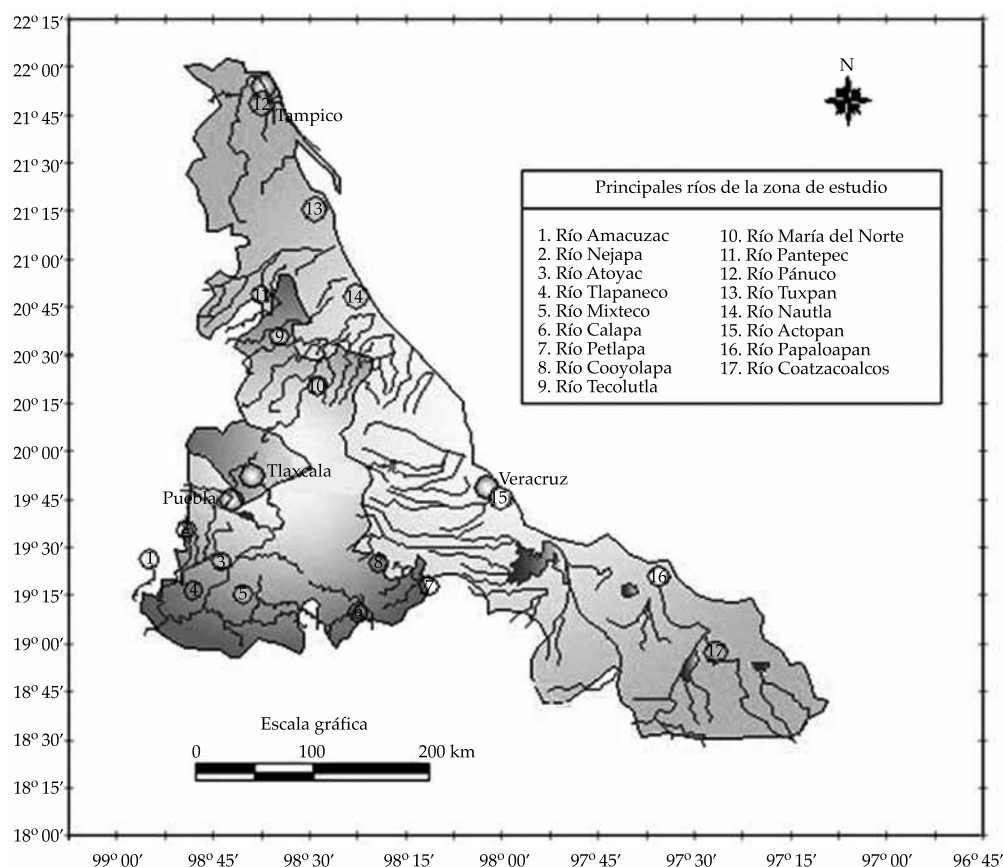


Figura 1. Localización del área de estudio.

del fluido con el oxígeno. Las estaciones de muestreo se ubicaron con un GPS Garmín MAP 60, mismo que se usó para establecer la altitud aproximada en metros de cada sitio.

Los parámetros químicos que se midieron fueron pH y CE al momento de tomar la muestra de acuerdo con APHA (1995). El contenido de B en las muestras de agua se determinó en el laboratorio de Ciencias Ambientales de Hidrociencias, en el Colegio de Postgraduados, Campus, Montecillo. El B fue analizado por el método de la azometina-H, el cual tiene un rango de detección de 0.5 a 10 $\mu\text{g ml}^{-1}$ (Bingham, 1982; Rodier, 1978; Rhoades, Ingvalson, & Hatcher, 1970). A los datos obtenidos se les realizó un análisis estadístico de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) entre sitios de muestreo, para comprobar la existencia de

diferencias significativas del contenido de B en las aguas muestreadas.

Resultados y discusión

En el cuadro 2 se presenta la ubicación geográfica, altitud y nombres de las estaciones de muestreo consideradas en la presente investigación. Es importante mencionar que las estaciones se localizan en un rango de altitud que va desde el nivel del mar hasta los 3 000 m. Se consideraron los ríos y embalses importantes para el riego agrícola en los estados de Puebla y Veracruz. La información de los resultados se manejó en conjunto para las 91 estaciones de muestreo.

En la figura 2 se presenta el pH y la CE medidos en los ríos, manantiales y embalses

Cuadro 2. Ubicación geográfica y nombres de las estaciones de muestreo.

Núm.	Lugar	Posición geográfica		Altitud (m)	Núm.	Lugar	Posición geográfica		Altitud (m)
		L. norte	Long. oeste				L. norte	Long. oeste	
1	Bordo Tepozontitla, Puebla	19°30.556	98°31.98	2 933	47	Río Puente Pescados, Veracruz	19°21.821	96°49.574	486
2	La Presita Nanacamilpa, Puebla	19°28.848	98°31.115	2 887	48	Afluente a río Pescados	19°23.121	96°51.058	687
3	Río en Atotomilco, Puebla	19°21.665	98°27.517	2 492	49	Río Lomas, Veracruz	19°26.076	96°54.711	1 107
4	Río Atoyac, Puebla	19°19.374	98°27.678	2 502	50	Río Cosolapa, Veracruz	19°27.837	96°56.850	1 270
5	Río Atoyac, Puebla	19°18.918	98°27.729	2 452	51	Lago cráter Alchichica	19°24.579	97°23.791	2 500
6	Laguna Chiautla, Puebla	19°19.011	98°28.250	2 478	52	Lago cráter La Preciosa	19°22.471	97°23.008	2 510
7	Nacimiento Chiautla, Puebla	19°19.065	98°28.472	2 524	53	Lago cráter Quecholac	19°22.471	97°23.008	2 510
8	Nacimiento 2 Chiautla, Puebla	19°19.065	98°28.472	2 524	54	Nacimiento Manantiales, Puebla	19°16.307	97°21.343	2 512
9	Río Atoyac, Puebla	19°04.121	98°14.515	2 268	55	Nacimiento Bicencio	19°17.524	97°40.148	2 530
10	Presa Manuel Ávila Camacho, Puebla	18°54.645	98°06.502	2 220	56	Nacimiento El Carmen	19°19.026	97°37.945	2 532
11	Bordo San José Aguacate	18°51.634	98°11.152	2 099	57	Lago cráter Aljojuca	19°05.550	97°32.223	2 545
12	Río Huehuetlán, Puebla	18°45.700	98°10.553	1 485	58	Lago cráter San Miguel Tecuitlapa	19°07.408	97°32.680	2 551
13	Arroyo Huehuetlán, Puebla	18°43.910	98°11.648	1 445	59	Lago cráter Atexcac	19°20.211	97°26.979	2 529
14	Río en Izúcar	18°35.370	98°27.843	1 436	60	Arroyo en San José Capillas	19°13.544	97°22.705	2 635
15	Arroyo Epatlán, Puebla	18°38.559	98°22.408	1 437	61	Nacimiento Pancho Pozas Altotongo	19°44.375	97°15.145	2 646
16	Laguna Epatlán, Puebla	18°37.764	98°21.098	1 442	62	Río Pancho Pozas Altotongo	19°44..603	97°14.915	2 165
17	Arroyo El Rodeo, Puebla	18°35.757	98°15.407	1 384	63	Río Tlapacoyan, Veracruz	19°50.034	97°13.206	1 303
18	Río Atoyac en Coatzingo, Puebla	18°36.708	98°10.784	1 251	64	Río Alseseca, Puente Tomata, Veracruz	19°55.311	97°13.363	1 309
19	Río Aximilpa, Tepej, Puebla	18°36.570	97°55.882	1 684	65	Cascada El Encanto Veracruz	19°58.865	97°10.435	601
20	Río Puente de Dios, Puebla	18°44.076	97°55.606	1 811	66	Arroyo de Piedra, Tlapacoyan, Veracruz	23°01.934	97°07.069	127
21	Río Tepeyahualco, Puebla	18°48..959	97°52.758	2 076	67	Río Filobobos, Veracruz	20°08.025	96°57.045	7
22	Riego Aspersión, La Purísima, Puebla	18°49.967	97°46.965	2 131	68	Río Nahuatla, Veracruz	20°12.770	96°46.718	18
23	Pozo San Antonio Tecolco, Puebla	18°51.575	97°46.234	2 150	69	Río en Nautla, Veracruz	20°12.891	96°45.686	5

24	Pozo Francisco Villa, Puebla	18°50.759	97°45.365	2 144	70	Río Nautla, Puente Remolino	20°23.949	97°14.247	24
25	Río Salado, Puebla	18°23.008	97°26.497	1 687	71	Arroyo afluente a río Tecolutla	20°23.160	97°18.362	48
26	Cascada Tilapa, Puebla	18°16.349	97°29.236	1 696	72	Río Tecolutla	20°26.939	97°05.005	58
27	Río Salado en Zapotitlán, Puebla	18°19.098	97°30.618	1 622	73	Río Cazones, Cazones, Veracruz	20°42.101	97°15.656	3
28	Arroyo en Salinas Zapotitlán, Puebla	18°20.809	97°26.930	1 642	74	Río Cazones, en La Unión, Veracruz	20°41.619	97°20.422	14
29	Pozo en Salinas Zapotitlán, Puebla	18°20.809	97°26.930	1 642	75	Arroyo en Países Bajos	20°54.140	97°21.946	6
30	Pileta en Salinas Puebla	18°20.809	97°26.930	1 642	76	Afluente a río Tuxpan	20°56.448	97°23.471	3
31	El Agua de Noé Alcutzingo, Puebla	18°44.927	97°14.518	1 649	77	Río Tuxpan, Puente Tuxpan	20°56.884	97°23.664	3
32	Río Blanco, Ojo Zarco Veracruz	18°46.843	97°12.379	1 435	78	Río en Tuxpan, Veracruz	20°58.416	97°18.473	2
33	Laguna Nogales, Veracruz	18°49.233	97°09.876	1 450	79	Río Afluente a Tuxpan	21°06.030	97°47.966	96
34	Río Blanco en Río Blanco, Veracruz	18°49.758	97°09.031	1 358	80	Arroyo Afluente a río Calabozos, Veracruz	21°03.900	98°08.644	103
35	Ojo de Agua, Orizaba, Veracruz	18°51.800	97°04.617	1 244	81	La Puerta, río Calabozos	21°03.835	98°09.230	92
36	Manantial en Matzinga, Veracruz	18°48.280	97°05.651	1 254	82	Río Terro en Alagualtitla, Veracruz	20°56.629	98°10.681	98
37	Río en Matzinga Veracruz	18°48.280	97°05.651	1 254	83	Nacimiento Mezcatlán, Veracruz	20°58.663	98°09.203	447
38	Nacimiento Los Manantiales, Veracruz	18°47.836	97°06.351	1 265	84	Río en Platón Sánchez, Veracruz	21°17.920	98°21.403	61
39	Río Blanco, salida de Orizaba	18°49.964	97°05.266	1 256	85	Río Tempoal, Veracruz	21°30.037	98°24.699	36
40	Río San Miguel, Veracruz	18°53.582	97°00.700	938	86	Río Pánuco, Veracruz	22°03.629	98°10.566	2
41	Río Meltac, Veracruz	18°53.582	97°00.700	938	87	Puente Cortadura Laguna de Chila, Veracruz	22°10.990	98°01.125	1
42	Río Blanco, Córdoba, Veracruz	18°52.192	96°52.537	724	88	Río Pánuco, salida al mar	22°13.414	97°53.717	4
43	Manantial en río Atoyac	18°55.564	96°52.713	646	89	Río Cazones en Coronel Tito Hdez.	20°27.239	97°43.968	144
44	Río Chocaman, Veracruz	19°01.994	97°01.671	1 449	90	Presa Necaxa	20°13.196	97°59.966	1308
45	Río Coscomatepec, en Jamapa, Veracruz	19°06.004	97°02.037	1 458	91	Río en puente Ixcapa II	20°13.196	97°59.966	1393
46	Río Huatuzco, Veracruz	19°09.072	96°49.574	486					

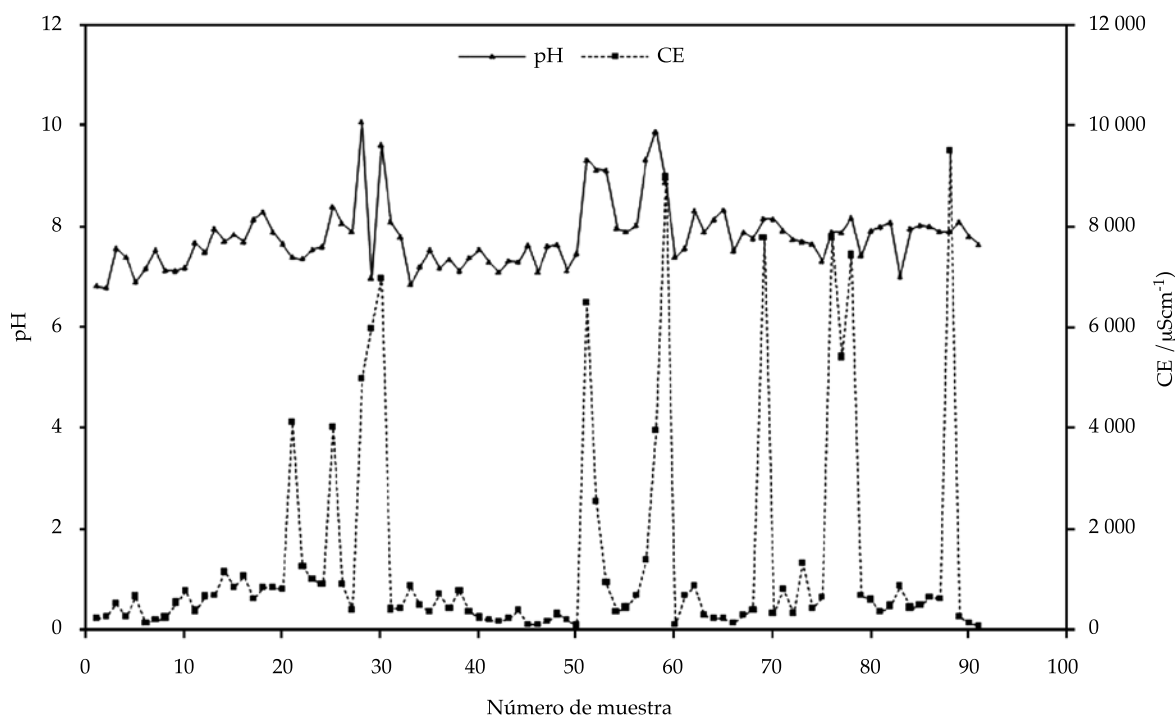


Figura 2. Conductividad eléctrica y pH medidos en las aguas muestreadas.

de Puebla y Veracruz. Los valores de estos parámetros fueron corregidos por los factores de temperatura respectivos. Se observa que 90% de las muestras presentó un pH entre 6.9 y 9 (el rango de límites máximos permisibles está entre 5 y 10 unidades para este parámetro), mientras que la conductividad eléctrica mostró en 85% de las muestras valores menores a 2 000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, lo cual indica que el agua analizada, bajo el criterio de estos dos parámetros y desde el punto de vista agrícola, es recomendable de acuerdo con Ayers y Westcot (1989), con algunas restricciones para 15% de las muestras que presentó elevados valores de CE debido a que proceden de agua influenciada por agua marina y agua subterránea salina.

Contenido de boro

Can et al. (2011) realizaron una investigación acerca del contenido de boro en las aguas subterráneas de la Cuenca Oriental, México, que abarca parte de los estados de Tlaxcala,

Puebla y Veracruz. Encontraron que la mayoría de las aguas superficiales contiene cantidades aceptables de boro, pero las aguas de los pozos profundos en algunas áreas contienen cantidades tóxicas de boro debido al contacto que tienen con las rocas ígneas de la zona. Las principales rocas volcánicas son andesitas, basaltos y riolitas. Entre éstas predominan riolitas sódicas, fenocristales de olivino y sedimentos piroclásticos, que en su mayoría se definen como tobas.

Las aguas superficiales se ven sometidas, a su vez, a los efectos del vertido de las aguas residuales domésticas y los drenajes agrícolas a la red hidrográfica, siendo éstas las dos fuentes principales de sales en los ríos (Velázquez et al., 2011). Una tercera fuente son los flujos geotérmicos (Velázquez & Pimentel, 2006), localizados en algunos sitios de la zona de estudio (Iglesias et al., 2005).

El contenido de B en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, para los tres muestreos, fue de valores bajos, es decir,

menores a 1 mg l^{-1} (figura 3); sin embargo, algunas muestras de agua presentaron valores elevados por encima del límite máximo permisible para las plantas: 3.75 mg l^{-1} (Scofield, 1936; Wilcox, 1948).

El agua superficial de Tlaxcala, Puebla y Veracruz que presentó concentraciones de B bajas, menores a 1 mg l^{-1} , es el agua que está en contacto con rocas sedimentarias que cubren más de 75% de la superficie terrestre, como calizas, lutitas, diatomitas, limonitas, yesos y lateritas (Tarbuck & Lutgens, 2008).

El agua que presentó baja concentración de B se presenta en la figura 4, donde se observa que el contenido de este elemento en el agua no superó los 0.03 mg l^{-1} .

Las muestras de agua que se presentan en la figura 4 son recomendables para la agricultura de riego, para los cultivos tolerantes, como algodón, espárrago, sorgo, alfalfa, lechuga y maíz, entre otros (Van Der Leeden, Troise, & Todd, 1990), así como para los cultivos sensibles, como limón, aguacate, naranja y cebada (Can *et al.*, 2011). Es decir, esta agua, en

cuanto al contenido de B, se recomienda para su uso en la agricultura de riego de cualquier cultivo.

Las concentraciones altas, mayores de 5 mg l^{-1} , de B (Velázquez *et al.*, 2011) en las muestras de agua superficial se presentaron en 15 puntos de muestreo, que corresponden a río Salado, arroyo en Zapotitlán, lagos cráter Alchichica, La Preciosa, Quecholac, Aljojuca, Tecuitlapa, Atexcac y el río Atoyac, en Puebla. Las muestras analizadas de estos sitios mostraron una concentración de 9 hasta 45 mg l^{-1} de B; en Tlaxcala se presentó una concentración mayor de 12 mg l^{-1} en el manantial El Carmen; en Veracruz, los ríos Nautla y Tuxpan presentaron valores mayores de 12 y 24 mg l^{-1} de boro (figura 5).

Las muestras de agua que se observan en la figura 5 son las que presentaron un contenido de B alto, superior a los 5 mg l^{-1} . Los sitios de muestreo donde se colectaron estas alicuotas están cercanos a zonas montañosas del Eje Neovolcánico Transversal Mexicano, cuya composición geológica es principalmente de

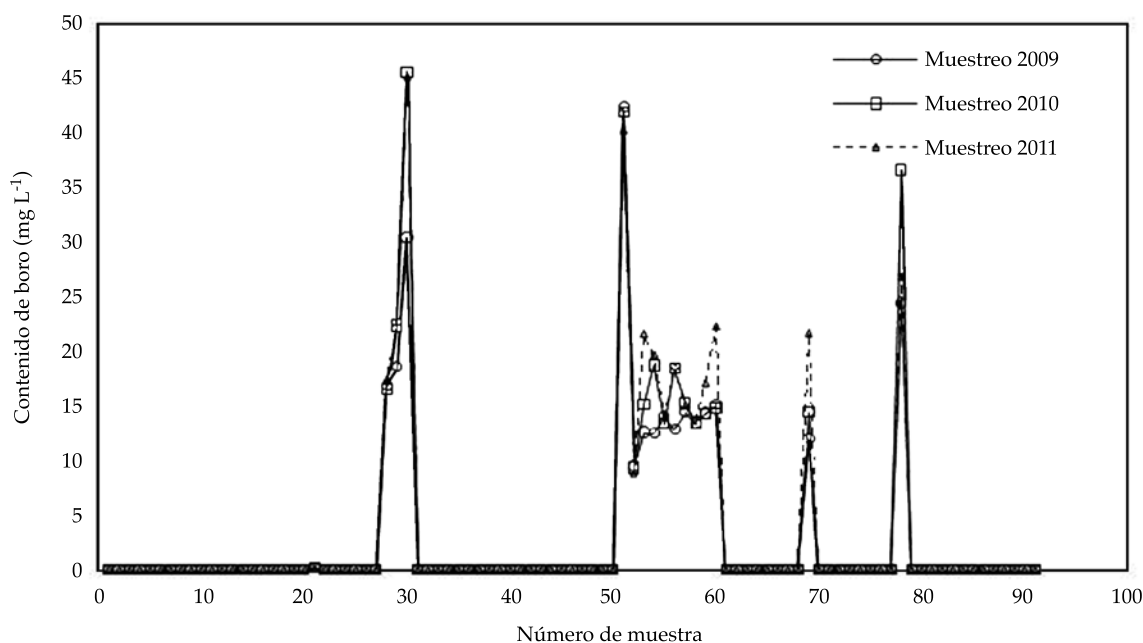


Figura 3. Concentración de boro en las aguas superficiales de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

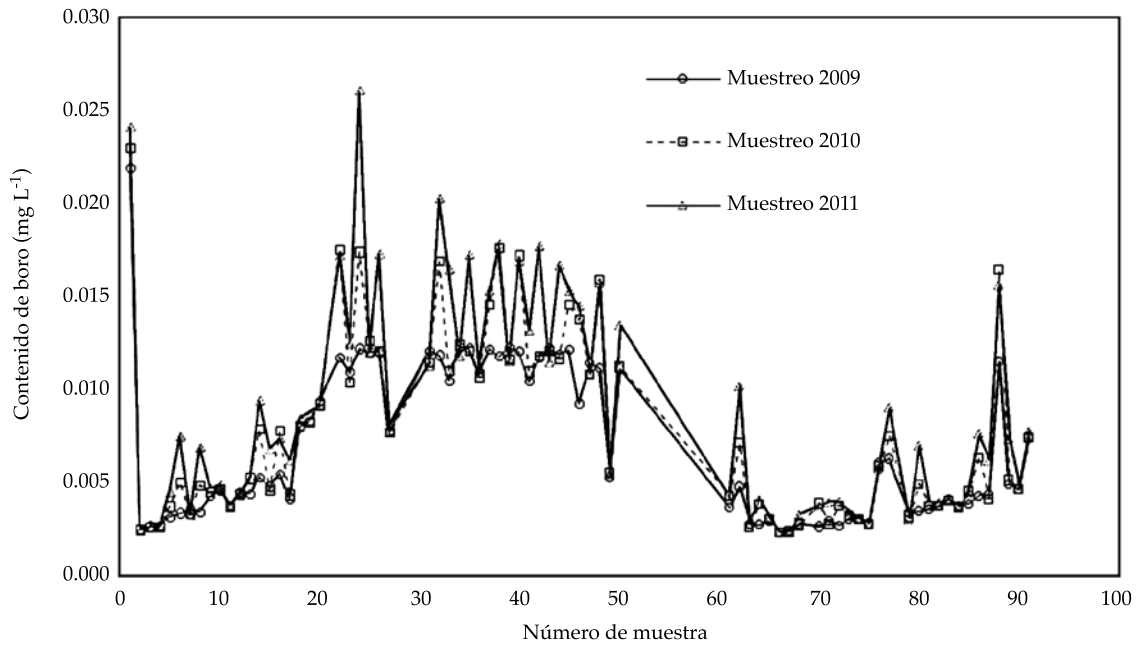


Figura 4. Concentraciones bajas de boro en las aguas superficiales de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

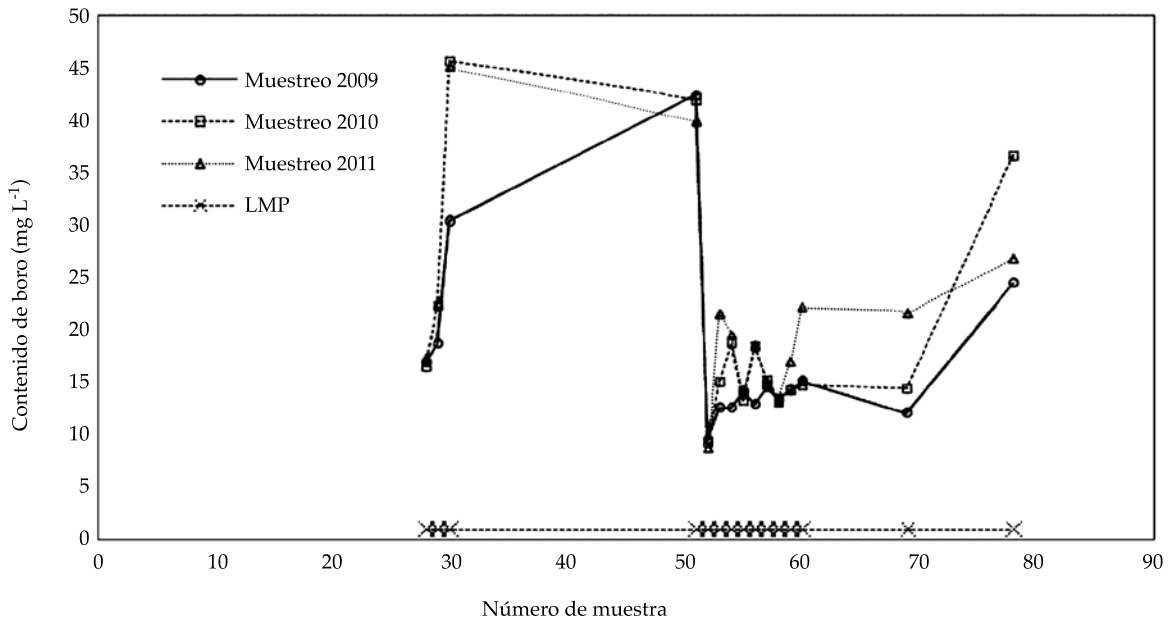


Figura 5. Concentraciones altas de boro en las aguas superficiales de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

rocas ígneas y, entre éstas, las que contienen B, como colemanita, bórax, olivino, sasolitas y pegmatitas, entre otras (Tarbuck & Lutgens,

2008); además, las muestras de agua de alto contenido de B de la zona de estudio pueden estar influenciadas por hidrotermalismo,

producto del vulcanismo reciente en la región (Alcozer, Escolero, & Marín, 2005).

Las muestras de agua con mayor contenido de B presentan además una mayor conductividad eléctrica, por consiguiente una mayor cantidad de sales disueltas, lo que puede ser influenciado por las sales de las intrusiones marinas (Salas, 1949; Reyes-Cortés, 1979). Es importante mencionar que el sinnúmero de manantiales salinos que se presenta en la región de Zapotitlán se debe a evaporitas marinas sepultadas y a sedimentos salinos carbonatados que tuvieron su origen durante las explosiones volcánicas que levantaron la zona de Zapotitlán durante el Terciario (Calderón-García, 1958; Salas, 1949; Villada, 1905; Reyes, 1998). Además, el tipo de salinidad del agua salina de Zapotitlán debe su origen al paso de aguas pluviales a través de las rocas calizas sedimentarias de esa zona (Cortés, 2009).

Por consiguiente, las colectas de agua de los 15 puntos de muestreo de alta concentración de B no son recomendables para riego agrícola, debido a que resultan tóxicas hasta para los cultivos más tolerantes. Además, su empleo es restringido para consumo humano (WHO, 2010), así como para uso doméstico y de recreación (Sedue, 1989).

Otro factor de las altas concentraciones de B puede ser los vertidos de agua residual agrícola, urbana e industrial que generan las actividades antropogénicas, sobre todo para los

casos de los ríos Nautla y Tuxpan en Veracruz.

En el cuadro 3 se presenta el análisis de medias Tukey en cuanto al contenido de B por sitio, en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. De acuerdo con el análisis estadístico, se observa que existe diferencia significativa en el contenido de B entre el agua que presentó mayor CE de aquella de menor contenido de sales disueltas.

No existe diferencia significativa en el agua que se encuentran cerca de actividad volcánica reciente, como es el agua de los lagos cráter en la Cuenca Oriental (Can, 2011), o el agua de los ríos con presencia de contaminación importante con agua residual, como en los ríos Nautla y Tuxpan en Veracruz. El agua de menor contenido de B, alejada de zonas con influencia de hidrotermalismo y que reporta menor influencia por contaminación con aguas residuales no presenta diferencias significativas en cuanto al contenido de boro.

Conclusiones

La conductividad eléctrica de 90% de las muestras de agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz presentó valores entre 100 y 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$, valores óptimos para agua con uso agrícola.

El agua superficial analizada presentó valores de pH ligeramente alcalinos, lo que sugiere la presencia importante de carbonatos

Cuadro 3. Análisis estadístico con prueba de medias Tukey en cuanto al contenido de B por sitio para los tres muestreos en las aguas superficiales de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Sitio	Rango de medias boro (mg l^{-1})	Tukey $\alpha = 0.05$ (¥)
30 y 51	40.42 a 41.59	A
78	29.34	B
29	21.2	C
28, 53, 54, 56, 60 y 69	16.058 a 17.424	CD
57 y 59	14.93 a 15.20	D
55 y 58	13.37 a 13.85	DE
52	9.2	E
1 al 27; 31 al 50; 61 al 68; 70 al 77; 79 al 91	0.002 a 0.138	F

¥ literal diferente significa diferencia significativa.

y bicarbonatos disueltos, pero no restringe el uso del agua en la agricultura.

El contenido de B en el agua superficial fue bajo en 76 de las muestras analizadas, por lo que esta agua es recomendable para riego agrícola sin ninguna restricción, así como para uso doméstico y de recreación.

Las 15 muestras de agua superficial de la zona de estudio que resultaron con alta concentración de B son influenciadas por hidrotermalismo, rocas que contienen B y presencia de sales por intrusiones marinas.

Las muestras de agua de alta concentración de B encontradas en 15 de los 91 sitios de muestreo en Puebla, Tlaxcala y Veracruz presentan restricción para usos agrícola, doméstico o de recreación debido a los riesgos de toxicidad tanto para los cultivos como para los humanos.

Existe diferencia significativa en cuanto al contenido de B entre sitios de muestreo y entre las muestras de agua de alta concentración iónica y las muestras de agua con baja concentración de sales disueltas y menor grado de contaminación con aguas residuales.

Referencias

- Alcocer, D. J., Escolero, F. Ó. A., & Marín, S. L. E. (2005). Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. En B. Jiménez & L. Marín (Eds.). *El agua en México vista desde la academia* (pp. 57-77). México, DF: Academia Mexicana de Ciencias.
- APHA (1995). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (1035 pp.). Washington, DC: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation (WPCF).
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1989). *La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1* (174 pp.). Trad. al español por J. F. Alfaro (Water Quality and Use in Agriculture). Roma: FAO.
- Bingham, F. T. (1982). Boron. In A. L. Page (Ed.). *Methods of Soil Analysis* (pp. 435-436). Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9. Madison, USA: ASA, SSSA, WI.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2002). *The Nature and Properties of Soils* (960 pp.). (13 ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Calderón-García, A. (1958). *Bosquejo geológico de la región de San Juan Raya, Puebla* (pp. 9-27). XX Congreso Geológico Internacional, Libro-Guía de la Excursión A-11, México, D.F.
- Can, C. A., Ortega, E. M., García, C. N., Reyes, O. A., González, H. V., & Flores, R. D. (2011). Origen y calidad del agua subterránea en la Cuenca Oriental de México. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 189-200.
- Carrera-Villacres, D. V., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-García, J., Ramírez-Ayala, C., Trejo-López, C., & Becerril-Román, A. E. (2011). Boro, fosfatos e índices de salinidad del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, México. *Tecnología y Ciencia del Agua*, 2(2), 5-21.
- Cortés, M. N. (2009). *Geoconservación y cultura: un análisis de paisaje en Zapotitlán Salinas-El Encinal, Puebla* (186 pp.). Tesis de maestría en Geografía. México, DF: UNAM.
- Coughlin, J. R. (1998). Inorganic Borates: Chemistry, Human Exposure, and Health and Regulatory Guidelines. *J. Trace Elem. Experim. Med.*, 9, 137-151.
- Elefteriou, P. (2001). *Boron in Groundwater of the Island of Cyprus 2001* [en línea]. Citado el 26 de febrero de 2013. Recuperado de <http://www.hydroweb.com/jehabs/eleftabs>.
- Dyer, S. D., & Caprara, R. J. (2009). A Method for Evaluating Consumer Product Ingredient Contributions to Surface and Drinking Water: Boron as a Test Case. *Environ. Tox. Chem.*, 16, 2070-2081.
- Fox, R. H. (1968). The Effect of Calcium and pH on Boron Uptake from High Concentrations of Boron by Cotton and Alfalfa. *Soil Sci.*, 106(6), 435-439.
- Gupta, I. C. (1983). Concept of Residual Sodium Carbonate in Irrigation Waters in Relation to Sodic Hazard in Irrigated Soils. *Curr. Agric.*, 7(3,4), 97-113.
- Gupta, U. C., Jame, Y. W., Cambell, C. A., Leyshon, A. J., & Nicholaichuk, W. (1985). Boron Toxicity and Deficiency: A Review. *Can. J. Soil Sci.*, 65(3), 381-409.
- Iglesias, E., Arellano, V., & Torres, J. R. (2005). Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la geotermia en México [en línea] Citado el 10 de febrero de 2013. Recuperado de http://www.sener.gob.mx/webSener/res/168/A3_Gtermia.pdf 12/06/2010.
- Kelley, W. P. (1963). Use of Saline Irrigation Water. *Soil Sci.*, 95, 385-391.
- Keren, R., & Miyamoto, S. (1990). Reclamation of Saline, Sodic and Boron Affected Soils. In K. K. Tanji (Ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management* (pp. 410-431). Chapter 19. ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. New York: American Society of Civil Engineers.
- Lemly, A. D., Finger, S. E., & Nelson, M. K. (2009). Sources and Impacts of Irrigation Drainwater Contaminants in Arid Wetlands. *Environ. Tox. Chem.*, 12, 2265-2279.
- Morell, I., Pulido-Bosch, A., Daniele, L., & Cruz, J. V. (2008). Chemical and Isotopic Assessment in Volcanic Thermal Waters: Cases of Ischia (Italy) and São Miguel (Azores, Portugal) [en línea]. Citado el 5 de diciembre de 2012.

- Recuperado de <http://www3.interscience.wiley.com/journal/118720600/>.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, 651-681.
- Murray, F. J. (1998). Issues in Boron Risk Assessment: Pivotal Study, Uncertainty Factors, and ADIs. *J. Trace Elem. Exp. Med.*, 9, 231-243.
- Ortega, Y. M., & Cintora, M. J. S. G. (2005). *Boro, fósforo, e índices de salinidad en las aguas residuales para riego agrícola en el valle del Mezquital, Hidalgo* (125 pp.). Tesis de Licenciatura en Biología. México, DF: UNAM.
- Reyes, G. J. C. (1998). *La sal en México II* (473 pp.). Colima, México: Universidad de Colima.
- Reyes-Cortés, M. (1979). *Geología de la Cuenca de Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala* (62 pp.). Colección Científica, Prehistoria 71. México, DF: SEP-INAH.
- Rhoades, J. D., Ingvalson, R. D., & Hatcher, J. T. (1970). Laboratory Determination of Leachable Soil Boron. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 871-875.
- Richard, H. F. (1968). The Effect of Calcium and pH on Boron Uptake from High Concentrations of Boron by Cotton and Alfalfa. *Soil Sci.*, 106(6), 435-439.
- Richards, L. A. (Ed.). (1973). Suelos salinos y sódicos. Personal del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. *FAO, Manual de Agricultura*, 60, 172.
- Rodier, J. (1978). *Análisis de las aguas* (pp. 186-191). Barcelona: Ediciones Omega.
- Ryan, J., Miyamoto, S., & Stroehlein, J. L. (1977). Relation of Solute and Sorbed Boron to the Boron Hazard in Irrigation Water Short Communication. *Plant and Soil.*, 47, 253-256.
- Salas, G. P. (1949). Bosquejo geológico de la cuenca sedimentaria de Oaxaca. *Bol. Asoc. Mexicana Geóls. Petrols.*, 1(2), 79-156.
- Schmidt, K. D. (2007). Groundwater Quality in the Cortaro Area Northwest of Tucson, Arizona. *J. Am. Water Res. Assoc.*, 9, 598-606.
- Scofield, F. E. (1936). *The Salinity of Irrigation Water* (pp. 275-283). Washington, DC: Smith. Instit. Ann. Rep.
- Sedue (13 de diciembre de 1989). Norma CE-CCA-001/89. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. *Diario Oficial de la Federación*, 430(9), 7-15.
- Seiler, R. L. (2007). Synthesis of Data from Studies by the National Irrigation Water-Quality Program. *J. Am. Water Res. Assoc.*, 32, 1233-1245.
- Selinus, O. (2004). Medical Geology: An Emerging Specialty. *Terrae*, 1(1), 8-15.
- Singh, J., & Randhawa, N. S. (1980). Boron Leaching and Regeneration Capacity in Saline Sodic Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 28(3), 307-311.
- Singh, V., & Singh, S. P. (1983). Effect of Applied Boron on the Chemical Composition of Lentil Plants. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 31, 169-170.
- SSA (18 de enero de 1996). 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. *Diario Oficial de la Federación*, 1-7.
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. J. (2008). *Ciencias de la Tierra* (721 pp.) (8a edición). Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Van Der Leeden, F., Troise, F. L., & Todd D. K. (1990). *The Water Encyclopedia* (808 pp.). Washington, DC: Island Press.
- Velázquez, M., & Pimentel, J. L. (del 24 al 26 de mayo, 2006). Salinidad, P, B y *E. coli* en el río Duero, Michoacán. *Memorias XV Congreso Nacional 2006 de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales* (CD-ROM), Guadalajara, Jalisco, México.
- Velázquez, M. A., Pimentel, J. L., & Ortega, H. M. (2011). Estudio de la distribución de boro en fuentes de agua de la cuenca del río Duero, México, utilizando análisis estadístico multivariado. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 27(1), 19-20.
- Verma, L. P. (1983). Tolerance of Wheat to Boron in Irrigation Water. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 31, 167-168.
- Villada, M. (1905). Una exploración a la cuenca fosilífera de San Juan Raya, Estado de Puebla. *Anales del Museo Nacional* (pp. 126-164). Tomo II. México.
- Weinthal, E., Parag, Y., Vengosh, A., Muti, A., & Kloppmann, W. (2005). The EU Drinking Water Directive: The Boron Standard and Scientific Uncertainty. *Europ. Environ.*, 15, 1-12.
- WHO (2008). *Guidelines for Drinking-Water Quality. Incorporating First and Second Addenda. Vol. 1. Recommendations.* (3a ed.) World Health Organization [en línea] Citado el 11 de enero de 2011. Recuperado de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/en/index.html 12/04/2010.
- WHO (2010). *Chemical Hazards in Drinking-Water-Boron.* World Health Organization 2010 [en línea]. Citado el 12 de abril de 2010. Recuperado de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/boron/en/ 12/04/2010.
- Wilcox, L. V. (1948). The Quality of Water for Irrigation Use. US Department of Agriculture. *Tech. Bulletin*, 962, 40.
- Wolf, L., Held, I., Eiswirth, M., & Hötzl, H. (2004). Impact of Leaky Sewers on Groundwater Quality. *Act. Hydroch. Hydrob.*, 32, 361-373.

Dirección institucional de los autores

Dr. Oscar Raúl Mancilla-Villa

Universidad de Guadalajara
 Centro Universitario de la Costa Sur
 Departamento de Producción Agrícola
 Avenida Independencia Nacional 151
 48900 Autlán de Navarro, Jalisco, México
 Teléfono: +52 (317) 3825 010, extensión 57026
 oscar.mancilla@cucsur.udg.mx

Dra. Ana Laura Bautista-Olivas

Universidad de Sonora
Departamento de Agricultura y Ganadería
Carretera Bahía de Kino km 21
83000 Hermosillo, Sonora, MÉXICO
Teléfono: +52 (662) 5960 295
analaura@colpos.mx

Dr. Héctor Manuel Ortega-Escobar
Dr. Carlos Ramírez-Ayala
Dr. Héctor Flores-Magdalen

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo
Hidrociencias
Carretera México-Texcoco km 36.5
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5804 5900, extensión 1167
manueloe@colpos.mx

Dra. Amada Laura Reyes-Ortigoza

Departamento de Ecología y Recursos Naturales
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México
Área de Biología
Colonia Universidad Nacional Autónoma
de México, CU, delegación Coyoacán
04510 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5622 4827, extensión 24922
amadala@ciencias.unam.mx

Dr. Diego Raymundo González-Eguiarte

Profesor Investigador del Centro Universitario de Ciencias
Biológicas y Agropecuarias (CUCBA)
Universidad de Guadalajara
Camino Ramón Padilla Sánchez #2100
Nextipac Zapopan, Jalisco, MÉXICO
Teléfono: +52 (33) 3777 1150, extensión 3040 y 3190
diegonz@cucba.udg.mx

Dr. Rubén Darío Guevara Gutiérrez

Centro Universitario de la Costa Sur
Universidad de Guadalajara
Avenida Independencia Nacional núm. 151
48900, Autlán de Navarro, Jalisco, MÉXICO
Teléfono: +52 (317) 3825 010, extensión 57165
rguevara@cucsur.udg.mx