

# Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México

• Álvaro Can-Chulim\* •

*Universidad Autónoma de Nayarit, México*

\*Autor de correspondencia

• Héctor Manuel Ortega-Escobar •

*Colegio de Postgraduados, México*

• Edgar Iván Sánchez-Bernal •

*Universidad del Mar, México*

• Elia Cruz-Crespo •

*Universidad Autónoma de Nayarit, México*

## Resumen

Can-Chulim, A., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I., & Cruz-Crespo, E. (septiembre-octubre, 2014). Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 77-96.

En el estado de Puebla, el agua es de gran importancia, ya que condiciona la posibilidad de incrementar el desarrollo económico. La mayor proporción de agua superficial se encuentra en la Sierra Norte, donde se emplea principalmente en la agricultura. A los cauces de los ríos se vierte agua de origen residual y de nacimientos termales, que modifican la calidad. Como el agua superficial de diferente origen y concentración se utiliza en la agricultura, se determinó su concentración y composición química, con el objetivo de evaluar su calidad para uso agrícola. Los principales parámetros de calidad y sus valores fueron: pH, media de 7.7, mínimo 6.1 y máximo 9.2; conductividad eléctrica, media de 346, mínimo 61.0 y máximo 1 913.0  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ; relación de adsorción de sodio (RAS) con medias de  $\text{RAS} = 1.0$ ,  $\text{RAS}_{\text{aj}} = 1.4$  y  $\text{RAS}^{\circ} = 1.0$ ; carbonato de sodio residual, con valores positivos en primavera y negativos en otoño; boro, media de 0.7, mínimo 0.0 y máximo 4.0  $\text{mg l}^{-1}$ . El agua superficial de la Sierra Norte es apta para el riego, su concentración iónica es baja, debido a que proviene de los escurrimientos pluviales, teniendo variaciones mayores donde recibe agua de nacimientos termales y moderadamente donde recibe residuales. La hidrogeoquímica indica que el carácter químico dominante del agua es resultado de los procesos físico-químicos del agua con la geología regional. El agua es bicarbonatada, con variaciones en sodio y calcio. En temporada de estiaje, el sodio predomina, y en lluvias, el calcio.

**Palabras clave:** RAS ajustado, RAS corregido, agua bicarbonatada, precipitación, dilución.

## Abstract

Can-Chulim, A., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I., & Cruz-Crespo, E. (September-October, 2014). Irrigation Water Quality in the Sierra Norte in Puebla, México. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 77-96.

Water is crucial to the state of Puebla because of its importance to increasing economic development. Most of the surface water is found in the Sierra Norte, where it is primarily used for agriculture. Wastewater and water from thermal springs spill into the river channels, modifying the quality. Since different sources and concentrations of surface water are used in agriculture, its concentration and chemical compositions were determined in order to evaluate its quality for use in agriculture. The primary quality parameters and their values were: pH, mean of 7.7, minimum 6.1 and maximum 9.2; mean electric conductivity 346, minimum 61.0 and maximum 1913.0  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ; sodium adsorption ratio (SAR) with SAR means  $\text{RAS} = 1.0$ ,  $\text{RAS}_{\text{aj}} = 1.4$  and  $\text{RAS}^{\circ} = 1.0$ ; residual sodium carbonate, with positive values in the springtime and negative in autumn; and boron, mean of 0.7, minimum 0.0 and maximum 4.0  $\text{mg L}^{-1}$ . Surface water in the Sierra Norte is suitable for irrigation. Its ionic concentration is low since it comes from runoff, with greater variations where it receives water from thermal springs and more moderate variations where it receives wastewater. The hydrogeochemistry indicates that the dominant chemical characteristics result from the physical and chemical processes of the water due to the regional geology. The water is bicarbonate, with variations in sodium and calcium. Sodium is predominant in the dry season and calcium predominates in the rainy season.

**Keywords:** Adjusted SAR, bicarbonate water, corrected SAR, dilution, precipitation.

Recibido: 07/11/12  
Aceptado: 25/01/14

## Introducción

El concepto de calidad del agua se refiere a la característica del agua que puede afectar su adaptabilidad a un uso específico y se define por sus características físicas, químicas o biológicas (Ayers & Westcot, 1987). Para uso agrícola, la calidad del agua se define por la concentración de iones específicos,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  y  $\text{K}^{+}$  como cationes;  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{Cl}^{-}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  como aniones, y otros de menor proporción como el  $\text{B}^{3+}$  y el P (Nishanthiny, Thushyanthy, Barathithasan, & Saravanan, 2010; Korzeniowska, 2008). Por otro lado, Silva (2004) cita que las características más importantes que determinan la calidad del agua para riego son la concentración total de sales solubles, la concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes, la concentración de boro u otros elementos que puedan ser tóxicos y, bajo ciertas condiciones, la concentración de bicarbonatos en relación con la concentración de calcio más magnesio. En otras palabras, la calidad del agua para riego está determinada por la concentración y composición de los constituyentes disueltos que contenga.

La importancia de conocer la calidad del agua para riego tiene el fin de poder predecir su efecto sobre el suelo y los cultivos (Rashidi & Seilsepuor, 2011); para esto, es necesario determinar la concentración cualitativa y cuantitativa de los iones en solución, principalmente los iones que causan toxicidad y los que originan la formación de sales nocivas.

Los problemas más comunes causados por el agua de riego de mala calidad son la salinización paulatina de los suelos, que trae como consecuencia problemas osmóticos sobre las plantas, y la toxicidad de algunas sales y elementos iónicos. La parte osmótica puede ser explicada en términos de la concentración salina; a mayor concentración, menor potencial osmótico y, por tanto, menor disponibilidad del agua para las plantas (Casierra & Rodríguez, 2006; Baccaro *et al.*, 2006). Con respecto a la toxicidad, una alta concentración de sales o iones causarán efectos tóxicos en las plantas; el

grado de toxicidad dependerá del tipo de sal o ion predominante y se refleja comúnmente en las hojas, que presentan cambios fisiológicos y morfológicos (Strogonov, 1964; Sánchez *et al.*, 2002). El mecanismo de defensa de las plantas ante el estrés salino es el ajuste osmótico, que consiste en la acumulación de solutos en respuesta al déficit hídrico y la disminución del potencial hídrico total de hojas, tallos y raíces; como resultado, las plantas pueden absorber agua y mantener la actividad fisiológica; sin embargo, este ajuste osmótico lleva consigo un gasto de energía que se traduce, entre otros efectos, en una disminución del crecimiento vegetativo y de la productividad de las plantas (Silva, Ortiz, & Acevedo, 2007).

Los elementos contenidos en el agua y suelo son el resultado de procesos de intemperismo químico (hidrólisis, hidratación, solución, oxidación y carbonatación) de las rocas al contacto con el agua. Posteriormente ocurre la formación y acumulación de estos elementos en forma de sales en los suelos, como resultado de muchos procesos geoquímicos que suceden en las capas superficiales de la corteza terrestre (Grattan, 2006). En las rocas sedimentarias y suelos, capas del intemperismo, una gran parte de las sales se encuentra en forma cristalina y durante el humedecimiento una parte de ellas pasa a la fase líquida; a medida que aumenta la temperatura, la solubilidad de algunas sales se incrementa. La secuencia de la precipitación de las sales de una solución policomponente depende del grado de su solubilidad y las regularidades de la precipitación se han estudiado ampliamente en las aguas de altos contenidos salinos. En primer lugar, se precipitan los hidróxidos de silicio y hierro, después los carbonatos de calcio y magnesio, más adelante el yeso y los sulfatos de magnesio y, por último, los cloruros de sodio, potasio y magnesio (Szabolcs, 1989).

El proceso principal de la salinización de los suelos agrícolas es mediante la aplicación del agua de riego cuando no es manejada correctamente de acuerdo con su calidad. La mayoría de los tipos de agua de riego

consideradas peligrosas tienen un contenido relativo de sales que en sí mismo no es demasiado perjudicial; el problema se presenta cuando esa agua interacciona con la concentración salina del suelo (Rashidi & Seilsepuor, 2011). La evaporación y transpiración consumen grandes cantidades de agua que disminuyen la humedad del suelo, pero no afectan a las sales disueltas, de forma que la solución del suelo se hace más salina a medida que el suelo se seca. Por esta razón, un agua que inicialmente tuviera una concentración salina aceptable puede alcanzar valores elevados en el suelo. Pero, además, se presentan otros fenómenos al concentrarse las sales, por ejemplo, algunas de ellas puede alcanzar su límite de solubilidad y precipitar, retirando de la solución del suelo determinados cationes y alterando las proporciones iniciales (Miyamoto & Pingitore, 1992). Esto suele ocurrir con algunas sales de calcio de baja solubilidad ( $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$ ), lo que tiene como consecuencia un aumento en la proporción de sodio en la solución del suelo y del por ciento de sodio intercambiable (Silva, 2004).

En el estado de Puebla, el agua es de gran importancia, ya que condiciona fuertemente la posibilidad de incrementar el desarrollo económico. En la actualidad, la agricultura ocupa el 48.97% de la superficie total del estado y el 78% del agua es utilizada para esta actividad (Guevara-Romero, 2011; López-Téllez, 2011). La mayor proporción de aguas superficiales en la entidad se encuentra en la Sierra Norte, en donde es empleada principalmente en la agricultura, seguida de la industria, acuicultura y terapia. A los cauces de los ríos se vierte agua de origen residual, derivada de las industrias y de los distintos poblados que se encuentran en dicha zona. Al contar con agua superficial todo el año, los agricultores la usan para el riego de las principales especies agrícolas, utilizándola como fuente directa, es decir, sin un acondicionamiento previo. Con estos antecedentes, se plantea que los materiales geológicos de la zona y los vertidos de agua residual modifican la concentración cualitativa

y cuantitativa de los iones en solución, esto es, modifican la calidad del agua. Como el agua superficial de diferente origen y concentración se utiliza en la agricultura, en este estudio se determinó la composición química y las concentraciones totales electrolíticas, con el objetivo de evaluar su calidad para uso agrícola.

## Metodología

### *Ubicación y caracterización del área de estudio*

La Sierra Norte de Puebla se ubica geológicamente, en mayor proporción, en la Sierra Madre Oriental y una pequeña parte en el Eje Neovolcánico. Es una porción territorial de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental, subprovincia del Carso Huasteco, que atraviesa por el estado de Puebla; se localiza en la parte norte-centro del mismo, entre los 19° 39' latitud norte y 97° 15' longitud oeste.

### *Marco geológico*

Esta región se identifica por su carácter netamente montañoso y comprende prácticamente a toda la región serrana del norte, la cual es un elemento de la Sierra Madre Oriental. Su relieve es relativamente moderno y sus ríos presentan numerosos saltos y cascadas. Su altitud varía entre 1 000 y 3 000 m. Las rocas que forman la Sierra Norte son principalmente calizas en gruesas capas, pizarras y calizas intercaladas de lutitas y areniscas, rocas casi todas del Mesozoico. En ella, las rocas sedimentarias, dispuestas en capas de espesor variable, ofrecen diferente resistencia a los procesos erosivos y a los esfuerzos corticales, y se manifiestan en grandes estructuras plegadas y dislocadas en ángulos bajos (Capra, Lugo-Hubp, & Zamorano-Orozco, 2006).

Las deformaciones orogénicas son las principales formadoras del relieve original sobre el que han actuado procesos erosivos controlados por sistemas de fallas y fracturas.

El agua, en su efecto disolutivo, ha contribuido a generar una morfología cárstica y ha labrado a la vez profundos cañones por los que drenan diversos ríos hacia el Golfo de México.

### *Hidrología*

La región hidrológica Tuxpan-Nautla comprende la zona norte del estado de Puebla, representada por partes de las cuencas de los ríos Tecolutla, Cazonces y Tuxpan, que desembocan en el Golfo de México. La hidrografía principal la conforma la vertiente norte, en donde el río Tecolutla es la corriente más característica de la Sierra Norte, y se forma por las siguientes corrientes: Necaxa, San Marcos, Tenango, Laxaxalpan, Tecuantepec o Zempoala, Joloapan, Apulco y Chichicatzipa. Con aguas de la parte alta de las tres primeras corrientes se construyó el importante sistema hidroeléctrico de Necaxa. En la porción norte-suroeste, entre los principales ríos están el Ajajalpa y el Marimba, y los lagos de Cruz Colorada, Cuatelolulco, Ajolotla y Chignahuapan (Galván *et al.*, 1999). Varios de estos ríos se originan de escurrimientos superficiales y manantiales de la zona.

Los ríos han labrado su cauce a través de los materiales volcánicos granulares no consolidados, depositados en los eventos volcánicos ocurridos posteriormente a la etapa de compresión que se produjo por movimientos tectónicos, y que provocaron el levantamiento y exposición de rocas marinas (Cuanalo & Melgarejo, 2002).

Los patrones de escurrimiento se determinan por la presencia de la Sierra Madre Oriental, en cuya vertiente oriente se originan los escurrimientos de los ríos que forman las grandes corrientes; estos pequeños arroyos son perennes debido a los altos índices de infiltración. También se tiene una serie de pequeños embalses que se usan para aprovechamiento agrícola, además de que los arroyos son utilizados de esta forma (Galván *et al.*, 1999).

### *Clima*

La distribución climática en la Sierra Norte de Puebla se presenta en una serie de franjas orientadas noroeste-sureste, que generan un gradiente climático cálido y semicálido húmedo en las partes bajas y templado húmedo en las zonas de mayor altitud (Martínez, Evangelista, Basurto, Mendoza, & Cruz-Rivas, 2007). En las zonas de mayor altitud, la precipitación anual oscila entre los 3 000 mm (Murillo-Licea, López-Ramírez, Chávez-Hernández, Marañón-Pimentel, & Brie-Gowland, 2010).

### *Suelos y cultivos*

De acuerdo con Vázquez-Martínez *et al.* (2009), el suelo predominante en la Sierra Norte es el andosol. En el recorrido de muestreo, en el mes de abril de 2010, se identificaron las principales especies vegetales cultivadas que existen en la Sierra Norte: cacahuete, café, calabaza, cilantro, durazno, frijol, haba, maíz, naranja, papa, pimienta, alfalfa, avena, cebada, tomate, trigo, manzana, pera y zarzamora.

### *Muestreo de agua y métodos analíticos*

En concordancia con los objetivos de este estudio, se realizaron dos muestreos: uno en primavera y otro en otoño de 2011, con 22 estaciones de muestreo. Se tomaron muestras de agua a lo largo de todo el área (sureste-noroeste), a fin de contar con una mayor representatividad de las aguas superficiales que circulan en el área. Para seleccionar los sitios de muestreo, se consideraron los principales puntos que contribuyen a la modificación de la calidad del agua, como los nacimientos de agua de diferente origen y los que llevan vertidos de agua residual. La toma de muestras se realizó con base en la NMX-AA-034-SCFI-2001, con tres muestras por estación. En la figura 1 se presenta la ubicación de las diferentes estaciones de muestreo del agua y en el cuadro 1, los parámetros que se determinaron en cada muestra.

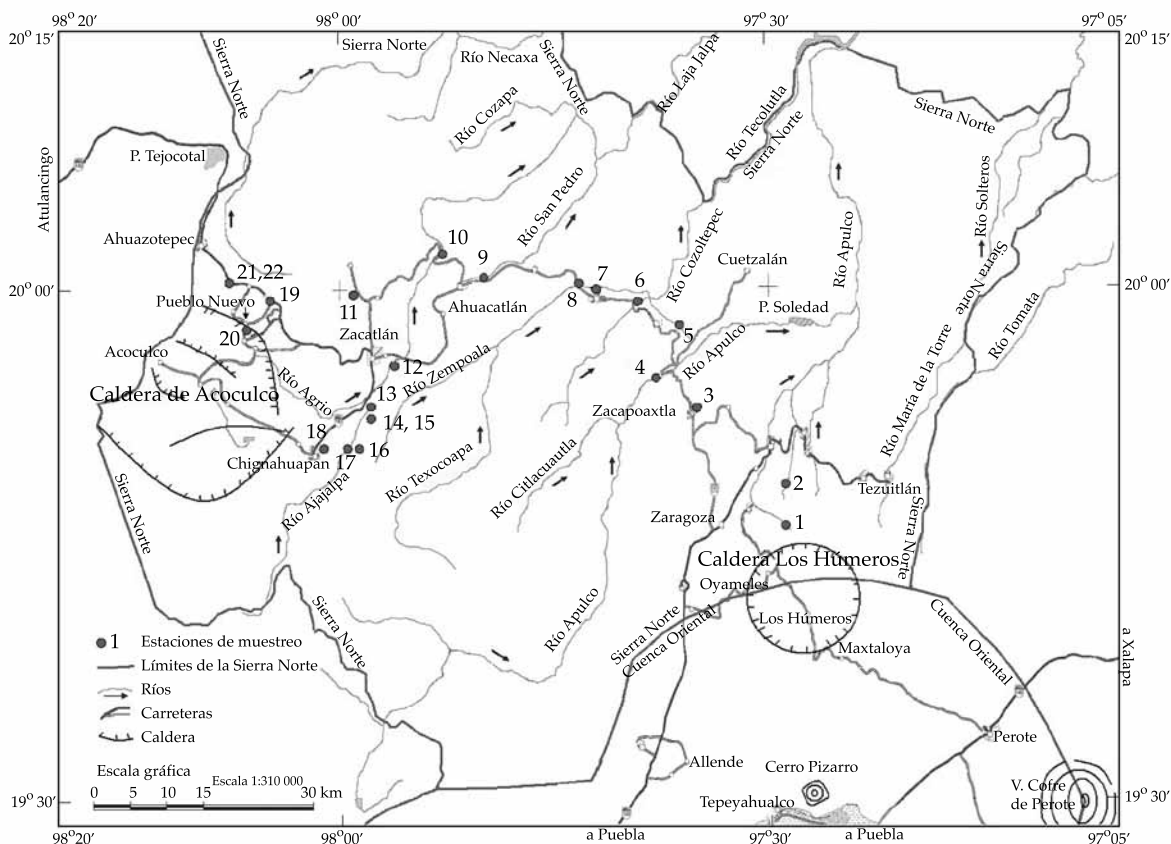


Figura 1. Ubicación de las estaciones de muestreo de agua superficial en la Sierra Norte de Puebla.

Cuadro 1. Marchas analíticas utilizadas para la determinación de los parámetros en el agua superficial de la Sierra Norte de Puebla.

Determinación	Método	Referencia
pH	Potenciométrico	NMX-AA-008-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	Conductimetría	NMX-AA-093-SCFI-2000
Residuo seco evaporado	Gravimetría	NMX-AA-034-SCFI-2001
Calcio y magnesio	Volumetría	Richards, 1990
Sodio y potasio	Flamometría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Carbonatos y bicarbonatos	Volumetría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Cloruros	Volumetría	NMX-AA-073-SCFI-2001
Sulfatos	Turbidimetría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Boro	Colorimetría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Ortofosfatos	Colorimetría	Rodier, 1990

### Parámetros de calidad del agua

Como el agua superficial de diferente origen se emplea en la agricultura, en este estudio

se determinó su composición química y sus concentraciones totales electrolíticas. Como parámetro de especial importancia, en lo que se refiere a la evaluación de la calidad del agua

que se utiliza en el riego de cultivos agrícolas, se determinaron los valores de la relación de adsorción de sodio en sus diferentes conceptualizaciones, relación de adsorción de sodio (RAS), relación de adsorción de sodio ajustado (RASaj) y relación de adsorción de sodio corregido (RAS°), ya que este índice incide directamente en las propiedades físico-químicas de los suelos y, por consiguiente, sobre las plantas. Además, en las muestras de agua se determinó el contenido de boro y fósforo.

#### Concentración iónica

Las exigencias de calidad para el agua de riego, a fin de prevenir la salinización de los suelos, se basan en la concentración total de sales solubles; para fines de diagnóstico y clasificación, se puede expresar en términos de conductividad eléctrica y se dividen en cuatro clases: agua de salinidad baja (C1: < 250  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), agua de salinidad media (C2: 250 - 750  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), agua de salinidad alta (C3: 750 - 2 250  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y agua de salinidad muy alta (C4: > 2 250  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) (Richards, 1990).

#### Contenido de sodio

En cuanto al contenido de sodio en el agua de riego, se clasifica utilizando la relación de adsorción de sodio (RAS) con respecto a la concentración iónica (CE), mediante el diagrama propuesto por Richards (1990); esta clasificación se basa principalmente en el efecto que tiene el ion sodio adsorbido sobre las condiciones físicas del suelo, es decir, se predice el efecto del sodio del agua de riego, que pasará a formar parte del suelo. Con base en el contenido de sodio (RAS), el agua para riego se clasifica en cuatro clases: agua baja en sodio (S1), agua media en sodio (S2), agua alta en sodio (S3) y agua muy alta en sodio (S4).

La estimación de la RAS bajo diferentes conceptualizaciones prevé las variaciones de las concentraciones de los iones de  $\text{Ca}^{2+}$ . Por lo tanto, si se considera que se cuenta con una

amplitud de valores máximos y mínimos de la RAS de las diferentes soluciones y aguas que atraviesan los espesores superficiales de los suelos, se podrán estimar los diferentes niveles de sodio intercambiable que adquirirán los suelos cuando se riegan con aguas de diferente RAS.

Los valores de la RAS se calculan mediante las siguientes ecuaciones: (1) RAS original propuesta por Gapón (citado por Richards, 1990); (2) en 1968, Bower, Ogata y Tucker establecieron una modificación a los valores originales o explícitos de la RAS del agua que se utiliza para riego. Estos nuevos valores del índice RAS se conocen como RAS ajustada (RASaj); (3) en 1981, Suárez recomienda un nuevo procedimiento para el cálculo de la relación de adsorción de sodio, la RAS corregida (RAS°), que conjuntamente con el valor de  $\text{Ca}^\circ$  ofrece una mejor comprensión de las modificaciones del calcio en la solución del suelo:

$$\text{RAS} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}} \quad (1)$$

$$\text{RAS}_{aj} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - \text{pHc})] \quad (2)$$

Para el cálculo de pHc se usa la ecuación de Langelier (1936):  $\text{pHc} = (\text{pK}_2' - \text{pK}_c') + p(\text{Ca}) + p(\text{Alk})$ :

$$\text{RAS}^\circ = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^\circ} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}} \quad (3)$$

En las ecuaciones anteriores,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se refieren a las concentraciones de los cationes solubles expresados en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ; pHc es el pH teórico que el agua alcanzaría en equilibrio con el  $\text{CaCO}_3$ ;  $\text{pK}_2'$  es el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), corregido por la fuerza iónica;  $\text{pK}_c'$  es el producto de solubilidad

del  $\text{CaCO}_3$ , corregido por la fuerza iónica;  $p\text{Ca}$  corresponde al logaritmo negativo de la concentración molar de  $\text{Ca}$ ;  $p(\text{Alk})$  corresponde al logaritmo negativo de la concentración equivalente de la base titulable de  $\text{CO}_3$  y  $\text{HCO}_3^-$ ;  $\text{Ca}^\circ$  es el contenido corregido de calcio en el agua de riego en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ; el valor de  $\text{Ca}^\circ$  representa el contenido de calcio en el agua de riego, corregido por la salinidad del agua (CE), por el contenido de iones bicarbonato en relación con su propio contenido de calcio ( $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ ) y por la presión parcial del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ejercida en los primeros milímetros del suelo ( $P = 0.0007 \text{ atm}$ ).

#### Carbonato de sodio residual

Otra de las consideraciones que Richards (1990) recomienda al evaluar la calidad es la concentración de bicarbonatos en relación con la concentración de calcio más magnesio. En el agua con altas concentraciones de iones bicarbonato existe la tendencia del calcio y del magnesio a precipitarse en forma de carbonatos, a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Eaton (1950) usa el término carbonato de sodio residual (CSR) al referirse a esta reacción. Este índice se calcula con la siguiente fórmula, donde todos los constituyentes iónicos se expresan en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ :

$$\text{Carbonato de sodio residual} \\ (\text{CSR}) = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Un agua con valor  $< 1.25$  se clasifica como de buena calidad para uso agrícola, entre 1.25 y 2.5 como condicionada y  $> 2.5$  como no recomendable (Nishanthiny *et al.*, 2010). Cuando la diferencia es negativa no existe el problema y el valor de CSR puede suponerse igual a cero. Cuando el valor es positivo indica que  $\text{Ca}$  y  $\text{Mg}$  precipitan como carbonatos, existiendo sólo sales de sodio en la solución.

#### Boro

El boro es un micronutriente requerido por las plantas y el rango entre la deficiencia y

toxicidad es reducido (Goldberg, Corwin, Shouse, & Suarez, 2005). El contenido de boro en el agua de riego se expresa en  $\text{mg l}^{-1}$  y los valores de tolerancia se han establecido por Wilcox en 1948. Para cultivos sensibles,  $< 0.33$  se clasifica como excelente, 0.33 - 0.67 buena, 0.67 - 1.00 aceptable, 1.00 - 1.25 insegura,  $> 1.25$  no recomendable; para cultivos semitolerantes,  $< 0.67$  excelente, 0.67 - 1.33 buena, 1.33 - 2.00 aceptable, 2.00 - 2.50 insegura,  $> 2.50$  no recomendable; para cultivos tolerantes,  $< 1.00$  excelente, 1.00 - 2.00 buena, 2.00 - 3.00 aceptable, 3.00 - 3.75 insegura,  $> 3.75$  no recomendable.

#### Fósforo

En las directrices para interpretar la calidad del agua para riego, Ayers y Westcot (1987) señalan que el contenido de fósforo normalmente aceptable es de  $2.0 \text{ mg l}^{-1}$ .

#### Clasificación hidrogeoquímica del agua

Los estudios hidroquímicos o hidrogeoquímicos sirven para determinar el origen de la composición química del agua y la relación entre el agua y la constitución química de las rocas. El método gráfico más utilizado para visualizar y clasificar los datos hidroquímicamente es el diagrama trilineal de Piper (Ray & Mukherjee, 2008).

#### Análisis estadístico (asociación de variables) y evaluación de datos analíticos

Para conocer la dependencia o asociación funcional entre las variables obtenidas en una muestra de una población determinada, la regresión lineal se convierte en la herramienta más adecuada (Méndez, Namihira-Guerrero, Moreno-Altamirano, & Sosa-De-Martínez, 1990). En esta investigación se calibró un modelo lineal sin ordenada o ajustada al origen mediante la técnica del análisis de regresión lineal. El ajuste del modelo se realizó al relacionar la concentración iónica de las soluciones en  $\text{mg l}^{-1}$  con la concentración en

términos de la conductividad eléctrica en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , con el método de mínimos cuadrados. El modelo tiene la estructura siguiente:

$$Y = fa X$$

Donde  $Y$  es la concentración de la solución en  $\text{mg L}^{-1}$  (sólidos disueltos totales);  $a$ , la pendiente de la recta, que significa el número de unidades en que aumenta  $Y$  por cada unidad de  $X$ ;  $X$ , la conductividad eléctrica de la solución en  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

Se verificó la exactitud de los valores analíticos mediante el método de comprobación recomendado por Eaton, Clesceri y Greenberg (1995), definido como sigue:

$$\% \text{ diferencia} = 100 \left[ \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \right]$$

## Resultados

### Concentración iónica del agua

Los datos analíticos tienen un margen de error menor a 2%, valor aceptable para este tipo de agua de baja concentración (cuadros 2 y 3).

De acuerdo con los rangos de los valores de la conductividad eléctrica establecidos por Richards (1990), para considerar la calidad del agua de riego, el agua superficial de la Sierra Norte se clasifica como sigue: muestreo en primavera, 16 muestras de agua como C1, 3 muestras como C2 y 3 muestras como C3; muestreo en otoño, 14 muestras como C1, 5 muestras como C2 y 3 muestras como C3.

A su vez, se debe señalar que la relación funcional  $\text{mg l}^{-1} = fa \text{CE}$ , en su proporcionalidad, la pendiente de la recta depende del tipo de salinidad. En la figura 2 se presenta la relación funcional entre las concentraciones de las sales solubles de las aguas superficiales de la Sierra Norte y sus valores correspondientes de la conductividad eléctrica. El valor de la pendiente  $a$  encontrada, para el muestreo en

primavera, fue de 0.7341 y para el otoño de 0.7062. El valor de  $a$  es arriba de 0.700, que corresponde a aguas con valores considerables en los contenidos de bicarbonatos.

### Contenido de sodio

En el cuadro 4 se presenta la clasificación del agua superficial de la Sierra Norte de acuerdo con sus valores de RAS y en el cuadro 5 se presentan los valores de RAS en sus diferentes conceptualizaciones, en las cuales se toman en cuenta las variaciones en las concentraciones de los iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y de magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) durante los procesos de precipitación o de disolución de la calcita. El agua superficial de la Sierra Norte se clasifica en general como S1, esto indica que no habrá problemas sobre las propiedades del suelo por efecto del sodio. El RASaj indica que dos estaciones se clasifican como S2, estos son el Nacimiento Termal Barranca Chignahuapan (núm. 16) en el muestreo de primavera y el Nacimiento Agua Mineral (núm. 14) en primavera y otoño.

### Carbonato de sodio residual

De acuerdo con el cuadro 6, se puede observar que las estaciones de la Sierra Norte que se muestrearon en primavera tienen en sus concentraciones cantidades considerables de bicarbonatos, esto se deduce por tener valores de CSR positivos; una estación se clasifica como condicionada por tener un valor de  $2.29 \text{ mmol}_e \text{ l}^{-1}$  y corresponde al río Agua Mineral en el Ejido Tuliman (núm. 15). En otoño, los valores obtenidos son negativos, indicando que son cálcico-magnésicas y magnésico-cálcicas; esto se deduce por los valores negativos (-) y se comprueba con los datos analíticos de estos elementos.

### Boro

En el cuadro 6 se presentan los contenidos de boro en las estaciones de la Sierra Norte. La



Cuadro 2. Concentración iónica del agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en primavera.

Estación	Fuente	pH	CE μS cm <sup>-1</sup>	mmol L <sup>-1</sup>				Suma cat	mmol L <sup>-1</sup>				Suma ani	Error %	STD mg L <sup>-1</sup>
				Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>			
1	Nacimiento en Ejido Gómez Tepetenco	8.7	83	0.12	0.18	0.44	0.08	0.82	0.02	0.57	0.15	0.05	0.79	1.86	63.37
2	Río en Tlautitiltalpea	8.6	129	0.18	0.24	0.75	0.10	1.27	0.04	0.81	0.26	0.12	1.23	1.60	97.00
3	Río Texpico en puente Zacapoaxtla	7.2	263	0.54	0.66	1.31	0.09	2.60	0.00	1.21	0.77	0.53	2.51	1.76	186.21
4	Río Apulco en Cascada La Gloria	7.5	157	0.37	0.39	0.73	0.06	1.55	0.00	0.63	0.51	0.35	1.49	1.97	108.27
5	Río Cuetzalan en Nauzontla	7.6	241	0.61	0.55	1.18	0.03	2.37	0.00	1.24	0.42	0.67	2.33	0.85	175.03
6	Río Tepeacan en San Miguel	7.4	99	0.22	0.17	0.52	0.07	0.98	0.00	0.56	0.32	0.07	0.95	1.55	72.84
7	Río Escorial en Zapotitlán	7.8	78	0.16	0.19	0.37	0.05	0.77	0.00	0.47	0.20	0.09	0.76	0.65	58.31
8	Río Escorial en puente a Zacapoaxtla	8.1	186	0.48	0.50	0.67	0.16	1.81	0.00	1.21	0.40	0.18	1.79	0.56	137.35
9	Río San Pedro en Ahuacatlán	8.0	225	0.60	0.34	1.19	0.09	2.22	0.00	1.15	0.73	0.31	2.19	0.68	162.70
10	Río Ajajalpa en puente km 92	8.0	256	0.58	0.65	1.10	0.20	2.53	0.00	1.93	0.40	0.12	2.45	1.61	196.98
11	Nacimiento termal El Pinal en Jicolapan	7.3	897	2.40	2.60	3.57	0.29	8.86	0.00	5.61	2.60	0.39	8.60	1.49	651.30
12	Río Agrio en Cascada San Pedro	8.0	132	0.24	0.30	0.72	0.04	1.30	0.00	0.67	0.48	0.12	1.27	1.17	93.84
13	Cascada Quetzalapan en Ejido Tuliman	8.9	161	0.20	0.26	1.04	0.08	1.58	0.06	1.01	0.35	0.12	1.54	1.28	120.43
14	Nacimiento Agua Mineral en Ejido Tuliman	7.8	1332	2.50	3.05	7.18	0.42	13.15	0.00	7.84	4.62	0.35	12.81	1.31	964.65
15	Río Ajajalpa en Ejido Tuliman	8.1	672	1.80	1.90	2.75	0.19	6.64	0.00	3.97	2.10	0.40	6.47	1.30	484.29
16	Nacimiento termal Barranca Chignahuapan	7.5	1343	6.90	1.10	4.94	0.32	13.26	0.00	8.84	3.50	0.58	12.92	1.30	1007.70
17	Río Ajajalpa en Barranca Chignahuapan	8.8	169	0.18	0.23	1.21	0.05	1.67	0.04	1.13	0.32	0.14	1.63	1.21	129.36
18	Manantial en Chignahuapan	9.2	149	0.25	0.32	0.84	0.06	1.47	0.02	0.98	0.28	0.15	1.43	1.38	112.40
19	Nacimiento en entronque a Pueblo Nuevo	8.8	61	0.12	0.18	0.22	0.08	0.60	0.02	0.33	0.15	0.08	0.58	1.69	44.38
20	Jagüey en Pueblo Nuevo	6.7	107	0.20	0.32	0.37	0.17	1.06	0.00	0.65	0.25	0.12	1.02	1.92	80.42
21	Manantial en Puente Atotomilco	9.1	77	0.18	0.20	0.29	0.09	0.76	0.02	0.49	0.20	0.03	0.74	1.33	57.46
22	Río Agrio en Puente Atotomilco	8.3	156	0.38	0.45	0.62	0.09	1.54	0.00	1.05	0.38	0.07	1.50	1.32	116.21

Cuadro 3. Concentración iónica del agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en otoño.

Estación	Altitud	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Suma cat	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Suma ani	Error	STD
	m		μS cm <sup>-1</sup>	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					%	mg L <sup>-1</sup>
1	2 616	8.0	93	0.40	0.32	0.15	0.05	0.92	0.00	0.60	0.21	0.08	0.89	1.66	67.48
2	2 576	8.4	149	0.60	0.46	0.34	0.07	1.47	0.03	1.05	0.23	0.11	1.42	1.73	110.29
3	1 725	7.0	321	2.04	0.56	0.42	0.08	3.10	0.00	1.75	0.80	0.62	3.17	1.12	233.25
4	1 734	7.7	221	1.67	0.32	0.15	0.04	2.18	0.00	1.10	0.62	0.40	2.12	1.40	156.69
5	1 434	7.8	263	2.08	0.24	0.22	0.06	2.60	0.00	1.12	0.55	0.86	2.53	1.36	188.37
6	598	7.7	121	0.77	0.21	0.18	0.04	1.20	0.00	0.57	0.55	0.05	1.17	1.27	83.17
7	696	7.3	89	0.41	0.25	0.19	0.03	0.88	0.00	0.55	0.25	0.06	0.86	1.15	64.26
8	710	8.1	288	1.91	0.35	0.52	0.06	2.84	0.00	1.88	0.75	0.12	2.75	1.61	211.00
9	1 278	8.0	354	2.76	0.38	0.24	0.12	3.50	0.00	2.28	0.92	0.22	3.42	1.16	258.71
10	1 248	8.0	295	1.65	0.72	0.46	0.08	2.91	0.00	1.96	0.70	0.17	2.83	1.39	216.38
11	2 232	6.1	1261	7.70	3.25	1.15	0.35	12.45	0.00	6.53	3.92	1.68	12.13	1.30	881.73
12	2 048	7.2	134	0.51	0.41	0.32	0.08	1.32	0.00	0.66	0.44	0.18	1.28	1.54	92.45
13	2 166	6.9	245	0.57	1.02	0.68	0.15	2.42	0.00	1.52	0.61	0.23	2.36	1.26	176.69
14	1 905	6.4	1913	7.71	6.00	4.76	0.42	18.89	0.00	9.77	8.30	0.33	18.40	1.31	1309.74
15	1 905	7.0	243	0.93	0.75	0.61	0.11	2.40	0.00	1.30	0.85	0.19	2.34	1.27	170.40
16	2 170	7.0	1471	7.19	3.05	3.97	0.28	14.49	0.00	10.13	3.55	0.47	14.15	1.19	1091.74
17	2 170	6.7	108	0.35	0.40	0.26	0.06	1.07	0.00	0.60	0.30	0.14	1.04	1.42	77.13
18	2 273	6.6	238	0.94	0.87	0.46	0.08	2.35	0.00	1.25	0.75	0.29	2.29	1.29	166.28
19	2 572	6.7	119	0.58	0.30	0.23	0.04	1.15	0.00	0.65	0.37	0.16	1.18	1.29	85.88
20	2 613	6.4	104	0.41	0.25	0.29	0.08	1.03	0.00	0.63	0.28	0.08	0.99	1.98	76.18
21	2 224	8.7	90	0.39	0.27	0.15	0.08	0.89	0.04	0.51	0.27	0.05	0.87	1.14	64.44
22	2 224	7.3	116	0.37	0.36	0.32	0.10	1.15	0.00	0.58	0.38	0.16	1.12	1.32	82.78

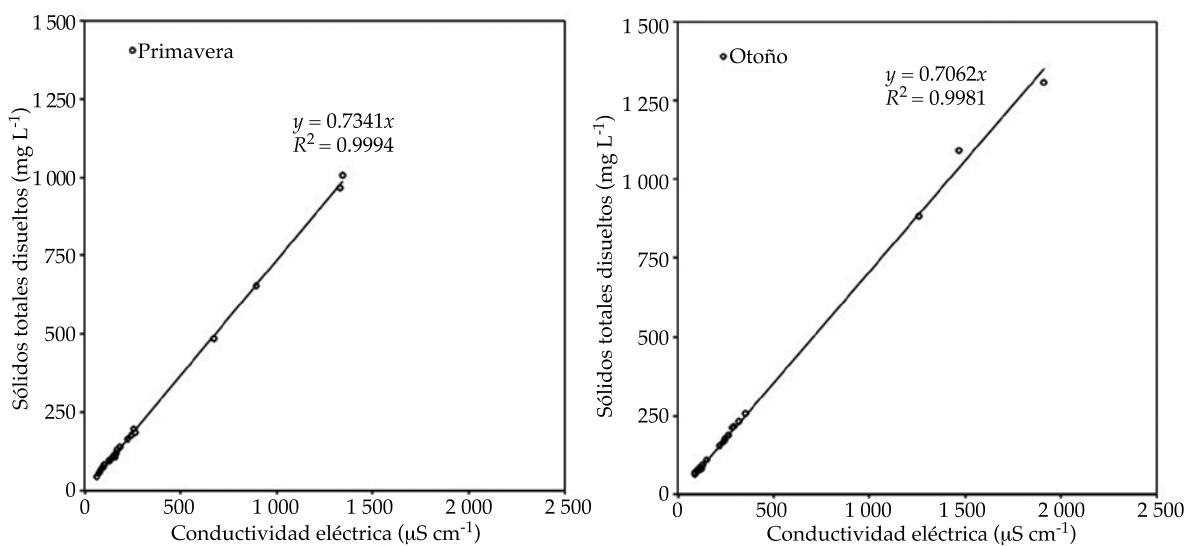


Figura 2. Concentración de sales y su relación con la conductividad eléctrica en el agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en primavera y otoño.

Cuadro 4. Síntesis de la clasificación del agua superficial de la Sierra Norte de Puebla con base en los valores de sodio. Muestreo en primavera y otoño.

Muestreo	Formulaciones de RAS	Clasificación		Muestreo	Formulaciones de RAS	Clasificación	
		S1	S2			S1	S2
Primavera	RAS			Otoño	RAS		
	Muestras	22			Muestras	22	
	RAS <sub>aj</sub>				RAS <sub>aj</sub>		
	Muestras	20	2		Muestras	21	1
	RAS°				RAS°		
	Muestras	22			Muestras	22	

Cuadro 5. Valores de la relación de adsorción de sodio en el agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en primavera y otoño.

Muestreo	Estación	pH	CE	RAS	RAS <sub>aj</sub>	RAS°	Muestreo	Estación	pH	CE	RAS	RAS <sub>aj</sub>	RAS°
			μS cm <sup>-1</sup>							μS cm <sup>-1</sup>			
Primavera	1	8.7	83	1.14	0.26	0.68	Otoño	1	8.0	93	0.25	0.15	0.16
	2	8.6	129	1.64	0.85	1.12		2	8.4	149	0.47	0.47	0.37
	3	7.2	263	1.69	1.85	1.40		3	7.0	321	0.37	0.58	0.35
	4	7.5	157	1.18	0.75	0.80		4	7.7	221	0.15	0.19	0.13
	5	7.6	241	1.55	1.69	1.28		5	7.8	263	0.20	0.27	0.17
	6	7.4	99	1.18	0.37	0.69		6	7.7	121	0.26	0.18	0.17
	7	7.8	78	0.88	0.17	0.51		7	7.3	89	0.33	0.18	0.20
	8	8.1	186	0.96	0.98	0.77		8	8.1	288	0.49	0.76	0.49
	9	8.0	225	1.74	1.69	1.37		9	8.0	354	0.19	0.34	0.21
	10	8.0	256	1.40	1.84	1.28		10	8.0	295	0.42	0.67	0.42
	11	7.3	897	2.26	5.17	2.59		11	6.1	1261	0.49	1.31	0.67
	12	8.0	132	1.39	0.72	0.95		12	7.2	134	0.47	0.35	0.32
	13	8.9	161	2.17	1.40	1.56		13	6.9	245	0.76	1.01	0.67
	14	7.8	1332	4.31	10.52	5.02		14	6.4	1913	1.82	5.25	2.39
	15	8.1	672	2.02	4.11	2.22		15	7.0	243	0.67	0.85	0.59
	16	7.5	1343	2.47	6.54	4.06		16	7.0	1471	1.75	4.92	2.66
	17	8.8	169	2.67	1.69	2.00		17	6.7	108	0.42	0.26	0.29
	18	9.2	149	1.57	1.12	1.16		18	6.6	238	0.48	0.62	0.41
	19	8.8	61	0.57	0.01	0.31		19	6.7	119	0.35	0.25	0.22
	20	6.7	107	0.73	0.36	0.50		20	6.4	104	0.50	0.30	0.32
	21	9.1	77	0.67	0.18	0.38		21	8.7	90	0.26	0.14	0.16
	22	8.3	156	0.96	0.86	0.76		22	7.3	116	0.53	0.32	0.34

mayoría de las estaciones contiene cantidades aceptables de boro. La fuente no recomendable para uso agrícola, con valor superior a 4 mg B l<sup>-1</sup>, corresponde al Nacimiento Termal Barranca Chignahuapan (núm. 16); este nacimiento descarga al río Agua Mineral (núm. 15),

que es muestreado aguas abajo y tiene un contenido de 3.28 mg B l<sup>-1</sup>. Otros dos puntos son nacimientos de agua: Nacimiento Agua Mineral (núm. 14) con concentración de 2.95 mg B l<sup>-1</sup> y Nacimiento Termal El Pinal (núm. 11), con 1.61 mg l<sup>-1</sup>, ambos en otoño.

Cuadro 6. Evaluación del carbonato de sodio residual, boro y fósforo en el agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en primavera y otoño.

Muestreo	Estación	CSR	Clasificación	B	Clasificación			P	Clasificación
		mmol L <sup>-1</sup>		mg L <sup>-1</sup>	Sensibles	Semitolerantes	Tolerantes	mg L <sup>-1</sup>	
Primavera	1	0.29	Buena	0.43	Buena	Excelente	Excelente	0.02	Aceptable
	2	0.43	Buena	0.28	Excelente	Excelente	Excelente	0.02	Aceptable
	3	0.01	Buena	0.11	Excelente	Excelente	Excelente	0.13	Aceptable
	4	-0.13	Buena	0.10	Excelente	Excelente	Excelente	0.07	Aceptable
	5	0.08	Buena	0.07	Excelente	Excelente	Excelente	0.07	Aceptable
	6	0.17	Buena	0.11	Excelente	Excelente	Excelente	0.08	Aceptable
	7	0.12	Buena	0.14	Excelente	Excelente	Excelente	0.13	Aceptable
	8	0.23	Buena	0.13	Excelente	Excelente	Excelente	0.04	Aceptable
	9	0.21	Buena	0.04	Excelente	Excelente	Excelente	0.08	Aceptable
	10	0.70	Buena	0.15	Excelente	Excelente	Excelente	0.10	Aceptable
	11	0.61	Buena	1.54	No recomendable	Aceptable	Buena	0.05	Aceptable
	12	0.13	Buena	0.15	Excelente	Excelente	Excelente	0.24	Aceptable
	13	0.61	Buena	0.20	Excelente	Excelente	Excelente	0.21	Aceptable
	14	2.29	Condicionada	3.28	No recomendable	No recomendable	Insegura	0.06	Aceptable
	15	0.27	Buena	2.18	No recomendable	Insegura	Aceptable	0.04	Aceptable
	16	0.84	Buena	4.04	No recomendable	No recomendable	No recomendable	0.03	Aceptable
	17	0.76	Buena	0.01	Excelente	Excelente	Excelente	0.28	Aceptable
	18	0.43	Buena	0.06	Excelente	Excelente	Excelente	0.04	Aceptable
	19	0.05	Buena	0.15	Excelente	Excelente	Excelente	0.24	Aceptable
	20	0.13	Buena	0.12	Excelente	Excelente	Excelente	0.14	Aceptable
	21	0.13	Buena	0.00	Excelente	Excelente	Excelente	0.14	Aceptable
	22	0.22	Buena	0.42	Buena	Excelente	Excelente	0.09	Aceptable
Otoño	1	-0.12	Buena	0.23	Excelente	Excelente	Excelente	0.03	Aceptable
	2	0.02	Buena	0.18	Excelente	Excelente	Excelente	0.04	Aceptable
	3	-0.85	Buena	0.12	Excelente	Excelente	Excelente	0.14	Aceptable
	4	-0.89	Buena	0.10	Excelente	Excelente	Excelente	0.06	Aceptable
	5	-1.20	Buena	0.07	Excelente	Excelente	Excelente	0.05	Aceptable
	6	-0.41	Buena	0.11	Excelente	Excelente	Excelente	0.09	Aceptable
	7	-0.11	Buena	0.16	Excelente	Excelente	Excelente	0.21	Aceptable
	8	-0.38	Buena	0.13	Excelente	Excelente	Excelente	0.09	Aceptable
	9	-0.86	Buena	0.04	Excelente	Excelente	Excelente	0.08	Aceptable
	10	-0.41	Buena	0.18	Excelente	Excelente	Excelente	0.15	Aceptable
	11	-4.42	Buena	1.61	No recomendable	Aceptable	Buena	0.02	Aceptable
	12	-0.26	Buena	0.85	Aceptable	Buena	Excelente	0.36	Aceptable
	13	-0.07	Buena	0.64	Buena	Excelente	Excelente	0.69	Aceptable
	14	-3.94	Buena	2.95	No recomendable	No recomendable	Aceptable	0.08	Aceptable
	15	-0.38	Buena	0.75	Aceptable	Buena	Excelente	0.30	Aceptable
	16	-0.11	Buena	4.01	No recomendable	No recomendable	No recomendable	0.02	Aceptable
	17	-0.15	Buena	0.58	Buena	Excelente	Excelente	0.27	Aceptable
	18	-0.56	Buena	0.64	Buena	Excelente	Excelente	0.39	Aceptable
	19	-0.23	Buena	0.22	Excelente	Excelente	Excelente	0.25	Aceptable
	20	-0.03	Buena	0.68	Aceptable	Buena	Excelente	0.35	Aceptable
	21	-0.11	Buena	0.01	Excelente	Excelente	Excelente	0.10	Aceptable
	22	-0.15	Buena	0.85	Aceptable	Buena	Buena	0.30	Aceptable

Fósforo

El contenido de fósforo en el agua en los dos muestreos se encontró entre 0.02 y 0.69 mg l<sup>-1</sup>; todas se consideran aptas para el riego (cuadro 6). En primavera se encontró una máxima de 0.28 mg l<sup>-1</sup>, que corresponde al río Ajajalpa en Barranca Chignahuapan (núm. 17) y en otoño la máxima fue de 0.69 mg l<sup>-1</sup> en la Cascada Quetzalapa (núm. 13).

Clasificación hidrogeoquímica

Esta clasificación indica que el agua superficial muestreada en las diferentes estaciones de la Sierra Norte es en su mayoría bicarbonatada con variaciones en los cationes sodio y

calcio. En el primer muestreo se clasifica como sódica bicarbonatada (figura 3). En el segundo muestreo se clasifica como cálcica bicarbonatada (figura 4).

Discusión

Concentración iónica

El conocimiento de la amplitud numérica de los distintos parámetros conlleva a la identificación de la prevalencia de ciertos procesos en el agua superficial y en los suelos que se riegan con ésta. Para tener certeza de estos procesos, es necesario contar con datos analíticos confiables, para ello se evaluaron los datos, como lo recomiendan Eaton et al.

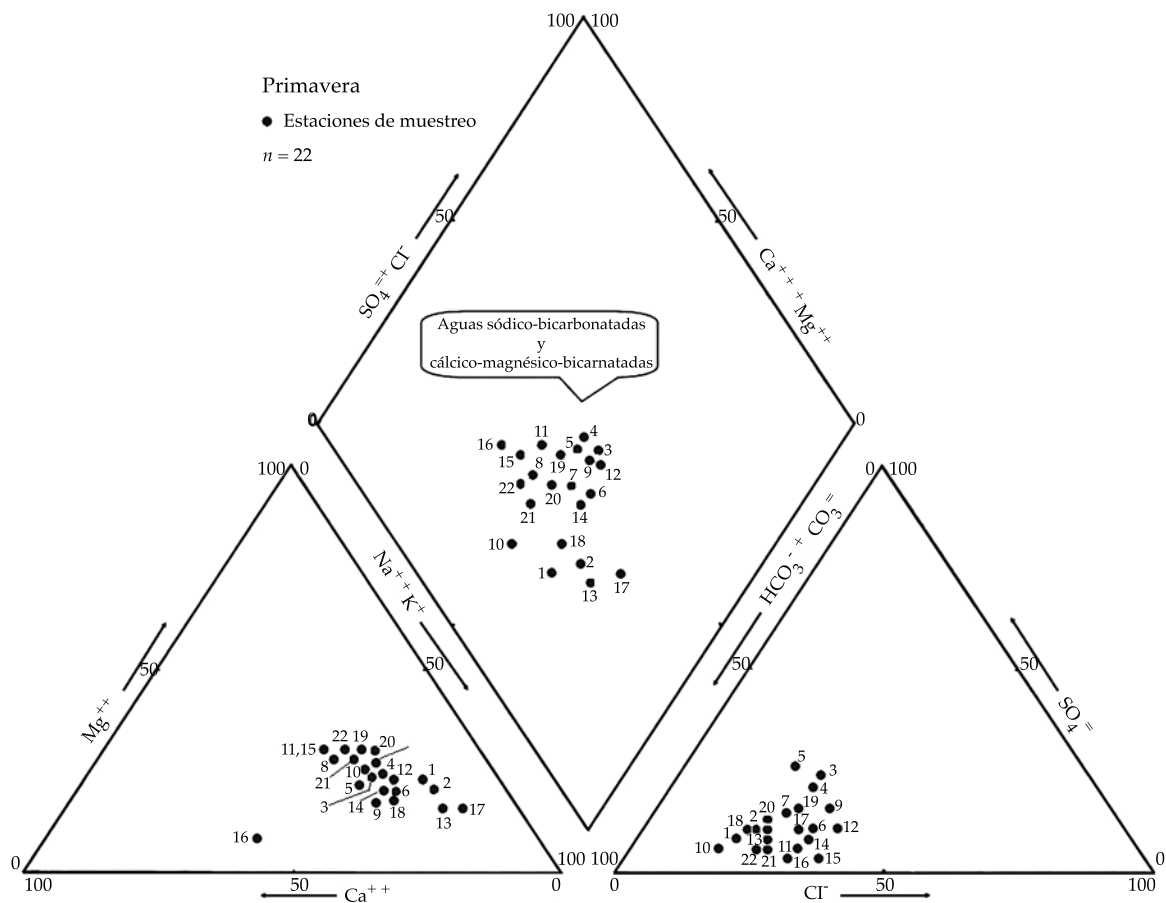


Figura 3. Clasificación hidrogeoquímica del agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en primavera.

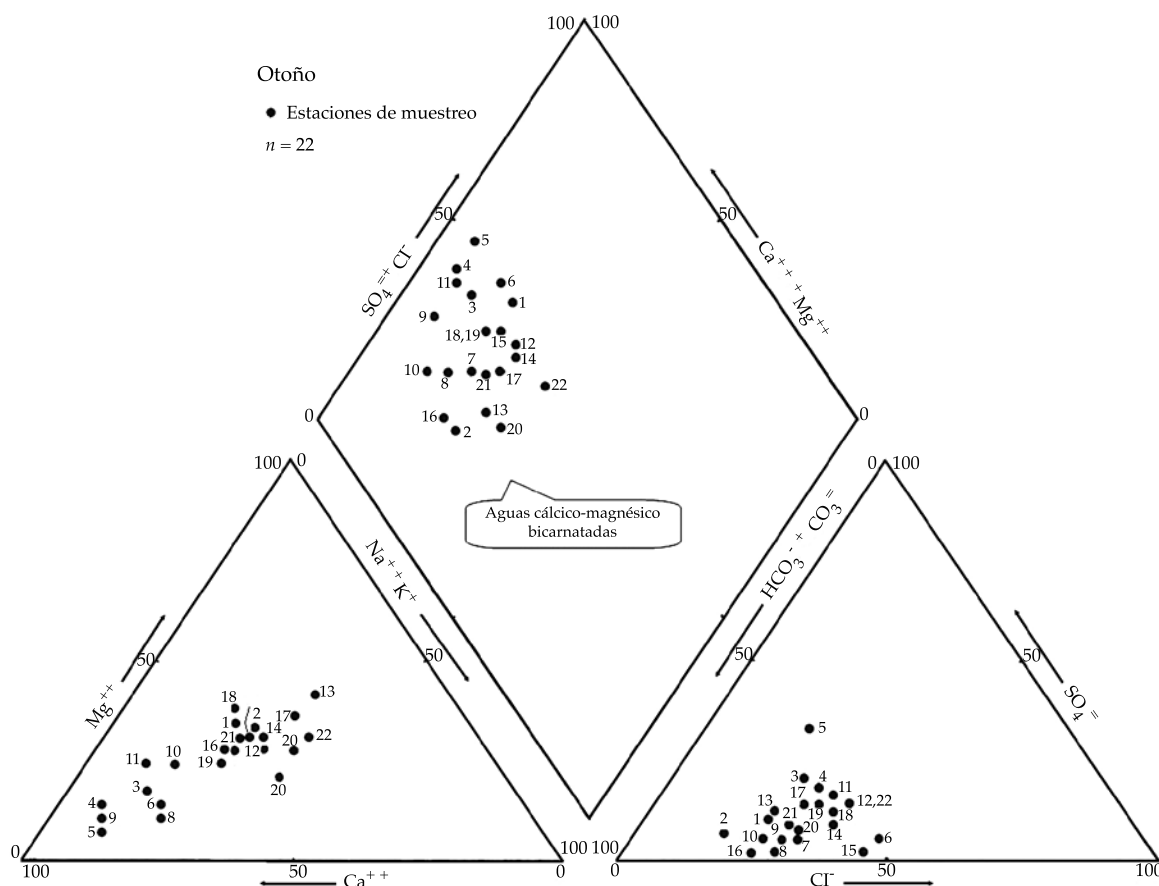


Figura 4. Clasificación hidrogeoquímica del agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en otoño.

(1995). Esta recomendación se fundamenta en la electroneutralidad de las soluciones, es decir, la suma de aniones debe ser similar a la suma de cationes.

La media del pH fue 8.1, máximo de 9.2 y mínimo de 6.7 en primavera, y 7.3, 8.7 y 6.1, respectivamente, en otoño. Los valores normales de pH en el agua de riego de acuerdo con Ayers y Westcot (1987) oscilan entre 6.5-8.4. Los valores por arriba de 8.4 de acuerdo con Ortega *et al.* (2002) tendrán implicaciones importantes sobre la disponibilidad y el manejo de nutrientes.

En los trabajos de evaluación y caracterización del agua tanto superficial como subterránea se ha considerado que al medir la conductividad eléctrica en las soluciones acuosas se puede relacionar esta medición con los sólidos disueltos en el agua (en mg l<sup>-1</sup>).

Velázquez, Ortega, Martínez, Kohashi, & García (2002), en su investigación, demostraron que el valor de la pendiente depende del tipo de sal dominante. Jurinak y Suarez (1990), y Richards (1990), en investigaciones específicas sobre numerosas determinaciones analíticas de la conductividad eléctrica y su relación con la cantidad en peso de los iones disociados, han establecido que las mediciones de conductividad eléctrica son directamente proporcionales a las masas moleculares disociadas. Aquí es necesario señalar que las mediciones de la conductividad eléctrica (CE) dependen del número de iones disociados en la solución, pero no de sus masas. La concentración en mg l<sup>-1</sup> sí depende de ambos, es decir, depende del número de iones y de sus masas.

La calidad del agua, en función de la concentración total expresada como conductividad eléctrica, indica que se puede emplear el agua superficial de la Sierra Norte sin restricción para uso agrícola, exceptuando las fuentes que se clasifican como C3, que sólo se recomiendan para cultivos tolerantes a la salinidad. Las fuentes son las siguientes: nacimiento termal El Pinal (núm. 11), nacimiento Agua Mineral (núm. 14) y nacimiento termal Barranca Chignahuapan (núm. 16). El agua de las dos primeras, en caso de emplearse para el riego, se recomienda en cultivos como alfalfa, avena, cebada y trigo, que de acuerdo con Maas (1990) toleran estos niveles de salinidad y son aptas para las condiciones ambientales de la zona donde se ubican, que son los municipios de Chignahuapan y Zacatlán. La última se utiliza como para fines terapéuticos ( $1343 \mu\text{S cm}^{-1}$ ), sin embargo se vierte al cauce del río Ajajalpa, que se muestrea aguas abajo en el Ejido Tuliman (núm. 15), con una concentración más diluida ( $672 \mu\text{S cm}^{-1}$ ).

Las estaciones de muestreo que llevan agua de origen residual son el número 3 en Zacapuaxtla, el 10 en Zacatlán, y 13 y 14 en Chignahuapan. El agua residual proviene principalmente de estas poblaciones y son producto de la actividad industrial, en específico de la manufacturera, por lo que generalmente son colorantes que no alteran la concentración iónica.

### *Concentración de sodio*

De acuerdo con Silva (2004) y Suarez, Wood y Lesch (2008), cuando se tienen altos valores de sodio intercambiable en los suelos, en estos últimos se presentan disminuciones en la permeabilidad, alteraciones en el medio poroso y efectos tóxicos en plantas sensibles al ion sodio. Existe una relación de proporcionalidad entre los valores de los parámetros RAS y por ciento de sodio intercambiable (PSI) en aguas de riego, ya que los valores de RAS se refieren a la cantidad de sodio adsorbido en el complejo de intercambio del suelo, como resultado de

la aplicación de un agua con un determinado contenido de sodio. Este parámetro se ha utilizado con muchas ventajas para hacer un excelente diagnóstico de los problemas de sodicidad en los suelos, en lugar de la determinación directa del sodio intercambiable. Los resultados en esta investigación demuestran que las tres expresiones de RAS permiten tener un rango de valores en cada punto, y con base en la característica del agua, en cuanto a pH, Ca, Mg y  $\text{HCO}_3$ , se puede predecir el efecto que tendrá el sodio sobre las propiedades de los suelos y, por consiguiente, sobre las plantas. La estación 14 tiene una RAS de 4.31, RASaj de 10.52 y RAS° 5.02. Los valores de Ca y Mg indican que se contrarresta el efecto del sodio, por esa razón se obtiene un valor bajo en la RAS original y RAS°. El valor de pH y el contenido de  $\text{HCO}_3$  permiten inferir que el Ca formará la sal  $\text{CaCO}_3$ ; el valor de la RASaj demuestra esta tendencia, ya que considera la precipitación del Ca en presencia de  $\text{HCO}_3$ . Esta precipitación favorece la predominancia del sodio en el suelo, ya que al ser de baja solubilidad, permanece en el suelo después de que calcio y magnesio han precipitado, como lo citan Can-Chulim, Ramírez-Ayala, Ortega-Escobar, Trejo-López y Cruz-Díaz, en 2008.

Los resultados de la RAS indican que el agua superficial se puede usar en la agricultura sin restricción.

### *Carbonato de sodio residual*

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el contenido de calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme el carbonato de sodio, debido a que por su alta solubilidad puede permanecer en solución aun después de que han precipitado los carbonatos de calcio y de magnesio.

Al realizar la evaluación del agua mediante este índice en los dos muestreos, sólo una fuente se clasifica como condicionada, la cual corresponde al nacimiento Agua Mineral (núm. 14), que no se utiliza para el riego, pero se vierte

directamente al río Ajajalpa. Los valores de CSR negativos indican que no existe problema para uso agrícola y los valores positivos muestran que Ca y Mg precipitarán como carbonatos cuando entren en contacto con el suelo, por lo que sólo permanecerán las sales de sodio en la solución del suelo. Dhembare (2012) encontró valores de CSR negativos y afirma que esto es porque el Ca y Mg no precipitan y permanecen en el agua. Se demuestra que en el periodo de estiaje se obtienen valores positivos de CSR, esto es porque los caudales se reducen y las concentraciones de Ca y Mg precipitan en forma de carbonatos. En el periodo de precipitación, estas sales precipitadas y, en general, las que se encuentran en los suelos y rocas de toda la zona de estudio se disuelven y son transportadas mediante los arroyos a los cauces principales. Nishanthiny *et al.* (2010) mencionan que la fuente principal de los contenidos de carbonatos son la disolución de las rocas carbonatadas. Por esta razón, los valores de CSR en la temporada de lluvias son negativos, porque los ríos contienen mayores concentraciones de Ca y Mg, producto de la disolución.

### Boro

Comúnmente, los altos contenidos de boro se asocian con las áreas salinas que se encuentran en zonas áridas y semiáridas (Yermiyahu *et al.*, 2003). Pero también se encuentran en zonas de regadío, donde el boro proviene principalmente del agua subterránea, que adquiere ese contenido de la actividad volcánica o de los materiales parentales con la que tiene contacto (Gmélíng, Németh, Eby, & Varga, 2007; Özgür, 2001). Gmélíng *et al.* (2007) encontraron valores altos de boro en agua subterránea de campos volcánicos y las asociaron con la actividad geotérmica. Velázquez, Pimentel y Ortega (2011), en una cuenca exorreica de uso agrícola, encontraron valores altos de B en el agua subterránea y su origen son los flujos geotérmicos. En el agua superficial, el

contenido de boro proviene principalmente del vertido de agua proveniente de zonas con influencia volcánica, del contacto del agua con las rocas ricas en boro y, en menor proporción, del vertido de agua residual.

En zonas de mucha precipitación pluvial, los síntomas de deficiencia en las plantas son muy comunes, debido a que las concentraciones de boro en los suelos son muy bajas y también a la alta lixiviación; por el contrario, en las zonas áridas y semiáridas, los síntomas de toxicidad por boro son el resultado de las grandes concentraciones en la solución del suelo y de las provenientes del agua de riego (Korzeniowska, 2008; Onthong, Yoajui, & Kaewsichan, 2011). Tanto la deficiencia como la toxicidad inhiben el crecimiento de las plantas, que traen como consecuencia marcadas reducciones en el rendimiento de los cultivos y pérdidas económicas a los productores (Edelstein, 2007).

La fuente no recomendable para uso agrícola, con valor superior a 4 mg l<sup>-1</sup>, corresponde al nacimiento termal Barranca Chignahuapan (núm. 16), que descarga al río Ajajalpa. En general, no existe problema para uso agrícola. Las fuentes de mayor concentración corresponden a nacimientos de agua, influenciados por la actividad volcánica residual de la caldera de Acoculco. La característica de estas fuentes es el hidrotermalismo y se usan para fines terapéuticos.

Para usar el agua directamente de la fuente se deben seleccionar cultivos tolerantes, como avena, maíz, calabaza, alfalfa y sorgo, que soportan entre 2.0 y 6.0 mg B l<sup>-1</sup> (Maas, 1990).

### Fósforo

El fósforo es un nutriente esencial para las plantas (Mendoza, Rodríguez-Martín, Fernández-Vera, Palacios-Díaz, & Hernández-Moreno, 2003) y es absorbido por la planta en forma de ortofosfatos. Los ortofosfatos son las formas inorgánicas más comunes del fósforo y en el agua de poca circulación causan diferentes niveles de intensidad de desarrollo



en los procesos de eutrofización. En el agua se encuentran en bajas concentraciones, pudiendo aumentar debido a incorporaciones de agua de origen urbano industrial (Johnston & Dawson, 2005). En el agua de la Sierra Norte no existe problema con el contenido de fósforo, se puede usar para fines agrícolas y en las presas los procesos de eutrofización serán incipientes.

### *Clasificación hidrogeoquímica*

Las estaciones de agua superficial con concentraciones altas son principalmente los nacimientos de agua, que se encuentran en un área geotérmica caracterizada por el hidrotermalismo. De acuerdo con Camprubí, González-Partida, Levresse, Tritlla y Carrillo-Chávez (2003), el hidrotermalismo se debe al contacto del agua con fuentes de calor provenientes de la actividad magmática que circulan por las fallas o zonas de fractura provocadas por actividad volcánica.

Existen tres nacimientos de agua con temperaturas superiores a los 30 °C. Una de ellas, el nacimiento termal Barranca Chignahuapan (núm. 16 con 48 °C), es explotado como baño termal por sus propiedades terapéuticas, como las de Viterbo, Italia (Piscopo *et al.*, 2006). Estos tres nacimientos con temperaturas elevadas se encuentran fuera de la caldera de Acoculco, pero la fuente de la elevada temperatura proviene de las profundidades del centro de la caldera y por la alta permeabilidad que subyace; estas fuentes de calor que calientan el agua y que posteriormente circulan por las fisuras o canales de disolución que se producen en las rocas calcáreas alimentan estos nacimientos. El tipo de agua sódica o cálcica bicarbonatada es una muestra de que el agua que alimenta estos puntos proviene del agua subterránea que subyace y circula por tales canales.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, las fuentes de agua superficial son en su mayoría bicarbonatadas, con variaciones en los cationes sodio y calcio. Estas variaciones se deben a la dilución y reconcentración. En periodos de estiaje, los iones menos solubles se

precipitan y sólo quedan en solución los más solubles. Esta es la razón del predominio del sodio en el primer muestreo, en donde las aguas se clasifican como sódicas bicarbonatadas. El segundo muestreo se realizó en época de intensa precipitación pluvial, donde las aguas interaccionan con los materiales calcáreos del área, diluyendo el calcio, y es lo que da el carácter de cálcicas bicarbonatadas.

### **Conclusiones**

La Sierra Norte es un área donde las corrientes superficiales son la fuente de mayor importancia para la agricultura. La concentración iónica del agua superficial por lo general es baja, debido a que en su mayoría proviene de los escurrimientos pluviales, teniendo variaciones mayores en puntos donde recibe descargas de nacimientos de agua de origen termal, y moderadas en donde recibe agua de origen urbano industrial.

La calidad del agua superficial es alterada moderadamente por las aportaciones iónicas de agua de origen urbano industrial en algunos puntos del cauce de los ríos. En general, el agua superficial es apta para el riego. Las particularidades de agua no recomendable se relacionan con los puntos que corresponden a nacimientos de agua que no se usan directamente para el riego, pero que se vierten a los cauces. Estos puntos de elevada concentración iónica cualitativa y cuantitativa son puntuales, porque tales concentraciones cambian aguas abajo de las descargas, ya sea por la dilución o precipitación, o por procesos químicos como oxidación y reducción.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, el agua superficial es, en su mayoría, bicarbonatada con variaciones en los cationes sodio y calcio. Estas variaciones se deben a la dilución y a la precipitación del calcio. En temporada de lluvias, el calcio se diluye y en temporada de estiaje se precipita. El área geotermal de la caldera de Acoculco es la fuente de la elevada temperatura y concentración iónica de los nacimientos de agua circundantes.

## Referencias

- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1987). *La calidad del agua y su uso en la agricultura* (81 pp.). Estudio FAO Riego y Drenaje 29, Rev. 1. Roma: FAO.
- Baccaro, K., Degorgue, M., Lucca, M., Picote, L., Zamuner, E., & Andreoli, Y. (2006). Calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del Cinturón Hortícola de Mar del Plata. *RIA*, 35(3), 95-110.
- Bower, C. A., Ogata, G., & Tucker, J. M. (1968). Sodium Hazard of Irrigation Waters as Influenced by Leaching Fraction and by Precipitation or Solution of Calcium Carbonate. *Soil Science*, 106(1), 29-34.
- Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., & Carrillo-Chávez, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 10-18.
- Can-Chulim, Á., Ramírez-Ayala, C., Ortega-Escobar, M., Trejo-López, C., & Cruz-Díaz, J. (2008). Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del río Tulancingo, estado de Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 243-252.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., & Zamorano-Orozco, J. J. (2006). La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 205-214.
- Casierra, F., & Rodríguez, S. Y. (2006). Tolerancia de plantas de feijoa (*Acca sellowiana* [Berg] Burret) a la salinidad por NaCl. *Agronomía Colombiana*, 24(2), 258-265.
- Cuanalo, O. A., & Melgarejo, G. (2002). Inestabilidad de las laderas Sierras Norte y Nororiental del estado de Puebla. *Ciencia y Cultura*, 9(47), 51-55.
- Dhembare, A. J. (2012). Assessment of Water Quality Indices for Irrigation of Dynaneshwar Dam Water, Ahmednagar, Maharashtra, India. *Archives of Applied Science Research*, 4(1), 348-352.
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., & Greenberg, A. E. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1325 pp). 19th Edition. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF.
- Eaton, F. M. (1950). Significance of Carbonates in Irrigation Water. *Soil Science*, 69(2), 123-133.
- Edelstein, M. (2007). Grafted Melons Irrigated with Fresh or Effluent Water Tolerate Excess Boron. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 132(4), 484-491.
- Galván, A., Hernández, G., Vélez, H., Gómez, E., Becerril, A., & Luna, A. (1999). *Evaluación de impacto ambiental, informe final de actividades Sierra Norte de Puebla* (62 pp.). México, DF: Secretaría de Agricultura y Ganadería, Banco Mundial, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
- Gmélíng, K., Németh, K., Eby, U., & Varga, Z. (2007). Boron Concentrations of Volcanic Fields in Different Geotectonic Settings. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159, 70-84.
- Goldberg, S., Corwin, D. L., Shouse, P. J., & Suarez, D. L. (2005). Prediction of Boron Adsorption by Field Samples of Diverse Textures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, 1379-1388.
- Grattan, S. (2006). Irrigation Water Composition and Salinization. In B. R. Hanson, S. R. Grattan, & A. Fulton (Eds.). *Agricultural Salinity and Drainage* (pp. 5-6). Water Management Series publication 3375. Davis, California: University of California Division of Agriculture and Natural Resources.
- Guevara-Romero, M. L. (2011). Tipos de vegetación de Puebla. En *La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado* (pp. 75-83). México, DF: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Johnston, A. E., & Dawson, C. J. (2005). *Phosphorus in Agriculture and in Relation to Water Quality* (71 pp.), Peterborough, United Kingdom: Agricultural Industries Confederation.
- Jurinak, J. J., & Suarez, D. L. (1990). The Chemistry of Salt Affected-Soils and Water. In K. K. Tanji (Ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management* (pp. 42-63). New York: ASCE.
- Korzeniowska, J. (2008). Response of Ten Winter wheat Cultivars to Boron Foliar Application in a Temperate Climate (South-West Poland). *Agronomy Research*, 6(2), 471-476.
- Langelier, W. F. (1936). The Analytical Control of Anticorrosion Water Treatment. *Journal American Waterworks Association*, 28, 1500-1521.
- López-Téllez, M. C. (2011). Usos del agua y situación de las cuencas hidrológicas. En *La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado* (pp. 244-246). México, DF: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Maas, E. V. (1990). Crop Salt Tolerance. En: K. K. Tanji (Ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management* (pp. 262-304). New York: ASCE.
- Martínez, M. Á., Evangelista, V., Basurto, F., Mendoza, M., & Cruz-Rivas, A. (2007). Flora útil de los cafetales en la Sierra Norte de Puebla, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 78, 15-40.
- Méndez-Ramírez, I., Namihira-Guerrero, D., Moreno-Altamirano, L., & Sosa-De-Martínez, C. (1990). *El protocolo de investigación. Lineamientos para su elaboración y análisis*. Segunda edición. México, DF: Trillas, 210 pp.
- Mendoza-Grimón, V., Rodríguez-Martín, R., Fernández-Vera, J. R., Palacios-Díaz, M. P., & Hernández-Moreno, J. M. (2003). Estudio de la disponibilidad del fósforo y boro aportados por las aguas depuradas en la Isla de Gran Canaria: Metodología y resultados preliminares.

- En J. Álvarez-Benedí & P. Marinero (Eds.). *Actas de las VI Jornadas sobre la Investigación de la Zona no Saturada del Suelo* (pp. 355-359). Vol. 6. Valladolid, España: Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITA).
- Miyamoto, S., & Pingitore, N. E. (1992). Predicting Calcium and Magnesium Precipitation in Saline Solutions Following Evaporation. *Soil Science Society of America Journal*, 56(6), 1767-1775.
- Murillo-Licea, D., López-Ramírez, E., Chávez-Hernández, P., Marañón-Pimentel, B., & Brie-Gowland, N. (2010). *Gobernanza del agua en comunidades indígenas de la región nororiental de Puebla* (256 pp.). Colección Agua y Sociedad. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Nishanthiny, S. C., Thushyanthy, M., Barathithasan, T., & Saravanan, S. (2010). Irrigation Water Quality Based on Hydro Chemical Analysis, Jaffna, Sri Lanka. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 7(1), 100-102.
- NMX-AA-008-SCFI-2000 (2000). *Análisis de agua - determinación del Ph* (36 pp.). México, DF: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- NMX-AA-034-SCFI-2001 (2001). *Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas* (18 pp.). México, DF: Secretaría de Economía.
- NMX-AA-073-SCFI-2001. *Análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas* (18 pp.). México, DF: Secretaría de Economía.
- NMX-AA-093-SCFI-2000 (2000). *Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica* (27 pp.). México, DF: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- NOM-O21-SEMARNAT-2000 (2000). *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis* (85 pp.). México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Onthong, J., Yoajui, N., & Kaewsichan, L. (2011). Alleviation of Plant Boron Toxicity by Using Water to Leach Boron from Soil Contaminated by Wastewater from Rubber Wood Factories. *ScienceAsia*, 37, 314-319.
- Ortega, M. A., Castellanos, J. Z., Aguilar, R., Vázquez, A., Alaníz, E., Vargas, C., & Urrutia, F. (2002). A Conceptual Model for Increases of Sodium, SAR, Alkalinity and pH at the Independence Aquifer in Guanajuato. *Terra*, 20, 199-207.
- Özgür, N. (2001). Origin of High Boron Contents of the Thermal Waters of Kizildere and Vicinity, Western Anatolia, Turkey. *International Geology Review*, 43(10), 910-920.
- Piscopo, V., Barbieri, M., Monetti, V., Pagano, G., Pistoni, S., Ruggi, E., & Stanzioni, D. (2006). Hydrogeology of Thermal Waters in Viterbo Area, Central Italy. *Hydrogeology Journal*, 14, 1508-1521.
- Rashidi, M., & Seilsepour, M. (2011). Prediction of Soil Sodium Adsorption Ratio Based on Soil Electrical Conductivity. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 8(2), 379-383.
- Ray, R. K., & Mukherjee, R. (2008). Reproducing the Piper Trilinear Diagram in Rectangular Coordinates. *Methods Note. Ground Water*, 46(6), 893-896.
- Richards, L. A. (1990). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos* (172 pp.). Manual núm. 60. Sexta reimpresión. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Laboratorio de Salinidad. México, DF: Limusa.
- Rodier, J. (1990). *Análisis de las aguas* (pp. 186-191). Segunda reimpresión. Barcelona: Omega.
- Sánchez, E., Ortega, M., Gonzáles, V., Ruelas, G., Kohashi, J., & García, N. (2002). Tolerancia de tubérculos de papa cv. Alpha en etapa de brotación a condiciones de salinidad. *Terra*, 21, 481-491.
- Silva, H., Ortiz, M., & Acevedo, E. (2007). Relaciones hídricas y ajuste osmótico en trigo. *Agrociencia*, 41(1), 23-34.
- Silva, E. I. L. (2004). Quality of Irrigation Water in Sri Lanka Status and Trends. *Asian Journal of Water*, 1(1-2), 5-12.
- Strogonov, B. P. (1964). *Physiological Basis of Salt Tolerance of Plants (As Affected by Various Types of Salinity)* (279 pp.). Jerusalem: Israel Program for Scientific Translation.
- Suarez, D. L. (1981). Relation between pH and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of Soil or Drainage Waters. *Soil Science Society America Journal*, 45, 464-475.
- Suarez, D. L., Wood, J. D., & Lesch, S. M. (2008). Infiltration into Cropped Soils: Effect of Rain and Sodium Adsorption Ratio-Impacted Irrigation Water. *J. Environ. Qual.*, 37, 169-179.
- Szabolcs, I. (1989). *Salt Affected Soils* (274 pp.). Boca Raton, USA: CRS Press.
- Vázquez-Martínez, I., Vargas-López, S., Zaragoza-Ramírez, J. L., Bustamante-González, Á., Calderón-Sánchez, F., Rojas-Álvarez, J., & Casiano-Ventura, M. Á. (2009). Tipología de explotaciones ovinas en la Sierra Norte del estado de Puebla. *Técnica Pecuaria en México*, 47(4), 357-369.
- Velázquez, M. A., Ortega, M., Martínez, Á., Kohashi, J., & García, N. (2002). Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra*, 20, 459-464.
- Velázquez, M. A., Pimentel, J. L., & Ortega, 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), 19-30.
- Wilcox, L. V. (1948). *The Quality of Water for Irrigation* (40 pp.). Tech. Bulletin 962. Washington, DC: Department of Agriculture.
- Yermiyahu, U., Finegold, I., Keren, R., Cohen, Y., Yehezkel, H., & Shmuel, D. (2003). Response of Pepper to Boron and Salinity under Greenhouse Conditions. *Acta Hort.*, 609, 149-154.

## Dirección institucional de los autores

*Dr. Álvaro Can Chulim*

Unidad Académica de Agricultura  
Universidad Autónoma de Nayarit  
km 9 Carretera Tepic-Compostela  
63780 Xalisco, Nayarit, MÉXICO  
Teléfono: +52 (311) 2110 128  
canchulim@yahoo.com.mx

*Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar*

Programa de Hidrociencias  
Campus Montecillo  
Colegio de Postgraduados  
km 36.5 Carretera México-Texcoco  
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO  
Teléfono: +52 (959) 5201 200  
manueloe@colpos.mx

*Dr. Edgar Iván Sánchez Bernal*

Instituto de Ecología  
Universidad del Mar  
Carretera a Zipolite km 1.5  
San Pedro Pochutla, Oaxaca, MÉXICO  
Teléfono: +52 (958) 5843 149  
edgarivansb@zicatela.umar.mx

*Dra. Elia Cruz Crespo*

Unidad Académica de Agricultura  
Universidad Autónoma de Nayarit.  
km 9 Carretera Tepic-Compostela  
63780 Xalisco, Nayarit, MÉXICO  
Teléfono: +52 (311) 2110 128  
ccruz2006@yahoo.com.mx