

# ORIGEN Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA ORIENTAL DE MÉXICO

## Origin and Quality of the Groundwater in the Oriental Basin of Mexico

Álvaro Can-Chulim<sup>1‡</sup>, Héctor Manuel Ortega-Escobar<sup>1</sup>, Norma Eugenia García-Calderón<sup>5</sup>, Amada Laura Reyes-Ortigoza<sup>3</sup>, Víctor Arturo González-Hernández<sup>2</sup> y David Flores-Román<sup>4</sup>

### RESUMEN

El agua subterránea es importante en el contexto económico del estado de Puebla, en donde se ubica la mayor proporción del área de estudio, ya que condiciona la factibilidad de incrementar su desarrollo económico. El 80% del agua subterránea se emplea en la agricultura. La mayor proporción del agua disponible, en el estado, se encuentra en la Cuenca Oriental. La extracción en la cuenca se ha incrementado en los últimos años al incorporar nuevas áreas a la agricultura de riego. La agricultura, en la cuenca, está condicionada por las características y propiedades físicas del suelo y la calidad del agua. En suelos de alta permeabilidad, de textura gruesa, se usa el riego por aspersión y en suelos de alta impermeabilidad, de textura fina, el riego por inundación, usando melgas y surcos. Al recurrir a estos métodos de riego, la calidad química y agronómica del agua se convierte en un factor importante, por los efectos que puede tener sobre el suelo y los cultivos. Se usaron índices como: carbonato de sodio residual, índice de saturación y relación de adsorción de sodio corregida. Estos índices son mejores parámetros para la evaluación de las aguas bicarbonatadas. El valor medio del pH fue de 8.7. La concentración media de 492.75 mg L<sup>-1</sup> y el carácter sódico bicarbonatado de las aguas subterráneas, de la cuenca, es definida por los materiales de origen volcánico con las que tienen contacto. Las aguas de los pozos profundos, son de baja concentración iónica, con una media de 244.37 mg L<sup>-1</sup>, una media de 1.80 mol<sub>c</sub> Na<sup>+</sup> L<sup>-1</sup>

y 2.16 mmol<sub>c</sub> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>. Las aguas del estrato superior, correspondientes a las capas freáticas, son de alta concentración iónica, con una media de 865.31 mg L<sup>-1</sup>, una media de 7.15 mmol<sub>c</sub> Na<sup>+</sup> L<sup>-1</sup> y 6.92 mmol<sub>c</sub> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** *sódico bicarbonatadas, acuífero, hidrogeoquímica, RAS<sup>o</sup>.*

### SUMMARY

Groundwater is important in the economic context of the Puebla state, where is located the largest portion of the study area, since it determines the feasibility to increase their economic development. The 80% of groundwater is used in agriculture. The largest proportion of available water in the state is in the Oriental Basin. The extraction in the basin has increased in recent years to incorporate new irrigated areas. Agriculture in the basin is conditioned by the characteristics and physical properties of soil and water quality. In high permeability soils, course texture, the sprinkler is used and in soils with high impermeability, fine texture, flood irrigation is recommended using beds and furrows. When using these irrigation methods, the chemical and agronomical quality of waters becomes an important factor because it may affect soil and crop. Residual sodium carbonate, saturation index and corrected sodium adsorption ratio were used as indexes. These are best for evaluation of bicarbonate-type waters. The mean pH was 8.7. The average concentration of 492.75 mg L<sup>-1</sup> and the bicarbonate sodium character of the groundwater basin are defined by volcanic materials. The ion concentration in waters of deep wells is low, with an average of 244.37 mg L<sup>-1</sup>, an average of 1.80 mmol<sub>c</sub> Na<sup>+</sup> L<sup>-1</sup> and 2.16 mmol<sub>c</sub> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>. The waters of the upper level (water tables) are high in ion concentration, with an average of 865.31 mg L<sup>-1</sup>, an average of 7.15 mmol<sub>c</sub> Na<sup>+</sup> L<sup>-1</sup> and 6.92 mmol<sub>c</sub> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>.

**Index words:** *sodium bicarbonate, aquifer, hydrogeochemistry, RAS<sup>o</sup>.*

<sup>1</sup> Programa de Hidrociencias; <sup>2</sup> Programa de Genética. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (acan@colpos.mx)

<sup>3</sup> Dpto. de Ecología y Recursos Naturales, Lab. de Edafología;

<sup>4</sup> Dpto. de Edafología, Inst. de Geología. UNAM. Delegación Coyoacán. 04510 México, D. F.

<sup>5</sup> UMDI, Fac. de Ciencias, Campus Juriquilla, UNAM. 76230 Querétaro, México.

## INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es de gran importancia dentro del contexto económico del estado de Puebla, ya que condiciona, fuertemente, la factibilidad de incrementar el desarrollo económico de la entidad. Actualmente, de la extracción total, en el estado, 67% corresponden a pozos y de éstas, el 80% se emplea, principalmente, en la agricultura. El agua disponible, en el estado de Puebla, se encuentra en su mayor parte en la Cuenca Oriental (INEGI, 2010). En el Diario Oficial de 1954 se declara la veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo de la cuenca cerrada denominada Oriental, en los estados de Puebla y Tlaxcala, sin embargo, en el artículo III se especifica que tanto las obras existentes, como las nuevas que se construyan, quedaran sujetas a las disposiciones que dicte la Secretaría de Recursos Hidráulicos, actualmente Comisión Nacional del Agua, para regular y controlar el mejor aprovechamiento de las aguas del subsuelo. Hoy en día, en la Cuenca Oriental, la agricultura de riego por aspersión es la más usada, aunque en las inmediaciones de la Laguna Totolcingo todavía se usa el riego por inundación, gracias a que la zona presenta suelos de textura fina de alta impermeabilidad. Dos factores condicionan el riego en la cuenca, una es el suelo y otra es la calidad del agua de riego. Bajo este contexto, un primer objetivo, de esta investigación, es determinar la composición química de las aguas y segundo, definir la calidad del agua para uso agrícola; para esto se usan los índices establecidos por Richards (1973) y Ayers y Westcot (1987). Richards establece que las características más importantes que determinan la calidad del agua para riego son: la concentración total de sales solubles, expresados en términos de conductividad eléctrica (CE); la concentración relativa del sodio expresada en términos de la relación de adsorción de sodio (RAS), en aguas bicarbonatadas, el calcio modifica los valores del RAS, debido a los procesos de hidrólisis y precipitación del ión calcio (Velázquez *et al.*, 2002), bajo este contexto la RAS<sup>o</sup> ofrece una mejor evaluación de los valores de la relación de adsorción de sodio; la concentración de Boro (B); y bajo ciertas condiciones, la concentración de bicarbonatos, para este caso, en términos del carbonato de sodio residual (CSR). Ayers y Westcot (1967) proponen la evaluación del problema que puede causar el agua de una determinada calidad al ser aplicada al suelo mediante el riego, para esto propone el uso de

una gráfica para predecir el efecto del agua sobre la infiltración. También propone el cálculo del índice de saturación (IS) para predecir la precipitación del calcio como carbonato de calcio en los sistemas de riego y en el suelo. La composición y concentración iónica de las aguas subterráneas en la Cuenca Oriental es definida por los materiales de origen volcánico con los que tiene contacto. Las aguas en contacto con materiales de origen volcánico son de baja concentración iónica, debido a que estos materiales son de baja solubilidad (Can *et al.*, 2008). Otro objetivo fue establecer el carácter químico dominante e inferir la procedencia iónica del agua subterránea, mediante el diagrama propuesto por Piper (1944).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Marco Geológico

La Cuenca Oriental se encuentra en la parte oriente del Eje Neovolcánico, es una cuenca endorreica ubicada entre las coordenadas 97° 09' y 98° 03' O y entre los 18° 48' y 19° 43' N (Arredondo, 2002). Abarca tres estados del territorio mexicano: Puebla, Tlaxcala y Veracruz (Alcocer *et al.*, 2007). Tiene una superficie aproximada de 5250 km<sup>2</sup>. En general se puede definir como una planicie cubierta parcialmente por lagunas temporales y someras, rodeadas por altas y escarpadas montañas, cuyas cimas constituyen el parteaguas de la cuenca (Reyes, 1979). Tiene una cota promedio de 2300 m (Gasca, 1981).

El parteaguas norte de la cuenca está delimitado por el enorme complejo volcánico del Pleistoceno que forma la caldera de Los Humeros y la Sierra de San Antonio, al sur de Teziutlan, Puebla. El parteaguas NO se construye con la Sierra de Tlaxco; una enorme acumulación de tobas y cenizas volcánicas que en parte contienen algunos acuíferos de sedimentos lacustres. En la zona occidental se levanta la estructura cónica compleja de lava y cenizas que forman La Malinche, de una altura de 4461 m (Yarza de, 2003), con sus pequeños conos adventicios. La parte sur está ocupada por la Sierra de Soltepec, con una dirección NO-SE formada por cenizas cretáceas al SE y material basáltico al NO. Por último, se cierra al oriente por un sistema de estructuras y derrames andesíticos y riolíticos que forman la Sierra de Citlaltépetl. Esta sierra se inicia al sur con la Sierra Negra y el Pico de Orizaba o Citlaltépetl de una altura de 5675 m (Macías, 2005), se continúa al sur un cordón

de 3300 m de altura formada principalmente por riolitas y traquiandesitas hasta culminar al norte con la prominencia llamada Cofre de Perote de 4282 m de altura (Díaz *et al.*, 2008).

En el interior de la cuenca se encuentran unidades perfectamente definidas, como el núcleo riolítico que forman las crestas de Las Derrumbadas y el Cerro Pinto en la parte centro-oriental; el Cerro Pizarro es otra prominencia que domina toda la cuenca desde el NE (Riggs y Carrasco, 2004). Al sur de la cuenca, en el área de San Salvador El Seco, existe un conjunto de aparatos volcánicos que representan, con los anteriores, las topografías más elevadas que se observan en el interior de la cuenca.

Existen dos lagos intermitentes, uno en el centro de la cuenca con 2334 m, llamado El Carmen (Totolcingo) y otro conocido como El Salado (Tepeyahualco) a 2312 m.

Existen extensas coladas basálticas superpuestas, una forma un malpaís escalonado desde la enorme caldera de Los Humeros descendiendo hasta cortarse abruptamente en el llano, a los pies del Cerro Pizarro; otra es la que se observa a un costado de la carretera Zacatepec-San Salvador El Seco.

Durante el Cretácico se desarrollaron potentes depósitos marinos calcáreos en el área. Con los movimientos del intenso plegamiento que sufrió la corteza a principios del Terciario, los sedimentos marinos emergieron formando anticlinales que han sido erosionados y sinclinales que han sido rellenados, quedando tan sólo una pequeña parte de ellos (Reyes, 1979).

Estos sinclinales rellenados son el basamento de la Cuenca Oriental. Estos materiales de relleno, que en la actualidad han peneplanizado y dado configuración actual a la cuenca, son constituidos por rocas volcánicas de diferente composición, en forma de derrames lávicos y una enorme cantidad de sedimentos piroclásticos (Gasca, 1981).

La composición de las estructuras prominentes en el interior y las que delimitan la cuenca, hacen suponer que los sedimentos piroclásticos corresponden al material que componen estas prominencias. Gasca (1981) hace una breve descripción de los materiales que forman la cuenca, entre estos materiales se encuentran las riolitas que petrográficamente se definen como riolitas sódicas; las andesitas, principalmente fenocristales de olivino; las tobas, corresponden a todos los sedimentos piroclásticos de composición variable que peneplanizan

la cuenca, los cuales se encuentran en su mayoría en una etapa de intemperismo avanzado y los derrames y conos cineríticos basálticos, que petrográficamente se definen como basaltos de olivino, la sucesión de derrames sobrepuestos y el hecho de ser posteriores a la formación de la planicie, facilitó su movilización para cubrir un área muy extensa.

### **Hidrología Subterránea**

La mayoría de los acuíferos, explotados en el estado de Puebla, son de tipo libre y relativamente poco profundos; los niveles estáticos fluctúan entre 2 y 80 m (INEGI, 2010). El agua disponible se encuentra en su mayor parte en la Cuenca Oriental. En donde la mayoría de los escurrimientos pluviales se infiltran hacia el subsuelo, formando un manto acuífero extenso, el cual constituye un recurso de abastecimiento hídrico muy valioso (Alcocer *et al.*, 2005).

La relevancia de la Cuenca Oriental, como área almacenadora de agua subterránea, estriba en el hecho de que 40% de ésta presenta materiales consolidados de alta permeabilidad con posibilidades altas de presencia de recursos hídricos subterráneos. Dichos materiales se encuentran en toda el área baja de la cuenca (Alcocer *et al.*, 2005).

Gasca (1981) menciona que la constitución litológica de la planicie da como resultado una alta permeabilidad, por lo que su red hidrográfica no está desarrollada y sólo se encuentran cauces bien definidos en las faldas de los volcanes mayores. Existen algunas áreas impermeables donde se desarrollan zonas pantanosas y lagos efímeros en las temporadas de lluvia, pero llegan a desaparecer casi totalmente en las épocas de seca. También existen manantiales, como El Carmen y Estación Manantiales, y cuerpos de agua denominados lagos-cráter.

### **Clima**

La Cuenca Oriental tiene un clima árido con una evaporación anual entre 1690 mm y una precipitación menor a 500 mm (intervalo entre 1966 a 2002); una temperatura entre -5.5 a 30 °C con una media de 12.9 °C (Adame *et al.*, 2008).

Alcocer *et al.* (2007) clasifican la zona por climas, de acuerdo con la altitud, por lo que para este trabajo se consideró la parte más baja de la cuenca, comprendida entre las coordenadas 97° 10' y 97° 50' O y 19° 00'

y 19° 40' N. El clima semiárido (BS1) con base a Alcocer *et al.* (2007) se distribuye en la parte central de la cuenca, la cual tiene una altitud entre 2300 y 2400 m, corresponde a la parte mas baja de la cuenca. El clima templado subhúmedo con lluvias en verano (C (W1)) rodea por completo al BS1 en forma concéntrica. Ambos climas son los predominantes en la cuenca, no obstante, el C (W1) se ubica entre 2400 y 3000 m en la parte norte y entre 2300 y 2500 en las zonas este, oeste y sur.

### Muestreo de Agua en Pozos

El muestreo de agua se realizó en el mes de marzo de 2008. Se seleccionaron 25 pozos, considerando su ubicación y altitud en la cuenca, de tal manera que permitan obtener un resultado confiable sobre la composición química del agua en el acuífero, también, se consideraron estos pozos porque se ubican en áreas abiertas, actualmente, a la agricultura de riego. El muestreo

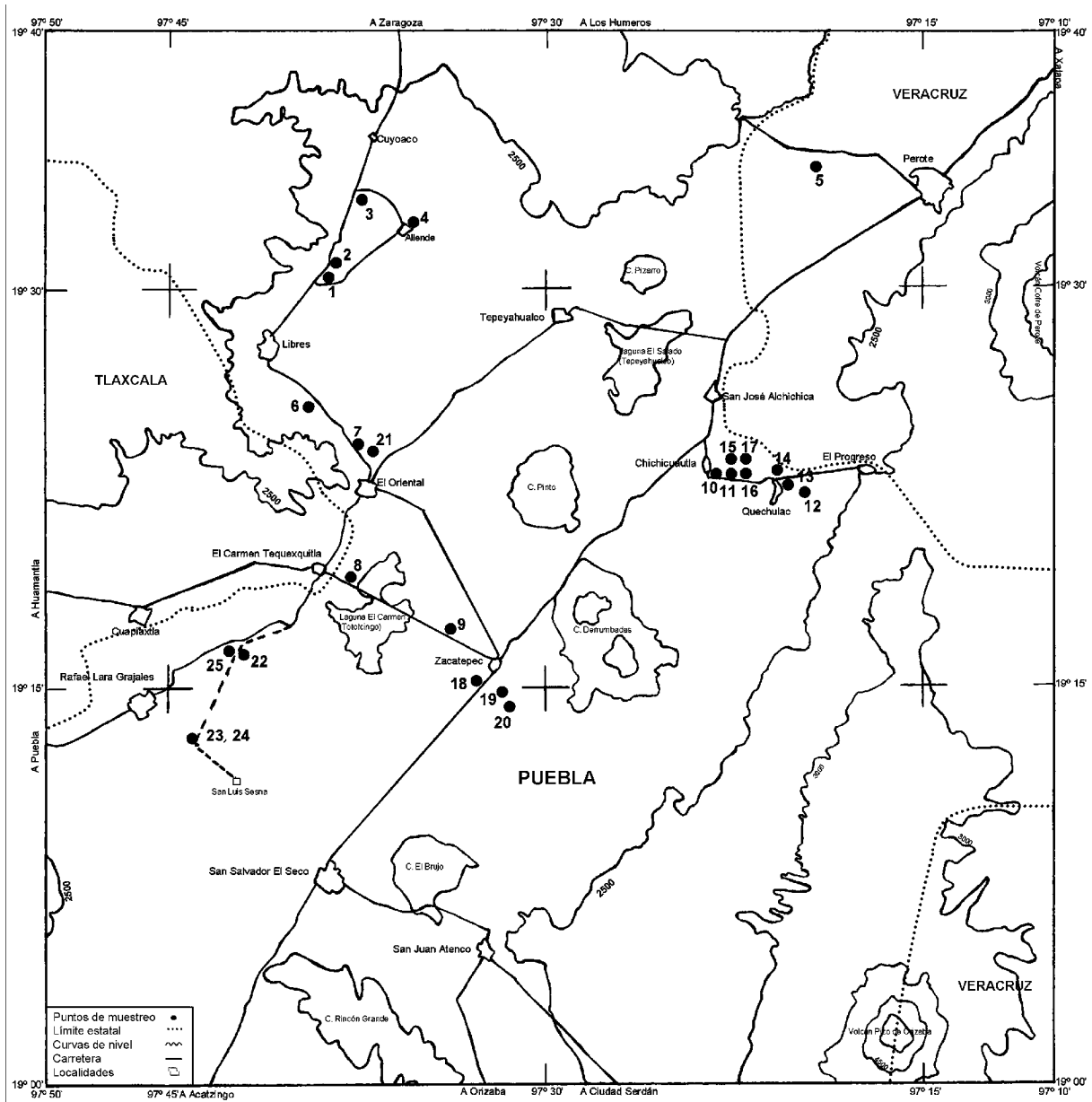


Figura 1. Ubicación de los pozos para el muestreo de agua en la cuenca Oriental de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

se realizó con base a la NOM-014-SSA1-1993. Se recolectaron tres muestras simples en cada pozo. Los pozos se ubicaron con un GPS Garmín MAP 60, mismo que se usó para establecer la altitud aproximada en metros de cada sitio (Figura 1). La altitud promedio de los sitios muestreados fue de 2364 m.

Para conocer la composición cuantitativa y cualitativa de las aguas, se realizaron determinaciones físicas y químicas a cada una de las muestras de agua (Cuadro 1).

Se verificó la exactitud de los valores analíticos usando el método de comprobación recomendado por Eaton *et al.* (1995), que se basa en el balance iónico entre aniones y cationes.

Para definir la calidad del agua, de acuerdo a su salinidad y contenido de sodio, se utilizó el diagrama propuesto por Richards (1990), que grafica los valores de la RAS con respecto a los valores de la CE, también se evaluó de acuerdo al índice CSR. La RAS utilizada fue la propuesta por Suárez (1981), debido a que en aguas con concentraciones elevadas de bicarbonatos, el calcio presenta grandes variaciones. Para evaluar la toxicidad del B se utilizaron las directrices propuestas por Ayers y Westcot (1987) y para predecir el efecto del agua al ser aplicada al suelo mediante el riego, se utilizó la gráfica de infiltración. Esta gráfica relaciona la salinidad (CE) y la RAS°. La ecuación propuesta por Suárez (1981) para calcular la RAS°:

$$RAS^{\circ} = \frac{C_{Na^{+}}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{0+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}} \quad (1)$$

donde:

Na = contenido de sodio en el agua de riego, mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>

Mg = contenido de magnesio en el agua de riego, mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>

Ca° = contenido corregido de calcio en el agua de riego, mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

El valor de Ca° es el contenido de calcio en el agua de riego, corregido por la salinidad del agua (CEa), por el contenido de iones bicarbonato en relación a su propio contenido de calcio (HCO<sub>3</sub>/Ca) y por la presión parcial del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ejercida en los primeros milímetros del suelo (presión = 0.0007 atmósferas). Cada uno de los valores de Ca° representa la concentración final del calcio que permanecería en solución en el suelo, como resultado de aplicar un agua de determinada salinidad (CE) y contenido relativo de bicarbonatos en relación al calcio (HCO<sub>3</sub>/Ca).

Ayers y Westcot (1987) también proponen la evaluación del índice de saturación (IS) para predecir el efecto de los iones bicarbonato sobre el calcio y por consiguiente su efecto en el suelo y los sistemas de riego. Este índice se calcula mediante la ecuación propuesta por Langelier (1936), llamado índice de saturación, indica la magnitud con que el agua fluye en un sistema cerrado, (sin pérdida de CO<sub>2</sub>) precipitando o diluyendo CaCO<sub>3</sub>. El IS es definido por el pH actual del agua (pHa) menos el pH teórico (pHc) que el agua alcanzaría estando en equilibrio con CaCO<sub>3</sub>:

Índice de saturación = pHa – pHc

Valores positivos de este índice indican que el CaCO<sub>3</sub> precipitará del agua, mientras que valores negativos indican que el agua disolverá CaCO<sub>3</sub>.

**Cuadro 1. Determinaciones físicas y químicas realizadas a las muestras de agua de la Cuenca Oriental de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.**

Determinación	Método	Referencia
pH	Potenciométrico	Eaton <i>et al.</i> , 1995
Conductividad eléctrica	Conductimetría	Richards, 1990
Residuo seco evaporado	Gravimetría	Eaton <i>et al.</i> , 1995
Calcio y magnesio	Volumetría	Richards, 1990
Sodio y potasio	Flamometría	Greenberg <i>et al.</i> , 1992
Carbonatos y bicarbonatos	Volumetría	Richards, 1990
Cloruros	Volumetría	Richards, 1990
Sulfatos	Turbidimetría	Eaton <i>et al.</i> , 1995
Boro	Colorimetría	Bingham, 1982

La ecuación de Langelier para el cálculo del pHc es:

$$\text{pHc} = (\text{pK}_2' - \text{pK}_c') + \text{p}(\text{Ca}) + \text{p}(\text{Alk}) \quad (2)$$

donde:

$\text{pK}_2'$  = es el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), corregido por la fuerza iónica de la solución.

$\text{pK}_c'$  = es el producto de solubilidad del  $\text{CaCO}_3$ , corregido por la fuerza iónica de la solución.

$\text{pCa}$  = corresponde al logaritmo negativo de la concentración molar de Ca.

$\text{p}(\text{Alk})$  = corresponde al logaritmo negativo de la concentración equivalente titulable de  $\text{CO}_3$  y  $\text{HCO}_3$ .

Para conocer el carácter químico dominante de las aguas, es decir, su composición y procedencia iónica, se clasificó hidrogeoquímicamente utilizando el diagrama de Piper (1944).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a la ecuación e intervalos propuestos por Eaton *et al.* (1995), para verificar la exactitud de los valores analíticos, la diferencia entre aniones y cationes es menor al 5%, porcentaje aceptable para los valores obtenidos. Los valores de pH medidos en las aguas de riego tienen una media de 8.7, de acuerdo con Ortega *et al.* (2002) estos valores tienen implicaciones importantes sobre la disponibilidad y manejo de nutrientes, ya que los valores normales de las aguas de riego oscilan entre 6.5-8.4 (Ayers y Westcot, 1987).

### Clasificación de las Aguas con Base en la CE y la RAS

Los valores de la CE y la RAS° de las aguas subterráneas se presentan en el Cuadro 2. Mediante el diagrama de clasificación propuesto por Richards (1990), las aguas de siete pozos se clasifican como C1-S1 (agua de baja salinidad, baja en sodio), ocho se ubican como C2-S1 (agua de salinidad media, baja en sodio), cuatro como C3-S1 (agua altamente salina, baja en sodio) y seis son C3-S2 (agua altamente salina, media en sodio).

De acuerdo a esta clasificación 10 pozos son los que deben condicionarse para su uso, debido a su alta salinidad y seis de estos, a su vez, debido a su contenido medio en sodio. Estas aguas no deben usarse en suelos

cuyo drenaje sea deficiente, sin embargo, pueden usarse en especies vegetales muy tolerantes a la salinidad, como la alfalfa que tolera hasta  $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ , la cebada  $8000 \mu\text{S cm}^{-1}$ , trigo  $4500 \mu\text{S cm}^{-1}$  y el pasto bermuda  $6900 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Con respecto al contenido medio en sodio sólo deben usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

### Clasificación de las Aguas con Base en el Contenido de Boro

El contenido de boro (B) en los suelos salinos y las concentraciones que se encuentran en algunas aguas de riego se determinan como parte de la evaluación por salinidad. Las aguas superficiales rara vez contienen niveles tóxicos de B, pero los nacimientos de agua y las aguas de pozo pueden contener concentraciones tóxicas, principalmente en las cercanías de fallas sísmicas y áreas geotérmicas. En el suelo se encuentra en minerales como la turmalina (Keren, 1996). Para evaluar este peligro, se usó la directriz propuesta por Ayers y Westcot (1987). Al clasificar, las aguas de 17 pozos no presentan restricción para su uso de acuerdo a su contenido de B, siete presentan reducción ligera a moderada y un pozo presenta reducción severa (Cuadro 3). Para usar las aguas de los últimos ocho pozos, deben seleccionarse cultivos tolerantes al contenido de B, como el apio, la avena, maíz, calabaza que toleran entre 2 a  $4 \text{ mg B L}^{-1}$ ; y el tomate, alfalfa, remolacha y sorgo que toleran entre  $4.0$  a  $6.0 \text{ mg B L}^{-1}$ .

El pozo número 5 es de alta concentración, al respecto, Lesser (1987) menciona que el B se encuentra en aguas que se encuentran en áreas de actividad volcánica reciente. Gméling *et al.* (2007) en un trabajo sobre las concentraciones de B en campos volcánicos, encontró valores similares al pozo 5 y las asocia a las rocas provenientes de zonas geotérmicas, entre estos minerales, el principal es el olivino. Se concluye que el alto contenido de B en el pozo 5 es debido al contacto del agua con minerales ricos en B, provenientes de la actividad volcánica reciente del campo geotérmico Los Humeros.

### Clasificación de las Aguas con Base en CSR

En aguas con concentraciones altas en bicarbonatos, el calcio y el magnesio tienden a precipitarse en forma de carbonatos a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Esta reacción no se completa

**Cuadro 2. Concentrado de datos analíticos y clasificación de acuerdo a la salinidad (CE) y contenido de sodio (RAS°) de las aguas de 25 pozos de la Cuenca Oriental de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.**

Fuente	Altitud	pH	CE	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>	RAS°	STD	Clasificación
	m		μS cm <sup>-1</sup>					mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>					mg L <sup>-1</sup>	CE-RAS°
1. Pozo Cosmaco (Riego por aspersión)	2375	8.7	221	0.42	0.52	1.14	0.10	0.08	1.46	0.42	0.16	1.40	152.64	C1-S1
2. Pozo 2 Ejido Buenavista (Riego por aspersión)	2373	8.6	214	0.38	0.42	1.23	0.08	0.06	1.12	0.50	0.38	1.52	147.81	C1-S1
3. Pozo Rancho San Alantín (Cañon viajero)	2407	9.1	235	0.46	0.56	1.18	0.12	0.09	1.50	0.55	0.22	1.43	162.31	C1-S1
4. Pozo Rancho Concepción de Allende (Riego por aspersión)	2378	9.0	249	0.48	0.58	1.30	0.10	0.10	1.56	0.50	0.24	1.57	171.98	C1-S1
5. Pozo Perote-Los Humeros CGM (Pivote central)	2380	8.5	1833	1.25	6.75	9.41	0.69	1.50	9.17	6.50	0.46	4.91	1266.05	C3-S2
6. Pozo Rancho San Juan (Pivote central)	2354	9.0	234	0.44	0.58	1.17	0.12	0.08	1.55	0.35	0.26	1.41	161.62	C1-S1
7. Pozo 2 Rancho San Juan (Pivote central)	2353	8.9	369	0.48	0.58	2.44	0.14	0.06	2.49	0.68	0.32	3.11	254.87	C2-S1
8. Manantial El Carmen	2352	9.1	566	0.58	0.68	4.10	0.23	0.10	3.30	1.72	0.30	4.99	390.94	C2-S1
9. Pozo en Laguna El Carmen (Riego por inundación)	2356	8.8	1420	1.40	1.78	10.60	0.24	0.60	6.10	3.35	3.58	9.35	980.79	C3-S2
10. Pozo Rancho La Amistad (Riego por aspersión)	2347	8.4	1623	2.48	4.04	9.23	0.28	0.90	9.51	3.15	2.05	5.90	1121.01	C3-S2
11. Pozo Rancho La Laguna (Pivote central)	2350	8.4	1452	2.10	3.45	8.61	0.18	0.62	7.91	3.10	2.24	5.87	1002.90	C3-S2
12. Pozo Quehulac (Riego por aspersión)	2374	9.0	190	0.20	0.28	1.19	0.20	0.04	1.25	0.35	0.18	1.91	131.23	C1-S1
13. Pozo Rancho Quechulac (Riego por aspersión-cañon)	2381	9.0	248	0.22	0.32	1.69	0.22	0.06	1.66	0.45	0.20	2.64	171.29	C1-S1
14. Pozo Rancho San Isidro Labrador (Riego por aspersión)	2362	9.1	312	0.28	0.41	2.27	0.12	0.07	1.84	0.85	0.21	3.33	215.50	C2-S1
15. Pozo Chichicuatla (Riego por aspersión)	2334	8.9	848	0.80	1.40	5.99	0.18	0.12	5.46	2.04	0.48	6.07	585.71	C3-S2
16. Pozo 2 Chichicuatla (Riego por aspersión)	2342	9.1	800	0.76	1.48	5.50	0.16	0.24	4.80	2.00	0.58	5.46	552.56	C3-S1
17. Pozo 4 Chichicuatla (Riego por aspersión)	2344	8.4	775	0.80	1.30	5.41	0.14	0.14	4.72	2.05	0.46	5.42	535.29	C3-S1
18. Pozo Rancho Los Julianes (Riego por inundación)	2373	7.8	1814	3.20	3.60	10.28	0.84	0.00	8.84	6.28	2.34	6.73	1252.93	C3-S2
19. Pozo 1 Rancho Los Julianes (Pivote central)	2381	8.1	661	1.12	1.92	3.17	0.32	0.00	3.85	1.35	1.12	2.64	456.55	C2-S1
20. Pozo 2 Rancho Los Julianes (Pivote central)	2393	8.2	956	2.25	2.96	4.13	0.10	0.00	6.02	2.84	0.30	2.89	660.31	C3-S1
21. Pozo Ex-Hacienda Rancho Virreyes (Pivote central)	2343	8.7	532	0.25	3.05	1.85	0.10	0.15	3.30	1.24	0.42	1.41	367.45	C2-S1
22. Manantial Estación Manantiales	2360	8.8	277	0.30	1.25	1.09	0.10	0.25	1.58	0.72	0.12	1.12	191.32	C2-S1
23. Pozo La Noria Ex-Hacienda San José Ozumba (Uso industrial)	2369	8.2	1007	1.52	5.31	2.34	0.78	0.00	6.68	2.54	0.47	1.34	695.53	C3-S1
24. Pozo El Viento Ex-Hacienda San José Ozumba (Riego por aspersión)	2369	8.2	714	1.12	3.45	2.00	0.48	0.00	4.09	2.36	0.40	1.36	493.16	C2-S1
25. Pozo Rancho Ojo de Agua (Cañon viajero)	2359	8.6	285	0.42	1.10	1.18	0.11	0.10	1.80	0.75	0.08	1.25	196.85	C2-S1

**Cuadro 3. Clasificación de las aguas con base al contenido de boro (B) y carbonato de sodio residual (CSR) de 25 pozos ubicados en la Cuenca Oriental de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.**

No.	B	Clasificación	CSR	Clasificación	No.	B	Clasificación	CSR	Clasificación
	mg L <sup>-1</sup>					mg L <sup>-1</sup>			
1	0.15	Ninguna	0.60	Buena	14	0.25	Ninguna	1.22	Buena
2	0.18	Ninguna	0.38	Buena	15	0.87	Ligera a moderada	3.38	No recomendable
3	0.14	Ninguna	0.57	Buena	16	0.96	Ligera a moderada	2.80	No recomendable
4	0.02	Ninguna	0.60	Buena	17	0.88	Ligera a moderada	2.76	No recomendable
5	4.57	Severa	2.67	No recomendable	18	1.22	Ligera a moderada	2.04	Condicionada
6	0.09	Ninguna	0.61	Buena	19	0.37	Ninguna	0.81	Buena
7	0.29	Ninguna	1.49	Condicionada	20	0.33	Ninguna	0.81	Buena
8	0.37	Ninguna	2.14	Condicionada	21	0.20	Ninguna	0.15	Buena
9	1.72	Ligera a moderada	3.52	No recomendable	22	0.07	Ninguna	0.28	Buena
10	1.93	Ligera a moderada	3.89	No recomendable	23	0.05	Ninguna	-0.15	Buena
11	0.93	Ligera a moderada	2.98	No recomendable	24	0.38	Ninguna	-0.48	Buena
12	0.03	Ninguna	0.81	Buena	25	0.58	Ninguna	0.38	Buena
13	0.08	Ninguna	1.18	Buena					

totalmente en circunstancias ordinarias, pero a medida que tiene lugar, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo, aumentando así la proporción relativa de sodio. Eaton (1950) propone el CSR para evaluar esta reacción. Cuando en el agua de riego, el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el contenido de calcio y magnesio, como las obtenidas en este trabajo (Cuadro 2), existe la posibilidad que se forme el carbonato de sodio, debido a que, por su alta solubilidad, puede permanecer en solución aún después de que han precipitado las primeras sales en forma de carbonatos de calcio y magnesio.

Las aguas de 15 pozos se clasificaron como buenas para uso agrícola, pero solo dos de ellos con valores negativos y 13 con valor positivo, tres como condicionadas con valores positivos y siete condicionadas con valor positivo no recomendables para el riego (Cuadro 3). El carbonato de sodio provoca la defloculación del suelo. Los valores de CSR negativos indican que no existe el problema, y los valores positivos indican que calcio y magnesio precipitan al suelo como carbonatos, existiendo sólo sales de sodio en solución.

### **Clasificación de las Aguas con Base en el Peligro de Infiltración**

Un problema de infiltración se hace evidente, cuando el agua de riego no atraviesa la superficie del suelo

a una velocidad lo suficientemente rápida, como para permitir la renovación del agua consumida por el cultivo entre dos riegos. Cuando la reducción de la infiltración se debe a la calidad del agua aplicada, el problema ocurre por lo general, en los primeros centímetros del suelo, aunque ocasionalmente, puede ocurrir, a mayores profundidades. Además de la calidad del agua, la infiltración es determinada por las características físicas y químicas del suelo. Mediante la evapotranspiración, las sales menos solubles precipitan al concentrarse, quedando en predominio una fracción de las más solubles. Esta, es la causa que da lugar al predominio de los iones más solubles, como el sodio, en la primera capa del suelo. La infiltración, en general, aumenta con la salinidad y disminuye con una reducción en salinidad, o un aumento en el contenido de sodio en relación al calcio y magnesio (RAS) (Ayers y Westcot, 1987; McNeal, 1968; Pupisky y Shainberg, 1979). El problema principal en la superficie de los suelos es la dispersión y destrucción de la estructura (Oster y Schoer, 1979 y Oster, 1994).

Los resultados, obtenidos al graficar indican que las aguas de cinco pozos no presentan reducción en la infiltración, 18 presentan reducción ligera a moderada y dos presentan reducción severa sobre la infiltración (Cuadro 4). Este problema debe tomarse en cuenta, principalmente, en las áreas con suelos de origen lacustre, que es donde el problema es más grave por la baja permeabilidad.

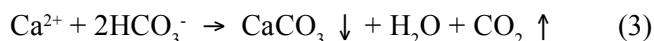


**Cuadro 4. Clasificación de las aguas en base al peligro de infiltración y al índice de saturación (IS) de 25 pozos ubicados en la Cuenca Oriental de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.**

No.	Problema de infiltración	IS	Clasificación	No.	Problema de infiltración	IS	Clasificación
1	Ligera a moderada	0.00	Precipita	14	Ligera a moderada	0.40	Precipita
2	Ligera a moderada	-0.20	Solubiliza	15	Ligera a moderada	1.00	Precipita
3	Ligera a moderada	0.50	Precipita	16	Ligera a moderada	1.10	Precipita
4	Ligera a moderada	0.40	Precipita	17	Ligera a moderada	0.40	Precipita
5	Ligera a moderada	1.00	Precipita	18	Sin reducción	0.60	Precipita
6	Ligera a moderada	0.30	Precipita	19	Ligera a moderada	0.20	Precipita
7	Ligera a moderada	0.50	Precipita	20	Sin reducción	0.80	Precipita
8	Ligera a moderada	0.80	Precipita	21	Ligera a moderada	0.10	Precipita
9	Ligera a moderada	1.30	Precipita	22	Ligera a moderada	0.10	Precipita
10	Sin reducción	1.20	Precipita	23	Sin reducción	0.60	Precipita
11	Sin reducción	1.00	Precipita	24	Ligera a moderada	0.30	Precipita
12	Reducción severa	0.00	Precipita	25	Ligera a moderada	0.00	Precipita
13	Reducción severa	0.00	Precipita				

### Clasificación de las Aguas con Base en el Índice de Saturación

Cuando las aguas contienen concentraciones apreciables de bicarbonatos y se emplean en la irrigación, una fracción variable de estos constituyentes precipita en el suelo como  $\text{CaCO}_3$  de acuerdo a la ecuación:



Esta precipitación causa una disminución en la salinidad del suelo pero causa un incremento en la proporción de sodio en la solución del suelo, y, en consecuencia sobre el complejo de intercambio (Bower y Wilcox, 1965). Sin embargo, la magnitud de la precipitación del bicarbonato de las aguas de riego es gobernado de una manera compleja por las prácticas de manejo del agua y las condiciones del suelo, así como por la composición del agua (Bower *et al.*, 1965).

En los últimos años, en la Cuenca Oriental, se han introducido sistemas de riego localizado, entre estas el pivote central, estos sistemas de riego por aspersión, son los más recomendables para las condiciones del suelo en la cuenca. El problema en los equipos es la precipitación de sustancias químicas. Ayers y Westcot (1987) dicen que las obstrucciones provocadas por las precipitaciones químicas de materiales como el carbonato de calcio y sulfato de calcio se producen gradualmente. Las altas temperaturas y los valores altos de pH favorecen la precipitación química, la cual se origina por exceso de carbonatos o sulfatos de calcio o magnesio.

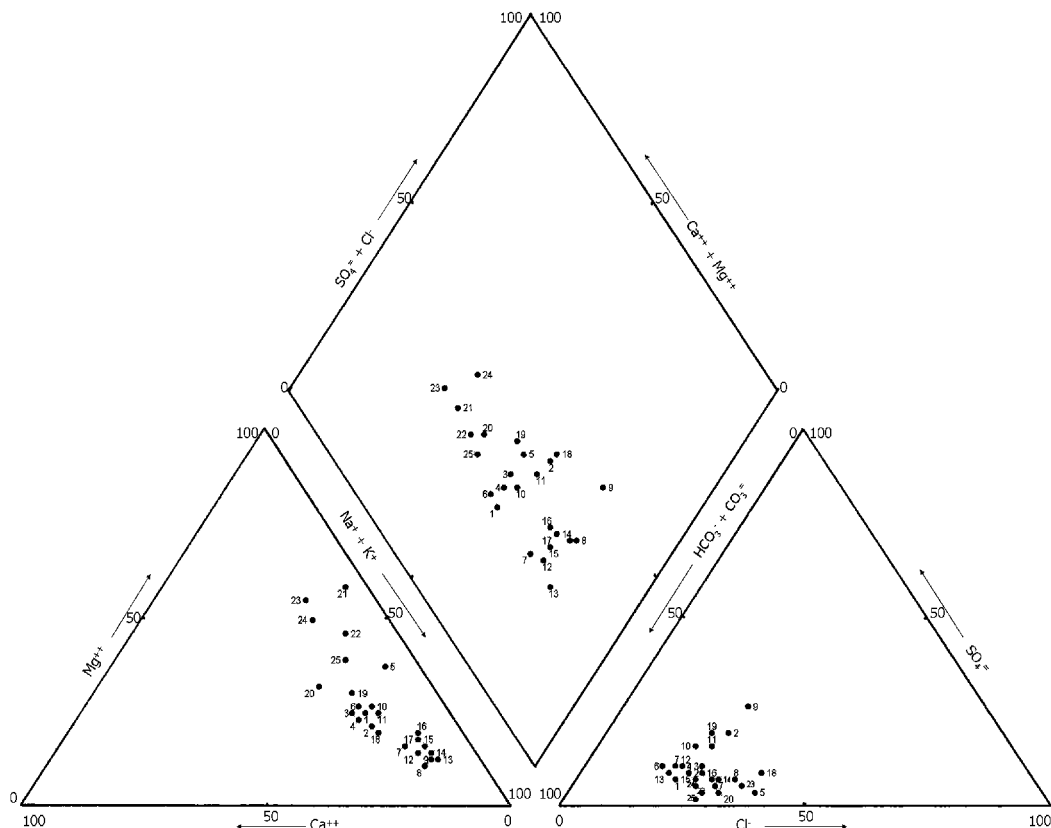
La precipitación del calcio en el agua, puede ser evaluada mediante el índice de Langelier (Bower *et al.*, 1965; Bower y Wilcox, 1965), según el cual, el carbonato de calcio precipita cuando alcanza su límite de saturación en presencia de bicarbonato.

Los resultados obtenidos indican que las aguas de 24 pozos precipitarán  $\text{CaCO}_3$ , y solo las aguas de un pozo solubilizarán  $\text{CaCO}_3$ , esto se debe principalmente al elevado pH y a la alta concentración de bicarbonatos (Cuadro 4).

### Clasificación Hidrogeoquímica

Esta clasificación indica que las aguas analizadas forman tres facies, un primer grupo formado por 19 pozos, corresponden a aguas de tipo sódico bicarbonatadas; un segundo, compuesto por cuatro pozos, como no dominantes bicarbonatadas, y un tercero, con dos pozos, magnésico bicarbonatadas (Figura 2).

El agua del acuífero, de la Cuenca Oriental, es de baja concentración iónica y de composición sódico bicarbonatada. En los estratos de mezcla de agua, la concentración iónica es mucho mayor y de facies sódico bicarbonatadas, y en las zonas de recarga de carácter no dominante-magnésico bicarbonatadas. Las recargas mas notables provienen del volcán La Malinche, los principales nacimientos son El Carmen y Estación Manantiales, los estratos de mezcla se ven en La Noria y pozo poco profundo de la Hacienda San José Ozumba, donde las aguas son de tipo magnésicas y no dominante bicarbonatadas. La mayor concentración iónica se tiene



**Figura 2.** Clasificación hidrogeoquímica, mediante el diagrama de Piper (1944), de las aguas subterráneas de la Cuenca Oriental de los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

en los pozos 5, 9, 10, 11, 18 y 23 y claramente se nota que pertenecen a aguas freáticas, como el caso de la noria con número 23 y los pozos someros 9, 18, 10 y 11.

El carácter químico dominante del agua es el reflejo de los materiales con los que tiene contacto, así, los pozos explotados en los alrededores de los lagos salinos y de poca profundidad presentan una mayor concentración iónica, debido a que son aguas freáticas en constante intercambio iónico con los materiales del estrato lacustre. Los pozos de mayor profundidad, que explotan las aguas del acuífero, son de baja concentración y composición iónica más estable, sódico bicarbonatadas. Resultados como estos fueron encontrados en la ciénega de Chapala por Silva *et al.* (2005) y en la porción centro-oriental del Valle del Mezquital por Del Arenal (1985).

Los procesos geológicos que dieron origen a esta cuenca, convirtiéndola en una cuenca endorreica, corresponden al Plio-Pleistoceno (Díaz, 1988). Al cerrarse la cuenca, el agua subterránea quedó confinada, y al mismo tiempo los fenómenos volcánicos fueron rellenando la cuenca con material volcánico.

El agua confinada, de un carácter químico diferente al actual, al contacto con los materiales volcánicos fue adquiriendo, con el paso del tiempo, las características químicas del material. Los materiales en contacto con el agua subterránea son de tipo volcánico, ricos en sodio, catión que domina en la actualidad en las aguas, el anión predominante es el bicarbonato. La predominancia del bicarbonato se ha mantenido desde el periodo de formación de la cuenca hasta la actualidad, las pequeñas variaciones en su concentración, al igual que el sodio, son únicamente producto del intercambio iónico al contacto con los materiales volcánicos. Ortega *et al.* (2002) asocian el carácter sódico, a la disolución del mineral feldespático llamado albita.

Al convertirse en una cuenca endorreica en el Plio-Pleistoceno y siendo una zona de gran actividad volcánica durante el Pleistoceno, los constantes aportes de materiales piroclásticos, así como las últimas glaciaciones, dieron origen a un gran lago pleistocénico (Álvarez, 1949) que en la actualidad ha quedado dividido en dos pequeños lagos intermitentes, el lago

de Totolcingo y el Lago de Tepeyahualco; estos lagos se conservan en las partes más bajas, donde el material sedimentado se concentró y dio una alta impermeabilidad.

### CONCLUSIONES

- La composición y concentración iónica de las aguas subterráneas en la Cuenca Oriental es definida por los materiales de origen volcánico con los que tiene contacto. Las principales rocas volcánicas son las andesitas, los basaltos y las riolitas. Entre estos predominan las riolitas sódicas, los fenocristales de olivino y los sedimentos piroclásticos, que en su mayoría se definen como tobas.
- Las aguas subterráneas, presentan variaciones, en concentración iónica, a través de la profundidad. Las aguas someras presentan altas concentraciones iónicas, tienen un contenido medio de 865.31 mg L<sup>-1</sup>, mientras que las más profundas presentan una baja concentración, contenido medio de 244.37 mg L<sup>-1</sup>.
- En las aguas de las capas freáticas los cationes predominantes son el sodio y el magnesio, con un contenido medio de 7.15 mmol<sub>c</sub> Na<sup>+</sup> L<sup>-1</sup> y 3.21 mmol<sub>c</sub> Mg<sup>2+</sup> L<sup>-1</sup>, con respecto a los aniones el ión predominante es el bicarbonato, con 6.92 mmol<sub>c</sub> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>. Esta concentración se debe a la interacción de las aguas de recarga con los diversos materiales de relleno que componen los estratos superficiales.
- Las aguas profundas presentan una concentración iónica rica en sodio y bicarbonatos, con un contenido medio de 1.80 mmol<sub>c</sub> Na<sup>+</sup> L<sup>-1</sup> y 2.16 mmol<sub>c</sub> HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>. Son aguas que permanecen desde los periodos de modificación orogénica, y que han tomado el carácter químico de las rocas de composición volcánica y de baja solubilidad con las que interactúan.
- Las aguas son sódico bicarbonatadas y al respecto, la consideración de la calidad del agua para uso en la agricultura debe tomarse en cuenta.
- El problema principal es la precipitación del CaCO<sub>3</sub> en los sistemas de riego y en el suelo, debido a la alta concentración de iones bicarbonato y a los valores elevados de pH, media de 8.7. Los valores altos de pH afectan a algunos elementos químicos que se aplican mediante fertilizantes, precipitándolos en algunos casos y reduciendo su disponibilidad para los cultivos en otros. El problema en los suelos se presenta en los primeros centímetros de la superficie, al precipitar el Ca y el Mg como carbonatos en la solución, el sodio es el que predomina por su alta solubilidad.

### LITERATURA CITADA

- Adame, M. F., J. Alcocer and E. Escobar. 2008. Size-fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. *Freshwater Biol.* 53: 22-31.
- Alcocer D., J., Ó. A. Escolero F. y L. E. Marín S. 2005. Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. pp. 57-77. *In*: B. Jiménez y L. Marín (eds.). El agua en México vista desde la academia. Academia Mexicana de Ciencias. México, D. F.
- Alcocer, J., A. Lugo, L. A. Oseguera y L. Peralta. 2007. Laguna de Totolcingo, Puebla y Tlaxcala. pp. 186-198. *In*: G. De la Lanza E. (ed). Las aguas interiores de México: Conceptos y casos. AGT. México, D. F.
- Álvarez, J. 1949. Correlación entre la distribución ictiofaunística y los cambios geomorfológicos. *Boletín Soc. Geológ. Mex.* 14: 39-45.
- Arredondo-Figueroa, J. L. 2002. Los axalapascos de la Cuenca Oriental, Puebla. pp. 81-107. *In*: G. De la Lanza E. y J. L. García C. (compiladores). Lagos y presas de México. AGT. México, D. F.
- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. 1987. La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29. Rev. 1. FAO. Roma, Italia.
- Bingham, F. T. 1982. Boron. pp. 435-436. *In*: A. L. Page (ed.). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9 ASA, SSSA. Madison, WI, USA.
- Bower, C. A. and L. V. Wilcox. 1965. Precipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29: 93-94.
- Bower, C. A., L. V. Wilcox, G. W. Akin, and M. G. Keyes. 1965. An index of the tendency of CaCO<sub>3</sub> to precipitate from irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29: 91-92.
- Can-Chulim, Á., C. Ramírez-Ayala, M. Ortega-Escobar, C. Trejo-López y J. Cruz-Díaz. 2008. Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del río Tulancingo, estado de Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana* 26: 243-252.
- Del Arenal-Capetillo, R. 1985. Estudio hidrogeoquímico de la porción centro-oriental del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Rev. Mex. Cienc. Geológ.* 6: 86-87.
- Díaz-Castellón, R., G. Carrasco-Núñez y A. Álvarez-Manilla-Aceves. 2008. Mechanical instability quantification of slopes at Cofre de Perote volcano, Eastern México. *Boletín Soc. Geológ. Mex.* 60: 187-201.
- Díaz-Pardo, E. 1998. Estudio filogenético y taxonómico en especies endémicas del género *Poblana* De Buen (Pisces: Atherinidae). Informe técnico final. H284. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento de Zoología, IPN. México, D. F.
- Eaton, A. D. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. Washington, DC, USA.
- Eaton, F. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Sci.* 69: 123-133.
- Gasca-Durán, A. 1981. Algunas notas de la génesis de los lagos-cráter de la Cuenca de Oriental, Puebla-Tlaxcala-Veracruz. INAH, Colección Científica, Prehistoria, 98. México, D. F.
- Gmélíng, K., K. Németh, U. Martin, N. Eby, and Z. Varga. 2007. Boron concentrations of volcanic fields in different geotectonic settings. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159: 70-84.

- Greenberg, A. E. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th edition. APHA, AWWA, WEF. Washington, DC, USA.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2010. Regiones y cuencas hidrológicas. <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/pue/rh.cfm?c=444&e=16> (Consulta: enero 10, 2010).
- Keren, R. 1996. Boron. pp. 603-607. In: D. L. Sparks (ed.). Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA Book Series 5. Madison, WI, USA.
- Langelier, W. F. 1936. The analytical control of anticorrosion water treatment. J. Am. Water Works Assoc. 28: 1500-1521.
- Lesser I., J. M. 1987. Geohidrología. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.
- Macías, J. L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana 57 (3): 379-424.
- McNeal, B. L. 1968. Prediction of the effect of mixed-salt solutions on soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 32: 190-193.
- NOM-O14-SSA1. 1993. Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. México, D. F.
- Ortega-Guerrero, M. A., J. Z. Castellanos, R. Aguilar G., A. Vázquez-Alarcón, E. Alaniz R., C. Vargas C., and F. Urrutia E. 2002. A conceptual model for increases of sodium, SAR, alkalinity and pH at the independence aquifer in Guanajuato. Terra 20: 199-207.
- Oster, J. D. 1994. Irrigation with poor quality water. Agric. Water Manag. 25: 271-297.
- Oster, J. D. and F. W. Schroer. 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 444-447.
- Piper, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis. Am. Geophys. Union Trans. 25: 914-923.
- Pupisky, H. and I. Shainberg. 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity on the sandy soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 429-433.
- Reyes-Cortés, M. 1979. Geología de la Cuenca de Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. SEP-INAH, Colección Científica, Prehistoria. México, D. F.
- Richards, L. A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos: Manual No. 60. Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América. Limusa. México, D. F.
- Riggs, N. and G. Carrasco-Núñez. 2004. Evolution of a complex isolated dome system, Cerro Pizarro, central México. Bull. Volc. 66: 322-335.
- Silva-García, J. T., S. Ochoa-Estrada, D. Cristóbal-Acevedo y F. Estrada-Godoy. 2005. Calidad química del agua subterránea de la ciénega de Chapala como factor de degradación del suelo. Terra Latinoamericana 24: 503-513.
- Suárez, D. L. 1981. Relation between pH and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 464-475.
- Velázquez-Machuca, M. A., M. Ortega-Escobar, A. Martínez-Garza., J. Kohashi-Shibata y N. García-Calderón. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Terra 20: 459-464.
- Yarza de-De la Torre, E. 2003. Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. Investigaciones geográficas. Boletín del Ins. Geog. 50: 220-234.