

# Calidad de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, Estados de Tlaxcala y Puebla, México

D.V. Carrera, C. Ramirez, H.M. Ortega, C. Trejo & A.E. Becerril

*Colegio de Postgraduados, Programa de Hidrociencias, campus Montecillo km 36.5 carretera México-Texcoco, C.P. 56230, Edo de México, México. (villacrés@colpos.mx).*

**RESUMEN:** Las aguas de riego urbano-industriales que se generan en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, localizado en los Estados de Tlaxcala y Puebla se utilizan para satisfacer las necesidades de riego en las áreas agrícolas de este sistema. Estas aguas en sus orígenes derivan de escurrimientos de las sierras de Tlaxco y de Calpulalpan. En la localidad de Panzacola, Tlax., confluyen los cauces de estos ríos para después seguir su cauce con el nombre de río Atoyac. El río Atoyac se embalsa en la presa Manuel Ávila Camacho. Durante su trayecto los ríos Zahuapan y Atoyac reciben afluentes de numerosas poblaciones de los valles de Tlaxcala y Puebla. Se tomaron muestras de agua en 41 estaciones de muestreo en el invierno de 2006 y 49 en primavera de 2007. Se determinaron quince mediciones en cada muestra de agua: Cationes y aniones, el pH, la conductividad eléctrica (CE)  $\text{dS m}^{-1}$ , residuo seco evaporado y calcinado (RSE y RSC), presión osmótica (PO), fosfatos y boro. Con la finalidad de tener estimadores, sobre el efecto de estas aguas sobre las propiedades físicas de los suelos, se calcularon los diferentes RAS en sus distintas modificaciones: RAS,  $\text{RAS}_{aj}$  y  $\text{RAS}^o$ . Los resultados que se obtuvieron fueron: 1. Conductividad eléctrica en los orígenes de estas aguas  $150\text{-}400 \mu\text{S cm}^{-1}$ , y cuando estas aguas reciben afluentes urbano-industriales sus valores son  $500\text{-}2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ , 2. Composición iónica,  $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-\text{-HCO}_3^-$ ; la concentración de bicarbonatos fue de  $1.12\text{-}8.90 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$ . Las concentraciones de bicarbonatos son por lo general  $> 50\%$  con respecto a la suma de aniones. 3. Los valores de pH son de  $6.0\text{-}8.45$

## INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales de la red hidrográfica Zahuapan-Atoyac, riegan los valles de Zacatelco-Tlaxcala y parcialmente el valle de Tepeaca-Tehuacan. El volumen aproximando que se embalsa en la presa Manuel Ávila Camacho es de  $228 \text{ Mm}^3$ . La presencia de iones de sodio en las aguas de riego conducen a que de manera paulatina el sodio aumente en la solución del suelo y se tengan cambios en las relaciones catiónicas de los sitios de intercambio del complejo de intercambio catiónico. Un conjunto de estudios se han llevado a cabo sobre los procesos de intercambio catiónico  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ , en condiciones de equilibrio químico y estos se han explicado en términos termodinámicos, aplicando la ley de acción de masas, utilizando la teoría estadística termodinámica y la teoría de la doble capa eléctrica. Las ecuaciones que se han derivado de estas aproximaciones, se han aplicado para describir la relación entre los cationes solubles en la solución de los suelos y aquellos cationes que se encuentran adsorbidos en la fase sólida de los suelos. La ecuación de Gapon (ver la Ecuación 1) que ha sido utilizada ampliamente en las aplicaciones prácticas en el manejo de las aguas y suelos salinos ha mostrado resultados bastante satisfactorios (Endo *et al.*, 2002).

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

En muchos trabajos de investigación se ha encontrado de manera experimental que La Relación de Adsorción de Sodio (RAS) de las aguas de riego esta altamente correlacionada con el

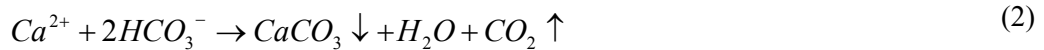
porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en los sitios de intercambio cuando el suelo esta en equilibrio con el agua de riego (Parker and Suarez, 1990).

Debido a que las concentraciones de los iones de calcio  $C_{Ca^{2+}}$  varían sensiblemente como consecuencia de los procesos de precipitación o de disolución, las formulaciones de la relación de adsorción de sodio que se utilizan con más frecuencia en el manejo de aguas y suelos salinos son: RAS,  $RAS_{aj}$ ,  $RAS^o$ . En este trabajo para evaluar la calidad del agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, se utilizaron estos tres estimadores. Las aguas urbano-industriales, por lo general, contienen cantidades elevadas de fósforo P- $PO_4$  que modifican considerablemente los niveles de eutrofización de estas aguas.

Por otra parte, como en los valles de Zacatelco-Tlaxcala y de Tepeaca-Tehuacan se cultivan suficientes áreas de hortalizas, también para este efecto, se determinaron las concentraciones de boro.

### **Aspectos teóricos**

Cuando las aguas de riego, sobre todo, las aguas urbano-industriales contienen concentraciones apreciables de iones bicarbonato ( $HCO_3^-$ ), es de preverse que algunas cantidades de iones bicarbonato se precipiten conjuntamente con los iones de calcio ( $Ca^{2+}$ ) en forma de carbonato de calcio  $CaCO_3$ , de acuerdo con la Ecuación 2:



Este proceso de precipitación, en principio, causa una disminución de las sales solubles en las soluciones salinas, a su vez, al mismo instante se aumenta la proporción de los iones de sodio en las soluciones de los suelos y por consiguiente en el complejo de intercambio catiónico.

Para considerar la precipitación o la disolución del carbonato de calcio  $CaCO_3$  en condiciones de  $CO_2$  constantes; Langelier proporciona el parámetro Índice de Saturación. El Índice de Saturación se define como el pH actual (medido) del agua (pHa) menos el pH teórico (pHc) que el agua debería tener en condiciones de equilibrio con el carbonato de calcio  $CaCO_3$ .

$$\text{Índice de Saturación} = pHa - pHc$$

Valores positivos de este índice indican que el  $CaCO_3$  se precipitará de la solución, mientras que valores negativos de este índice indicarán que el agua disolverá fracciones de  $CaCO_3$ . Para calcular el pHc a partir de los análisis del agua se utiliza la ecuación de Langelier (ver la Ecuación 3).

$$pHc = (pK_2' - pK_c') + pCa + pAlk \quad (3)$$

Los últimos dos términos de esta ecuación son el logaritmo negativo de la concentración molar del calcio y de la concentración equivalente de las bases titulables de ( $CO_3^{2-} + HCO_3^-$ ), respectivamente, mientras que  $pK_2'$  y  $pK_c'$  son el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del  $H_2CO_3$  y la constante de solubilidad del  $CaCO_3$  respectivamente, ambas constante corregidas por fuerza iónica. Los valores que se puede adquirir de pHc de cualquier conjunto de aguas de riego serán los estimadores de la tendencia de la precipitación del  $CaCO_3$ . El  $RAS_{aj}$  se presenta en la Ecuación 4:

$$RAS_{aj} = RAS[1 + (8.4 - pHc)] \quad (4)$$

En el  $RAS^o$  (corregido) las concentraciones de los iones de calcio en el agua de riego que se encuentra en equilibrio con el suelo, se tomaron en cuenta los efectos del dióxido de carbono  $CO_2$  y las concentraciones de los bicarbonatos  $HCO_3^-$ . Se considera que la concentración parcial del  $CO_2$  es de 0.0007 atmósferas. El  $RAS^o$  (corregido) puede utilizarse para predecir mejor los problemas de infiltración en ciertas condiciones de aguas de riego que tienen concentraciones relativamente altas de sodio y bajas cantidades de calcio (Velázquez *et al.*, 2002).

El RAS (original) que se calcula sin tomar en cuenta la precipitación de los iones de calcio en presencia de cantidades considerables de iones bicarbonato, se determina de acuerdo con la Ecuación 5, que es la de Gapon (Sposito and Mattigod, 1997): las concentraciones están expresadas en  $mmol_c L^{-1}$ .

Un especialista en manejo de aguas y suelos salinos debe calcular estos tres estimadores del RAS en sus diferentes modificaciones, para visualizar que fracciones de sodio intercambiable XNa se van a tener en el complejo de intercambio catiónico en los suelos.

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (5)$$

El objetivo del presente trabajo se relaciona con la caracterización físico-química de las aguas de los cauces de los ríos Zahuapan y Atoyac. Establecer la distribución de iones en todas las estaciones de muestreo en dos periodos: invierno del 2006 y primavera del 2007. En las clasificaciones más recientes sobre la calidad del agua de riego se deben tomar en cuenta las concentraciones de bicarbonato, sobre todo si estas son mayores de 50% con respecto al total de aniones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En cada estación de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac se tomaron por duplicado muestras de agua con un volumen de 0.5 L. El envase de recolección de la muestra de agua se enjuagó varias veces con el agua sujeta a muestreo. Los diferentes iones se determinaron analíticamente utilizando los métodos de APHA (1989): pH, CE,  $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ,  $Na^+ + K^+$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$  y  $SO_4^{2-}$ , RSE y RSC, (métodos 4500-H<sup>+</sup>B, 2510 B, 3500 Ca D, 3500 Na K D, 2320 B, 4500 Ci B, 4500-SO<sub>4</sub> B, 2540 D y 2540 E). Para determinar la concentración de boro se utilizó el método de la azometina-H<sup>+</sup> (Keren, 1996), la determinación de fosfatos se llevó a cabo de acuerdo con (Kuo, 1996). La determinación de la presión osmótica se hizo con el equipo VAPRO 5520. En la Figura 1 se presenta la zona de estudio.

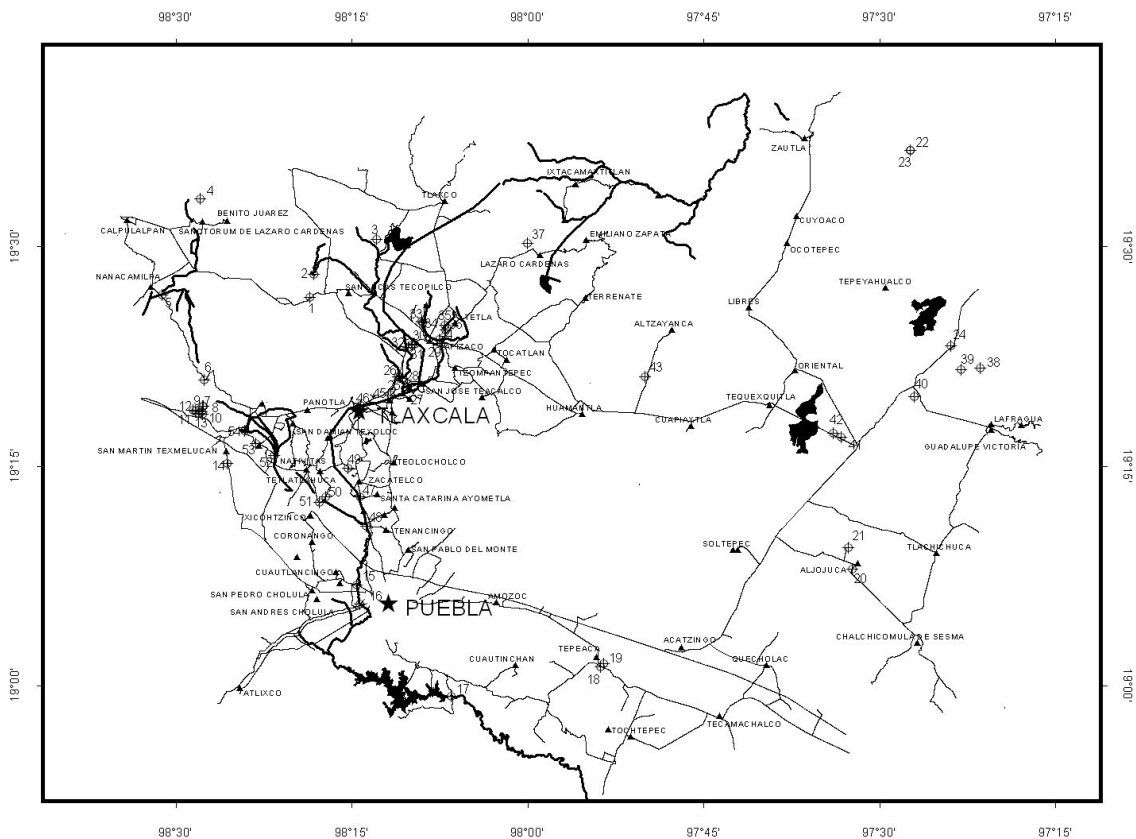


Figura 1. Localización de las estaciones de muestreo de aguas urbano-industriales del sistema hidrográfico, Zahuapan-Atoyac, estados de Tlaxcala y Puebla.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *La relación total de sales solubles ( $\text{mg L}^{-1}$ )-conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) y su significado*

La calidad del agua de riego está predeterminada por la concentración y la composición de los iones constituyentes que se encuentran disueltos en esta agua. Es por este motivo que la determinación analítica de las diferentes relaciones iónicas que se tienen en las aguas de riego en sus diferentes cauces, es de gran importancia para comprender los procesos de salinización y sodificación en los suelos. Los contenidos de sales en las aguas de manantiales, de escurrimientos superficiales y de yacimientos subterráneos son diferentes. La concentración total de sales solubles en las aguas de riego con fines de diagnóstico y de clasificación, se puede expresar en términos de conductividad eléctrica. En la Figura 2 se presenta la relación que se obtuvo al graficar las sales solubles totales  $\text{mg L}^{-1}$  y la conductividad eléctrica  $\text{dS m}^{-1}$ .

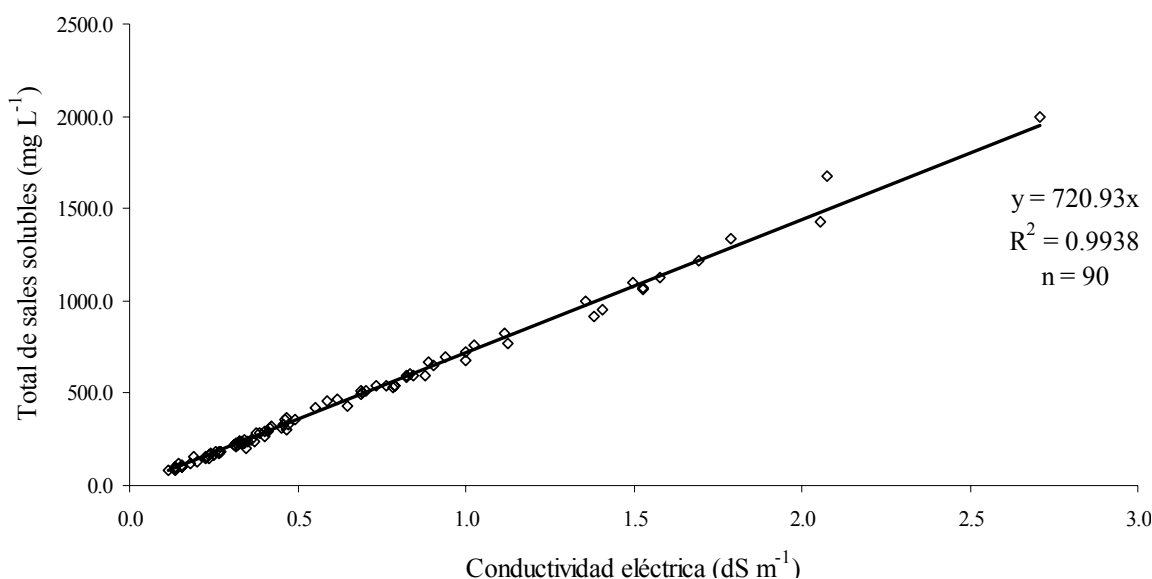


Figura 2. Relación entre la conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) y la concentración de sales ( $\text{mg L}^{-1}$ ), de todas las estaciones de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, estados de Tlaxcala y Puebla.

La relación funcional total de sales solubles (TSS,  $\text{mg L}^{-1}$ )-conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ).

$\text{TSS} (\text{mg L}^{-1}) = f a (\text{dS m}^{-1})$  expresa una relación de proporcionalidad, es decir, que si se aumentan las cantidades de sales solubles, también se aumentan los valores de la conductividad eléctrica. Esto ocurre así, debido a que la solubilidad de los cationes y los aniones de las sales solubles ocurre en forma equivalente. La suma de cationes  $\sum \text{cat}$  es igual a la suma de aniones  $\sum \text{aniones}$ , es decir  $\sum \text{cat} = \sum \text{aniones}$ . Los valores que puede adquirir el coeficiente (a) dependerá de los tipos de sales solubles disueltos en las soluciones. El valor de (a) para todas las muestras de aguas de todas las estaciones de muestreo de los periodos estacionales de estudio fue de 720.93. El valor de (a) depende de la composición cualitativa de las soluciones, por ejemplo para composiciones bicarbonatadas el valor de (a) es de 700-850. En la composición iónica de esta agua predominan los bicarbonatos  $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$ . En cambio cuando las relaciones iónicas  $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-} < 1.0$ , las aguas de riego son de composición clorhídrica y en el caso de composiciones sulfáticas las relaciones iónicas son las siguientes:  $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-} < 1.0$  y  $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}) > 1.0$ . En estos casos el valor del coeficiente (a) adquiere valores de 900 - 1300. Las concentraciones de las aguas urbano-industriales del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, en su mayoría son de 0.100 - 0.500  $\text{dS m}^{-1}$ , para las aguas de origen inicial o de origen de manantial y de concentraciones de 0.500 - 1.000  $\text{dS m}^{-1}$  para aguas de cauces hacia donde afluyen corrientes urbano-industriales.

### ***La presión osmótica. Una propiedad coligativa de las soluciones salinas***

En la Figura 3 se presenta la relación presión osmótica (PO)-conductividad eléctrica (CE) de las soluciones que circulan en los suelos. Esto es importante, ya que la tolerancia de los cultivos a las condiciones de salinidad se hace en base a la conductividad eléctrica y presión osmótica o potenciales osmóticos (Sánchez *et al.*, 2003). La presión osmótica es una de las propiedades coligativas de las soluciones salinas. La conductividad eléctrica así como la presión osmótica dependen del número de partículas que se encuentran en las soluciones salinas. Los valores de la presión osmótica de las diferentes estaciones de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac variaron de la siguiente manera  $PO = 10.13 - 140.00$  kPa, sin embargo, se debe señalar que la presión osmótica de las soluciones de las aguas de los manantiales y de los cauces en los orígenes de los ríos Zahuapan y Atoyac son de valores bajos, y solamente cuando los cauces de los ríos Zahuapan y Atoyac reciben aguas de descarga urbano-industriales, la presión osmótica de esta agua aumenta a valores de  $PO = 60.79 - 121.59$  kPa. Cuando las aguas del sistema Zahuapan-Atoyac riegan la zona agrícola de Tlaxcala-Zacatelco ya las aguas llevan considerables concentraciones de sales. Las aguas que riegan la zona agrícola de Tlaxcala-Zacatelco ya son de calidad bicarbonatada ( $HCO_3^- > 50.0\%$ ).

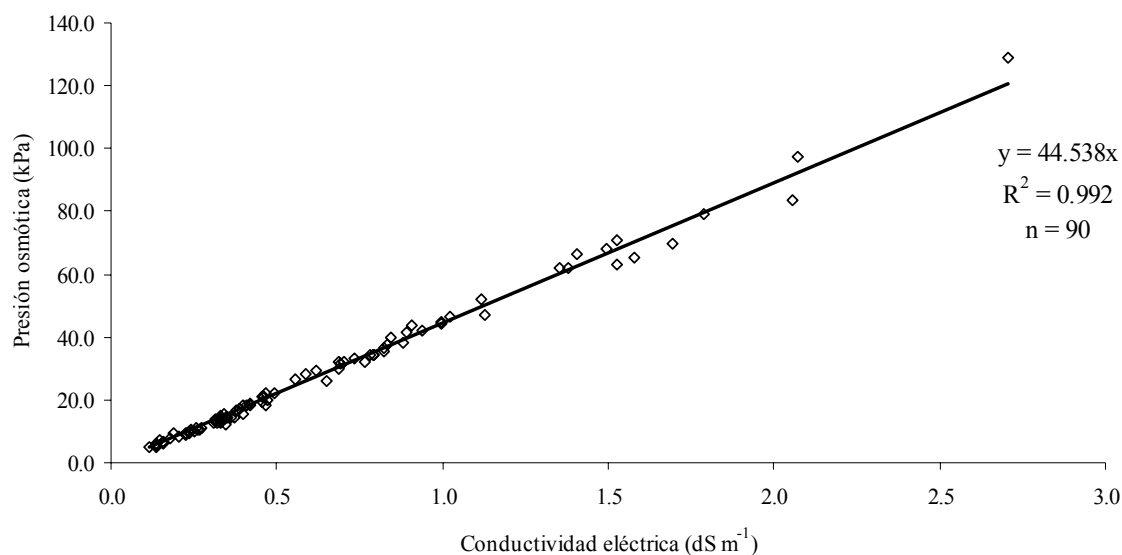


Figura 3. Relación entre la conductividad eléctrica ( $dS m^{-1}$ ) y la presión osmótica (kPa), de todas las estaciones de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, estados de Tlaxcala y Puebla.

### ***Composición iónica de las aguas residuales***

En la Figura 4 se presentan las distribuciones iónicas en lo que concierne a cationes y aniones de los muestreos de invierno-2006 y primavera-2007. En esta misma figura también se encuentran las variaciones del pH. El pH en ambas fechas de muestreo tuvo variaciones de  $pH = 6.3 - 8.1$ . En estas condiciones de pH el sistema  $HCO_3^- - CO_3^{2-}$  permanece en el régimen fisicoquímico de  $HCO_3^-$ , la predominancia de los aniones bicarbonato se tiene tanto en las aguas que corresponden a manantiales y claramente cuando los cauces conducen aguas urbano-industriales. De acuerdo con la distribución de las concentraciones de sales en las aguas de los cauces de los ríos Zahuapan y Atoyac se observa que desde los orígenes de estos cauces hasta el paso de estos por las primeras poblaciones, en donde se derivan aguas residuales hacia estos cauces, las concentraciones de sales totales de esta agua son de  $134 - 465 \mu S cm^{-1}$  y las concentraciones de los cationes y aniones son de  $1.26 - 4.88 mmol_c L^{-1}$ , si embargo, a partir de las estaciones 13 - 15 hasta las estaciones de muestreo 41 - 49 las concentraciones de sales varían de  $500 - 1700 - 2800 \mu S cm^{-1}$ . Aquí, a este respecto, se debe mencionar que precisamente, cuando las concentraciones de los cauces de los ríos Zahuapan y Atoyac alcanzan  $1500 - 2800 \mu S cm^{-1}$ ,

en la parte norte de la zona agrícola Tlaxcala-Zacatelco, se inicia el riego hacia el sur por todo el valle de Tlaxcala-Zacatelco.

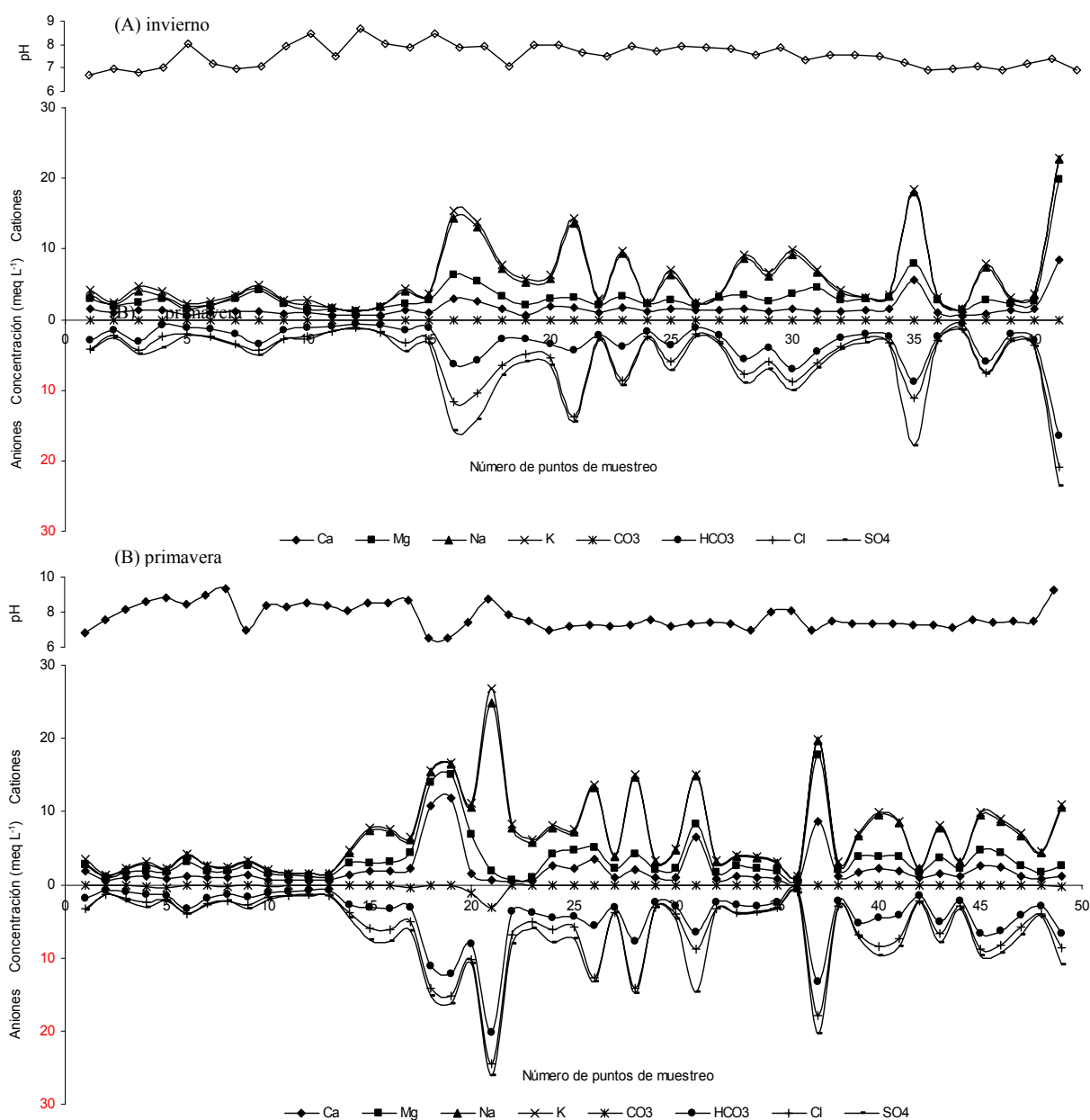


Figura 4. Composición iónica y pH, de las aguas residuales (A) muestreo invierno-2006, (B) muestreo primavera-2007.

La irrigación del valle Tlaxcala-Zacatelco se hace con aguas urbano-industriales de concentraciones  $> 1500 \mu\text{S cm}^{-1}$  y RAS  $> 3.0$ . En estas aguas los valores del RAS varían de 3.12 - 4.67 - 5.14. Y si consideramos que cuando en las aguas de los cauces urbano-industriales se tienen altas concentraciones de iones bicarbonato, entonces, debido a la tendencia de que precipiten fracciones considerables de iones de calcio, es entonces evidente que las concentraciones de sodio irán en aumento y los valores del RAS originales, tenderán también a aumentar debido a la precipitación de los iones de calcio. En estas condiciones las aguas se enriquecen con sodio y con magnesio. En las agua de las 90 estaciones de muestreo la relación  $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$  fue de 0.9 y 1.2. Obviamente, en condiciones de variaciones físico-químico como cambios de temperatura  $\theta^t$  y la presión parcial de bióxido de carbono  $P_{\text{CO}_2}$ , las concentraciones de los iones de calcio tendrán fuertes variaciones. En estas condiciones de relación  $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+} < 1.0$ . Las sales solubles

más comunes encontradas en las aguas urbano-industriales del sistema Zahuapan-Atoyac fueron:  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  y  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ .

**Valores de RAS y los problemas de infiltración**

Durante la aplicación de las aguas de riego a los suelos así como durante la recuperación de los suelos salinos y sódicos es muy importante que el agua tenga fácil movilidad dentro de sus espesores de suelo. Los peligros de sodificación están asociados con el sodio intercambiable. Se ha observado que la conductividad hidráulica de los suelos disminuye cuando la concentración electrolítica de las aguas es baja y los valores de RAS son altos. También se ha establecido que durante los procesos de dispersión de las partículas arcillosas y durante su movimiento los microporos de los suelos se tapan y se sellan. Cuando en los suelos se tienen minerales arcillosos del tipo de la montmorillonita y altos valores de sodio intercambiable debido a soluciones de RAS elevado, en los suelos tienen ocurrencia procesos de hinchamiento. En algunas zonas de la zona agrícola de Tlaxcala-Zacatelco se tienen suelos vertisoles. La dispersión de arcillas y los procesos de hinchamiento afectan la infiltración de agua en los suelos (Shainberg *et al.*, 1997; Dontsova and Norton, 2002). En la Figura 5 se presenta la relación RAS - CE de las aguas urbano-industriales para las formulaciones de RAS,  $\text{RAS}_{aj}$  y  $\text{RAS}^0$ . Cuando los valores de RAS no toman en cuenta las condiciones de alcalinidad de las soluciones y la precipitación del  $\text{Ca}^{2+}$  y de  $\text{Mg}^{2+}$  las aguas urbano-industriales del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac en condiciones de equilibrio con los suelos presentarán sus valores diferentes de  $\text{PSI}_2$ , sin embargo, cuando se consideran las posibles precipitaciones del  $\text{Ca}^{2+}$  y de  $\text{Mg}^{2+}$  debido al Índice de Saturación (IS) que estima la precipitación del agua de riego como una función del grado de saturación con  $\text{CaCO}_3$  en la solución del suelo, y además por otra parte, las concentraciones de  $P_{\text{CO}_2}$  conjuntamente con la determinación de las relaciones de  $\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$  los valores del RAS aumentan debido a las precipitaciones parciales del  $\text{Ca}^{2+}$ . Las aguas urbano-industriales de los ríos Zahuapan y Atoyac, en lo que se refiere a su capacidad de reducir la infiltración en los suelos, se disponen en el orden siguiente: sin reducción ( $\text{RAS}$  y  $\text{RAS}^0$ ) y con reducción moderada ( $\text{RAS}_{aj}$ ).

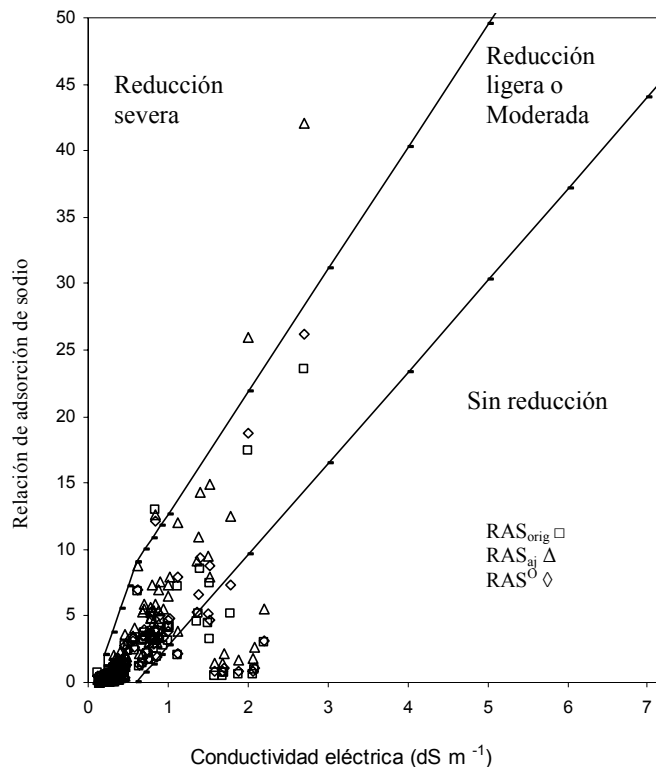


Figura 5. Reducción relativa de la infiltración de los suelos inducida por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales.

**Concentraciones de fósforo  $P\text{-PO}_4$**

En condiciones de alcalinidad cuando el sistema  $\text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2+}$  tiende a la formación de carbonatos  $\rightarrow \text{CO}_3^{2+}$  el ion  $\text{H}_2\text{PO}_4$  se asocia con el  $\text{Na}^+$  para formar  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ . Si las condiciones de alcalinidad persisten entonces, posteriormente el  $\text{PO}_4^{3-}$  se precipitará con el  $\text{Ca}^{2+}$  para formar  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ .

En la Figura 6 se presentan las concentraciones de fósforo P- $\text{PO}_4$  en los muestreos de invierno-2006 y de primavera-2007. En ambos muestreos, las concentraciones de fósforo P- $\text{PO}_4$  en los orígenes de los ríos Zahuapan y Atoyac tienen muy bajas cantidades de fósforo 0.3 - 0.5  $\text{mg L}^{-1}$ . En cambio, cuando los cauces de estos ríos ingresan a poblados urbano-industriales, las concentraciones de los fosfatos P- $\text{PO}_4$  aumentan considerablemente variando como sigue: P- $\text{PO}_4$  = 1.0 - 7.0  $\text{mg L}^{-1}$ . Con estas concentraciones de fosfatos en estas aguas urbano-industriales, se desarrollarán con mucha intensidad los procesos de eutrofización. El límite de concentración de P- $\text{PO}_4$  es de 0.05  $\text{mg L}^{-1}$  para que se inicien los procesos de eutrofización.

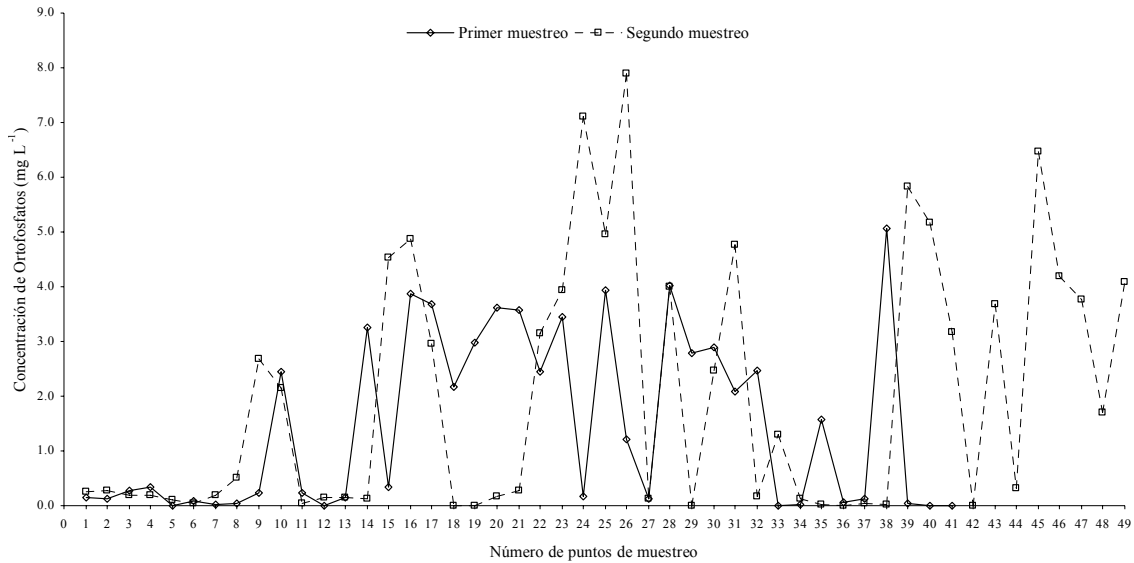


Figura 6. Distribución de los ortofosfatos en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

### Concentraciones de boro

Se ha reconocido que el boro es esencial para el desarrollo y crecimiento normal de los cultivos en pequeñas cantidades, sin embargo, el boro es muy tóxico para ciertas especies. Por ejemplo el Boro es muy tóxico para el cultivo del limonero. En el caso de la vid si la concentración del boro en las aguas es  $< 1.0 \text{ mg L}^{-1}$ , no presenta problemas de toxicidad. En concentraciones de boro  $> 3.0 \text{ mg L}^{-1}$  los daños de la vid son muy severos. Las plantas pueden experimentar deficiencias o toxicidades al boro durante su ciclo vegetativo (Goldberg *et al.*, 2002). En las directrices para interpretar la calidad de las aguas de riego se establece que cuando las concentraciones de boro  $< 0.7 \text{ mg L}^{-1}$  no hay ninguna restricción en el uso del agua; cuando las concentraciones de boro son  $0.7 - 3.0 \text{ mg L}^{-1}$  las restricciones son moderadas; cuando las concentraciones de boro son  $> 3.0 \text{ mg L}^{-1}$ , las restricciones del uso del agua son severas. En la Figura 7 se presentan las variaciones de la concentración de boro en las aguas urbano-industriales del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. Las concentraciones de boro fueron de 0.0 - 1.6  $\text{mg L}^{-1}$ , en los muestreos de invierno-2006 y primavera-2007.

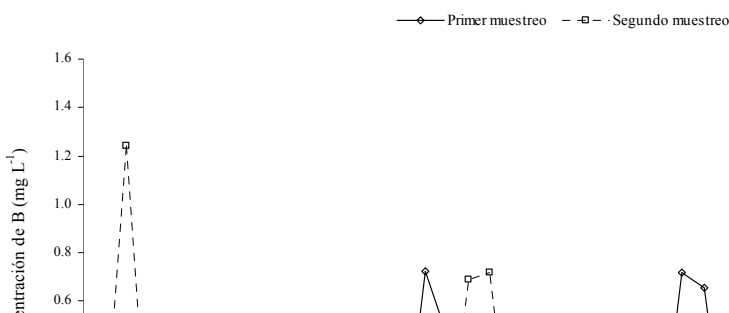


Figura 7. Distribución del boro en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac

## CONCLUSIONES

En sus orígenes, los ríos Zahuapan y Atoyac, sus aguas tienen concentraciones electrolíticas bajas:  $100 - 480 \mu\text{S cm}^{-1}$ , sin embargo cuando a estos cauces se vierten aguas urbano-industriales las concentraciones electrolíticas alcanzan valores de:  $480 - 1500 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Las aguas urbano-industriales incrementan sus concentraciones de sodio en  $1.75 - 8.0 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$ . Las concentraciones de bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$  aumentan en valores:  $2.91 - 6.38 \text{ mmol}_e$ . En estas condiciones los suelos de la zona agrícola Tlaxcala-Zacatelco paulatinamente en el tiempo, aumentarán las cantidades de sodio intercambiable

## LITERATURA CITADA

- APHA. American Public Health Association. 1989. Standard M. D. Methods for the examination of water and waste water. 17th ed Port City Pres. Baltimore, USA.
- Dontsova, K. M. and L. D. Norton. 2002. Clay dispersion, infiltration, and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg. *Soil Sci.* 167: 184-193.
- Endo, T., S. Yamamoto, T. Honna and A. E. Eneji. 2002. Sodium-Calcium exchange selectivity as influenced by clays minerals and composition. *Soil Sci.* 167: 117-125.
- Goldberg, S., P. J. Shouse, S. M. Lesch, C. M. Grieve, J. A. Poss, H. S. Forster and D. L. Suarez. 2002. Soil boron extractions as indicator of boron content an field-grown crops. *Soil Sci.* 167: 720-728.
- Keren, R. 1996. Boron. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA. 3th. ed. Madison. WI. USA.
- Kuo, S. 1996. Phosporus. Method of soil analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA. 3th. ed. Madison. WI. USA.
- Parker, F. P. and D. L. Suarez. 1990. Irrigation water quality assesment. In agricultural salinity assesment and management. ASCE. New York. USA.
- Sánchez-Bernal, E., M. Ortega-Escobar, Gonzalez-Hernandez, G. Ruelas-Angeles, J. Kohashi-Shibata y N. García-Calderon. 2003. Tolerancia de tuberculos de papa cv. Alpha en etapa de brotación a condiciones de salinidad. *Terra* 21: 481-491.
- Shainberg, I., G. J. Levy, J. Levin and D. Goldstein. 1997. Aggregate size and real properties. *Soil Sci.* 162: 470-478.
- Sposito, G. and Mattigod. 1997. On the chemical fundation of the sodium adsorption ratio. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 41: 323-329.
- Velázquez, 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.