

EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN DE ADSORCIÓN DE SODIO EN LAS AGUAS DEL RÍO TULANCINGO, ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO

Evaluation of the Sodium Adsorption Ratio in Waters of the Tulancingo River, State of Hidalgo, Mexico

Álvaro Can Chulim^{1‡}, Carlos Ramírez Ayala¹, Manuel Ortega Escobar¹, Carlos Trejo López¹ y Jaime Cruz Díaz¹

RESUMEN

El río Tulancingo se encuentra dentro de una zona de volcanismo reciente, caracterizada geológicamente por el predominio de rocas Cenozoicas que datan del Terciario y del Cuaternario. Dado que es una zona volcánica, cuyas rocas, en la mayoría de los casos insolubles, presentan aguas de baja concentración iónica, aumentando únicamente donde existen afluentes urbano-industriales y aguas termales. El análisis hidrogeoquímico indica que las aguas se clasifican dentro de la familia cálcico/magnésico-bicarbonatadas. La ecuación usada para la evaluación de la relación de adsorción de sodio (RAS) fue la RAS corregida. Esta ecuación toma en cuenta las variaciones del ión calcio en la solución del suelo. El valor mínimo calculado de la RAS corregida fue de 0.200 y el máximo de 5.911, con una media de 0.674. El efecto principal del agua, detectado mediante la gráfica de infiltración que relaciona la conductividad eléctrica (CE) y la RAS, es sobre la infiltración. El valor mínimo de la CE medida fue de 0.043 dS m⁻¹ y el valor máximo de 1.438 dS m⁻¹, con un valor medio de 0.419 dS m⁻¹. El Ca²⁺ es importante en la estabilidad de las propiedades físicas del suelo y especialmente de la conductividad hidráulica; su disponibilidad es afectada por la solubilización y la precipitación en presencia de los bicarbonatos.

Palabras clave: concentración iónica, infiltración, RAS, volcanismo.

SUMMARY

The Tulancingo River is situated in an area of recent volcanism, geologically characterized by

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

[‡] Autor responsable (acan@colpos.mx)

Recibido: noviembre de 2005. Aceptado: abril de 2008.
Publicado en Terra Latinoamericana 26: 243-252.

the predominance of Cenozoic rocks dated in the Tertiary and the Quaternary periods. Since it is a volcanic zone whose rocks are insoluble in most cases, its water is of low ionic concentration, increasing only where urban-industrial affluents and hot springs exist. The hydrochemical analysis indicates that the waters are classified within the calcic/magnesian-bicarbonated family. The equation used for the evaluation of the sodium adsorption ratio (SAR) was the corrected SAR, since this equation takes into account variations in calcium ions in the soil solution. The calculated minimum value of the corrected SAR was 0.200, and the maximum was 5.911, with an average of 0.674. The main effect of the water, detected by means of the infiltration graph that relates electrical conductivity (EC) and SAR, is on infiltration. The minimum and maximum EC values were 0.043 dS m⁻¹ and 1.438 dS m⁻¹, respectively, with an average of 0.419 dS m⁻¹. Ca²⁺ is important in the stability of soil physical properties, especially of hydraulic conductivity; its availability is affected by solubilization and precipitation in the presence of bicarbonates.

Index words: ionic concentration, infiltration, SAR, volcanism.

INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de un desarrollo acelerado de la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y mineras (Foster *et al.*, 2002), México enfrenta, en la actualidad, grandes problemas, entre los que destaca la disminución acelerada de la disponibilidad de agua en las zonas más pobladas y la creciente contaminación de los cuerpos de agua, susceptibles de servir como fuentes de abastecimiento; esto ha propiciado un aumento en la extracción y el consumo de agua que se traduce en una mayor generación de aguas residuales. Las aguas residuales, al descargarse sin tratamiento a los cuerpos receptores, perjudican sus usos legítimos y disminuyen su potencial de aprovechamiento, por lo que,

posiblemente, en el futuro cercano se presentarán déficit críticos en algunas regiones, lo que plantea un serio desafío para las autoridades a cargo de su administración y distribución (Guerra y Mora, 1989).

En la zona de estudio, la fuente principal de abastecimiento de agua para uso agrícola es el agua superficial que proviene de corrientes superficiales, lagunas y nacimientos. La cuenca del río Tulancingo está comprendida dentro de dos provincias geológicas: el eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental. La provincia del eje Neovolcánico cubre la mayor parte de la región y se caracteriza geológicamente por el predominio de rocas volcánicas Cenozoicas que datan del Terciario y del Cuaternario.

En zonas volcánicas las rocas están constituidas principalmente por minerales silicatados, los cuales, en la mayoría de los casos, son insolubles. El grado de aportación iónica de estos suelos y rocas, a la composición de las aguas, depende de su origen geológico (Martínez *et al.*, 2006). Con estos antecedentes, se plantea la hipótesis que la composición iónica de las aguas que circulan y se almacenan en la cuenca del río Tulancingo, desde su origen hasta el embalse de la laguna Metztlán, varía, debido a los vertidos de agua urbano-industriales.

El concepto de calidad del agua se refiere a las características del agua que puedan afectar su adaptabilidad a un uso específico y se define por sus características físicas, químicas o biológicas. En aguas para uso agrícola la calidad es definida por la concentración de iones específicos, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ como cationes; CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} como aniones, y otros de menor proporción, como el B^{3+} , I^- y NO_3^- (Pizarro, 1985). Estos elementos tienen su origen en la disolución o meteorización de las rocas y suelos, y son transportados mediante corrientes, tanto superficiales como subterráneas, y depositados en el suelo de forma natural o mediante el riego (Lesser, 1987). Uno de los objetivos de este trabajo fue determinar las concentraciones iónicas de las aguas del río Tulancingo en diferentes puntos de muestreo a lo largo de su cauce y afluentes, desde los inicios de la formación del cauce hasta el reservorio en la laguna de Metztlán. Con base en los resultados de estas determinaciones, otro objetivo fue determinar los índices de salinidad y sodicidad, para definir la calidad de las aguas.

Las aguas de baja concentración, al ser aplicadas al suelo mediante el riego, presentan problemas de infiltración (Ayers y Westcot, 1987). Mediante

la evapotranspiración, las sales menos solubles precipitan al concentrarse, quedando en predominio una fracción de las más solubles. Ésta es la causa que da lugar al predominio de los iones más solubles, como el sodio, en la primera capa del suelo (Velázquez *et al.*, 2002). En general, la infiltración aumenta con la salinidad y disminuye con una reducción en salinidad o un incremento en el contenido de sodio en relación con el calcio y magnesio (RAS) (Fine *et al.*, 1959; Pupisky y Shainberg, 1979; Oster, 1994). Para evaluar el efecto del agua de baja concentración, al ser aplicada al suelo mediante el riego, se usó la gráfica de infiltración propuesta por Ayers y Westcot (1987). Esta gráfica relaciona la salinidad (CE) con la RAS y predice el efecto sobre la infiltración.

El procedimiento que se recomienda para el cálculo de la RAS es el propuesto por Suárez (1981), el cual ajusta la concentración de calcio en el agua, al valor de equilibrio esperado después del riego, e incluye, además, los efectos del bióxido de carbono (CO_2), el bicarbonato (HCO_3^-) y la salinidad sobre el calcio originalmente contenido en el agua de riego, y que no forma parte del suelo. Además, supone la existencia de una fuente de calcio en el suelo, como la caliza (CaCO_3) u otros minerales, como los silicatos, y la inexistencia de precipitación del magnesio. El objetivo principal de este trabajo fue la determinación de las variaciones de la RAS bajo diferentes enfoques conceptuales: RAS (Gapón, citado por Richards, 1973, Ecuación 1), RAS ajustado (RASaj) (Bower y Wilcox, 1965; Bower *et al.*, 1965, Ecuación 2) y RAS corregido (RAS^o) (Suárez, 1981, Ecuación 3).

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

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

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

donde: Na = contenido de sodio en el agua de riego, meq L⁻¹; Ca = contenido de calcio en el agua de riego, meq L⁻¹; Mg = contenido de magnesio en el agua de riego, meq L⁻¹; pHc = pH teórico en el que el agua alcanzaría el equilibrio con el CaCO₃; y Ca° = contenido corregido de calcio en el agua del riego, meq L⁻¹.

El pHc se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$\text{pHc} = (\text{pK}_2 - \text{pKc}) + \text{p}(\text{Ca}) + \text{p}(\text{Alk})$$

donde: pK₂ = el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico (H₂CO₃), corregido por la fuerza iónica de la solución; pKc = el producto de solubilidad del CaCO₃, corregido por la fuerza iónica de la solución; pCa corresponde al logaritmo negativo de la concentración molar de Ca²⁺; p(Alk) es el logaritmo negativo de la concentración equivalente titulable de CO₃²⁻ y HCO₃⁻.

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 con relación a su propio contenido de calcio (HCO₃⁻/Ca²⁺) y por la presión parcial del dióxido de carbono (CO₂), ejercida en los primeros milímetros del suelo (presión igual a 0.0007 atm).

MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca del río Tulancingo se sitúa en la porción noreste de la Mesa Central, entre 98° 10' y 98° 55' O y 19° 55' y 20° 45' N. El río Tulancingo o Metztitlán nace en el estado de Puebla con el nombre de río Huitzongo, desciende del cerro Tlachaloya desde una altitud de 2750 m con rumbo noroeste; pasa por Tulancingo, Hidalgo, donde recibe por la margen derecha al río Chico,

corriendo a partir de esta confluencia con dirección norte y con el nombre de río Grande de Tulancingo. Más adelante cruza por Alcholoaya, Hidalgo y con el nombre de río Alcholoaya llega hasta la población El Vite, a partir de donde ya se conoce, propiamente, como río Metztitlán; cruza por la Carretera Federal 105 Pachuca-Huejutla bajo el puente de Venados. Finalmente, el río descarga a la Laguna de Metztitlán, aguas abajo del poblado Vega de Metztitlán, con una altitud de 1246 m para continuar, posteriormente, su curso hasta su confluencia al río Moctezuma, con el nombre de río Amajaque.

Se seleccionaron 45 puntos de muestreo y se consideraron los afluentes que desembocan en el cauce principal, pozos, lagunas y nacimientos. Éstos son estratégicos para conocer el carácter químico dominante de las aguas de la zona en estudio. Se realizaron tres muestreos, distribuidos en un año: el primero, en septiembre de 2004 (otoño); el segundo, en marzo de 2005 (primavera), y el tercero, en junio de 2005 (verano). Para que la muestra sea representativa, se recolectaron tres muestras de cada estación de muestreo; los sitios se ubicaron con un GPS Garmin MAP60.

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 métodos de comprobación recomendados por Eaton (1995), como: balance anión-cation; total de sólidos disueltos medidos, (TSD) medidos = TSD calculados; CE medida = CE calculada; CE medida y la suma de aniones; TSD medidos a un intervalo de CE; TSD calculados a un intervalo de CE.

Cuadro 1. Determinaciones físicas y químicas realizadas a las muestras de agua del río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México.

Determinación	Método	Referencia
a. pH	Potenciométrico	Eaton (1995)
b. Conductividad eléctrica	Conductimétrico	Richards (1973)
c. Residuo seco evaporado (RSE)	En base peso seco	Eaton (1995)
d. Calcio y magnesio	Titulación	Richards (1973)
e. Sodio y potasio	Flamometría	Greenberg (1992)
f. Carbonatos y bicarbonatos	Titulación	Richards (1973)
g. Cloruros	Titulación	Richards (1973)
h. Sulfatos	Turbidimetría	Eaton (1995)
i. Ortofosfatos	Titulación	Rodier (1978)
j. Boro	Titulación	Page (1982)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fuente principal de abastecimiento de agua para uso agrícola, en la zona de estudio del río Tulancingo, son las corrientes superficiales, las lagunas y los nacimientos. Los resultados obtenidos en este trabajo indican bajas concentraciones iónicas, lo cual se atribuye a que en la zona volcánica las rocas y los suelos tienen bajo contenido de minerales solubles.

Uno de los aspectos más relevantes para que toda interpretación sobre calidad del agua sea correcta, de acuerdo con los intervalos de exactitud presentados por Eaton (1995), es que los valores analíticos sean correctos. Con respecto al balance entre aniones y cationes, para los tres muestreos, el resultado obtenido es de 0.6% y la suma de aniones igual a 4.01; el intervalo de aceptación para una suma de aniones entre 3.0 y 10.0 meq L⁻¹ es de $\pm 2\%$. Se usó la media de los valores obtenidos de los tres muestreos para esta comprobación, pero también se le usó para cada valor en particular. La comprobación, de los valores obtenidos, indica que los análisis se han realizado correctamente.

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

Los resultados de los cálculos de la RAS, para cada muestreo, bajo las diferentes formulaciones, se presentan en los Cuadros 2, 3 y 4. Se puede ver que no en todos los puntos seleccionados se colectaron muestras, debido a la inaccesibilidad al sitio. Con estos resultados y mediante el diagrama de clasificación propuesto por Richards (1973), que grafica los valores de la RAS con respecto a los valores de la CE, para el primer muestreo, 40.0% de las aguas se clasifican como C2-S1 (agua de salinidad media, baja en sodio), 30.0% se ubica como C1-S1 (agua de baja salinidad, baja en sodio), 13.3% es C3-S1 (agua altamente salina, baja en sodio) y 16.7% no entran dentro de las categorías de este diagrama, por su menor concentración de sales. Para el segundo muestreo, 51.5% se clasifican como C2-S1 (agua de salinidad media, baja en sodio), 15.15% son C1-S1 (agua de baja salinidad, baja en sodio), 15.15% se ubican como C3-S1 (agua altamente salina, baja en sodio) y 18.2% no entran en ninguna categoría, por su baja concentración salina. Para el tercer muestreo, 32.5% son C2-S1 (agua de salinidad media, baja en sodio), 27.5% se clasifican como C3-S1 (agua altamente salina, baja en sodio), 25.0% se ubican como C1-S1 (agua de baja salinidad, baja en sodio) y

15.0% no entran dentro del intervalo de clasificación, debido a su baja presencia de sales.

No existe mayor problema para el uso de estas aguas debido a su baja CE. Estas aguas pueden usarse para el riego de la mayor parte de los cultivos y algunas fuentes pueden usarse con un grado moderado de lavado; puede usarse en la mayoría de los suelos con pocas probabilidades de alcanzar grados peligrosos de sodio intercambiable.

Clasificación de las Aguas con Base en el Peligro de Infiltración

Las aguas de baja concentración salina, al aplicarse al suelo mediante el riego, lixivian las sales y los minerales solubles, como el calcio, reduciendo su influencia sobre la estabilidad de los agregados y la estructura del suelo. Independientemente del valor de la RAS, las aguas de muy baja salinidad (conductividad por debajo de 0.2 dS m⁻¹), según McNeal *et al.* (1968) y Ayers y Westcot (1987), invariablemente causan problemas de infiltración. Suárez (1981) recomienda un procedimiento para el cálculo de la RAS que ofrece una mayor comprensión de las modificaciones del calcio del agua del suelo, ecuación que para este tipo de aguas de baja concentración es la más adecuada. Para analizar la variación entre ecuaciones sobre los problemas de infiltración, se grafican los valores obtenidos de las tres ecuaciones propuestas para la RAS, para cada muestreo, y éstos no muestran grandes diferencias por las bajas concentraciones iónicas en el agua.

Los resultados, obtenidos al graficar, se pueden observar en las Figuras 1, 2 y 3. La Figura 1 indica que 56.7% de las aguas presentan reducción ligera a moderada sobre la infiltración, 33.3% presentan reducción severa y sólo 10% no presentan reducción sobre la infiltración. En la Figura 2, 54.5% de estas aguas presentan reducción ligera a moderada, 27.3% presentan reducción severa y 18.2% no presentan reducción sobre la infiltración. En la Figura 3, 52.5% de estas aguas presentan reducción ligera a moderada, 32.5% presentan reducción severa y 15% no presentan reducción sobre la infiltración.

Las aguas de baja concentración salina, con iones altamente hidratados, al contacto con los iones de la solución del suelo interaccionan con éstos solubilizando y al alcanzar sus límites de solubilidad precipitan. Entre estos iones se encuentra el calcio que, al combinarse con carbonatos, bicarbonatos y sulfatos, y exceder

Cuadro 2. Valores de las formulaciones de la relación de adsorción de sodio (RAS) en las muestras de agua del río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. Muestreo realizado en septiembre de 2004.

No.	Descripción del sitio de muestreo	Ubicación		RAS	RASaj		RAS°
		N	O		pHc	RASaj	
1	Tezoncualpan (nacimiento)	19.93716°	98.26150°	0.366	8.550	0.311	0.318
3	San Lorenzo Sayula (río)	19.98566°	98.29607°	0.054	8.550	0.046	0.044
5	Sta. María Asunción (río)	20.12629°	98.27427°	0.046	8.400	0.046	0.039
6	Sta. María Nativitas (río)	20.03570°	98.29478°	0.220	7.900	0.330	0.222
7	Rancho Las Cruces (nacimiento)	20.13885°	98.25153°	0.060	9.550	-0.009	0.034
8	Presa La Esperanza	20.06016°	98.33173°	0.332	8.000	0.465	0.323
10	Santiago Ventoquilpa (canal pared textilera)	20.04068°	98.34718°	0.129	8.500	0.116	0.119
11	Sta. María Asunción (pozo artesiano)	20.15159°	98.26811°	1.398	7.700	2.376	1.480
12	Presa en Tulancingo	20.10125°	98.34795°	0.134	8.250	0.154	0.113
13	Laguna Zupitlán	20.15538°	98.40511°	0.102	8.350	0.107	0.090
14	La Esperanza (río bajo puente junto a textilera)	20.06045°	98.34111°	1.278	7.550	2.364	1.420
15	Río San Lorenzo (unión en Tulancingo)	20.07844°	98.38031°	0.203	8.300	0.223	0.183
16	Río Chico Tulancingo (unión en Tulancingo)	20.07844°	98.38031°	1.246	7.250	2.679	1.540
17	Rancho el Lucero (presa)	20.16288°	98.44004°	0.134	8.200	0.161	0.118
18	Presa Metepec	20.23423°	98.31947°	0.358	8.600	0.286	0.298
19	Fundición Ferrería de Apulco SCL (río)	20.30171°	98.34360°	0.069	9.500	-0.007	0.034
20	Río Tulancingo (en Tortugas)	20.23734°	98.36197°	1.706	7.400	3.412	2.002
21	Río Tortugas (en Tortugas)	20.23883°	98.35976°	0.036	8.150	0.045	0.034
22	Presa Rancho San José	20.22026°	98.52426°	0.097	8.900	0.048	0.066
24	Río El Meco (en El Chamizal)	20.31751°	98.40883°	0.058	9.250	0.009	0.029
25	Pozo profundo (en Tortugas)	20.24648°	98.34117°	0.055	8.400	0.055	0.049
26	Río Alcholya	20.22495°	98.45338°	0.101	7.750	0.167	0.108
28	San Miguel Regla (río bajo puente, entrada a la presa)	20.22083°	98.55916°	0.048	9.150	0.012	0.032
29	San Miguel Regla (presa)	20.23236°	98.55799°	0.085	8.850	0.047	0.062
31	Río Tulancingo (antes de unión con río Meco)	20.28083°	98.40816°	0.101	8.350	0.106	0.085
32	El Vite (aguas termales)	20.25583°	98.48959°	2.154	7.350	4.416	2.903
36	Río Tulancingo (en San Sebastián)	20.29519°	98.53925°	0.361	7.800	0.578	0.378
37	Río Venados (en Venados)	20.46844°	98.67959°	0.098	7.900	0.147	0.101
39	Pozo profundo en el Valle de Metztlán	20.65708°	98.80506°	0.712	7.550	1.317	0.801
41	Laguna Metztlán	20.67832°	98.87118°	0.764	7.650	1.337	0.830
Media				0.417	8.250	0.711	0.462
Mediana				0.132	8.280	0.158	0.116
Moda				0.134	8.550	0.046	0.034
Desviación estándar				0.566	0.622	1.159	0.709

la solubilidad del carbonato de calcio (CaCO_3) o la solubilidad del sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), precipita. El sodio, por el contrario, permanece en solución en las primeras capas del suelo, donde influye sobre la estabilidad de los agregados y la estructura del suelo. Oster y Schroer (1979) y McNeal *et al.* (1968) en sus investigaciones comprobaron que las partículas más pequeñas del suelo, dispersados, obstruyen el espacio poroso y sellan la superficie del suelo, reduciendo notablemente la infiltración. Estos efectos son similares a los provocados por las aguas de lluvia, que son de

muy baja conductividad y pueden, por lo tanto, provocar excesos de escorrentía en las áreas regadas.

Clasificación Hidrogeoquímica

Para constatar el carácter químico dominante de esta agua, se clasificó hidrogeoquímicamente, mediante el diagrama de Piper (1944), y se encontró que pertenecen a las familias cálcico/magnésicas-bicarbonatadas. Lesser *et al.* (1986), en un estudio sobre la hidrogeoquímica de la Ciudad de México, encontraron que el calcio que forma

Cuadro 3. Valores de las formulaciones de la relación de adsorción de sodio (RAS) en las muestras de agua del río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. Muestreo realizado en marzo de 2005.

No.	Descripción del sitio de muestreo	Ubicación		RAS	RASaj		RAS°
		N	O		pHc	RASaj	
1	Tezoncualpan (nacimiento)	19.93716°	98.26150°	0.820	8.000	1.148	0.828
2	Lago Tecocomulco de Juárez	19.90139°	98.35326°	0.593	7.800	0.949	0.612
3	San Lorenzo Sayula (río)	19.98566°	98.29607°	0.144	8.500	0.130	0.106
4	Lago San Juan Hueyapan	20.02505°	98.28060°	0.388	8.300	0.427	0.339
5	Sta. María Asunción (río)	20.12629°	98.27427°	0.049	8.550	0.042	0.035
6	Sta. María Nativitas (río)	20.0357°	98.29478°	0.560	7.700	0.952	0.615
7	Rancho Las Cruces (nacimiento)	20.13885°	98.25153°	0.043	9.800	-0.017	0.020
9	Santiago Ventoquilpa (nacimiento)	20.03438°	98.33773°	0.137	9.650	0.103	0.118
11	Sta. María Asunción (pozo artesiano)	20.15159°	98.26811°	0.097	7.650	0.170	0.103
12	Presa en Tulancingo	20.10125°	98.34795°	0.165	7.950	0.239	0.166
13	Laguna Zupitlán	20.15538°	98.40511°	0.065	8.100	0.084	0.061
14	La Esperanza (río bajo puente junto a textilera)	20.06045°	98.34111°	1.058	7.600	1.904	1.178
15	Río San Lorenzo (unión en Tulancingo)	20.07844°	98.38031°	0.286	7.600	0.515	0.311
16	Río Chico Tulancingo (unión en Tulancingo)	20.07844°	98.38031°	4.923	7.300	10.338	5.911
17	Rancho el Lucero (presa)	20.16288°	98.44004°	0.096	7.800	0.154	0.096
18	Presa Metepec	20.23423°	98.31947°	0.125	8.100	0.162	0.114
19	Fundición Ferrería de Apulco SCL (río)	20.30171°	98.34360°	0.119	9.250	0.018	0.068
20	Río Tulancingo (en Tortugas)	20.23734°	98.36197°	0.266	8.700	0.186	0.248
21	Río Tortugas (en Tortugas)	20.23883°	98.35976°	0.296	8.200	0.355	0.280
22	Presa Rancho San José	20.22026°	98.52426°	0.290	9.150	0.072	0.177
23	Presa La Doria	20.20117°	98.49316°	0.093	9.100	0.028	0.061
24	Río El Meco (en El Chamizal)	20.31751°	98.40883°	0.036	9.200	0.007	0.020
25	Pozo profundo (en Tortugas)	20.24648°	98.34117°	0.191	8.300	0.210	0.171
26	Río Alcoholoya	20.22495°	98.45338°	0.539	7.500	1.024	0.597
27	San Miguel Regla (criadero de peces)	20.21654°	98.55740°	0.048	9.000	0.019	0.030
29	San Miguel Regla (presa)	20.23236°	98.55799°	0.057	8.850	0.031	0.040
34	Río en el Cardonal rumbo a Actopan	20.57290°	98.99386°	1.096	7.500	2.082	1.206
36	Río Tulancingo (en San Sebastián)	20.29519°	98.53925°	0.524	7.500	0.996	0.606
37	Río Venados (en Venados)	20.46844°	98.67959°	0.126	7.250	0.271	0.157
38	Grutas de Tulantongo (nacimiento)	20.62877°	99.00140°	2.035	7.400	4.070	2.327
39	Pozo profundo en el Valle de Metztlán	20.65708°	98.80506°	0.663	7.350	1.359	0.769
41	Laguna Metztlán	20.67832°	98.87118°	1.840	7.200	4.048	2.187
43	Río Amajaque (puente en San Pablo Tetlapayac)	20.62877°	98.91098°	1.042	7.500	1.980	1.174
Media				0.570	8.160	1.032	0.628
Mediana				0.266	8.000	0.239	0.177
Moda					7.500		0.020
Desviación estándar				0.926	0.744	1.972	1.113

parte de la mayoría de las rocas que constituyen la corteza terrestre, se encuentra disuelto en las aguas y proviene, principalmente, de los feldespatos cálcicos que forman las rocas volcánicas. El magnesio en solución se origina de los basaltos constituidos por minerales ferromagnésicos, como los piroxenos y las anfíbolos, los cuales son atacados por el agua. El bicarbonato, se produce a consecuencia de reacciones químicas

debidas a la interacción entre el agua, los gases y las rocas.

CONCLUSIONES

- La calidad de las aguas superficiales y su composición química son el reflejo de los minerales con los que tienen contacto, debido a los procesos de intemperismo.

Cuadro 4. Valores de las formulaciones de la relación de adsorción de sodio (RAS) en las muestras de agua del río Tulancingo, Estado de Hidalgo, México. Muestreo realizado en junio de 2005.

No.	Descripción del sitio de muestreo	Ubicación		RAS	RASaj		RAS°
		N	O		pHc	RASaj	
1	Tezoncualpan (nacimiento)	19.93716°	98.26150°	0.698	8.100	0.907	0.683
2	Lago Tecocomulco de Juárez	19.90139°	98.35326°	1.172	8.000	1.641	1.195
3	San Lorenzo Sayula (río)	19.98566°	98.29607°	0.117	8.350	0.123	0.094
4	Lago San Juan Hueyapan	20.02505°	98.28060°	0.243	8.350	0.255	0.173
5	Sta. María Asunción (río)	20.12629°	98.27427°	0.087	9.000	0.035	0.062
6	Sta. María Nativitas (río)	20.03570°	98.29478°	0.744	7.750	1.228	0.802
7	Rancho Las Cruces (nacimiento)	20.13885°	98.25153°	0.039	9.350	0.002	0.020
9	Santiago Ventoquilpa (nacimiento)	20.03438°	98.33773°	0.073	8.700	0.051	0.062
10	Santiago Ventoquilpa (canal pared textilera)	20.04068°	98.34718°	0.100	8.200	0.120	0.090
11	Sta. María Asunción (pozo artesiano)	20.15159°	98.26811°	0.076	7.700	0.129	0.083
12	Presa en Tulancingo	20.10125°	98.34795°	1.716	7.500	3.260	1.904
13	Laguna Zupitlán	20.15538°	98.40511°	0.111	8.550	0.094	0.091
14	La Esperanza (río bajo puente junto a textilera)	20.06045°	98.34111°	2.083	7.400	4.166	2.460
15	Río San Lorenzo (unión en Tulancingo)	20.07844°	98.38031°	0.805	7.650	1.409	0.880
16	Río Chico Tulancingo (unión en Tulancingo)	20.07844°	98.38031°	5.128	7.650	8.974	5.885
17	Rancho el Lucero (presa)	20.16288°	98.44004°	0.445	8.300	0.489	0.412
18	Presa Metepec	20.23423°	98.31947°	1.007	8.400	1.007	0.856
19	Fundición Ferrería de Apulco SCL (río)	20.30171°	98.34360°	0.159	9.200	0.032	0.097
20	Río Tulancingo (en Tortugas)	20.23734°	98.36197°	0.129	8.150	0.161	0.121
21	Río Tortugas (en Tortugas)	20.23883°	98.35976°	0.097	8.200	0.116	0.091
22	Presa Rancho San José	20.22026°	98.52426°	0.247	9.050	0.086	0.160
23	Presa La Doria	20.20117°	98.49316°	0.064	9.100	0.019	0.041
24	Río El Meco (en El Chamizal)	20.31751°	98.40883°	0.233	9.200	0.047	0.129
25	Pozo profundo (en Tortugas)	20.24648°	98.34117°	0.109	8.200	0.131	0.101
26	Río Alcholoaya	20.22495°	98.45338°	1.537	7.300	3.228	1.767
27	San Miguel Regla (criadero de peces)	20.21654°	98.55740°	0.036	9.500	-0.004	0.020
29	San Miguel Regla (presa)	20.23236°	98.55799°	0.046	8.900	0.023	0.031
30	El Vite (río bajo puente)	20.25330°	98.49709°	0.356	8.000	0.498	0.360
32	El Vite (aguas termales)	20.25583°	98.48959°	3.344	7.500	6.354	3.923
33	El Vite (nacimiento)	20.25583°	98.48959°	3.608	7.550	6.675	4.253
35	El Campamento	20.25244°	98.54967°	0.061	8.500	0.055	0.047
36	Río Tulancingo (en San Sebastián)	20.29519°	98.53925°	0.907	7.600	1.633	1.021
37	Río Venados (en Venados)	20.46844°	98.67959°	0.414	7.500	0.787	0.468
38	Grutas de Tulantongo (nacimiento)	20.62877°	99.00140°	2.142	7.400	4.284	2.529
39	Pozo profundo en el Valle de Metztlán	20.65708°	98.80506°	0.473	7.100	1.088	0.634
40	Pozo profundo en el Valle de Metztlán (pileta)	20.65708°	98.80506°	0.458	7.100	1.053	0.598
41	Laguna Metztlán	20.67832°	98.87118°	0.893	7.600	1.607	1.001
42	Laguna Metztlán (agua freática)	20.67832°	98.87118°	1.124	7.300	2.360	1.406
44	Río Grande Tulancingo en San Juan Amajaque	20.71931°	98.94795°	0.891	7.650	1.559	0.974
45	Río Amajaque en San Juan Amajaque	20.71763°	98.95083°	1.618	7.550	2.993	1.787
Media				0.840	8.100	1.467	0.933
Mediana				0.430	8.050	0.643	0.440
Moda					8.200		0.062
Desviación estándar				1.111	0.673	2.088	1.302

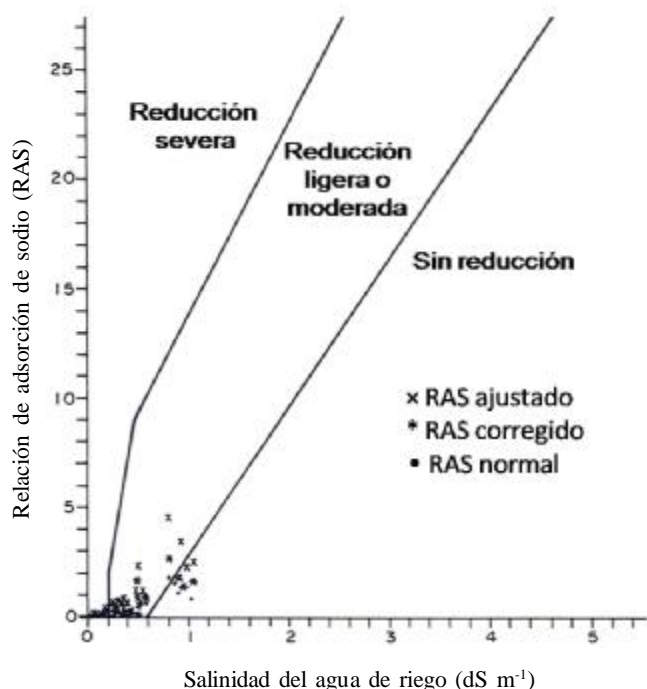


Figura 1. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio (RAS). Muestreo realizado en septiembre de 2004.

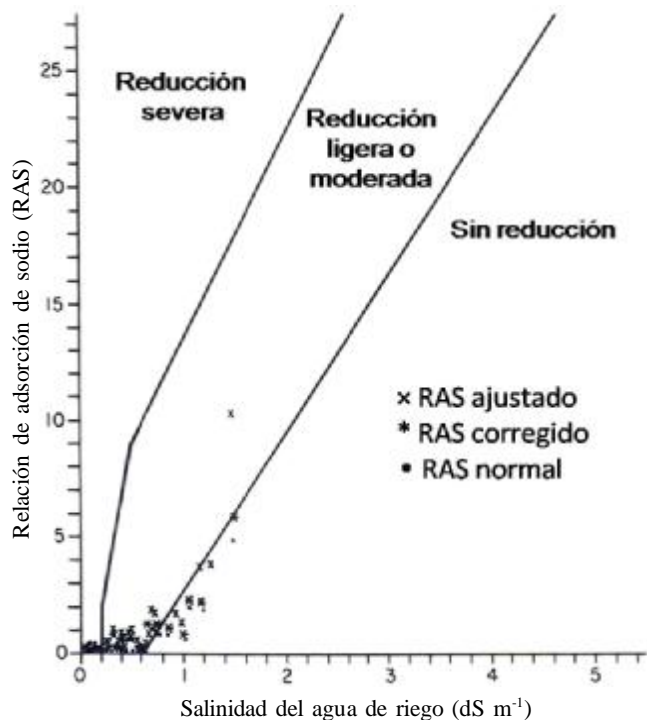


Figura 2. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio (RAS). Muestreo realizado en marzo de 2005.

Los diferentes iones, que poseen las aguas del río Tulancingo, provienen de los constituyentes rocosos de las formaciones basálticas y tóxicas de la gran falla tectónica por la que sigue su cauce el río Tulancingo. También, a su vez, al gran cauce del río Tulancingo se incorporan diferentes afluentes de aguas de uso urbano-industrial. Las aguas urbano-industriales tienen diferentes concentraciones y composiciones iónicas. El área de estudio se encuentra dentro de una zona de volcanismo reciente, caracterizada geológicamente por el predominio de rocas Cenozoicas que datan del Terciario y Cuaternario. Una de las razones de la baja concentración de iones en estas aguas es que las rocas volcánicas están constituidas casi exclusivamente por minerales silicatados, los cuales, en la mayoría de los casos, son insolubles. Sin embargo, estos son fácilmente alterables cuando hay variaciones del pH, como en el caso de las rocas alcalinas donde las aguas son predominantemente sódicas y en rocas basálticas dominan los alcalinotérreos, especialmente el magnesio. Las aguas son de baja concentración iónica y pH neutro, con ciertas variaciones, producto, principalmente, de la concentración de aguas urbano industriales y termales. Se pueden usar sin mayor grado de restricción, dependiendo de la fuente. La clasificación hidrogeoquímica de estas aguas corresponde a la familia de aguas cálcico/magnésico-bicarbonatadas.

- Las aguas tienen considerables cantidades de bicarbonatos, esto debe tomarse en cuenta, por los efectos que pueden tener en los procesos de infiltración, ya que algunas fracciones de iones de calcio se precipitan en forma de carbonato de calcio. Este proceso de la precipitación de compuestos poco solubles de calcio queda explícito en los valores del pH teórico en el que el agua alcanzaría el equilibrio con el carbonato de calcio (pH_c) y cómo los iones de sodio permanecen en solución, ya que el sodio no precipita fácilmente en los suelos, entonces, los valores de la RAS aumentan.

- El riesgo de acumulación de sodio, y por consiguiente los problemas previstos de infiltración, es de esperarse, principalmente, en el área agrícola de la laguna de Metztlán, reservorio de las aguas del río Tulancingo.

LITERATURA CITADA

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. Food and Agriculture Organization. Roma, Italia.

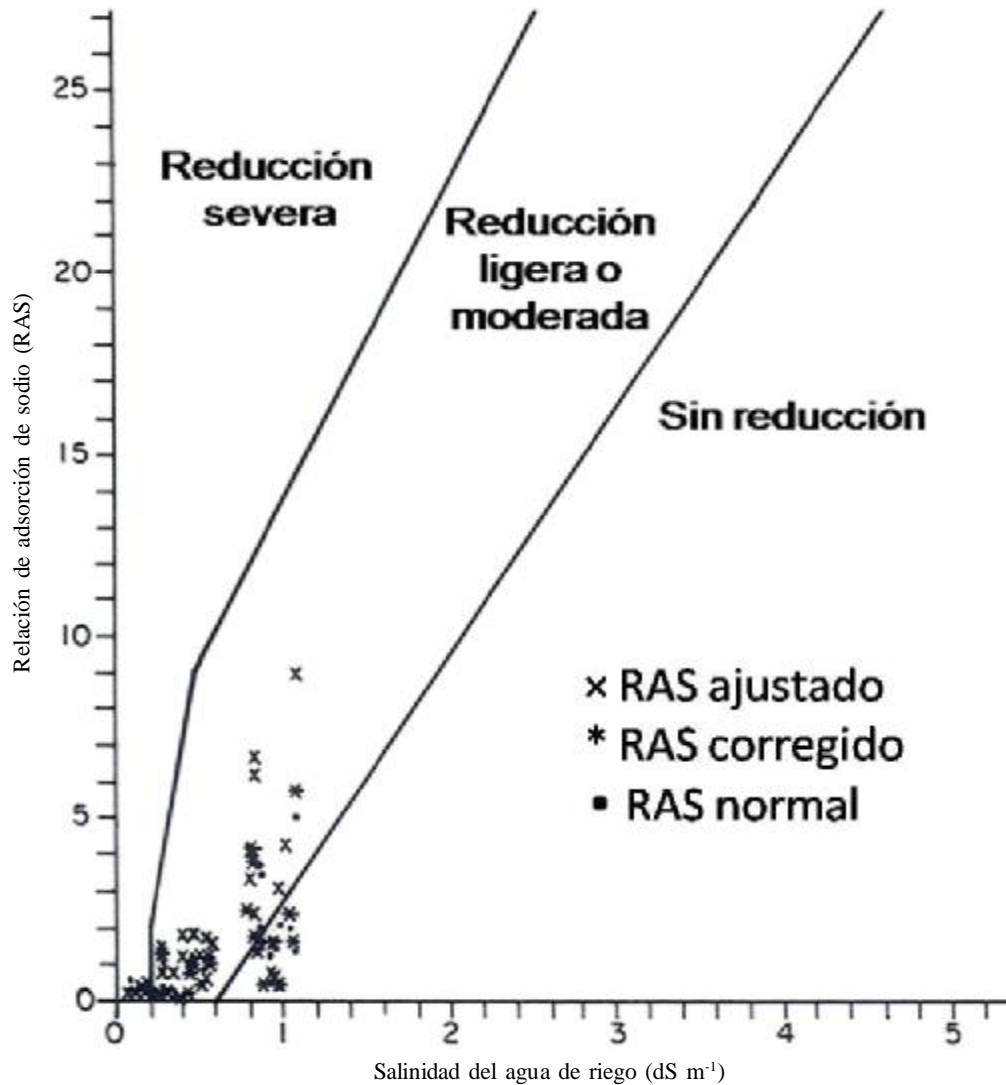


Figura 3. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio (RAS). Muestreo realizado en junio de 2005.

- 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_3 to precipitate from irrigation waters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 29: 91-92.
- Eaton, A. D. 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater.* 19th ed. American Public Health Association. Washington, DC, USA.
- Fine, L. O., E. J. Williamson, F. Wiersma, and C. R. Umbach. 1959. A study of the sodium adsorption ratio and residual sodium carbonate concepts of irrigation waters as they affect exchangeable sodium of soils under semiarid conditions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23: 263-266.
- Foster, S., R. Hirata, D. Gómez, M. D'Elia y M. Paris. 2002. *Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales.* Mundi-Prensa. Washington, DC, USA.
- Greenberg, A. E. 1992. *Standard methods for the examination of water and wastewater.* 18th ed. APHA-AWWA-WEF. Washington, DC, USA.
- Guerra, L. M. y J. Mora R. (compiladores). 1989. *Agua e hidrología en la cuenca del Valle de México: antecedentes, diagnóstico, perspectivas y alternativas.* Fundación Friedrich Ebert. México, D. F.
- Lesser I., J. M. 1987. *Geohidrología.* Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México.
- Lesser I., J. M., F. Sánchez D. y D. González P. 1986. Hidrogeoquímica del acuífero de la Ciudad de México. *Ingeniería Hidráulica en México* 1: 64-77.
- Martínez A., P. E., P. Martínez S. y S. Castaño C. 2006. *Fundamentos de hidrología.* Mundi-Prensa. Madrid, España.
- McNeal, B. L., D. A. Layfield, W. A. Norvell, and J. D. Rhoades. 1968. Factors influencing hydraulic conductivity of soils in

- presence of mixed-salt solutions. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 187-193.
- Oster, J. D. 1994. Irrigation with poor quality water. *Agric. Water Manage.* 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.
- Page, A. L. 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. *Agronomy* 9. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Piper, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis. *Am. Geophys. Union Trans.* 25: 914-923.
- Pizarro, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. 2ª ed. Agrícola Española. Madrid, España.
- Pupisky, H. and I. Shainberg. 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity on the sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 429-433.
- Richards, L. A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual 60. Limusa. México, D. F.
- Rodier. 1978. Análisis de las aguas. Omega. Barcelona, España.
- 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 Sci. Soc. Am. J.* 45: 464-475.
- Velázquez M., M. A., M. Ortega E., A. Martínez G., J. Kohashi S. y N. García C. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra* 20: 459-464.