

Diagnóstico de indicadores de calidad físico-química del agua en afluentes del río Atoyac

Diagnosis of indicators of physical-chemical quality of water in affluents of the Atoyac River

E. González-Pérez¹

H.M. Ortega-Escobar²

M.J. Yáñez-Morales³

A. Rodríguez-Guillén⁴

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México, email: gonzalez.enrique@inifap.gob.mx

²Colegio de Postgraduados, Hidrociencias, Campus Montecillo, Edo. de México, email: manueloe@colpos.mx

³Colegio de Postgraduados, Fitopatología, Campus Montecillo, Edo. de México, email: yanezmj@colpos.mx

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México, email: rodriguez.alejandro@inifap.gob.mx

Autor para correspondencia: E. González-Pérez, email: gonzalez.enrique@inifap.gob.mx

Resumen

El agua para riego que se utiliza en la región de Texmelucan, Puebla, y zonas colindantes proviene, principalmente, del deshielo de los volcanes y de los pozos profundos, aunque alrededor de 350 productores emplean aguas residuales. Se evaluaron algunos parámetros que inciden en la calidad físico-química del agua cuando se utiliza con fines de riego

(pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , PO_4^{2-} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , B y Cl^-) mediante un muestreo aleatorio realizado en 28 puntos de diversos afluentes del río Atoyac. Los resultados muestran que la CE osciló entre 0 y 0.875 dS m^{-1} ; el 64.28% correspondió a aguas de baja salinidad y bajo contenido de sodio (clase C1S1), el 28.57% a aguas con salinidad media y bajo contenido de sodio (clase C2S1) y el 7.15% a aguas de salinidad alta y bajo contenido de sodio (clase C3S1). En promedio, el Ca (0.98 meq L^{-1}) y Mg (1.11 meq L^{-1}) estuvieron presentes en mayor concentración, lo que modificó favorablemente los valores de la relación de adsorción de sodio (RAS). Los iones bicarbonato (HCO_3^-) en el agua presentaron una media de 1.83 meq L^{-1} . La concentración de Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , B y SO_4^{2-} no ha afectado a los cultivos establecidos y la concentración de PO_4^{2-} es un aporte significativo a los cultivos. Estos resultados indican que la región de Texmelucan tiene agua apta para el riego desde el punto de vista físico-químico; sin considerar el contenido de metales pesados ni el resultado de los análisis biológicos de la misma.

Palabras clave: aguas residuales municipales e industriales, salinidad, sodicidad, hortalizas, flores de corte, nutrimentos.

Abstract

In the area of Texmelucan, Puebla, the main source of irrigation water come from the melting of ice on the volcanoes and from deep wells; these sources satisfy the water needs of the agricultural area of Texmelucan and its surroundings. However, around 350 farmers also use wastewater to irrigate their crops. We evaluated some parameters that incide on the physical and chemical quality of the water when it is used for irrigation (pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , PO_4^{2-} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , B and Cl^-). Random sampling was performed in 28 points, in tributaries of the Atoyac River, where water samples were taken to perform the corresponding physical and chemical analysis. Results show that the EC fluctuated between 0 and 0.875 dS m^{-1} ; 64.28% were waters with a low salinity and sodium contents (class C1S1), 28.57% were waters with a medium salinity and low sodium content (clase C2S1) and 7.15% were waters with a high salinity and a low sodium content (class C3S1). On average, Ca (0.98 meq L^{-1}) and Mg (1.11 meq L^{-1}) were present in higher concentrations, which favorably modified the sodium adsorption ratio (SAR). The ion bicarbonate (HCO_3^-) in the water presented an average of 1.83 meq L^{-1} . The concentration of Cl^- , HCO_3^- ,

CO_3^{-2} , B and SO_4^{-2} has not affected the established crops and the concentration of PO_4^{2-} is a significant contribution to the crops. These results indicate that the area of Texmelucan, Pue. Has adequate water for irrigation from the physical and chemical standpoint, disregarding its content of heavy metals or biological analyses.

Keywords: Municipal and industrial wastewater, salinity, sodicity, vegetables, ornamental flowers, nutrients.

Recibido: 07/10/2015

Aceptado: 02/07/2018

Introducción

La agricultura de riego ocupa el 16% de las zonas cultivables del mundo (FAO, 2013), mismas que aprovechan las aguas superficiales y las que se extraen de pozos profundos, principalmente. Sin embargo, esta última práctica ha ocasionado que el nivel de las primeras sufra pérdidas considerables por sobreexplotación en zonas agrícolas, en detrimento de su calidad por contaminación. Las aguas residuales al descargarse sin tratamiento a los afluentes de los ríos perjudican su uso y reducen su potencial de aprovechamiento al afectar su calidad (física, química y biológica), por lo que se vislumbran déficits críticos en algunas regiones de México (Can Chulin, Ramírez, Ortega-Escobar, Trejo & Cruz, 2008)

El concepto de calidad del agua ha sido definido por diversos autores como "las propiedades químicas, físicas y biológicas del agua que afectan su uso". Desde el punto de vista agrícola, la calidad del recurso se refiere al tipo y a la cantidad de sales presentes en ella así como a su efecto sobre el suelo, el desarrollo y crecimiento de los cultivos (Letey *et al.*, 2003). Las principales variables que determinan la calidad del agua de riego, desde una perspectiva agrícola, son la concentración total de sólidos disueltos o sales solubles, la presencia relativa de sodio, el contenido de carbonatos y bicarbonatos y la concentración de otros iones específicos que pueden ser tóxicos, como cloro y boro (De Pascale & Barbieri, 1995; Castellanos, 2015). Estos elementos que inciden sobre

la calidad del agua se originan en la disolución o meteorización de las rocas y otros componentes edáficos que son transportados mediante corrientes superficiales o subterráneas y, posteriormente, depositados en el suelo de forma natural o mediante el riego (Römheld, 2002). Existen varios parámetros para determinar la calidad del agua que incluyen la acidez y la alcalinidad, el pH, la conductividad eléctrica (CE), la relación de adsorción de sodio (RAS) (Richards, 1982, Ayers & Westcot, 1989), la salinidad efectiva, la salinidad potencial y el índice de permeabilidad (Cortés-Jiménez *et al.*, 2008). En este sentido, Cortés-Jiménez, Troyo-Diéguez & Garatuza-Payán (2009) realizaron una correlación entre indicadores de la calidad del agua para uso agrícola en la que determinaron que la mayoría de ellos (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^-), a excepción del RAS, estuvieron correlacionados con la CE, mientras que los valores de RAS solo estuvieron correlacionados entre sí. De acuerdo con lo anterior, concluyeron que ambos indicadores son los más importantes en el diagnóstico de la calidad del agua y que, el valor de CE interpretado de acuerdo con la FAO y el cálculo e interpretación del RAS de acuerdo con Richards (1982) o Ayers y Westcot (1989) son los criterios más adecuados, suficientes y sencillos.

En la Región de San Martín Texmelucan, Puebla, la producción de hortalizas y ornamentales de flor de corte es una de las actividades más importantes en la región (González-Pérez, Carrillo-Salazar, García de los Santos, Yáñez-Morales & Juárez-Muñoz, 2011) donde el 65% de la superficie dedicada a la producción agrícola es bajo condiciones de riego cuyas aguas provienen de corrientes superficiales, de nacimientos y del deshielo de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl (razón por la cual presentan baja concentración de iones), además del empleo de aguas residuales urbanas e industriales con diferentes concentraciones y composiciones iónicas fácilmente alterables debido, principalmente, a su origen. Las aguas residuales contienen cantidades considerables de iones tóxicos como son bicarbonatos, boro, cloro, cadmio y flúor, entre otros, que afectan a algunos cultivos (Ayers & Westcot, 1989). Estos iones causan quemaduras en el ápice de las hojas en algunas plantas cultivadas, y esto repercute en una reducción de la estética de la planta y de su sabor, lo que afecta su precio en el mercado.

En esta investigación se analizaron diferentes muestras de agua recolectadas en los afluentes del río Atoyac; la parte estudiada fue la zona productora del Valle de Texmelucan, que es una zona montañosa que comprende los municipios de San Felipe Teotlalcingo, San Martín Texmelucan, San Matías Tlalancaleca, Santa Rita Tlahuapan y San

Salvador el Verde. Con estos antecedentes y debido a que no existen estudios en esta región sobre la calidad del agua que se utiliza para riego se determinó la concentración de los iones que afectan al suelo y al desarrollo de los cultivos.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La región productora de hortalizas y flores de corte del Valle de Texmelucan, Pue., se ubica a 19°17' N y 98°26' O; a una altitud media de 2 278 metros sobre el nivel del mar (msnm). Tiene un clima templado húmedo con estación invernal seca (Cw) (c, con temperatura media anual de 17 °C. La temporada de lluvias abarca de mayo a octubre, con una precipitación media anual de 801.6 mm, con lluvias frecuentes en las tardes. De noviembre a febrero es común que se presenten heladas (por debajo de 0 °C) y el clima sea frío (5 °C) (García, 2004).

Muestreo

En 2011 se realizó un muestreo en tres afluentes del río Atoyac: Achichipilco, Santa María y San Felipe, distribuido en puntos ubicados en los municipios de San Felipe Teotlalcingo, San Matías Tlalancaleca, San Martín Texmelucan, San Salvador el Verde, y Santa Rita Tlahuapan. Las estaciones de muestreo se establecieron en diferentes sitios de estos municipios con la finalidad de abarcar la mayor superficie posible en donde se riega con estas aguas (Tabla 1). La selección de los puntos de

muestreo se realizó utilizando los criterios de accesibilidad al punto de muestreo, que el agua fuera empleada para el riego de cultivos y que la superficie muestreada cubriera la mayor parte del área de estudio. Cada muestra se tomó en los cauces a intervalos de 2 a 5 km de distancia y, en los pozos profundos, se tomó de la pileta de descarga (Figura 1).

Tabla 1. Identificación de los puntos de muestreo ubicados en la región productora del Valle de Texmelucan, Puebla.

No	Sitio de muestreo	No	Sitio de muestreo	No	Sitio de muestreo
1	Santa María (desagüe).	11	Ejido El Banco.	21	Pozo Tlanalapan.
2	Río Santa María.	12	San Antonio A. (río).	22	San Simón Atzizintla.
3	Ameyal Santa María.	13	Atoyac (Texmelucan).	23	San Rafael Tlanalapan.
4	San Felipe (desagüe).	14	San Martín Texmelucan.	24	El Moral.
5	San Felipe Teotlacingo.	15	San Antonio A. (desagüe).	25	San Cristóbal (desagüe).
6	Ejido El Bentudero.	16	San Matías Atzala.	26	San Cristóbal Tepatlaxco.
7	San Miguel Teanguistenco.	17	Pozo Tlancaleca.	27	Puebla de Zaragoza.
8	San Salvador El Verde.	18	Presa de Chautla.	28	Presa Manuel Ávila Camacho.
9	Ejido La Virgen.	19	Ex-hacienda de Chautla.		
10	Hagüey La Virgen.	20	Teotlalzingo.		

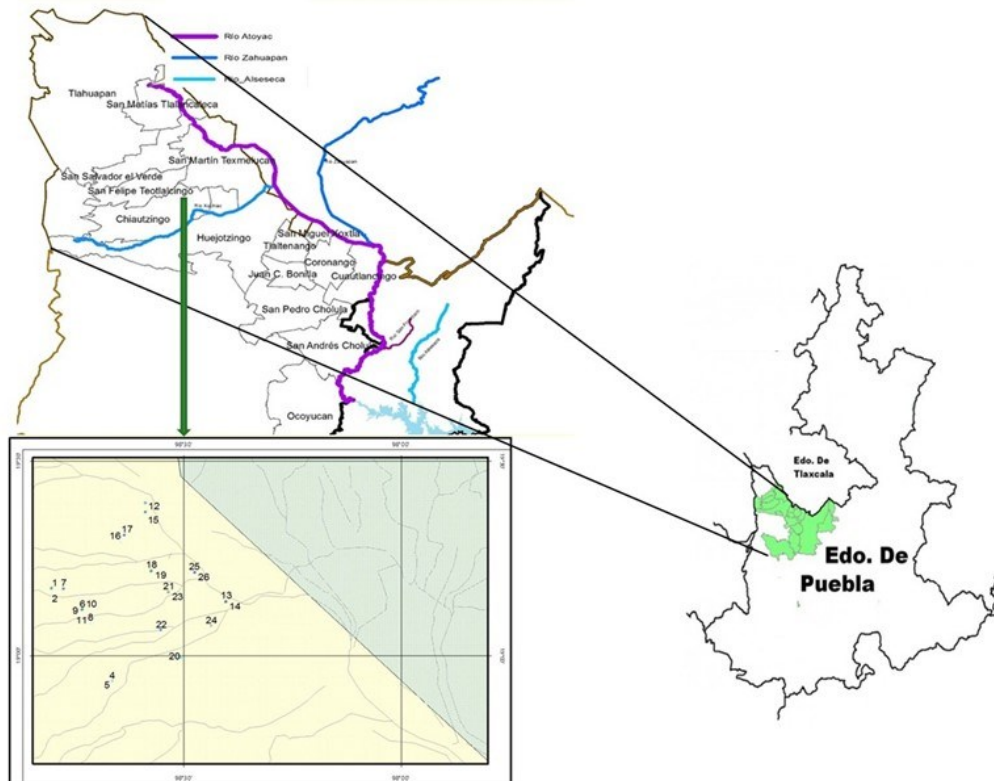


Figura 1. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo (ver la Tabla 1 para realizar su identificación correspondiente).

Colecta de muestras

De los afluentes del río Atoyac se seleccionaron 26 puntos de muestreo y, de los pozos profundos, solo dos, los cuales se ubicaron con un GPS Garmin MAP60. Los puntos fueron seleccionados de manera estratégica para conocer el carácter físico-químico dominante de las aguas de la zona. De cada punto se tomaron tres muestras (repeticiones), en botellas de plástico (HPDE) las cuales se aforaron a 500 mL de agua. Las muestras de pozo se tomaron cuando el equipo de bombeo tenía más de tres horas en funcionamiento y, en los ríos, se tomó del agua en movimiento, a una profundidad media de 1.0 m. Cada muestra se

identificó, colocando una etiqueta con la descripción del lugar, fecha de colecta, datos generales y clave de identificación.

Para conocer la composición cuantitativa de las aguas, las muestras se trasladaron al laboratorio para realizar las determinaciones físicas y químicas (Tabla 2 y 3). La comprobación de exactitud de valores analíticos se hizo con los métodos recomendados por Eaton, Clesceri, Rice, Greenberg, & Franson, 2005).

Tabla 2. Parámetros físicos y químicos evaluados en las muestras de agua del río Atoyac, método usado y referencia correspondiente.

Determinación	Método	Referencia
a. pH	Potenciómetro	Eaton <i>et al.</i> (2005)
b. Conductividad eléctrica (CE)	Conductivímetro	Richards (1982)
c. Residuo seco evaporado (RSE)	En base a peso seco	APHA (1998)
d. Calcio y Magnesio	Titulación	Richards (1982)
e. Sodio y Potasio	Flamometría	Greenberg (1992)
f. Boro	Titulación	Page <i>et al.</i> (1982)
g. Carbonatos y Bicarbonatos	Titulación	Richards (1982)
h. Cloruros	Titulación	Richards (1982)
i. Sulfatos	Turbidimetría	APHA (1998)
j. Ortofosfatos	Titulación	Rodier (1978)

Tabla 3. Concentración permisible de pH, TSD, de los principales cationes y aniones y B (meq L⁻¹) en agua para su uso en riego, de acuerdo a Richards (1982).

Parámetr	pH	TSD	Ca	M	Na	K	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	B*
----------	----	-----	----	---	----	---	-----------------	------------------	----	-----------------	----

o		†	g	+	*	-2	-	-	-2		
Limite permisible	6.5	<200	0-	0-	0-	0	0-	0-10	0-	0-	0.7
	-	0	20	5	40	-	0.1		3	20	-3
e	8.4					2			0		

TDS = Total de sólidos disueltos

† mg L⁻¹.

Relación de adsorción de sodio (RAS)

Se estudiaron los valores de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) para determinar las variaciones bajo diferentes enfoques: RAS observada (RAS), (Gapón, citado por Ayers & Westcot, 1989; Ecuación 1), RAS ajustada (RASaj), en la que se tiene en cuenta la formación de precipitados de CaCO₃, aunque se sigue ignorando los precipitados de CaSO₄, así como equiparar el Ca y el Mg (Bower & Wilcox, 1965; Ecuación 2) y RAS corregida (RAS^o) que toma en consideración el efecto de las concentraciones de carbonatos (CO₃²⁻) y del bicarbonato (HCO₃⁻) y la salinidad (CEa) sobre los procesos de dilución y precipitación del calcio (Suárez, 1981; Ecuación 3).

$$RASc = 0.08 + 1.115 RAS \quad (1)$$

$$RASaj = RAS [1 + (8.4 - pHc)] \quad (2)$$

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

Dónde: Na = contenido de sodio en el agua de riego en meq L⁻¹; Ca = contenido de calcio en el agua de riego en meq L⁻¹; Mg = contenido de magnesio en el agua de riego en meq L⁻¹; pHc = pH teórico en el que el

agua alcanzaría el equilibrio con el CaCO_3 ; y Ca^0 = contenido corregido de calcio en el agua de riego en meq L^{-1} .

El pHc se calculó de acuerdo con la ecuación: $\text{pHc} = (\text{pK}_2 - \text{pKc}) + \text{p}(\text{Ca}) + \text{p}(\text{Alk})$.

Donde: pK_2 = el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico (H_2CO_3), corregido por la fuerza iónica de la solución; pKc = el producto de solubilidad del CaCO_3 , corregido por la fuerza iónica de la solución; pCa = corresponde al logaritmo negativo de la concentración molar de Ca^{2+} ; $\text{p}(\text{Alk})$ = es el logaritmo negativo de la concentración equivalente titulable de CO_3^{2-} y HCO_3^- .

El valor de Ca^0 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 ($\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$) y por la presión parcial del dióxido de carbono (CO_2), ejercida en los primeros milímetros del suelo (presión igual a 0.0007 atm).

Resultados y discusión

Las corrientes superficiales y nacimientos de agua son la principal fuente de abastecimiento de agua para riego en el Valle de Texmelucan; sin embargo, aproximadamente 800 productores utilizan aguas residuales urbanas e industriales para regar sus cultivos. Con este estudio se pretende obtener un panorama más amplio y claro de la calidad del agua de los afluentes del río Atoyac en la zona productora del Valle de Texmelucan. Los resultados indican bajas concentraciones de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , lo cual se atribuye a que los suelos presentan bajo contenido de minerales solubles (Tabla 4).

Tabla 4. Concentración de los principales cationes y aniones y su sumatoria, así como valor del pH, CE y RSE* de las aguas residuales en los afluentes del río Atoyac, Puebla.

No.	p	CE	<u>meq L⁻¹</u>	RSE
-----	---	----	---------------------------	-----

	H	(dS m ⁻¹)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	B	HCO ₃ ⁻¹	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Σ	mg L ⁻¹
1	6.			0.3	0.	0.	1.	0.1		0.	0.0	1.	
	6	0.114	0.65	9	03	02	09	9	0.86	18	8	12	82
2	6.			0.4	0.	0.	0.	0.1		0.	0.0	1.	
	9	0.109	0.46	5	04	02	97	3	0.83	11	6	00	76
3	7.			0.5	0.	0.	1.	0.1		0.	0.0	0.	
	0	0.109	0.46	3	05	02	06	5	0.84	10	5	99	78
4	6.			1.5	0.	0.	2.	0.3		0.	0.1	2.	
	5	0.289	1.07	5	04	02	68	3	2.31	25	6	72	203
5	6.			0.6	0.	0.	1.	0.2		0.	0.1	1.	
	8	0.164	0.6	4	20	12	56	6	1.03	45	0	58	115
6	6.			0.6	0.	0.	1.	0.1		0.	0.0	1.	
	9	0.138	0.5	7	07	06	30	9	0.85	39	9	33	95
7	7.			0.6	0.	0.	1.	0.1		0.	0.0	1.	
	1	0.128	0.50	3	04	02	19	1	1.03	13	5	21	91
8	6.			0.6	0.	0.	1.	0.1		0.	0.0	1.	
	8	0.126	0.50	3	05	02	20	2	0.86	25	7	18	86
9	6.			0.6	0.	0.	1.	0.2		0.	0.1	1.	
	9	0.138	0.50	5	08	05	28	3	0.85	33	2	30	95
10	7.			0.6	0.	0.	1.	0.2		0.	0.1	1.	
	0	0.132	0.50	2	11	03	26	6	0.79	31	3	23	89
11	6.			0.4	0.	0.	1.	0.1		0.	0.1	1.	
	8	0.126	0.60	4	08	07	19	7	0.86	18	8	22	91
12	6.			1.1	0.	0.	2.	0.1		0.	0.1	2.	
	9	0.283	1.3	8	12	02	62	9	1.68	75	7	60	187
13	6.			3.1	2.	0.	8.	0.6		0.	0.7	8.	
	6	0.875	2.56	5	15	38	24	3	6.92	85	7	54	660
14	7.			1.6	0.	0.	3.	0.2		0.	0.1	3.	
	1	0.358	1.40	6	14	08	28	1	2.32	85	6	33	238
15	6.			2.1	0.	0.	3.	0.2		1.	0.1	3.	
	7	0.378	1.05	3	33	05	56	8	2.08	25	8	51	242
16	6.			0.5	0.	0.	1.	0.3		0.	0.0	1.	
	9	0.164	0.80	8	15	02	55	1	1.20	30	7	57	116

17	6. 9	0.214	0.80	0.9 5	0. 13	0. 08	1. 96	0.1 9	1.55	0. 27	0.1 6	1. 98	148
18	6. 7	0.230	0.67	1.3 4	0. 09	0. 06	2. 16	0.1 8	0.11	1. 75	0.2 8	2. 14	120
19	6. 5	0.230	0.63	1.3 7	0. 07	0. 06	2. 13	0.2 4	0.46	0. 71	1.0 1	2. 18	167
20	7. 3	0.151	0.65	0.7 3	0. 03	0. 02	1. 43	0.2 0	1.03	0. 25	0.1 3	1. 41	104
21	7. 3	0.150	0.68	0.0 8	0. 05	0. 13	0. 94	0.2 2	0.95	0. 36	0.1 2	1. 43	99
22	7. 0	0.164	0.80	0.6 2	0. 06	0. 02	1. 50	0.1 9	1.25	0. 20	0.0 6	1. 51	113
23	6. 9	0.138	0.45	0.6 2	0. 16	0. 04	1. 27	0.5 3	0.92	0. 33	0.0 4	1. 29	93
24	7. 2	0.252	1.10	1.1 5	0. 08	0. 03	2. 36	0.3 3	1.95	0. 25	0.1 6	2. 36	177
25	7. 0	0.442	1.71	1.8 0	0. 25	0. 38	4. 14	0.1 9	2.86	0. 98	0.2 8	4. 12	307
26	7. 0	0.440	2.19	1.7 5	0. 12	0. 05	4. 11	0.0 8	3.42	0. 50	0.2 4	4. 16	317
27	6. 9	0.667	1.77	2.2 5	1. 75	0. 35	6. 12	0.5 6	5.19	0. 50	0.5 8	6. 27	489
28	7. 2	0.818	2.55	2.5 8	2. 20	0. 39	7. 72	0.5 2	6.19	0. 93	0.7 2	7. 84	604
Medi a	6. 87	0.263	0.98	1.1 1	0. 31	0. 09	2. 49	0.2 6	1.83	0. 49	0.2 2	2. 54	188. 8
Mín	6. 5	0.109	0.45	0.0 8	0. 03	0. 02	0. 97	0.0 8	0.11	0. 10	0.0 4	0. 99	76
Máx	7. 3	0.875	2.56	3.1 5	2. 20	0. 38	8. 24	0.6 3	6.19	1. 75	1.0 1	8. 54	660
Med	6. 90	0.164	0.74	0.8 4	0. 10	0. 05	1. 76	0.2 1	1.12	0. 35	0.1 6	1. 78	118. 0
Moda	6. 90	0.164	0.50	0.6 2	0. 05	0. 02	1. 93	0.1 9	1.03	0. 25	0.1 6	1. 97	95.0 0

R.S.E. = Residuo seco evaporado.

Min= Mínimo

Max= Máximo

Med= Mediana

Este estudio se desarrolló en una zona rural donde, prácticamente, los únicos vertidos que se encontraron fueron provenientes de la agricultura y ganadería, los cuales no incrementaron de manera significativa la concentración iónica del agua. Sin embargo, en el 25% de los puntos de muestreo las aguas presentaron alteraciones de los parámetros físico-químicos que potencialmente pudiesen ocasionar daño en algunos cultivos. Estos puntos se ubicaron en lugares de descarga urbana e industrial, donde las aportaciones de desechos incrementaron la concentración de los iones B , Na^+ , CO_3^{-2} y HCO_3^- .

Distribución de aniones y cationes

La distribución de los cationes y aniones en los 28 puntos mostró que el ión Mg^{+2} cubrió la mayor superficie, al sobresalir en casi todas las estaciones de muestreo. Este ión representó el 44.57% del total de cationes, seguido de Ca^{+2} , con 39.3% y Na^+ , con el 12.44%, esto fue determinado por el origen de las aguas que son de deshielo y subterráneas. Las aguas presentaron una relación $(Mg^{+2} + Ca^{+2})/Na^+ > 3.5$, por lo que el uso de esta agua en el riego agrícola a la fecha no ha ocasionado ningún problema en las propiedades físico-químicas del suelo. El contenido de Na^+ indica que la probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable es baja por lo que, a corto y mediano plazo, el agua es apta para riego desde el punto de vista de esta variable (Richards, 1982).

El contenido de iones bicarbonato (HCO_3^-) en el agua presentó una media de 1.83 meq L^{-1} y mostró una relación $HCO_3^-/(Cl^- + SO_4^{-2})$ de 2.57. Esta relación estuvo influenciada por la actividad biológica y no tanto por la presencia de iones Na^+ , además que la relación de 1:2 representa procesos de sodificación en el suelo. Mientras que el contenido de iones Ca^{+2} fue de 0.98 meq L^{-1} en promedio, y el de Mg alcanzó un valor de 1.11 meq L^{-1} . Las variaciones en la concentración de los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} modificaron favorablemente los valores de la

relación de adsorción de sodio (RAS). Los resultados concuerdan con lo reportado por Paliwal & Gandhi (1976) y por Torres & Acevedo (2008), quienes mencionan que cuando las variaciones de Ca^{+2} y Mg^{+2} están en balance impiden que la RAS aumente y cause daño por sodicidad y salinidad. El agua con que se riega a los cultivos dedicados a flor de corte en la región contienen una cantidad moderada de iones bicarbonato ($<7.5 \text{ meq L}^{-1}$). Esta situación es favorable debido a que los bicarbonatos tienen influencia sobre el desarrollo de las flores y, si hay exceso, se pueden presentar manchas blancas en las hojas como resultado de la actividad biológica aeróbica y anaeróbica que da origen a la mayor parte de los iones bicarbonato (Buyatti & Pilatti, 1997).

Concentración total de sólidos disueltos

Los valores mostraron una CE de 0.7006 dS m^{-1} obtenida entre la relación total de sólidos disueltos (TSD; mg L^{-1}) y la CE (dS m^{-1}), esto indica que el agua de los afluentes del río Atoyac contiene iones bicarbonato (Ramírez, Ortega-Escobar, Rodríguez, Ramírez-Ayala, & Rone, 1989). Sin embargo, los valores de CE obtenidos estuvieron dentro de lo permitido por el (Diario Oficial de la Federación (DOF), 1989), que es de 0.9 a 1.1 dS m^{-1} . La CE estuvo determinada por el origen del agua, ya que el 92.8% de las aguas con que se riega en la región del Valle de Texmelucan son aguas de deshielo, de manantiales y subterráneas de pozos, mientras que solo el 7.14% corresponde a aguas residuales (puntos donde desemboca el drenaje de fábricas y desechos urbanos). Debido a ello, todas las muestras de agua presentaron baja CE y se clasificaron como adecuadas para riego, considerando solamente esta variable (Olías, Cerón & Fernández, 2005), a excepción de los puntos en los que desembocan las aguas residuales. En general, la CE osciló entre 0.109 a 0.875 dS m^{-1} y la distribución de las muestras fue: 64% entre 0.1 y 0.25 dS m^{-1} , 28.57% entre 0.25 y 0.75 dS m^{-1} , y 7.14% entre 0.75 y 1.0 dS m^{-1} (Tabla 4). Es importante señalar que los mayores porcentajes correspondieron a los puntos 13 (San Martín Texmelucan), donde desembocan aguas residuales provenientes de fábricas de textiles y de drenaje; 25 y 26 (San Cristóbal Tepatlaxco), donde se incorporan desechos de fábricas textiles, granjas y desechos

urbanos; 27 (Ciudad de Puebla) en el cual la principal fuente de abastecimiento de agua es la descarga del drenaje que desemboca a lo largo del cauce del río y, finalmente, al punto 28 (Presa Manuel Ávila Camacho), donde se acumulan todos los residuos que se incorporan a lo largo del río Atoyac.

Concentración de boro

El boro se encuentra en todas las aguas naturales, y en la región de estudio el boro es un elemento abundante debido a que el agua atraviesa superficies de suelo y estratos litológicos de origen volcánico (Rhoades, Kandiah & Mashali, 1992). El 85.71% de las muestras tuvieron de 0.082 a 0.33 mg L⁻¹ y, de acuerdo a las normas de la Comisión Nacional de Agua (DOF, 1989), esta concentración causa daño en cultivos muy sensibles. El restante 14.28% se ubicó entre 0.33 y 0.67 mg L⁻¹, estas concentraciones causan daño en cultivos como aguacate, limón, zarzamora, etc. (Ayers & Wescot, 1989), mientras que en flores de corte (como gladiolo) el daño solo ocurre cuando se excede el límite de tolerancia de 2 mg L⁻¹. En general, se puede decir que las concentraciones de boro se encuentran en cantidades que no tienen efectos tóxicos en la mayoría de cultivos regados en el Valle de Texmelucan y que este tipo de agua solo causaría daño en cultivos muy sensibles a este elemento (Torres & Acevedo, 2008). Una concentración de B superior a 0.3 mg L⁻¹ ocasiona toxicidad en la mayoría de los cultivos y, en la región de estudio, solo se identificaron cuatro puntos que superan este nivel de concentración: Ciudad de Puebla, San Cristóbal Tepatlaxco, San Martín Texmelucan, y la Presa Manuel Ávila Camacho, que son lugares en los que desembocan aguas residuales de fábricas y desechos urbanos.

En lo que respecta a los 24 puntos restantes, se observó que el contenido de boro fue cambiando conforme se incorporaron aguas residuales, éste se inició con una concentración de 0.082 mg L⁻¹, donde la principal fuente de boro fueron los materiales volcánicos por los que atraviesa el agua (Ameyal), que emerge en las faldas del volcán Popocatepetl mientras que, en la trayectoria del cauce, la concentración de boro disminuye debido a que parte de este boro se fija en el

complejo arcilloso. Sin embargo, el punto cuatro presentó un aumento considerable (0.63 mg L^{-1}) en relación a la concentración inicial, esto influenciado principalmente por la incorporación de agua residual con alto contenido de detergente proveniente de la comunidad de San Felipe Teotlalzingo (28).

Concentración de sulfatos

Ayers y Westcot (1989) mencionan que las aguas originadas de residuos urbanos normalmente contienen de 0.01 a $2.0 \text{ mg de SO}_4^{-2} \text{ L}^{-1}$, lo cual ha traído beneficios a los suelos donde se utiliza esta agua, por el aporte de azufre en sus diferentes formas. El ión sulfato no provoca en general daños a las plantas, sin embargo, contribuye al incremento de la salinidad en la solución del suelo (Glover, 1993). En este estudio el 96.4% de las aguas tuvieron una concentración de SO_4^{-2} entre 0.1 y 0.6 mg L^{-1} , solo el punto 19 ubicado en la Ex-hacienda de Chautla (3.57%) tuvo una concentración de 1.01 mg L^{-1} . En este punto se incorpora la descarga de agua residual de fábricas textiles y de los drenajes de las comunidades aledañas. Estas concentraciones no causan fitotoxicidad a los cultivos (Kowalska & Sady, 2003) por lo que, la concentración de sulfatos no representa peligro para el suelo y/o cultivos. Por el contrario, aportan cantidades significativas de azufre (SO_4^{-2}) a los suelos donde se riega con esta agua, por lo cual se tiene la ventaja de que el contenido de sulfatos aportados por el agua a los diferentes cultivos se puede restar a la fórmula de fertilización utilizada por los productores.

Clasificación de las aguas en relación a la CE y RAS (RASc, RASaj, RAS)

Las muestras de agua de los afluentes del río Atoyac se clasificaron de acuerdo a la RAS original, corregida y ajustada (Tabla 5). El 64.28% de las muestras correspondió a aguas de baja salinidad y bajo contenido de

sodio, las cuales son aptas para riego (C1-S1). Sin embargo, pueden presentarse problemas en suelos con baja permeabilidad y en cultivos sensibles al sodio; el 28.57% fue para aguas con salinidad media y bajo contenido de sodio, también aptas para riego (C2-S1) aunque en ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad y, además, en algunos suelos puede presentarse problemas de permeabilidad. El restante 7.14% fue para aguas de salinidad alta (C3-S1) que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el exceso de sales del suelo y realizar un uso de cultivos muy tolerantes a la salinidad.

Tabla 5. Localización geográfica de los sitios de muestreo y valores de los índices derivados de la Relación de Adsorción de Sodio (RASo, RASaj y RASc) en los afluentes del río Atoyac.

Sitio	LN*	LO*	RASo	RASaj	RASc	Clasificación
1	19° 17' 32"	98°32' 15"	0.042	0.268	0.040	C1-S1
2	19° 17' 32"	98°32' 15"	0.059	0.398	0.056	C1-S1
3	19° 17' 32"	98°32' 15"	0.071	0.464	0.068	C1-S1
4	19° 13' 49"	98°30' 05"	0.253	0.063	0.254	C2-S1
5	19° 13' 49"	98°30' 05"	0.254	1.445	0.256	C2-S1
6	19° 16' 41"	98°31' 09"	0.092	0.562	0.088	C1-S1
7	19° 17' 31"	98°31' 50"	0.053	0.323	0.054	C1-S1
8	19° 16' 08"	98°30' 52"	0.067	0.414	0.064	C1-S1
9	19° 16' 41"	98°31' 09"	0.106	0.651	0.102	C1-S1
10	19° 16' 41"	98°31' 09"	0.147	0.920	0.139	C1-S1
11	19° 16' 41"	98°31' 09"	0.111	0.708	0.106	C1-S1
12	19° 20' 56"	98°28' 53"	0.108	0.284	0.121	C1-S1
13	19° 17' 00"	98°26' 00"	0.272	0.611	0.521	C2-S1
14	19° 17' 00"	98°26' 00"	0.273	0.613	0.523	C2-S1
15	19° 20' 56"	98°28' 53"	0.262	0.165	0.288	C2-S1
16	19° 19' 24"	98°29' 47"	0.181	0.955	0.190	C1-S1
17	19° 19' 40"	98°29' 39"	0.139	0.586	0.152	C1-S1

18	19° 18' 14"	98°28' 41"	0.090	0.465	0.047	C1-S1
19	19° 18' 14"	98°28' 41"	0.070	0.341	0.060	C1-S1
20	19° 14' 45"	98°27' 37"	0.036	0.202	0.036	C1-S1
21	19° 17' 23"	98°28' 04"	0.081	0.558	0.079	C1-S1
22	19° 15' 51"	98°28' 20"	0.071	0.374	0.076	C1-S1
23	19° 17' 23"	98°28' 04"	0.219	1.352	0.215	C2-S1
24	19° 16' 02"	098°26' 32"	0.275	0.416	0.286	C2-S1
25	19° 18' 10"	98°27' 08"	0.289	0.138	0.228	C2-S1
26	19° 18' 10"	98°27' 08"	0.085	0.073	0.061	C1-S1
27	19° 02' 36"	98°11' 50"	1.234	2.688	1.538	C3-S1
28	18° 55' 10"	98°08' 03"	1.374	2.706	1.499	C3-S1

LN= Latitud norte

LO= Longitud oeste.

C1-S1= Agua de baja salinidad y bajo contenido de sodio apta para riego.

C2-S1 = Agua con salinidad media y bajo contenido de sodio apta para riego.

C3-S1 = Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.

Estos resultados indican que toda la región productora del Valle de Texmelucan tiene agua de adecuada calidad, apta para riego y en la que no se tienen problemas de sodicidad, solamente en los puntos donde se incorporan aguas residuales como en San Martín Texmelucan y en la Presa Manuel Ávila Camacho podrían causar problemas de salinidad en suelos con baja permeabilidad y en cultivos poco tolerantes a la salinidad. Los resultados concuerdan con Olías, Cerón & Fernández (2005) quienes mencionan que no existe problema con el uso de estas aguas debido a su baja CE ($<0.75 \text{ dS m}^{-1}$) y RAS por lo que pueden usarse en la mayoría de suelos debido a las pocas probabilidades de alcanzar concentraciones peligrosas de sodio intercambiable. Mientras que Levin, Goldstein & Mamedov (2005) mencionan que aguas con baja RAS son óptimas para uso agrícola por su mínima o nula probabilidad de causar salinidad. Los resultados de la RAS obtenidos en este estudio en

los diferentes puntos de muestreo, con valores que fluctuaron de 0.035 (punto 4: San Felipe) a 1.374 (punto 28: Presa Manuel Ávila Camacho), fueron muy similares a los de la RASc, cuyos valores oscilaron de 0.036 (punto 20: Teotlatzingo) a 1.538 (punto 27: Puebla de Zaragoza). Sin embargo, en todos los casos difirieron significativamente de los valores de la RASaj, (en el rango de 0.063, en el punto 4: San Felipe, hasta 2.706, en el punto 28: Presa Manuel Ávila Camacho), la cual mostró valores muy superiores a las primeras dos variantes del parámetro Relación de Adsorción de Sodio (RAS) (Tabla 5). Lo anterior coincide con lo señalado por García (2012), quien indica que esto mismo también se demostró en estudios realizados por el Laboratorio de Salinidad del USDA.

Conclusiones

De acuerdo con las normas de clasificación de la Comisión Nacional del Agua (DOF, 1989) y considerando los parámetros físico-químicos que se evaluaron en este estudio, el agua proveniente de los afluentes del río Atoyac es, en general, de buena calidad y apta para el riego de hortalizas y flores de corte que actualmente se cultivan en el Valle de Texmelucan. El uso del agua residual no representa riesgos para la calidad del suelo y su utilización para el riego podría contribuir a una producción agrícola más eficaz y a la puesta en riego de una superficie importante en la región, siempre y cuando se realice un análisis químico de metales pesados más detallado y se complemente el estudio con análisis microbiológicos. La calidad de estas aguas superficiales y su composición química de todos los elementos son el reflejo de los minerales con los que están en contacto debido a procesos como el intemperismo, sobresaliendo particularmente los altos niveles de Ca^{2+} y Mg^{2+} . A la fecha, la concentración iónica de sodio (Na^+) en el agua de los afluentes del río Atoyac no ha sido suficiente para causar problemas de sodicidad. La concentración de SO_4^{-2} se considera un aporte nutrimental significativo para los cultivos hortícolas y ornamentales. El agua de pozos profundos es apta para su uso en la agricultura, ya que las concentraciones de iones específicos (potencialmente tóxicos), como Cl^- y B , a la fecha no han afectado a los cultivos establecidos en el Valle

de Texmelucan. Respecto a la relación de adsorción de sodio (RAS), tanto la calculada RASc como la corregida RAS^o dieron valores más reales que la RASaj ajustada.

Referencias

American Public Health Association APHA. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, USA: APHA-AWWA-WEF.

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1989). *La calidad del agua y su uso en la agricultura*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization.

Bower, C. A., & Wilcox, L. V. (1965). Precipitation and solition of calcium carbonate in irrigation operations. *Soil Sci. Soc. Am.*, 29, 93-94.

Buyatti, M., & Pilatti, R. A. (1997). Influence of irrigation with bicarbonates and low relation Ca/Mg water on the production of tomato seedling. *Revista FAVE*, 11.

Can Chulin, A., Ramirez, C. A., Ortega-Escobar, H. M., Trejo, L. C., & Cruz, J. D. (2008). Evaluacion de la relación adsorción de sodio en las aguas del río Tulancingo, Estado de Hidalgo, Mexico. *Terra Latinoamericana*, 26, 243-252.

Castellanos-Ramos, J. Z. (2015). La calidad del agua para fertirriego. *Intagri*, 6.

Cortés-Jiménez, J. M., Troyo-Diéguez, E., Murillo-Amador, B., García-Hernández, J. L., Garatuza-Payán, J., & Lee, S. S. (2008). Índices de la calidad del aguadel acuífero del Valle del Yaqui, Sonora. *Terra Latinoamericana*, 27, 133-141.

Cortés-Jiménez, J. M., Troyo-Diéguez, E., & Garatuza-Payán, J. (2009). *Correlación entre indicadores de la calidad del agua para uso agrícola*. (Vol. Folleto técnico 66). Centro de Investigación Regional del Noroeste. Campo Experimental Valle del Yaqui. Cd. Obregón, Sonora, México.: INIFAP.

De Pascale, S., & Barbieri, G. (1995). Effects of soil salinity from long-term irrigation with saline-sodic water on yield and quality of winter vegetable crops. *Sci. Hortic.*, 64(1195), 145-157.

Diario Oficial de la Federación (DOF). (13 de Diciembre de 1989). Diario Oficial de la Federación. Recuperado el 22 de Julio de 2015, de

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989

Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., Greenberg, A. E., & Franson, M. H. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, USA: American Public Health Association.

García, E. (2004). *Changes to the Köeppen climate classification system* (Vol. 5a). D.F, México: Books series.

García, O. A. (2012). *Criterios modernos para la evaluación de la calidad del agua para riego (Segunda parte)*. (Vol. Segunda parte). International Union of Soil Sciences (IUSS).

Glover, C. R. (1993). *Irrigation water classification systems*. New Mexico, USA: Cooperative Extension Service. New Mexico State University.

González-Pérez, E., Carrillo-Salazar, J. A., García de los Santos, G., Yáñez-Morales, M. J., & Juárez-Muñoz, J. (2011). A study of development, flower quality and fertilization in gladiolus (*Gladiolus grandiflorus* Hort.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34, 277-283.

Greenberg, A. E., Clesceri, L. S., & Eaton, A. D. (1992). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. . Washington, USA: American Public Health Association.

Kowalska, I., & Sady, W. (2003). Effects of different sulphate levels at the root zone on the concentration of mineral compounds in the leaves of greenhouse tomato grown on NFT. *Acta Hort*, 604(2), 499-504.

Letey, J., Sojka, E. R., Upchurch, R. D., Cassel, K. D., Olson, K. R., Payne, W. A. & Triplett, G. B. (2003). Deficiencies in the soil quality concept and its application. *Journal Soil Water Conservation*, 58(4), 180-187.

Levy, G., Goldstein, D., & Mamedov, A. I. (2005). Saturated hydraulic conductivity of semiarid soils: Combined effects of salinity, sodicity and rate of wetting. *Soil Science Society American Journal*, 69, 653-662.

Olías, M., Cerón, J. C., & Fernández, E. I. (2005). Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del U.S. Laboratory Salinity (USLS). *Geogaceta*, 37, 111-113.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: Beneficios para todos* (Vol. 29). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

- Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). *Methods of soil analysis* (Vol. No. 9). Wisconsin, USA: Agronomic.
- Paliwal, K. V., & Gandhi, A. P. (1976). Effect of salinity, SAR, Ca:Mg ratio in irrigation water and soil texture on the predictability of exchangeable sodium percentage. *Soil Science*, 122, 85-90.
- Ramírez, M., Ortega-Escobar, H. M., Rodríguez, J. L., Ramírez-Ayala, C., & Rone, J. L. (1989). Determinación experimental de la capacidad germinativa de algunos cultivos agrícolas en soluciones salinas de diferente concentración total y composición cualitativa. *Agrociencia*, 78, 249-264.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A., & Mashali, A. M. (1992). *The use of saline waters for crop production* (Vol. Paper No. 48). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Richards, L. A. (1982). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos* (Vol. 6ta). California, USA: Limusa.
- Rodier, J. (1978). *Análisis de las aguas*. Barcelona, España: Omega.
- Römheld, V. (2002). Boron in plant biology. *Plant Biology*, 4, 211-229.
- Suarez, D. L. (1981). Relation between pHc and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternate method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 45, 469-475.
- Torres, H. A., & Acevedo, H. E. (2008). El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en el Valle de Lluta y Azapa en el norte de Chile. *Idesia*, 31-44.