

Calidad del agua subterránea para uso agrícola en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, México

Groundwater quality for agricultural use in Zacoalco de Torres and Autlan de Navarro, Mexico

Oscar Raúl Mancilla-Villa^{1*}, Blanca Noemy Anzaldo-Cortes²,
Rubén Darío Guevara-Gutiérrez², Omar Hernández-Vargas¹, Carlos Palomera-García³,
Yerena Figueroa-González³, Héctor Manuel Ortega-Escobar⁴, Héctor Flores-Magdaleno⁴,
Álvaro Can-Chulim⁵, Elia Cruz-Crespo⁵, Edgar Iván Sánchez-Bernal⁶,
José Luis Olguín-López² e Isabel Mendoza-Saldivar⁷

¹ Departamento de Producción Agrícola (CUCSUR); ² Ingeniería en Recursos Naturales y Agropecuarios (CUCSUR); ³ Departamento de Ciencias de la Salud y Ecología Humana (CUCSUR). Centro Universitario de la Costa Sur (CUCSUR), Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional 151, Centro. 48900 Autlán de Navarro, Jalisco, México.

* Autor para correspondencia (oscar.mancilla@academicos.udg.mx)

⁴ Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

⁵ Unidad Académica de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela km 9. 63780 Xalisco, Nayarit, México.

⁶ Universidad del Mar, Campus Puerto Ángel. Ciudad Universitaria Puerto Ángel Distrito de San Pedro Pochutla. 70902 San Pedro Pochutla, Oaxaca, México.

⁷ Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo (ITESA). Carretera Apan-Tepeapulco, Las Peñitas. 43900 Apan, Hidalgo, México.

RESUMEN

En México una de las principales fuentes de abastecimiento del riego agrícola es el agua subterránea, irrigando aproximadamente dos millones de hectáreas, aporta 75% del volumen de agua en zonas rurales y urbanas a nivel nacional. Estos recursos hídricos se han visto afectados por contaminantes provenientes de desechos industriales y residuales, así como el lixiviado de sustancias químicas en suelos agrícolas. Con la finalidad de evaluar las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas, se realizó el presente estudio en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro. Se realizaron muestreos en la temporada seca y lluviosa en 2017. Los sitios de muestreo fueron pozos profundos y norias. En total se obtuvieron 48 muestras correspondientes a las dos estaciones; en cada muestra se analizaron pH, aniones y cationes, conductividad eléctrica (CE), carbonato de sodio residual (CSR), relación de adsorción de sodio (RAS), así como la clasificación hidrogeoquímica. Las aguas subterráneas de Zacoalco son en su mayoría aguas

cloradas-magnésicas y en Autlán bicarbonatadas-magnésicas, con concentraciones medias y bajas, por lo que se consideran recomendables para el riego. Con respecto a la salinidad Zacoalco presenta 40% aguas de alta salinidad en secas y 66% aguas de media salinidad en lluvias; Autlán presenta 75% aguas de alta salinidad en secas, y en lluvias 75% aguas de media salinidad, por lo que su uso presenta restricciones moderadas.

Palabras clave: carbonato de sodio residual, relación de adsorción de sodio, hidrogeoquímica, aniones, cationes.

SUMMARY

In Mexico, one of the main sources of agricultural irrigation supply is groundwater, irrigating approximately two million hectares of land and also providing 75% of water volume in rural and urban areas nationwide. However, these water resources have been largely affected by pollutants from industrial waste, as well as leaching

Cita recomendada:

Mancilla-Villa, O. R., Anzaldo-Cortes, B. N., Guevara-Gutiérrez, R. D., Hernández-Vargas, O., Palomera-García, C., Figueroa-González, Y., Ortega-Escobar, H. M., Flores-Magdaleno, H., Can-Chulim, A., Cruz-Crespo, E., Sánchez-Bernal, E. I., Olguín-López, J. L. y Mendoza-Saldivar, I. (2021). Calidad del agua subterránea para uso agrícola en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, México. *Terra Latinoamericana* 39: 1-12. e745. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.745>

Recibido: 21 de febrero de 2020. Aceptado: 17 de noviembre de 2020.
Artículo. Volumen 39, marzo de 2021.

of chemical substances in agricultural soils. To assess the physicochemical characteristics of groundwater, this study was performed in Zacoalco de Torres and Autlan de Navarro, which are located in areas of the agricultural valley and thus influenced by agricultural and urban activities. Samples were collected in the dry and rainy seasons in 2017. The sampling sites were deep wells and water wheels. In total 48 samples were obtained corresponding to the two stations. In each sample, the following parameters were analyzed: pH, anions and cations, electric conductivity (EC), residual sodium carbonate (RSC), sodium adsorption ratio (SAR), as well as hydrogeochemical classification. The underground waters of Zacoalco are mostly chlorinated-magnesium waters and in Autlan bicarbonate-magnesium with medium and low concentrations, so they are recommended for irrigation; with respect to salinity Zacoalco has 40% high salinity waters in dry and 66% medium salinity waters in rains; Autlan has 75% high salinity waters in dry and 75% medium salinity waters, so its use shows moderate restrictions.

Index words: residual sodium carbonate, sodium adsorption ratio, hydrogeochemistry, anions, cations.

INTRODUCCIÓN

México presenta contrastes y carencias respecto al agua, tanto en calidad como en cantidad, la disponibilidad y cuantía son importantes para satisfacer las necesidades sociales, puesto que es una condición necesaria para hacer viable el desarrollo social, económico y ambiental (Mancilla-Villa, 2012¹). La problemática de la degradación, por efectos antropogénicos, en lo que respecta al estado de calidad y cantidad del recurso hídrico superficial y subterráneo, es motivo de gran preocupación. Hasta hace algunos años fue poco investigada y se consideraba poco susceptible a la polución; en la actualidad se conoce que su contaminación es originada por políticas de explotación nacional e inclusive mundial, filtración de aguas que contienen contaminantes provenientes de desechos industriales o por lavado de sustancias en suelos agrícolas (Cardona *et al.*, 1992).

La Comisión Nacional del Agua considera que la insuficiencia en algunas zonas del agua subterránea, es debido al aumento poblacional y a su aplicación indiscriminada en los diferentes usos que propicia un suministro continuo de aguas subterráneas, provocando sobreexplotación y disminución de la calidad natural del recurso hídrico (CONAGUA, 2008). En México tan solo en 2001 el número de acuíferos sobreexplotados osciló anualmente entre 100 y 106 pozos, para diciembre de 2013 se reportaron 106 acuíferos sobreexplotados; de los cuales se extrae 55.2% del agua subterránea y en los cuales la extracción sobrepasó 10% de su recarga natural (CONAGUA, 2014). Can-Chulim *et al.* (2014) mencionan que de la extracción depende el desarrollo de la actividad agrícola, independientemente de su adaptabilidad de su uso, y a su concentración de iones específicos. Mancilla-Villa *et al.* (2014) mencionan que dependiendo del tipo y la cantidad de sales que estén presentes en el agua, estos propiciarán que la calidad del recurso varíe de una clasificación a otra. Para la calidad de aguas subterráneas, el contenido de sales y otros iones específicos son de gran importancia, debido a que permite su clasificación en aguas dulces, ligeramente salobres, salobres y salinas; en resumen, el estado óptimo o calidad del agua está relacionada con las diferentes concentraciones en el aspecto químico y mineralógico.

En el caso del recurso hídrico para riego, la condición de calidad mala se produce por adición de sales a los suelos (salinización), filtración de aguas contaminadas en el suelo y por toxicidad ocasionada por metales pesados y iones; esto ocasiona afectaciones fisiológicas a las plantas, provocando bajo rendimiento de las cosechas (Mancilla-Villa, 2012¹). Se debe de tener en cuenta las condiciones físicas y el tipo de suelos, la mineralogía, el cultivo que se establecerá y sus requerimientos nutricionales, para conocer las necesidades de las diferentes plántulas o restringir la plantación y producción de cultivos, y para no contribuir a la contaminación del suelo (García, 2012).

La calidad del agua se define por el uso específico al cual se destinará el recurso hídrico, en este sentido el agua subterránea para riego agrícola se pondera en importancia las concentraciones de CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , y con una menor relevancia en algunos estudios se adhieren a la determinación de N, P

¹ Mancilla-Villa, O. R. 2012. Índices de salinidad y calidad de aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz. (Tesis de Doctorado). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México.

y B⁺ (Massone y Martínez, 2008; Mancilla-Villa, 2012¹; Martínez y Osterrieth, 2013). Caracterizar el contenido iónico de las aguas subterráneas que se destinaron para uso en riego agrícola, proporciona la información necesaria para inferir las posibles problemáticas, tanto en los cultivos como en los suelos agrícolas, ya que algunos cultivos son más susceptibles a sufrir daños fisiológicos por el contenido de iones y sales presentes en el recurso hídrico, esto además de dañar los cultivos, genera salinización de suelos y por ende pérdidas económicas para los productores (Doneen, 1975; Can-Chulim *et al.*, 2014; Mancilla-Villa *et al.*, 2014). En el estado de Jalisco se tienen 59 acuíferos, de los cuales 33 se encuentran con baja disponibilidad y 26 están sobreexplotados, con un déficit del orden de 343.69 hectómetros cúbicos, aunado a esta problemática de sobreexplotación y déficit, los estudios sobre la calidad del agua subterránea para riego agrícola son muy pocos (Ramos-Olmos *et al.*, 2003; CONAGUA, 2015). En este sentido, el principal objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad del agua subterránea que se destina para uso en riego agrícola con la finalidad de generar conocimiento respecto al uso de las aguas analizadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

Según la Comisión Estatal del Agua del Estado de Jalisco (CEA, 2015) el municipio de Zacoalco de Torres Jalisco está situado al sureste del estado, en las coordenadas geográficas 20° 01' 30" a 20° 21' 05" N y 103° 30' 30" a 103° 41' 25" O; con altitud promedio de 1354 m. Presenta clima semiárido cálido con precipitación media anual de 828 mm y promedio de temperatura anual de 20.2 °C (Figura 1). El municipio de Autlán de Navarro se encuentra localizado al suroeste del estado entre las coordenadas extremas 19° 34' 30" a 19° 53' 45" N, y 104° 07' 00" a 104° 27' 35" O. Su clima de influencia es semiseco y semicaldo con precipitación media de 719.9 mm, temperatura media anual de 23.5 °C, con altitud promedio de 900 m (H. Ayuntamiento de Autlán de Navarro, 2016²). La zona de estudio se encuentra conformada por suelos feozems, regosoles y cambisoles principalmente; aunque en menor proporción se presentan los vertisoles, luvisoles y litosoles. El origen de estos suelos se debe a la presencia de roca ígnea extrusiva, suelos

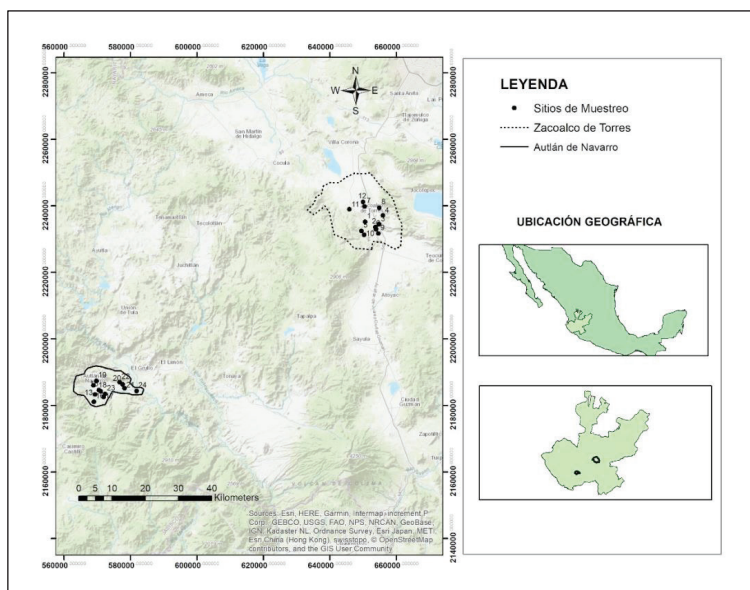


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo en los municipios de Autlán de Navarro y Zacoalco de Torres, Jalisco, México.

Figure 1. Geographical location of the sampling sites in the municipalities of Autlan de Navarro and Zacoalco de Torres, Jalisco, Mexico.

² H. Ayuntamiento de Autlán de Navarro. 2016. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Secretaría General de Gobierno. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM14jalisco/municipios/14015.html> (Consulta: septiembre 20, 2019).

aluviales, roca caliza riolita, andesita y basalto entre otros (CONAGUA, 2018). En el estudio se analizaron 24 pozos de agua, de los cuales 12 se encuentran ubicados en el municipio de Zacoalco de Torres y los restantes se distribuyen sobre el municipio de Autlán de Navarro. Los pozos seleccionados en el municipio de Zacoalco de Torres se encuentran en un área en donde se cultiva alfalfa, caña, aguacate, zarzamora, arándano, higo y limón. En el municipio de Autlán de Navarro los pozos se distribuyen en su mayoría sobre el valle donde se desarrollan actividades agrícolas como el cultivo de caña, hortalizas, rábanos y maíz, entre otros.

Muestreo de Agua y Métodos de Análisis

Para el presente estudio se eligieron 24 sitios de colecta por temporada, 12 sitios se establecieron en el municipio de Zacoalco de Torres y 12 sitios en el de Autlán de Navarro, Jalisco. Estos sitios se ubicaron y eligieron por ser pozos de agua subterránea y norias, la información de estos sitios se obtuvo de las capas de aprovechamientos subterráneos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) en

formato KMZ, y a través del Sistema de Información Geográfica del Agua (SIGA) obtenidos de CONAGUA (2015), todos los sitios fueron georreferenciados mediante GPS (Figura 1).

El muestreo de las aguas subterráneas se llevó a cabo siguiendo los lineamientos de la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015 (Norma Mexicana, 2015), se realizaron dos muestreos de tipo probabilístico aleatorio dirigido, en la estación seca y lluviosa en el año 2017. Para la recolección de las muestras se emplearon frascos de polietileno de alta densidad con capacidad de 500 mL, las metodologías empleadas se presentan en el Cuadro 1.

Parámetros de Calidad

Clasificación hidrogeoquímica y balance de cationes-aniones. Los estudios de hidrogeoquímica sirven para determinar el origen de la composición química del agua y la relación entre el agua y la constitución química de las rocas, el método gráfico más utilizado es el diagrama triangular de Piper y Durov (Can-Chulim *et al.*, 2014). Se entiende por

Cuadro 1. Métodos utilizados para las determinaciones de parámetros químicos y fisicoquímicos en las muestras de agua de pozo colectadas en los municipios de Autlán de Navarro y Zacoalco de Torres, Jalisco, México.

Table 1. Methods used for the determinations of chemical and physicochemical parameters in well water samples collected in the municipalities of Autlan de Navarro and Zacoalco de Torres, Jalisco, Mexico.

Determinación	Método	Referencia
pH	Potenciometría.	Trujillo-Piña <i>et al.</i> , 2014.
Conductividad eléctrica	Conductimetría, mediante conductímetro con puente Wheastone con celda de vidrio.	Rodríguez-Pozueta, 2016; Richards, 1990.
Calcio y magnesio	Volumetría titulación con EDTA y eriocromo negro T como indicador, para Ca+Mg y Murexida para Ca.	González-Peréz, 2016; APHA, 1995.
Sodio y potasio	Flamometría, mediante flamómetro IL Autocal Flame Photometer 643, L=589 nm, calibrado con soluciones estándar de 145 mmol _c L ⁻¹ para Na y de 5 mmol _c L ⁻¹ para K.	BVSDE, 2016; APHA, 1995.
Carbonatos	Volumetría mediante titulación de ácido sulfúrico y fenolfaleína como indicador.	Severiche Sierra <i>et al.</i> , 2013; APHA, 1995.
Bicarbonatos	Volumetría mediante titulación de ácido sulfúrico y anaranjado de metilo como indicador.	APHA, 1995.
Cloruros	Volumetría titulación con nitrato de plata y cromato de potasio al 5% como indicador.	González-Peréz, 2016; APHA, 1995.
Sulfatos	Turbidimetría, mediante el espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, L = 420 nm.	Ucroz-Peréz, 2014; APHA, 1995.

composición química al conjunto de sustancias (generalmente inorgánicas) incorporadas al agua por procesos naturales, la composición química del agua subterránea natural se define a partir de los análisis de muestras recogidas adecuadamente, y se cuantifica por medio de la concentración de cada constituyente analizado (Freeze y Cherry, 1979). Como constituyentes mayoritarios o fundamentales se consideran los siguientes: Aniones: ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$), Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y Cationes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ (García-Hidalgo, 2015).

Conductividad eléctrica. La concentración total de sales solubles, para fines de diagnóstico y clasificación, se pueden expresar en términos de conductividad eléctrica y, de acuerdo con Richards (1990) se dividen en cuatro: agua de salinidad baja (C1: $< 250 \text{ mS cm}^{-1}$), agua de salinidad media (C2: $250\text{-}750 \text{ mS cm}^{-1}$), agua de salinidad alta (C3: $750\text{-}2250 \text{ mS cm}^{-1}$) y agua de salinidad muy alta (C4: $> 2250 \text{ mS cm}^{-1}$) (Pérez-León, 2011; Can-Chulim *et al.*, 2014). La salinidad se evalúa mediante los índices de conductividad eléctrica, y en algunas ocasiones se emplean índices de salinidad efectiva y salinidad potencial (Pérez-León, 2011). La conductividad eléctrica es uno de los índices más frecuentes para analizar el riesgo de salinización, basándose como tal en la propiedad de conducir corriente eléctrica cuando existen iones disueltos (Mancilla-Villa, 2012¹). En lo referente al potencial de hidrogeno (pH), el agua se puede clasificar según Steiner (1968) en: fuertemente ácida < 5 , moderadamente ácida 5.1-6.5, neutra 6.6-7.3, medianamente alcalina 7.4 a 8.5 y fuertemente alcalina > 8.5 . Para utilizar el recurso hídrico en el riego agrícola se recomiendan valores que oscilen entre 5.5 y 6.5 ya que la mayoría de los iones se encontrarán disponibles para la planta (Silva-García *et al.*, 2006; Ortiz-Vega *et al.*, 2019).

La relación de adsorción de sodio (RAS). Las concentraciones de sodio en el recurso hídrico se clasifican empleando el RAS con respecto a las concentraciones iónicas (CE), mediante el diagrama propuesto por Richards (1990); dicha clasificación se basa en los efectos que posee el ion sodio que se absorbe por el suelo sobre sus condiciones físicas, esta relación infiere el efecto del sodio del agua de riego, que pasará a formar parte del suelo. Con base al contenido de sodio (RAS) el agua para riego se puede clasificar en cuatro clases: agua baja en sodio (S1), agua media en sodio (S2), agua alta en sodio (S3) y agua muy alta en sodio (S4) (Can-Chulim *et al.*, 2008; Pérez-León, 2011).

El RAS se calcula mediante la siguiente ecuación, en sus valores originales sin considerar variaciones en las concentraciones de calcio y de magnesio:

$$\text{RAS} = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]}{2}}}$$

dónde:

Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se refieren a las concentraciones de los cationes solubles expresados en mEq L^{-1} .

El carbonato de sodio residual (CSR). Autores como Richards (1990) recomiendan que, al evaluar la calidad del agua, se debe considerar la concentración de bicarbonatos con relación a la concentración de Ca y Mg. Dado que en el agua con altas concentraciones de iones bicarbonato existe la tendencia del calcio y del magnesio a precipitarse en forma de carbonatos, a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada (Can-Chulim *et al.*, 2014). Eaton (1950) usa el término carbonato de sodio residual (CSR) al referirse a dicha reacción. Este índice se calcula con la siguiente fórmula, donde todos los constituyentes iónicos se expresan en mEq L^{-1} .

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

Agua con valor < 1.25 se clasifica como de buena calidad para uso agrícola, entre 1.25 y 2.5 como condicionada y > 2.5 como no recomendable (Richards, 1990). Cuando la diferencia es negativa, no existe problema alguno y el valor de CSR puede inferirse como igual a cero. Cuando el valor es positivo, muestra que Ca y Mg se precipitarán como carbonatos, existiendo solo sales de sodio en la solución (Can-Chulim *et al.*, 2014).

Análisis estadístico. Se utilizó el programa SPSS V 25.0, se llevó a cabo una prueba de varianza de medias (ANOVA), para comparar los resultados de las determinaciones de los parámetros analizados entre las dos temporadas de muestreo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación hidrogeoquímica. La distribución iónica permite observar, con mayor claridad, el predominio de los iones en las muestras de agua subterránea en cada sitio de muestreo realizado en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro en la estación seca (Figura 2) y lluviosa (Figura 3) de 2017.

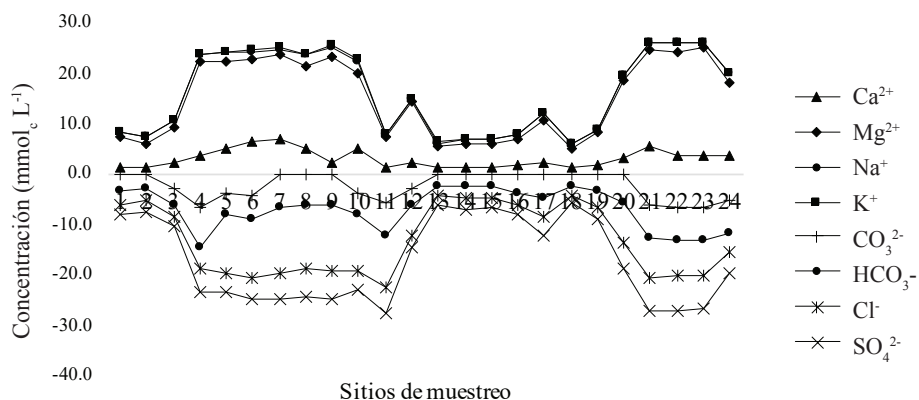


Figura 2. Distribución catiónica y aniónica de las aguas subterráneas de Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro en la temporada seca, Jalisco, México.

Figure 2. Cationic and anionic groundwater distribution in the dry season in Zacoalco de Torres and Autlan de Navarro, Jalisco, Mexico.

Además, se observa que el equilibrio electrolítico, entre aniones y cationes, es correcto debido a la diferencia de concentración menor a 2%. En la composición iónica, respecto a los aniones predominó el ion cloruro (Cl^-), mientras que en los cationes predominó el ión magnesio (Mg^{2+}). Se observó que en las primeras muestras de cada municipio las concentraciones de cationes y aniones es baja, mientras que en las siguientes muestras la concentración es alta y variada, sin sobrepasar 30 mmol L^{-1} . El ion que presenta la concentración más alta es el magnesio, solo se encontraron diferencias significativas entre las temporadas de muestreo para los Cl^- ($F = 30.59$; $P = 0.01$) y los SO_4^{2-} ($F = 16.73$; $P = 0.02$).

Por otra parte, en el periodo de lluvia, para Zacoalco y Autlán, en cuanto a cationes el ion que presentó la concentración más alta fue el magnesio, seguido de calcio, sodio y potasio.

La clasificación de las aguas que desarrollan diferentes tipos de salinización se numeran en: 1. Clorhídricas, 2. Sulfático-clorhídricas, 3. Clorhídricas-sulfáticas, 4. Sulfáticas, 5. Sulfáticas-sódicas, de tal manera que la salinidad se relaciona con el contenido y predominio de los iones mayoritarios en disolución (Mancilla-Villa, 2012¹; Herrera-Apablaza *et al.*, 2018). En este caso, la composición de las aguas subterráneas de Zacoalco como Autlán se clasifican como magnésicas-clorhídricas. Mancilla-Villa *et al.*, 2017) realizaron

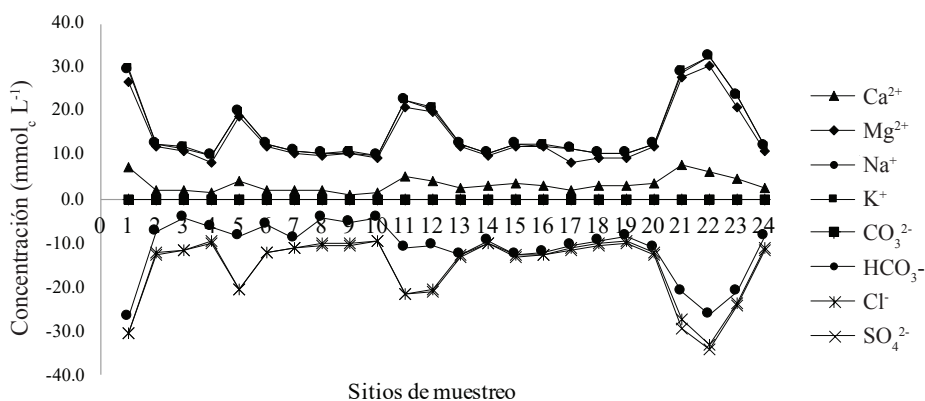


Figura 3. Distribución catiónica y aniónica de las aguas subterráneas de Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro en la temporada lluviosa, Jalisco, México.

Figure 3. Cationic and anionic groundwater distribution in the rainy season in Zacoalco de Torres and Autlan de Navarro, Jalisco, Mexico.

un estudio en aguas superficiales en el río Ayuquila-Tuxcacuesco-Armería, en el cual encontraron que las concentraciones de cationes y aniones fueron relativamente bajas ya que no sobrepasó 30 mmol_c L⁻¹; sin embargo, el catión predominante es el magnesio y como anión los sulfatos, seguido de los bicarbonatos y los cloruros. Además, mencionan que la mayoría de las muestras que presentaron concentraciones iónicas altas corresponden a pozos y norias. Atribuyen estas concentraciones a las aguas que están en contacto con materiales de origen volcánico, ya que son de baja concentración iónica y por lo tanto de baja solubilidad. El magnesio lo atribuyen a los minerales ferromagnesianos constituidos por basaltos, entre los que se encuentran los piroxenos (Al, Mg, Fe, Mn, Cr, Sc, Ti) (Si, Al)₂O₆, los cuales son removidos por el agua originando la presencia de magnesio en solución. **Conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH.** En el Cuadro 2, se muestra la clasificación de acuerdo a la CE (µS cm⁻¹) y sólidos totales disueltos (STD), de las aguas subterráneas de Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro en ambos periodos de muestreo. En el Cuadro 2 se observa que la mayoría de las aguas subterráneas tanto en Zacoalco como en Autlán, se clasifican en aguas de salinidad alta, teniendo una variación entre 0.5-1.5 g L⁻¹ de sales en las aguas y C.E. de entre 750 a 2250 µmhos cm⁻¹, esto significa como

tal, un riesgo alto de salinización de suelos, así como la restricción al establecimiento de cultivos sensibles; por lo que será necesario optar por cultivos tolerantes a las sales que componen el agua subterránea. No se encontraron diferencias significativas en los valores de C.E. entre las temporadas de muestreo (F = 0.17; P = 0.60). Pérez-Díaz (2018³) menciona que las sales en el agua son originadas a partir de procesos de intemperismo de los minerales y rocas y se encuentran dentro la composición de la corteza terrestre, y son las que pasan a formar parte de las soluciones acuosas, y que posteriormente son transportadas como agua de riego produciendo la salinización de los suelos. Además, menciona que los cloruros, nitratos, sulfatos y carbonatos de iones alcalinotérreos, son las sales que se forman con mayor facilidad como consecuencia del intemperismo. Con base en lo anterior, la salinidad de las aguas subterráneas de los municipios se atribuye a la composición iónica predominante, originada por procesos de intemperismo de las rocas como depósitos minerales en abundancia del subsuelo de los municipios, así como la lixiviación por productos agrícolas en los mantos acuíferos. En cuanto al pH, se encontró en las aguas valor promedio de 7.7 lo que las clasifica como ligeramente alcalinas, se encontraron diferencias significativas entre ambas temporadas de muestreo (F = 27.2; P = 0.01).

Cuadro 2. Clasificación de las aguas subterráneas de acuerdo con la conductividad eléctrica (CE) y sólidos totales disueltos (STD) de Zacoalco y Autlán de Navarro, Jalisco, México.

Table 2. Groundwater classification according to electrical conductivity (CE) and total dissolved solids (STD) in Zacoalco and Autlan de Navarro, Jalisco, Mexico.

Clasificación	CE a 25 °C	Concentraciones de sal	Localidad			
			Zacoalco		Autlán	
	µmhos cm ⁻¹	g L ⁻¹	Número de muestras			
			S	LL	S	LL
C1: Agua de salinidad baja	0 - 250	< 0.2	3	0	0	0
C2: Agua de salinidad media	250 - 750	0.2 - 0.5	4	8	3	9
C3: Agua de salinidad alta	750 - 2250	0.5 - 1.5	5	4	9	3
C4: Agua de salinidad muy alta	> 2250	1.5 - 3.0	0	0	0	0

S = temporada seca; LL = temporada lluviosa.
S = dry season; LL = rainy season.

³ Pérez-Díaz, J. P. 2018. Calidad agronómica del sistema hidrográfico Lerma-Santiago-Pacífico y de las aguas que riegan el valle del Mezquital, Hidalgo. (Tesis de Doctorado). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 469 pp.

Relación adsorción de sodio. Como resultado de los dos muestreos de 2017, en la temporada seca 100% de la clasificación de las aguas de acuerdo al RAS corresponden a S1 (aguas bajas en sodio). Mientras, para la temporada de lluvia en Zacoalco y Autlán, una muestra se clasificó en agua media en sodio. Se explica que la relación de las composiciones iónicas, presentan concentraciones importantes de magnesio y calcio en comparación a las del sodio. Por lo que las aguas subterráneas de ambos municipios, pueden usarse en casi todos los suelos, sin riesgo de que el nivel del sodio de intercambio se eleve. Es posible que las concentraciones bajas del sodio en las aguas subterráneas de los municipios estén directamente relacionadas con la composición del subsuelo, es decir no existe en gran abundancia depósitos minerales de este compuesto. Osicka y Giménez (2004), a diferencia de lo anterior, mencionan que las aguas subterráneas y los ríos superficiales de tierras bajas, presentan niveles más altos de sodio; mientras que, en tierras altas, muestran contenidos relativamente bajos y lo atribuyen a la abundancia de depósitos minerales o donde ha habido contaminación por filtración salina. En los dos muestreos realizados, la clasificación de las aguas subterráneas de acuerdo al RAS corresponde a S1 a

diferencia que en el periodo de lluvias dos muestras son de S2; es decir, que en su mayoría corresponden a aguas bajas en sodio. En la Figura 4a y b, se presenta la clasificación de las aguas de riego de acuerdo al contenido de sodio y conductividad eléctrica en los dos periodos de muestreo. En ambas figuras se observa que el riesgo de sodificación disminuye a medida que se incrementa la CE del agua.

En general, las aguas subterráneas de los municipios presentaron bajos niveles de sodio en los dos periodos muestreados, considerándose aptas para el riego con escasa probabilidad de alcanzar altos niveles de sodio en los suelos. En cuanto a la salinidad, la mayoría de las aguas se clasificaron como C2, de salinidad media, es decir, que las aguas subterráneas de los municipios pueden usarse para riego, cuando haya una constante irrigación de suelo y se tengan cultivos moderadamente tolerantes a las sales. Para aquellos sitios que se concentraron en la clasificación C1, son aguas de baja salinidad, por lo que pueden usarse en la mayoría de los cultivos y tipos de suelo, con un riesgo mínimo de salinización, con respecto a las muestras que se clasificaron en C3, éstas son aguas altamente salinas no apropiadas para el riego, por lo que es necesario tomar en cuenta plantas tolerantes a muy

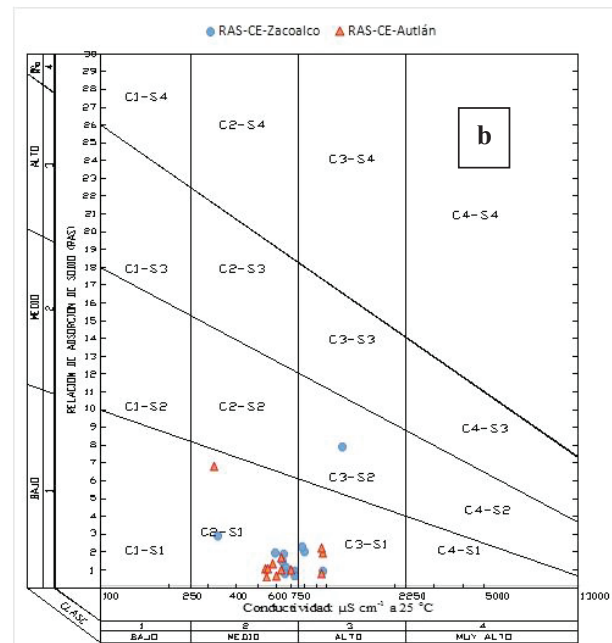
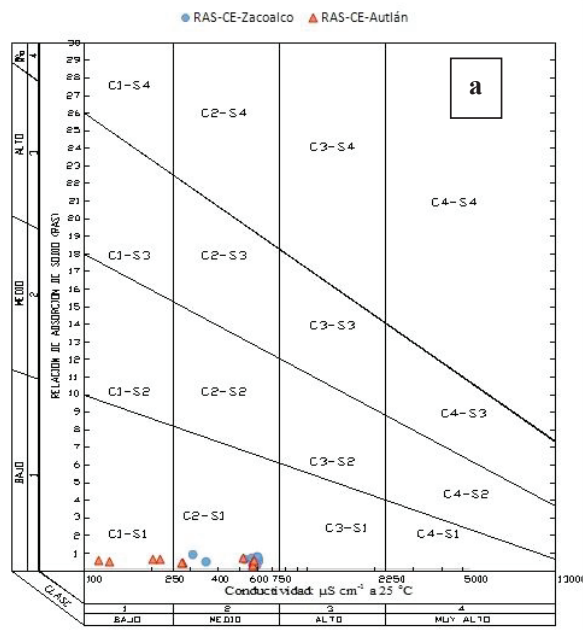


Figura 4 (a) y (b). Diagrama de clasificación de las aguas subterráneas para riego en ambos periodos de muestreo en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, Jalisco, México.

Figure 4 (a) and (b). Diagram of groundwater classification for irrigation in both sampling periods in Zacoalco de Torres and Autlan de Navarro, Jalisco, Mexico.

tolerantes a la salinidad (Richards, 1990; Can-Chulim *et al.*, 2011; Mancilla-Villa, 2012¹), por ejemplo tomate, trigo, sorgo, alfalfa y cebada (Can-Chulim *et al.*, 2011). Can-Chulim *et al.* (2011) realizaron un estudio en agua subterránea de la cuenca Oriental de México, encontrando en la mayoría de las muestras la clasificación C2-S1 (aguas de salinidad media, baja en sodio), enseguida de C1-S1 (aguas de baja salinidad, baja en sodio) y C3-S1 (aguas altamente salinas, medias en sodio) y menciona que las aguas que son de alta salinidad y mediana en sodio su uso debe ser condicionado y no debe utilizarse en suelos donde el drenaje es deficiente, pero puede usarse con especies vegetales tolerantes a la salinidad.

Carbonato de sodio residual. En la Figura 5a y b, se presenta la clasificación de las aguas subterráneas de Zacoalco y Autlán con base en el carbonato de sodio

residual (CSR) expresada en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, para ambas temporadas de muestreo.

De acuerdo con el índice de carbonato de sodio residual, 100% de las muestras analizadas en los periodos establecidos, presentan clasificaciones buenas, para las aguas subterráneas del municipio de Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, debido a que exhibieron valores menores a 0, cuyo límite no supero a lo establecido para evaluar criterios de sodicidad mencionados por Can-Chulim *et al.* (2014). Por lo tanto, se concluye que las aguas subterráneas de las dos áreas de estudio son buenas y aptas para el riego agrícola, sin provocar peligros de sodicidad en el suelo (Can-Chulim *et al.*, 2011; López-García *et al.*, 2016). Almeida y Gisbert (2006), realizaron un estudio de calidad de agua de riego en un huerto de cítricos en España y encontraron valores de CSR menores a 0, y en la cual menciona

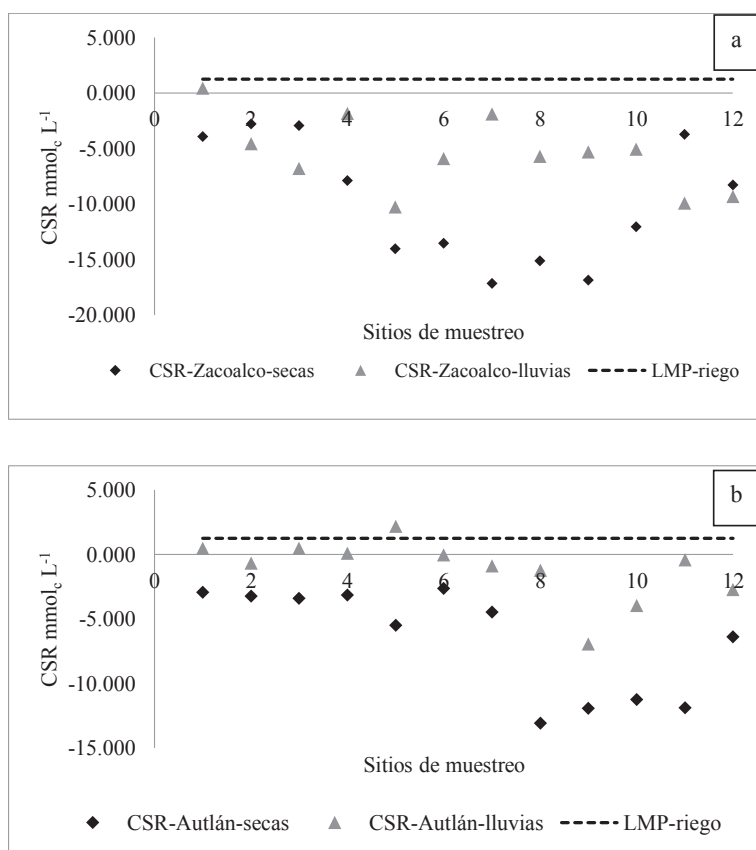


Figura 5 (a) y (b). Clasificación de las aguas subterráneas de acuerdo al índice de carbonato de sodio residual (CSR) en ambas temporadas de muestreo en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, Jalisco, México.

Figure 5 (a) and (b). Groundwater classification according to the residual sodium carbonate index (CSR) in both sampling seasons in Zacoalco de Torres and Autlan de Navarro, Jalisco, Mexico.

ser apta para riego agrícola sin causar problemas de sodicidad en el suelo, resultados que coinciden con lo obtenido en las muestras de agua subterránea de los municipios de Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro.

CONCLUSIONES

Las aguas subterráneas de Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro en ambas temporadas de muestreo, en cuanto al pH presentan aguas ligeramente alcalino-neutras, y presentan variabilidad en la dispersión de los datos.

La conductividad eléctrica (CE) en temporada secas y lluviosa presenta un promedio de $823 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $680 \mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente, esto indica que las muestras son de salinidad media. La desviación estándar es de $271.24 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $191.29 \mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente, los cuales señalan que la dispersión de los datos respecto a la media, presentan valores relativamente bajos.

En la composición iónica de las aguas subterráneas muestreadas en las dos temporadas, de Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, se clasifican como magnésicas-clorhídricas y bicarbonatadas-magnésicas.

En cuanto a CE y sólidos totales disueltos, la mayoría de las aguas subterráneas en ambos municipios en las dos temporadas muestreadas, se clasifican como aguas de salinidad alta, y presentan entre $0.5\text{-}1.5 \text{ g L}^{-1}$ de sales en las aguas, por lo que existe un riesgo alto de salinización de suelos, así como la restricción al establecimiento de cultivos sensibles.

En cuanto a la relación de adsorción de sodio; en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, en la temporada seca, 100% de las muestras se consideran como bajas en sodio. Mientras que en la temporada de lluvia dos sitios se clasificaron en aguas medias en sodio, por lo tanto, las aguas no presentan riesgo de que el nivel del sodio de intercambio se eleve.

Para la relación de adsorción de sodio (RAS) y CE, en ambas temporadas muestreadas Zacoalco y Autlán en la mayoría de las muestras presentan aguas de media salinidad y baja sodicidad (C2-S1), y en menor cantidad aguas de alta salinidad y baja sodicidad (C3 S1 y S2).

Las aguas subterráneas de las dos áreas de estudio en cuanto al índice de carbonato residual son buenas y aptas para el riego agrícola, sin provocar peligros de sodicidad en el suelo.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

En la presente investigación, no se involucran humanos o tejido humano, no se involucran animales o tejidos animales; por lo tanto “No aplicable en esta sección”.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados o analizados durante el estudio actual no están disponibles públicamente debido [Se están trabajando en un proyecto macro del cual forma parte este artículo] pero están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

Las fuentes de financiamiento recibidas en esta investigación fueron otorgadas por las instituciones de adscripción de los autores.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: O.R.M.V., H.M.O.E., Á.C.Ch. y E.I.S.B. Metodología: H.F.M., R.D.G.G., O.H.V. y C.P.G. Investigación: B.N.A.C., O.R.M.V. y E.C.C. Curación de datos: O.H.V. e I.M.S. Escritura: preparación del borrador original: O.R.M.V., O.H.V. y Y.F.G. Escritura: revisión y edición: O.R.M.V. y O.H.V. Adquisición de fondos: Todos los autores.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Guadalajara (CUCSUR), al Colegio de Postgraduados (Campus Montecillo), a la Universidad Autónoma de Nayarit, a la Universidad del Mar, Oaxaca y al Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo.

LITERATURA CITADA

- Almeida, O. A. y J. M. Girbert. 2006. Variación en la calidad del agua de riego en un huerto de cítricos. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.* 10: 64-69. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000100010>.
- APHA (American Public Health Association). 1995. Standard methods for examination of water and wastewater. American Public Health Association. Washington, DC, USA.
- BVSDE (Biblioteca Virtual en Salud y Desarrollo Sostenible). 2016. Espectrofotómetro. Organización Panamericana de la Salud. Washington, DC, USA. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/laboratorio/cap11.pdf> (Consulta: noviembre 28, 2019).
- Can-Chulim, A., C. Ramírez Ayala, M. Ortega Escobar, C. Trejo López y J. Cruz Díaz. 2008. Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del río Tulancingo, estado de Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana* 26: 244-247.
- Can-Chulim, A., H. M. Ortega-Escobar, N. E. García-Calderón, A. L. Reyes-Ortigoza, V. A. González-Hernández y D. Flores-Román. 2011. Origen y calidad del agua subterránea en la cuenca oriental de México. *Terra Latinoamericana* 29: 189-200.
- Can-Chulim, A., H. M. Ortega-Escobar, E. I. Sánchez-Bernal y E. Cruz-Crespo. 2014. Calidad de agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México. *Tecnol. Cienc. Agua* 5: 77-96.
- Cardona, B., J. J. Carrillo y M. A. Armienta. 1992. Elementos traza: Contaminación y valores de fondo en aguas subterráneas de San Luis Potosí, México. *Geofis. Int.* 32: 277-286.
- CEA (Comisión Estatal del Agua). 2015. Ficha técnica hidrológica municipal. Zacoalco de Torres. Secretaría de Gobierno del Estado de Jalisco. 3-25 p. Guadalajara, Jalisco, México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2008. Estadísticas del agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Coyoacán, México, D. F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2014. Aguas subterráneas en números. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Coyoacán, México, D. F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2015. Programa hídrico estatal 2014-2018 del estado de Jalisco. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Coyoacán, México, D. F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican (Estado de Jalisco, Autlán 1417). *Diario Oficial de la Federación*. México, D. F.
- Doneen, L. D. 1975. Water quality for irrigated agriculture. pp. 56-76. *In: A. Poljakoff-Mayber and J. Gale (eds.). Plant in saline environments. Ecological Studies.* Springer Verlag. New York, NY, USA.
- Eaton, F. M. 1950. Significance of carbonates in irrigation water. *Soil Sci.* 69: 123-134. doi: <https://doi.org/10.1097/00010694-195002000-00004>.
- Freeze, A. R. and J. A. Cherry. 1979. *Groundwater.* Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA.
- García O., A. 2012. Criterios modernos para la evaluación de la calidad del agua para riego. Primera y segunda parte. *IAH* 7: 27-36.
- García-Hidalgo, Y. 2015. Calidad de agua con fines de riego. *Ojeando Agenda* 35: 1-12.
- González-Pérez, C. 2016. Introducción al análisis volumétrico. Química Analítica. http://ocw.usal.es/cienciasexperimentales/quimicaanalitica/contenidos/CONTENIDOS/3.CONCEPTOS_TEORICOS.pdf (Consulta: noviembre 20, 2019).
- Herrera-Apablaza, V., N. Gutiérrez-Roa, S. Córdova-Molina, J. Luque-Marín, M. Idelfonso-Carpanchay, A. Flores-Riveras y L. Romero. 2018. Calidad del agua subterránea para el riego en el Oasis de Pica, norte de Chile. *IDESIA (Chile)* 36: 181-191.
- López-García, A. D., H. M. Ortega-Escobar, C. Ramírez-Ayala, E. I. Sánchez-Bernal, Á. Can-Chulim, D. J. Gómez-Meléndez y R. E. Vázquez-Alvarado. 2016. Caracterización fisicoquímica del agua residual urbano-industrial y su importancia en la agricultura. *Tecnol. Cienc. Agua* 7: 139-157.
- Mancilla-Villa, O. R., A. L. Bautista-Olivas, H. M. Ortega-Escobar, C. Ramírez-Ayala, A. L. Reyes-Ortigoza, H. Flores-Magdaleno, D. R. González-Eguarte y R. D. Guevara-Gutiérrez. 2014. Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. *Tecnol. Cienc. Agua* 5: 97-109.
- Mancilla-Villa, O. R., B. E. Fregoso-Zamorano, E. J. Hueso-Guerrero, R. D. Guevara-Gutiérrez, C. Palomera-García, J. L. Olguín-López, H. M. Ortega-Escobar, E. K. Medina-Valdovinos y H. Flores-Magdaleno. 2017. Concentración iónica y metales pesados en el agua de riego de la cuenca del río Ayuquila-Tuxcacuesco-Armería. *Idesia (Arica)* 35: 115-123. doi: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292017005000303>.
- Martínez, D. E. and M. Osterrieth. 2013. Hydrogeochemistry and pollution effects of an aquifer in Quaternary loess like sediments in the landfilling area of Mar del Plata, Argentina. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* 66: 9-23.
- Massone, H. y D. Martínez. 2008. Consideraciones metodológicas acerca del proceso de gestión del impacto y riesgo de contaminación de acuíferos. *Rev. Ing. Univ. Medellín* 7: 9-21.
- Norma Mexicana. 2015. NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, método de prueba (CANCELA A LA NMX-AA-034-SCFI-2001). Secretaría de Economía. México, D. F.
- Ortiz-Vega, M. I., Á. Can-Chulim., C. A. Romero-Bañuelos., E. Cruz-Crespo y A. Madueño-Molina. 2019. Calidad del agua para uso agrícola del río Mololoa, México. *Terra Latinoamericana* 37: 185-195. doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.406>.
- Osicka, R. M. y M. C. Giménez. 2004. Determinación del contenido de sodio y potasio en aguas naturales subterráneas por fotometría de llama. *Universidad Nacional del Nordeste. Comun. Cient. Tecnol.* 6: 3-6.
- Pérez-León, J. M. 2011. Manual para determinar la calidad de agua para riego agrícola. Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Agrícolas. Xalapa de Enríquez, Veracruz, México.
- Ramos-Olmos, R., R. Sepúlveda-Vázquez y F. Villalobos-Moreto. 2003. El agua en el Medio Ambiente; muestreo y análisis. Plaza y Valdés. Baja California, México. ISBN: 9789707221413.
- Richards, L. A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos: Manual de agricultura No. 60. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Limusa. México, D. F.

-
-
- Rodríguez-Pozueta, M. A. 2016. Puente de Wheatstone. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. Cantabria, España. <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Puente%20de%20Wheatstone.pdf> (Consulta: agosto 21, 2019).
- Severiche-Sierra, C.A., M. E. Castillo-Berthel y R. L. Acevedos-Barrios. 2013. Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas. Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso para eumed.net. Cartagena de Indias, Colombia. <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1326/1326.pdf> (Consulta: julio 15, 2019).
- Silva-García, J. T., S. Ochoa-Estrada, D. Cristóbal-Acevedo y F. Estrada-Godoy. 2006. Calidad química del agua subterránea de la ciénega de Chapala como factor de degradación del suelo. *Terra Latinoamericana* 24: 503-513.
- Steiner, A. A. 1968. Soilless culture. pp. 324-341. *In*: Proceedings of the colloquium, 6th, of the International Potash Institute. Florence, Italy.
- Trujillo-Piña, A. L., P. Vega Sánchez y L. Barajas Bermúdez. 2013. Potenciometría: Usos y Aplicaciones. Universidad Autónoma de Coahuila. http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/CienciaCierta/CC38/4.html#.WA_SHejhB1t (Consulta: abril 20, 2019).
- Ucroz-Peréz, L. 2014. Turbidimetría. Análisis químico Instrumental. <http://lauraucros.blogspot.mx/2014/10/turbidimetria.html> (Consulta: febrero 20, 2019).