

# Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala

Juan José Castellón Gómez<sup>1</sup>, Roberto Bernal Muñoz<sup>2</sup>, María de Lourdes Hernández Rodríguez<sup>3</sup>

*Fecha de recepción: mayo 2014 – Fecha de aprobación: diciembre 2014*

## RESUMEN

El uso del agua para la agricultura protegida, está íntimamente relacionada con el concepto de fertirrigación, a través del parámetro de calidad, que engloba concentración de sales disueltas (CE), presencia relativa de sodio (RAS), contenido de carbonatos y bicarbonatos (que condicionan el pH), concentración de cloro, boro, hierro y manganeso; y nutrientes como calcio, magnesio y sulfatos que determinan el balance final en la aplicación de fertilizantes en la preparación de una solución nutritiva.

Este trabajo consideró la disponibilidad y calidad del agua subterránea para el riego; particularmente para su uso en la agricultura protegida por el grupo “Productores de hortalizas del Sur de Tlaxcala”, atendiendo los parámetros básicos de componentes químicos que tienen influencia para el cultivo y el suelo. Se realizó un muestreo tomando agua de 26 pozos que abastecen las unidades de producción, cuyas muestras se analizaron en un laboratorio certificado en la NOM-021-SEMARNAT-2000, autorizada para análisis de aguas en México.

Con respecto a los parámetros evaluados se encontró que todas las aguas cumplen con el parámetro de CE, ya que los valores son menores a  $0.7 \text{ dS.m}^{-1}$ , mientras que sólo las muestras de 7 pozos cumplen con el parámetro de pH. Paralelamente los niveles de sodio y cloruros no representan restricción alguna para el uso del agua en el riego y en el caso de bicarbonatos las aguas presentan una restricción moderada, sin embargo esto no es una limitante en términos de disponibilidad de nutrientes para las plantas y los suelos a corto y mediano plazo.

**Palabras clave:** calidad del agua, agricultura protegida, riego.

## Irrigation water quality in greenhouse in Tlaxcala

### ABSTRACT

The use of water for protected agriculture, is closely related to the concept of fertigation through quality parameter, which includes concentration of dissolved salts (CE) concerning the presence of sodium (RAS), content of carbonates and bicarbonates (which conditioning the pH), concentration of chlorine, boron, iron and manganese; and nutrients such as calcium, magnesium and sulfates that determine the final balance in the application of fertilizers in the preparation of a nutrient solution.

This work considered the availability and quality of groundwater for irrigation; particularly for use in agriculture protected by the "Vegetable growers South Tlaxcala" group, meeting the basic parameters of chemical constituents that influence cultivation and soil. Sampled drinking water from 26 wells that supply production units, whose samples were analyzed by a certified laboratory in NOM-021-SEMARNAT-2000, authorized for water testing was conducted in Mexico.

With respect to the evaluated parameters was found that all waters meet CE parameter, since the values are less than  $0.7 \text{ dS.m}^{-1}$ , while only 7 samples wells meet pH parameter. Same levels of sodium and chloride do not represent a restriction on water use in irrigation and in the case of bicarbonate waters have a moderate restriction, however this is not a limitation in terms of availability of nutrients for plants and soils short and medium term.

**Keywords:** water quality, protected agriculture, irrigation.

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala; Km. 7.5 de la carretera federal San Martín Texmelucan-Tlaxcala, Xocoyucan, Tlaxcala; jcastellon@colpos.mx

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala; Km. 7.5 de la carretera federal San Martín Texmelucan-Tlaxcala, Xocoyucan, Tlaxcala; bernaltlax@yahoo.com.mx

<sup>3</sup> El Colegio de Tlaxcala, A.C. Melchor Ocampo No 28, Apetatitlán, Tlaxcala; lourher@gmail.com

**Nota:** El período de discusión está abierto hasta el 1° de mayo de 2015. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 19, No.1, 2015, ISSN 1665-529-X.

## **INTRODUCCIÓN**

El gran objetivo de la agricultura es satisfacer las necesidades de alimento y fibras que tiene la humanidad. Dichas necesidades se incrementan conforme aumenta la población, cuyo crecimiento promedio en los últimos 50 años ha sido de 50 millones de personas por año; a éste ritmo de crecimiento poblacional, satisfacer la ingesta de alimentos para los siguientes treinta-cuarenta años requerirá un incremento en la producción agrícola de 40 a 50 % (Trueba 2002). En éste contexto, el riego ha tenido una función estratégica en el incremento de la producción de alimentos, sin embargo; en las últimas cinco décadas se ha observado que su práctica no controlada ha ocasionado diversos problemas en el suelo, deteriorado la calidad en grandes superficies agrícolas del mundo (Ayers y Westcot 1994).

Por sus características estructurales, el agua disuelve y mantiene en suspensión un gran número de sustancias, algunas de las cuales son potencialmente tóxicas para las plantas, por lo que su acumulación (ya sea o no directamente tóxica) genera problemas en los vegetales por efecto salino (Hazem-Kalaji y Pietkiewicz 1993).

En este sentido, uno de los factores más importantes en la producción intensiva de cultivos después de la disponibilidad del agua, es su calidad (Bojórquez, 2008), la cual se puede dividir en química y agronómica. La calidad química del agua, que puede tener un uso muy amplio, está dada por las cantidades de sales y la proporción de diferentes iones que ésta tiene en solución; su conocimiento permite determinar si se puede recomendar con fines domésticos, industriales, pecuarios y/o agrícolas. El problema frecuente en el caso del riego de cultivos, es que generalmente no se especifica con qué calidad química se debe utilizar el agua, sino que solamente se da importancia a la calidad agronómica determinada por: cultivo a regar, condiciones climatológicas, métodos de riego, condiciones de drenaje del suelo y prácticas de manejo de agua, suelo y plantas (Aceves, 2011).

Sin embargo la calidad del agua para riego, también está determinada por la concentración y composición de los constituyentes disueltos que contenga. Por lo tanto, ésta calidad es una consideración fundamental para la investigación de las condiciones de salinidad o contenido de sodio intercambiable en cualquier zona de riego. Las características más importantes que determinan la calidad del agua para riego son: 1) la concentración total de sales solubles; 2) la concentración relativa de sodio con respecto a otros cationes; 3) la concentración de boro u otros

elementos que puedan ser tóxicos y 4) bajo ciertas condiciones, la concentración de bicarbonatos con relación a la concentración de calcio más magnesio (Richards, 1985).

Adicionalmente, el riego puede crear o corregir suelos salinos o alcalinos. La concentración de sales en el agua de riego reduce el agua disponible para los cultivos, esto hace que la planta deba ejercer mayor esfuerzo para poder absorber el agua y pudiendo incluso llegar ocasionarle estrés fisiológico por deshidratación, afectando su crecimiento (Chirinos, s/f).

Paralelamente, la agricultura de riego también depende de un adecuado suministro de agua de calidad utilizable, la cual se define por algunas de sus características químicas, físicas y biológicas, poniendo énfasis en las dos primeras, por ello es necesario considerar que ciertos constituyentes del agua emergen como indicadores de problemas en su calidad cuando ésta se usa por periodos prolongados (Ayers y Westcot, 1994); por ello es importante considerar que las principales variables para clasificar la calidad del agua desde una perspectiva agrícola son: a) concentración de sólidos disueltos o sales; b) presencia relativa de sodio; c) contenido de carbonatos y bicarbonatos; d) concentración de otros iones específicos como cloro y boro y e) presencia y concentración de Fe y Mn (Castellanos *et al.*, 2002).

Por otra parte, en el proceso de abastecimiento de agua a los cultivos se conoce de manera general como, cuando y cuanto regar, con base en los parámetros de los requerimientos de los cultivos universalmente conocidos tales como: evaporación máxima, consumos máximos de humedad aprovechable, profundidad de las raíces, requerimientos de riego, entre otras; sin embargo es muy común que se ignore la calidad de las aguas utilizadas medidas por su carga salina, lo cual es un factor imprescindible a tener en cuenta en el cálculo de las dotaciones de agua (Palacios, 2002 y Katerji *et al.*, 2009).

De ahí la importancia de que los productores de hortalizas conozcan que la calidad y cantidad de agua utilizada durante el desarrollo de las plantas está influenciada por la interacción de los elementos químicos disueltos en el agua de riego, las propiedades químicas del suelo o sustrato y el programa de fertilización que se utiliza. Baste recordar que los cultivos en agricultura protegida precisan de una gran cantidad de agua, hasta 30 000 m<sup>3</sup> por hectárea al año, lo cual varía en función de las condiciones ambientales y del manejo del agua (Tognoni, 2003).

En el estado de Tlaxcala se cultivan 232 809 hectáreas, de las cuales, el 89 % se realiza en condiciones de temporal y el 11 % restante bajo condiciones de riego (SIAP, 2010). Con respecto a la superficie de riego, las 25 609 hectáreas se encuentran bajo el control de 29 710 usuarios que tienen concesionados 188.23 millones de m<sup>3</sup> de agua al año, de los cuales 36.4 % son de origen superficial y 63.4% provienen de 552 pozos profundos (Hernández y Castellón 2007). Sin embargo, la agricultura protegida sólo ocupa cerca de 50 hectáreas que han sido establecidas en los últimos diez años con una serie de problemas asociados a la falta de conocimiento en el manejo de cultivos protegidos, uso del agua y baja disponibilidad de recursos económicos para la continuidad de las actividades después de los primeros años de operación (Castellón et al., 2008).

En éste contexto, el objetivo del presente trabajo de investigación es elaborar una caracterización del agua de riego para uso en la agricultura protegida en el estado de Tlaxcala, con base en los parámetros químicos de mayor relevancia y su impacto en la salinización del suelo.

#### **El uso de agua en la agricultura protegida**

Existe una gran preocupación por el alto desperdicio del agua que se presenta en los diferentes sectores económicos y sociales que la utilizan; 77 % del recurso concesionado se usa en la agricultura; 14 % es para uso doméstico y 9 % restante se destina al uso industrial. Se desperdicia 50 % del agua que se consume en los tres sectores. Un análisis general del uso de agua en la agricultura, permite concluir que al pasar del riego rodado al riego por compuertas se podría regar el doble de superficie; si se usará riego por aspersión la superficie regada sería del orden de cuatro hectáreas y con sistemas de goteo la superficie regada sería de seis hectáreas (Morales et al., 2008).

Las pérdidas de agua para la agricultura de riego en el país son del orden del 40 al 75 %, lo que se debe fundamentalmente a la evaporación y conducción en canales largos y no revestidos, azolve de presas y canales, y salinización de suelos, entre otros.

El agua debe enfocarse a un uso más eficiente, en términos de la eficiencia transpirativa de las plantas, lo cual está asociado a la estructura genética de la especie y condicionado por el manejo agronómico del cultivo. En el Tabla 1, se presenta el consumo de agua para producir un kg de materia seca de diferentes cultivos.

Para el caso de jitomate, diferentes sistemas de riego eficiente del agua logran cambios significativos. En campo abierto, Israel y Almería, España han logrado producir un kg de producto con 60 litros de agua. En plásticos sin calefacción (Almería) la eficiencia se ha incrementado con un consumo de 40 litros de agua, mientras que con cristal sin calefacción (Israel), se ha logrado producir un kg de materia seca con 30 L de agua. En cambio en Holanda, en invernaderos de cristal con control climático y aplicación de CO<sub>2</sub> se utilizan 22 L de agua, pero con reutilización del agua residual la eficiencia permite el uso de 15 L de agua por kg de producto (Stanghellini, 2003).

El uso del agua para la agricultura protegida, está íntimamente relacionada con el concepto de fertirrigación, a través del parámetro de calidad que engloba aspectos químicos como: concentración de sales disueltas (CE), presencia relativa de sodio (RAS), contenido de carbonatos y bicarbonatos (lo que condiciona el pH), concentración de cloro, boro, hierro y manganeso. De igual manera el agua de riego, puede contener nutrimentos como calcio, magnesio y sulfatos; lo que determina el balance final en la aplicación de fertilizantes para la preparación de la solución nutritiva (Castellanos y Ojodeagua, 2009).

Estos parámetros son de utilidad para determinar el uso del agua para la agricultura. Así, un agua de buena calidad debe contener ente 0.7 y 1.5 dS.m<sup>-1</sup>, es decir; entre 595 y 1 275 mg.L<sup>-1</sup> de sales. El boro no debe rebasar 0.5 ppm ya que representa serios problemas para el desarrollo de las plantas. El pH debe estar ubicado en un rango de 5.5 a 7.0 con la finalidad de favorecer la absorción de nutrimentos. La RAS debe ubicarse hasta 18, siempre y cuando la CE no esté por encima de 250 ppm de sales (*op. cit.*).

**Tabla 1.** Consumo de agua de diferentes especies para producir un kg de materia seca.

<b>Especie</b>	<b>Consumo de agua por kg de materia seca (L)</b>
Papa	500
Trigo	900
Sorgo	1100
Maíz	1400
Arroz	1900
Soya	2000
Jitomate (cielo abierto)	1000

Fuente: Stanguellini, 2003

### **El agua de riego y el contenido de sales**

La importancia de la gestión de la calidad del agua en agricultura proviene de dos perspectivas interrelacionadas: 1) La sustentabilidad de la producción de cultivos requiere un cierto estándar mínimo de calidad del agua y 2) Que las actividades agrícolas no causen deterioro de la calidad del agua con impactos sobre los subsecuentes usos del agua para otros propósitos (FAO, 2000).

Cuando las técnicas aplicadas en la agricultura no son las correctas, particularmente el riego, provoca procesos de salinización de diferente gravedad, cuando se utilizan aguas conteniendo sales sin el debido control, acumulándose directamente en el suelo o en los mantos freáticos, o bien cuando se ha producido un descenso en el nivel freático local y la intrusión de capas de aguas salinas, ubicadas en capas más profundas, como consecuencia de la sobreexplotación (Aceves, 1979).

El riego de cultivos, requiere grandes volúmenes de agua, la cual puede ser de baja calidad. Aunque la calidad del agua requerida para la irrigación es baja, altos niveles de salinidad excluye su uso para el riego, y suministros de agua contaminada puede reducir la calidad de producir (FAO, 2004).

El término salinidad se refiere a la presencia de los mayores solutos inorgánicos disueltos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ ) en muestras acuosas. La salinidad es cuantificada en términos de la concentración total de sales solubles, o más prácticamente, en términos de la conductividad eléctrica (CE) de la solución. La CE es una expresión numérica de la capacidad inherente de un medio para conducir una corriente eléctrica. Ya que la CE y la concentración de sales totales de una solución acuosa están íntimamente relacionadas, la CE es comúnmente usada como una expresión de la concentración de sales totales disueltas, aunque es afectada por la temperatura de la muestra, movilidad, valencia y concentración relativa de los iones individuales en la solución (Rhoades *et al.*, 1999).

La CE como una medida del contenido total de sales no proporciona información sobre las concentraciones de cada nutriente. Además, la acumulación de iones no útiles puede impedir el aporte de nutrientes. La disponibilidad de agua limpia es esencial para la producción de alta calidad de los cultivos hortícolas; el agua limpia está asociada a la ausencia de sales. A mayor calidad del agua, más sencillo será formular una solución nutritiva optimizada. En cambio, a mayor contenido de sales, mayor será la cantidad de agua utilizada para remover las sales que se acumulen en el suelo o sustrato (Kempkes, 2003).

Aparte de los nutrimentos, las plantas también absorben iones residuales como el Na y el Cl. Estos iones son importantes para la determinación de la calidad del agua. En tal sentido, la sodicidad del suelo o sustrato, está relacionado con un desequilibrio entre bicarbonatos y cationes divalentes, fundamentalmente Ca y Mg. En principio, si la concentración de bicarbonatos es mayor que el doble de la concentración de Ca + Mg habrá sodicidad (Sonneveld, 2003).

El agua de riego, también trae consigo nutrimentos como calcio, azufre, potasio, magnesio y algunos elementos tóxicos como el sodio y el cloro, los cuales deben ser considerados al momento de diseñar las soluciones nutritivas para los cultivos. Las aguas con cierto grado de salinidad representan un ahorro en el uso de fertilizantes en los sistemas hidropónicos o en suelo, pues reducen las dosis de fertilizantes a adicionar al cultivo (Castellanos, 2004).

Un problema de salinidad existe si la sal se acumula en la zona de raíces de un cultivo, causando pérdidas en el rendimiento. Algunos problemas de toxicidad ocurren si ciertos iones en el suelo son absorbidos por la planta y se acumulan a concentraciones tan altas que causan daños en el cultivo o reducen el rendimiento. Los elementos que causan mayor daño son cloro, sodio y boro.

### **METODOLOGÍA**

Las aguas subterráneas analizadas en el presente estudio corresponden a 21 municipios del estado de Tlaxcala, donde se practica agricultura bajo cubierta plástica para la producción de jitomate, cuya ubicación geográfica se muestra en la Figura 1, donde se puede observar que para algunos municipios como Nativitas, Ixtacuixtla, Tlaxcala y Apizaco, se muestrearon 26 fuentes de abastecimiento, una por cada unidad de producción abastecida. Con la identificación de las fuentes de abastecimiento de agua para riego de interés para las unidades de producción que se atienden por el grupo de trabajo “productores de hortalizas del sur de Tlaxcala”, se tomaron muestras de las fuentes de abastecimiento referenciadas anteriormente.

El muestreo de agua para la determinación de los parámetros evaluados, se realizó por triplicado en botellas de plástico de un litro de capacidad previamente lavadas con agua desionizada, las cuales se sellaron herméticamente y se pusieron en la sombra para evitar reacciones posteriores que alterarán la composición química de la misma. El muestreo de agua se realizó durante el verano de 2012, tomando las muestras directamente del flujo del pozo al momento de la extracción.

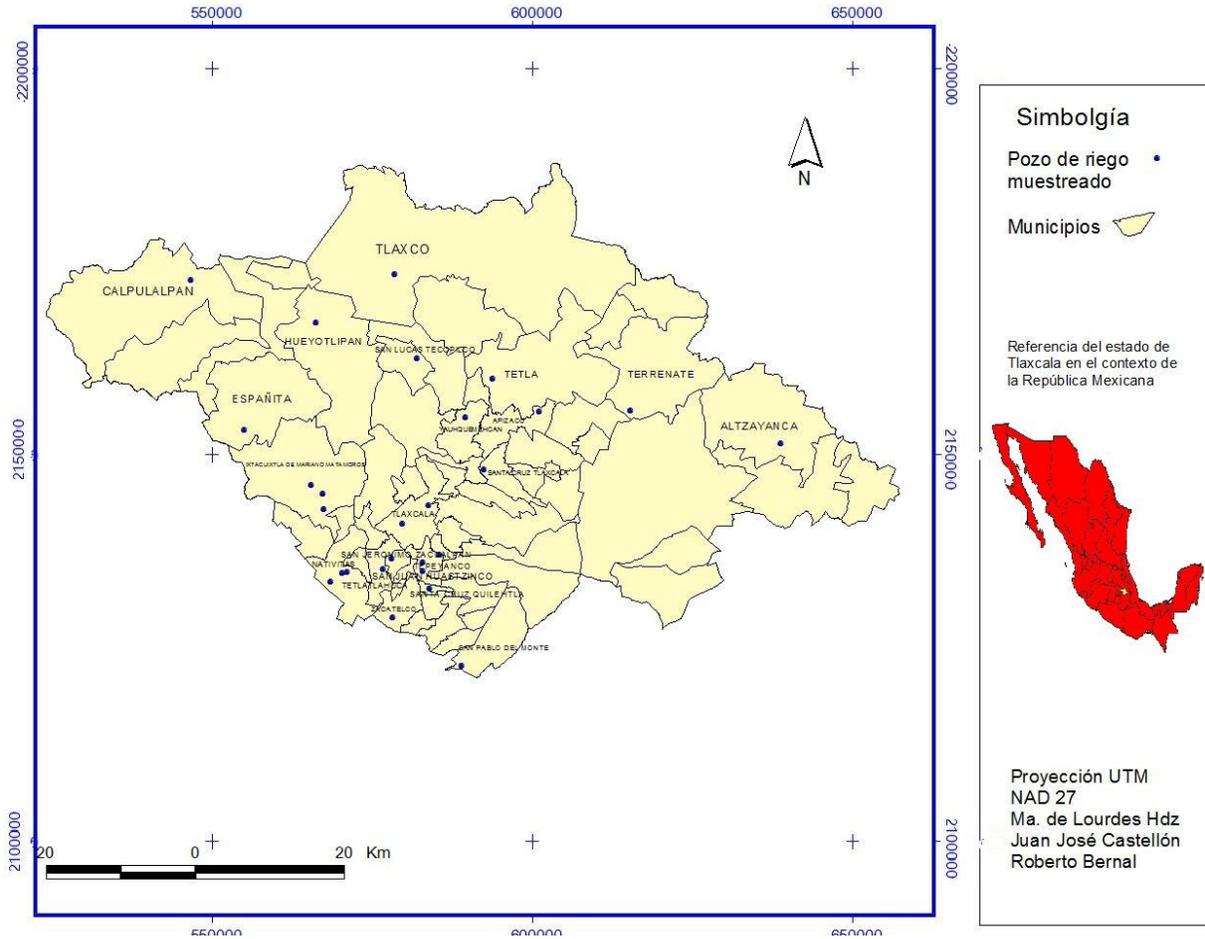


Figura 1. Ubicación geográfica de las fuentes de abastecimiento de agua en el presente estudio (Basado en INEGI, 2012).

Tabla 2. Parámetros de calidad del agua de riego para uso agrícola.

Parámetro	Unidad	Grado de restricción		
		Ninguno	Leve a moderado	Severo
<b>Salinidad</b>				
Conductividad eléctrica	dS.m <sup>-1</sup>	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0
Sólidos disueltos totales	mg.L <sup>-1</sup>	< 450	450-2000	> 2000
Salinidad efectiva	me.L <sup>-1</sup>	< 3.0	3.0-15.0	>15.0
Salinidad potencial	me.L <sup>-1</sup>	< 3.0	3.0-15.0	>15.0
<b>Sodicidad</b>				
Carbonato de sodio residual	me.L <sup>-1</sup>	< 1.25	1.25-2.5	>2.5
Relación de adsorción de sodio	me.L <sup>-1</sup>	< 3.0	3.0-9.0	> 9.0
<b>Efecto de iones específicos</b>				
Sodio	me.L <sup>-1</sup>	< 5.0	5.0-10.0	> 10.0
Bicarbonatos	me.L <sup>-1</sup>	< 1.5	1.5-8.5	> 8.5
Cloruros	me.L <sup>-1</sup>	< 4.0	4.0-10.0	> 10.0
Boro	mg.L <sup>-1</sup>	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0
Hierro	mg.L <sup>-1</sup>	< 0.1	0.1-1.5	> 1.5

Tomado de Castellanos, *et al.* (2000).

### **Análisis de la calidad del agua**

Con la finalidad de determinar la calidad del agua para riego, se analizaron los parámetros que se describen a continuación: Conductividad eléctrica ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), pH, cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ), aniones ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), elementos tóxicos ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ) y bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ). A partir de estos datos se determinaron los parámetros siguientes: Salinidad efectiva (SE), Salinidad potencial (SP), Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y Carbonato de Sodio Residual (CSR) con base en la NOM-021-SEMARNAT- 2000 (SEMARNAT, 2002).

En el Tabla 2, se presentan los niveles de referencia para medir el grado de restricción del agua de riego para su uso en la agricultura y el nivel de peligro de daño cuando se aplica el agua al suelo.

De acuerdo con Aceves (2011), y Aguilera y Martínez (1986), se han generado tres criterios para juzgar la conveniencia o limitación del empleo del agua con fines de riego, el contenido de sales solubles, el efecto probable del sodio sobre las características físicas del suelo y el contenido de elementos tóxicos para las plantas, para lo cual se han definido índices cuantitativos para su medición, algunos de los más usuales son los siguientes.

### **Salinidad efectiva (SE)**

Esta da una estimación del peligro que presentan las sales solubles del agua de riego al pasar a formar parte de la solución del suelo, pues considera la precipitación posterior de las sales menos solubles (carbonatos de calcio y magnesio así como sulfato de calcio) las cuales dejan de participar en la elevación de la presión osmótica de la solución del suelo. Este proceso es más notable cuando las aguas tienen un alto contenido de carbonatos y bicarbonatos. El cálculo de la salinidad efectiva se realizó siguiendo los siguientes parámetros y reglas de decisión:

1. Si  $\text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$   
Entonces  $\text{SE} = \Sigma \text{ cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$
2. Si  $\text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$  pero  $\text{Ca} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$   
Entonces  $\text{SE} = \Sigma \text{ cationes} - \text{Ca}^{2+}$
3. Si  $\text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$  pero  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$   
Entonces  $\text{SE} = \Sigma \text{ cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$
4. Si  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$   
Entonces  $\text{SE} = \Sigma \text{ cationes} - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$

Nota: Si la  $\Sigma \text{ cationes} < \Sigma \text{ aniones}$  deberá emplearse está última en lugar de la  $\Sigma \text{ cationes}$ .

### **Salinidad potencial (SP)**

Cuando la humedad aprovechable de un suelo es menor del 50 %, las últimas sales que quedan en solución son cloruros y sulfatos. La salinidad potencial es un índice para estimar el peligro de estas y que por consiguiente aumentan la presión osmótica. El índice se calcula con la siguiente fórmula:  $\text{SP} = \text{Cl}^- + \frac{1}{2} \text{SO}_4^{2-}$ , las unidades se expresan en  $\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$ .

### **Carbonato de sodio residual (CSR)**

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el de  $\text{Ca} + \text{Mg}$ , existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio debido a que por su alta solubilidad puede permanecer en solución, aun después de que han precipitado los carbonatos de calcio y magnesio. En estas condiciones, la concentración total y relativa de sodio puede ser suficiente para desplazar al  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  del complejo de intercambio, produciéndose la defloculación del suelo. El CSR no es un parámetro de riesgo, cuando se usa agua en fertirrigación, ya que los  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  pueden ser destruidos mediante el uso de ácidos. Este índice se calcula de la siguiente manera:  $\text{CSR} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ . Cuando la diferencia es negativa no existe el problema y el valor del CSR puede suponerse igual a cero.

### **Relación de adsorción de sodio (RAS)**

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

El sodio en el agua de riego propicia la dispersión de los coloides una vez que entra en contacto con el suelo y desplaza los cationes divalentes  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ , disminuyendo con ello la facilidad del suelo para conducir agua y oxígeno en el perfil. La sodicidad se expresa como la presencia relativa de  $\text{Na}^+$  con respecto a los cationes  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ . La RAS se expresa de la siguiente manera:

## **RESULTADOS**

### **Aporte de nutrimentos por el agua de riego**

Con la finalidad de dar una idea del contenido de sales útiles en la nutrición de las plantas que aportan las aguas subterráneas utilizadas para riego en invernaderos en la zona estudiada en el estado de Tlaxcala, en el Tabla 3, se presentan los valores de nutrimentos obtenidos en el análisis químico del agua muestreada en el presente estudio; donde se puede notar cierto nivel en el aporte de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  lo que repercute en un ahorro en el uso de fertilizantes cuando se usa el agua para hidroponía o

en suelo, ya que reducen las cantidades de fertilizantes a adicionar en el cultivo. Los valores de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , son moderadamente altos resaltando las localidades de Ixtacuixtla, Nativitas (G. Victoria), Nativitas (S. Michac) y Yauhquemecan con valores de calcio por arriba de  $3.8 \text{ me.L}^{-1}$ . Para el caso de magnesio sobresalen las localidades de Ixtacuixtla y Nativitas (S. Michac) con valores de 6.4 y  $6.8 \text{ me.L}^{-1}$  rebasando considerablemente los requerimientos del cultivo en la solución nutritiva. El potasio de manera general, presenta valores bajos, salvo para la localidad de San Lucas Tecopilco con una concentración de  $2.74 \text{ me.L}^{-1}$ , que representa cerca del 40 % de las

necesidades de este elemento para un cultivo manejado en hidroponía y del 56 % de las necesidades del mismo cultivo en condiciones de suelo.

Dada la naturaleza del origen de las aguas con base en la presencia de rocas, los iones  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , básicamente se encuentran ausentes.

En el Tabla 4, se presentan los parámetros de calidad del agua asociados a problemas de salinidad y sodicidad

**Tabla 3.** Contenido de sales en el agua de riego de diferentes fuentes de abastecimiento.

Localidad	Cationes ( $\text{me.L}^{-1}$ )			Aniones ( $\text{me.L}^{-1}$ )					
	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{HCO}_3^-$
Altzayanca (R. Pocitos)	1.14	0.19	0.74	0.58	0.06	0	0.93	0.35	1.56
Apizaco	1.60	0.23	1.50	1.02	0	0	0.13	0.60	3.20
Ixtacuixtla (Atotonilco)	1.53	0.30	1.42	0.85	0.03	0	0.86	0.70	2.41
Calpulalpan (B. Juárez)	2.50	0.00	2.50	0.15	0	0	0.11	1.21	5.40
Españita	1.40	0.21	1.40	0.91	0	0	0.07	0.60	3.20
Huactzinco	1.40	0.15	1.40	0.64	0	0	0.32	0.60	2.20
Hueyotlipan	2.20	0.27	3.00	1.06	0	0	0.19	0.60	4.40
Ixtacuixtla	3.80	0.49	6.40	1.10	0	0	0.13	1.00	11.80
Ixtacuixtla (S. J. Ecatepec)	2.40	0.00	3.60	-	0	0	1.16	1.71	7.40
Nativitas (G. Victoria)	3.89	0.20	2.65	1.40	0	0	0.52	1.02	7.03
Nativitas (S. M. Milagro)	1.40	0.10	2.40	1.10	0	0	0.36	0.40	4.70
Nativitas (S. Michac)	4.60	0.21	6.80	3.86	0	0	1.80	1.80	11.50
San Lucas Tecopilco	1.60	2.74	1.80	1.31	0	0	0.23	0.60	4.20
San Pablo del Monte	1.20	0.08	2.20	0.31	0	0	0.06	0.50	1.60
Sta. Cruz Quiletle	1.40	0.00	0.40	0.00	0	0	0.24	0.23	1.72
Sta. Cruz Tlaxcala	0.80	0.06	1.10	0.20	0	0	0.03	0.50	2.00
Tepeyanco	1.60	0.08	1.30	0.30	0	0	0.40	0.84	2.20
Terrenate (N. Bravo)	1.69	0.22	1.19	0.90	0.08	0	0.16	0.91	2.65
Tetla	2.30	0.11	0.90	0.41	0	0	0.03	0.14	3.50
Tetlatlahuca	2.40	0.27	2.80	1.30	0	0	0.31	0.80	5.20
Tlaxcala (Atlahapa)	2.68	0.22	2.70	1.12	0	0	1.00	1.16	4.77
Tlaxcala (Ocotlán)	1.01	0.11	0.81	0.47	0	0	0.13	0.37	2.10
Tlaxco (Buenavista)	1.20	0.18	1.40	0.95	0	0	0.08	0.60	3.00
Yauhquemecan	4.20	0.37	2.40	1.06	0.06	0	0.69	2.10	4.37
Zacatelco	1.20	0.23	2.40	0.92	0	0	0.27	0.80	2.00
Zacualpan	1.97	0.36	2.44	1.46	0	0	0.33	0.48	4.90

**Tabla 4.** Parámetros de salinidad determinados en diferentes fuentes de abastecimiento de agua de riego en el estado de Tlaxcala.

Localidad	CE (dS.m <sup>-1</sup> )	pH	me.L <sup>-1</sup>				Ppm	
			SE	SP	RAS	CSR	B	Fe
Altzayanca (R. Pocitos)	0.29	7.72	1.09	0.82	0.60	0	0.01	
Apizaco	0.34	6.80	1.25	0.67	0.82	0.10		
Ixtacuixtla (Atotonilco)	0.40	7.36	1.69	1.13	0.70	0	0.12	1.39
Calpulalpan (B. Juárez)	0.29	7.37	1.72	1.26	1.32	0.40		
Españita	0.31	6.50	1.12	0.64	0.75	0.40		
Huactzinco	0.38	7.00	1.39	0.76	0.54	0		
Hueyotlipan	0.42	6.50	2.13	0.69	1.18	0		
Ixtacuixtla	1.01	6.50	1.59	1.06	0.49	1.60		
Ixtacuixtla (S. J. Ecatepec)	1.29	6.47	4.27	2.29	0.98	1.40		
Nativitas (G. Victoria)	0.89	7.58	2.02	1.28	0.77	0.49	0.46	0.015
Nativitas (S. M. Milagro)	0.50	7.10	1.66	0.58	0.80	0.90		
Nativitas (S. Michac)	1.30	7.10	4.07	2.70	0.83	0.10		
San Lucas Tecopilco	0.41	7.10	4.05	0.72	1.01	0.80		
San Pablo del Monte	0.15	6.60	2.19	0.53	0.24	0		
Sta. Cruz Quileta	0.15	5.85	0.47	0.35	0.00	0		
Sta. Cruz Tlaxcala	0.26	6.50	0.63	0.52	0.21	0.10		
Tepeyanco	0.12	7.00	1.24	1.04	0.25	0		
Terrenate (N. Bravo)	0.38	7.64	1.32	0.98	0.75	0	0.03	
Tetla	0.36	7.27	0.51	0.15	0.32	0.30		
Tetlatlahuca	0.53	7.00	1.56	0.95	0.80	0		
Tlaxcala (Atlahapa)	0.83	7.47	2.16	1.66	0.68	0	0.02	0.579
Tlaxcala (Ocotlán)	0.27	7.63	0.78	0.44	0.49	0.28		0.027
Tlaxco (Buenavista)	0.28	6.80	1.14	0.64	0.84	0.40		
Yauhquemecan	0.60	7.54	3.66	2.45	0.58	0		
Zacatelco	0.28	7.00	2.76	0.93	0.69	0		
Zacualpan	0.56	7.54	1.82	0.65	0.98	0.49	0.03	0.016

**Presencia de iones específicos**

Con respecto a los iones que pueden causar algún problema de acumulación en el suelo, cabe destacar que todas las fuentes de abastecimiento no presentan problemas de cloruros ya que el rango se encuentra entre 0.23 y 2.10 me.L<sup>-1</sup>; por lo que no existe ningún grado de restricción para el uso del agua debajo de 4.0 me.L<sup>-1</sup>; los niveles de sulfatos están bajos con un rango ubicado entre 0.03 y 1.80 me.L<sup>-1</sup>, no representado problema alguno para el uso del agua en la agricultura y los niveles de sodio están por debajo del nivel mínimo aceptable de aguas de buena calidad.

Los bicarbonatos en el agua de riego, a pesar de que en la actualidad ya no representan un riesgo alto de alcalinización del suelo, no dejan de ser una preocupación, ya que se deben tomar medidas para su neutralización mediante la aplicación de ácidos y finalmente estos se pierden a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub> convirtiéndose en una fuente de contaminación potencial. Los valores de este parámetro en las aguas analizadas en su mayoría representan un grado de restricción de leve a moderado, salvo dos casos donde

los valores se encuentran por encima de 8.5 me.L<sup>-1</sup>.

Aunque boro y hierro no se determinaron para todas las muestras, en aquellos casos en que se realizaron los análisis, en ambos iones; no existen restricciones para el uso del agua en la agricultura.

**Salinidad y sodicidad en el agua de riego**

El parámetro de salinidad medido a través de la C.E. como una medida para conducir la electricidad a través del agua por la presencia de sólidos disueltos totales, ayuda a determinar las sales contenidas en el agua de riego. A mayor contenido de sales en el agua de riego, mayor será el esfuerzo que realizan las plantas para obtener el agua ya que se incrementa el potencial osmótico del suelo.

**DISCUSIÓN**

Las aguas analizadas en la presente investigación, muestran que solamente aquellas provenientes de fuentes ubicadas en zonas lacustres o de inundación como son Nativitas e Ixtacuixtla presentan una ligera restricción para su uso, el resto de las aguas

muestreadas no presentan restricciones ya que su C.E. está por debajo de  $0.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , lo que las ubica como aguas de buena calidad para su uso en la agricultura bajo cubierta plástica.

El parámetro de salinidad efectiva (Tabla 4), muestra que sólo las localidades de Nativitas, Ixtacuixtla, Tecopilco y Yauhquemecan, presentan un nivel medio de restricción para el uso del agua en la agricultura protegida, debido a que se ubican fundamentalmente en zonas que en algún tiempo tuvieron cuerpos de agua superficiales dejando un alto contenido de sales que pueden migrar hacia las capas profundas y aumentar la salinidad de las aguas subterráneas.

La salinidad potencial no muestra un peligro serio de salinidad ya que los iones de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , se encuentran en niveles muy bajos que no representan una alta restricción.

El sodio en el agua de riego puede provocar serios problemas en el suelo cuando se riega con agua con altos contenidos relativos de sodio respecto al calcio y magnesio, en tal sentido; las muestras de agua analizadas del estado de Tlaxcala, de manera general; no presentan problemas de sodicidad medido a través de la RAS, como se puede observar en el Tabla 4, este parámetro no rebasa un valor de  $1.32 \text{ me}\cdot\text{L}^{-1}$ , lo que indica que no existe restricción para el uso del agua.

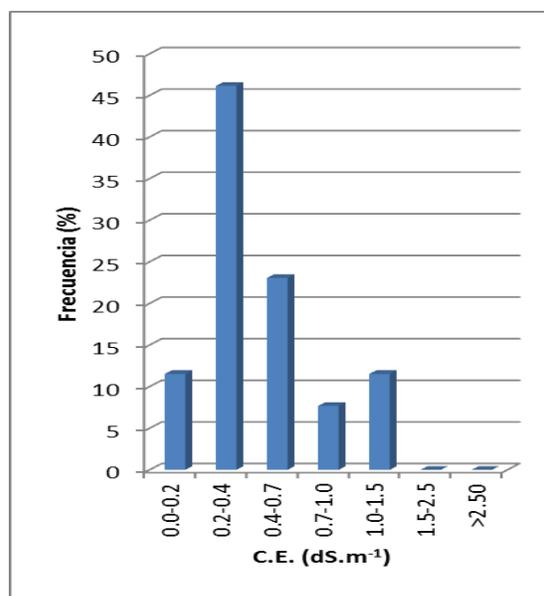
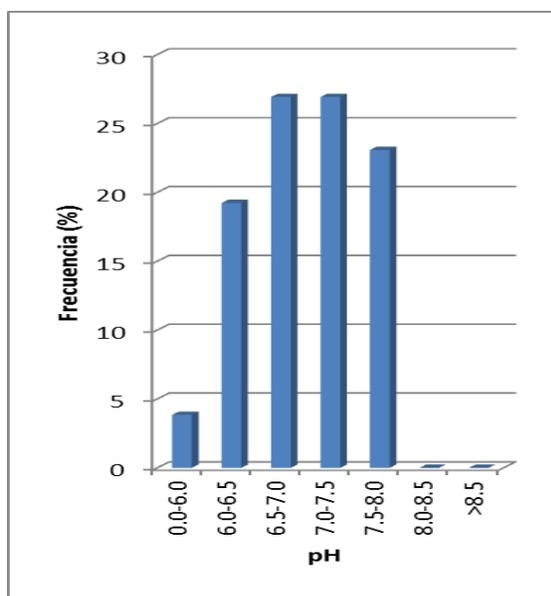
Con respecto al CSR, como otro parámetro para medir el riesgo de sodicidad por el agua de riego, se observa, que no hay problema alguno, salvo las dos muestras del municipio de Ixtacuixtla que presentan

restricción de leve a moderada.

La Figura 2, muestra la variación que se presenta en las aguas analizadas del estado de Tlaxcala en cuanto a la salinidad y pH. Resalta que el agua desde el punto de vista de estos parámetros es aún de buena calidad.

En la Figura 3, se presentan los histogramas de la frecuencia relativa para las aguas de riego en cuanto a los contenidos de Ca, Mg, K y Na. Los niveles más comunes de Ca se sitúan en el rango de 1.5 a 2.5, aunque alrededor de un 20 % de las aguas presentan de 2.5-5.0 y cerca de un 35 % valores de 1.0-1.5  $\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$ . El magnesio presenta una proporción del 42 % de las aguas en un rango de 2.0-4.0, 34 % de las aguas en un rango de 1.0-2.0, incluso se presenta un 7 % en un rango mayor a 6.0  $\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$ . El potasio se ubica mayormente en un rango de 0 a 3.0  $\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$ . El 95 % de las aguas analizadas presentan una concentración de sodio de 0 a 2.0  $\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$  lo que las ubica en un rango sin restricciones para su uso en la agricultura.

En la Figura 4, se presentan los histogramas de distribución de los aniones de las aguas analizadas en el estado de Tlaxcala, donde se observa de manera general que los niveles de cloruros y sulfatos se ubican en niveles muy bajos lo que permite usar estas aguas para la agricultura protegida sin restricciones. En el caso de los bicarbonatos, el 34 % de las aguas se ubican en un rango de 3.0-5.0  $\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$ , que no presenta problemas para su uso en la agricultura ya que como se mencionó anteriormente, estos pueden neutralizarse mediante el uso de ácidos.



**Figura 2.** Frecuencias del pH y CE de las aguas subterráneas del estado de Tlaxcala.

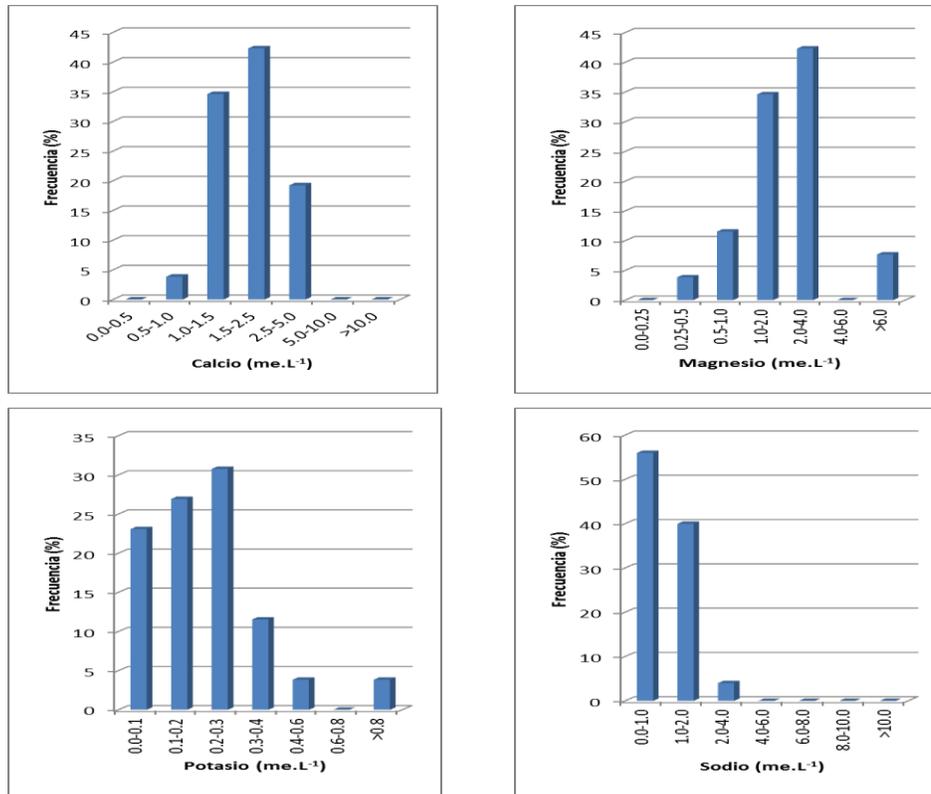


Figura 3. Frecuencias de los cationes Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup> en el agua subterránea del estado de Tlaxcala.

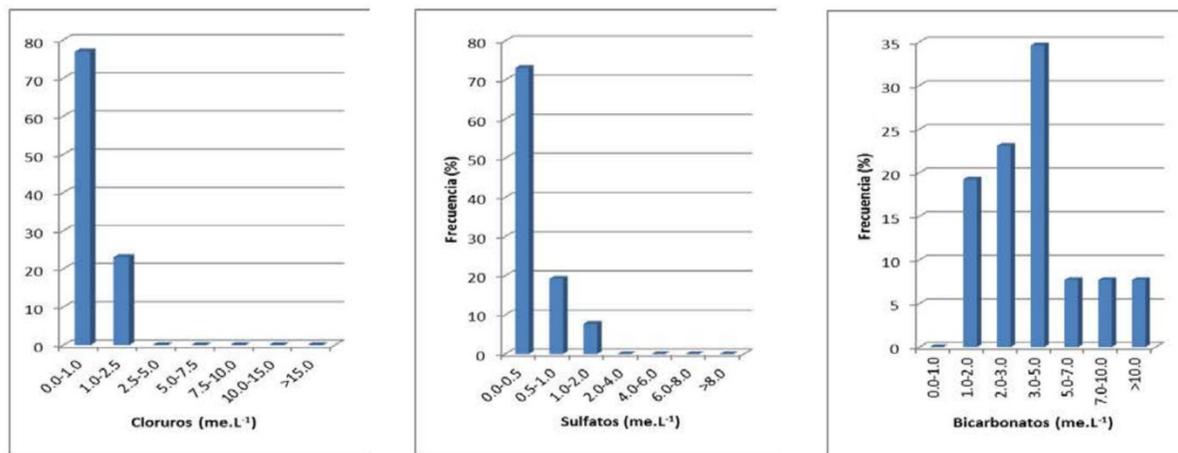


Figura 4. Frecuencias de los aniones Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> de las aguas subterráneas del estado de Tlaxcala.

### CONCLUSIONES

Con base en los análisis químicos practicados a las aguas del estado de Tlaxcala, los contenidos de Ca, Mg y K, permite ajustar la solución nutritiva disminuyendo la aplicación de fertilizantes en forma artificial.

La presencia de Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, no son restrictivos en la gran mayoría de las aguas analizadas, por lo que se pueden utilizar en agricultura protegida de manera confiable.

Los valores de CE como medida de la presencia de sólidos disueltos totales, no son una restricción para el uso del agua en la agricultura, ya que no representa un riesgo de salinidad al suelo.

Los parámetros de RAS y CSR se encuentran en niveles bajos por lo que no representan un riesgo para el uso de las aguas en este tipo de agricultura.

Finalmente y con base en los datos analizados en este trabajo se concluye que el agua utilizada para la agricultura en el estado de Tlaxcala cumple con los parámetros químicos de calidad requeridos para su

uso en la agricultura protegida, sin riesgos de salinización ni sodificación para los cultivos y los suelos en los que se practique en el corto y mediano plazo.

## **REFERENCIAS**

Aceves, N. E. (1979). El ensalitramiento de los suelos bajo riego (identificación, control, combate y adaptación). 1ª. Edición. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 150 pp.

Aceves, N. E. (2011). El ensalitramiento de los suelos bajo riego. 2ª. Edición. Biblioteca Básica de Agricultura. Colegio de Postgraduados, Mundi-Prensa. México, D.F.

Aguilera, C. M. y R. Martínez E. (1986). Relaciones agua suelo planta atmósfera. 3ª. Edición. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

Ayers, R. S. y D. W. Westcot. (1994). Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper.29 Rev. 1. Roma, Italy.

Bojórquez, F. (2008). Parámetros de agua de riego. Productores de Hortalizas. Consultado el 30 de julio de 2014. <http://www.hortalizas.com/irrigacion/parametros-de-agua-de-riego/>

Castellanos, J.Z., Uvalle B, J.X. y A. Aguilar S. (2000) Manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP. 2da edición. INTAGRI, México.

Castellanos, J.Z., Ortega, G. A., Grajeda, A. O.A., Vázquez A., Villalobos, S., Muñoz, R.J.J., B. Zamudio, J.G., Martínez, B., Hurtado, P., Vargas, S. y A. Enríquez. (2002). Changes in the quality of groundwater for agricultural use in Guanajuato. Terra 20 (2): 161-170.

Castellanos, J.Z. (2004). La calidad del agua. En: J.Z. Castellanos (Ed.). Manual de producción hortícola en invernadero. 2ª. Edición. INTAGRI. México.

Castellanos, R. J.Z y J.L. Ojodeagua (2009). Formulación de soluciones nutritivas. pp 131-156. En: J.R. Castellanos (Ed.). Manual de producción de tomate en invernadero. INTAGRI. Celaya, Guanajuato, México.

Castellón, G.J.J.; E.I. García S.; S. Flores P.; E. González H.; J.L. Mendoza S. y O.S. Ramírez L. (2008). Estrategia de gestión para la innovación en la red de agricultura protegida en Tlaxcala. Agencia de Gestión de Innovación (AGI), ITAT, CECADER, UTE, SEFOA, Gobierno del estado de Tlaxcala, SAGARPA. Tlaxcala, Tlax.

Chirinos, (s/f). ¿Es su agua de riego adecuada para los cultivos? Disponible en: [http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/\\$webindex/62BE8B18BD5BD3C206256AE8005EF92A/\\$file/es+su+agua.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/$webindex/62BE8B18BD5BD3C206256AE8005EF92A/$file/es+su+agua.pdf)

FAO (2000). Water quality management and control of water pollution. Water Reports 21. Proceedings of a Regional Workshop Bangkok, Thailand 26-30 October 1999. Roma, Italia.

FAO (2004). Economic valuation of water resources in agriculture. FAO Water Reports 27. Roma, Italia.

Hazem-Kalaji, M. y Pietkiewicz, S. (1993). Salinity effects on plant growth and other physiological processes. *Physiol. Plant.*, vol. 15, p. 89-124.

Hernández, R Ma. de L. y J.J. Castellón G.. (2007). “La concesión del agua en Tlaxcala y su impacto en la producción de alimentos” en el 12 Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México, AMECIDER: Reconstruyendo el desarrollo regional de México ante la recomposición del mundo. Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional. UNAM, Coltlax, CIISDER-UAT. Santa Cruz, Tlaxcala, México.

Katerji, N.; Mastrorilli, M.; Van Hoorn, J. W.; Lahmer, F. Z.; Hamdy, A. y Oweis, T. (2009). Durum wheat and

barley productivity in saline-drought environments. *Eur. J. Agron.*, vol. 31, No. 1, p. 1–9.

Kempkes, F. (2003). Sistemas cerrados en cultivos sin suelo: Elementos y Técnicas. pp 55-69. En: M. Fernández, F.; P. Lorenzo M. y M. I. Cuadrado G. (Ed.). Curso de especialización 7. Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos. Dirección General de Investigación y Formación Agraria, Consejería de Agricultura y Pesca, Hortimed, Fundación para la investigación agraria en la provincia de Almería, Cajamar. Almería, España.

Palacios, V. E. (2002). ¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar? para lograr mejores cosechas. Trillas. México. D.F.

Rhoades, J.D., Chanduvi, F. y S. Lesch. (1999). Soil salinity assessment. Methods and Interpretation of Electric Conductivity Measurements. FA-O Irrigation and Drainage Papers 57. Roma, Italy.

Richards, L.A. (1985). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Quinta reimpresión. Editorial Limusa. USDA. México

Stanguellini, C. (2003). El agua de riego: Su uso, eficiencia y economía. pp 25-36. En: M. Fernández, F.; P. Lorenzo M. y M. I. Cuadrado G. (Ed.). Curso de especialización 7. Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos. Dirección General de Investigación y Formación Agraria, Consejería de Agricultura y Pesca, Hortimed, Fundación para la investigación agraria en la provincia de Almería, Cajamar. Almería, España.

SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>

SIAP (2010). Portales estandarizados estatales del sistema Nacional de Información para el Desarrollo Rural sustentable. SAGARPA. [http://www.campomexicano.gob.mx/portal\\_SRP/Integracion/EstadisticaDerivada/InformaciondeMercados/Mercados/Modelos/Indicadoresbasicos2009.pdf](http://www.campomexicano.gob.mx/portal_SRP/Integracion/EstadisticaDerivada/InformaciondeMercados/Mercados/Modelos/Indicadoresbasicos2009.pdf).

Sonneveld, C. (2003). Efectos de la salinidad en los cultivos sin suelo. pp 149-168. En: M. Fernández, F.; P. Lorenzo M. y M. I. Cuadrado G. (Ed.). Curso de especialización 7. Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos. Dirección General de Investigación y Formación Agraria, Consejería de Agricultura y Pesca, Hortimed, Fundación para la investigación agraria en la provincia de Almería, Cajamar. Almería, España.

Tinarelli, D. (1989). El Arroz. Ed. Mundi Prensa, Madrid. España.

Tognoni, F. (2003). El desarrollo de los sistemas de cultivo en horticultura protegida. pp 25-36. En: M. Fernández, F.; P. Lorenzo M. y M. I. Cuadrado G. (Ed.). Curso de especialización 7. Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos. Dirección General de Investigación y Formación Agraria, Consejería de Agricultura y Pesca, Hortimed, Fundación para la investigación agraria en la provincia de Almería, Cajamar. Almería, España

Trueba, I. (2002). La seguridad alimentaria mundial. Primeras décadas del siglo XXI. El papel de la FAO y el PMA. Cátedra Alonso Martín Escudero. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

---

Este documento debe citarse como: Castellón Gómez J., Bernal Muñoz R., Hernández Rodríguez M. (2015). **Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 19-1, pp. 39-50, ISSN 1665-529-X.