

USO DE AGUA PRODUCIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) EN INVERNADERO

JOSÉ FERNANDO MARTEL VALLES

TESIS

Presentado como requisito para
Obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Ingeniería de Sistemas de Producción



Universidad Autónoma Agraria

Antonio Narro

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Julio de 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

USO DE AGUA PRODUCIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)
EN INVERNADERO

TESIS

JOSÉ FERNANDO MARTEL VALLES

Que se Somete a Consideración del H. Jurado Examinador como
Requisito Parcial, para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
COMITÉ PARTICULAR

Asesor principal:



Dr. Adalberto Benavides Mendoza

Asesor:



Dr. Rosalinda Mendoza Villarreal

Asesor:



Dr. Norma Angélica Ruiz Torres

Asesor:



Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor:



Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar



Dr. Fernando Ruiz Zarate

Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Julio de 2013.

DEDICATORIA

A Dios

Porque siempre me acompañas, por guiar mis pasos, por darme fortaleza para seguir adelante y por poner a buenas personas en mi camino.

A mis padres:

*+ María Valles Lucero
José Guadalupe Martell Castro*

Por darme la vida y su amor incondicional, por sus consejos y tantas cosas que me brindaron, ya que sin su apoyo este triunfo no sería posible.

A mis Hermanos:

Pbro. José Miguel Martell Valles, Elvia Martell Valles, María de Jesús Martel Valles, José Abel Martell Valles, José Eduardo Martell Valles y José Guadalupe Martell Valles

Por apoyarme siempre en los objetivos que me he fijado brindándome su confianza y amistad, alentándome en todo momento.

A mi Esposa e Hijos:

*Gladys María Leyva Muñoz
Gladys Guadalupe Martell Leyva, José Fernando Martell Leyva
y José David Martell Leyva*

Porque siempre están conmigo, por darme su amor y confianza, además de tener la paciencia de esperarme en nuestro hogar, además de ser el mejor equipo para los trabajos de campo y laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** por dar un vuelco a mi vida profesional y personal, porque ahí me dieron la oportunidad de enriquecer mis conocimientos, por lo cual hoy me siento orgulloso, gracias **ALMA TERRA MATER**.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**) por apoyarme económicamente a través de su programa de becas.

Al **Dr. Adalberto Benavides Mendoza** por darme la oportunidad de realizar mi investigación bajo su supervisión, brindándome su paciencia, apoyo incondicional y confianza; para que pudiera concluir satisfactoriamente esta etapa profesional.

A mi comité de asesores: Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal, Dra. Norma Angélica Ruiz Torres, Dr. Alejandro Zermeño González y Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar por su asesoría, apoyo, facilidades y contribución en la elaboración de esta investigación.

A la **academia de maestros del programa de Sistemas de Producción y Horticultura** por todo su tiempo, sus enseñanzas y paciencia dedicada a la formación de profesionales.

Al **T.L.Q. Carlos Alberto Arévalo Sanmiguel** y a la **Ing. Auri Gutiérrez** por su amistad, tiempo, confianza, apoyo y asesoría brindada en el Laboratorio de Nutrición Animal de la UAAAN.

Al CIQA. Centro de Investigación en Química Aplicada especialmente al **Lic. Luis Enrique Reyes Vielma, M.C. José Ángel Sánchez Molina** y al **Lic. Jesús Alejandro Espinosa Muñoz** por su apoyo y asesoría brindada en el Laboratorio de caracterización química.

A los funcionarios de la Subdirección de Postgrado de la UAAAN: **Ana Ma. Aguirre Gámez** y **Yolanda Sánchez** por sus amables atenciones, paciencia y facilidades otorgadas.

A mis amigos:

MC. Wendy Karina Gastelum Ferro, Ing. Benito Gustavo Correa González, Ing. Fernando Galindo García, MC. Isidro Morales García, MC. Antonio Juárez Maldonado, MC Willian Alfredo Narvaez Ortiz, Ing. Pedro Marcial Dajui Vixta, MC Alfredo Patichtan Moreno, Ing. Carlos López. MC Dagoberto Flores Marin y MC Víctor Camacho Chaves por apoyarme en el transcurso de mi estancia en la UAAAN.

RESUMEN

USO DE AGUA PRODUCIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) EN INVERNADERO

POR

JOSÉ FERNANDO MARTEL VALLES

**DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. JULIO 2013

Dr. Adalberto Benavides Mendoza –Asesor–

Palabras clave: aguas congénitas, contenido de sales, agricultura, NOM-143-SEMARNAT-2003.

Según la NOM-143-SEMARNAT-2003, el agua congénita o de formación, es agua salada que se encuentra dentro de los espacios porosos de la roca y partículas que forman los acuíferos confinados, asociada a la presencia de hidrocarburos. Contiene sales disueltas, como cloruros de calcio y sodio, carbonatos de sodio, cloruros de potasio, sulfatos de calcio o de bario, entre otros; puede incluso contener algunos metales. Estos componentes en alta concentración pueden ocasionar impactos negativos al medio ambiente cuando su manejo y disposición no son adecuados. Las estructuras geológicas productoras de hidrocarburos normalmente contienen aguas congénitas, que

al ser extraídas durante el proceso de producción de gas o petróleo son modificadas en su composición, con la adición de surfactantes geles e inhibidores (Veil *et al.*, 2004), los cuales facilitan la extracción de gas o petróleo y se les llama entonces “aguas producidas.” La composición de estas aguas es muy variable y depende del sitio de extracción, considerándose posible que en algunos casos pueda ser usada en la agricultura, por lo que el objetivo del presente estudio fue caracterizar y evaluar la factibilidad del uso agrícola de aguas producidas provenientes de la zona de producción de gas de Sabinas-Piedras Negras del norte de México en la producción de plantas de tomate cultivadas en condiciones de invernadero.

El estudio fue realizado en los años 2011 y 2012 utilizando aguas producidas provenientes de las estaciones (Buena Suerte, Forasteros y Monclova 1) más un testigo en el que se usó solamente solución Steiner. Las aguas producidas utilizadas se analizaron bajo la NOM-143-SEMARNAT-2003, además se realizó un análisis de calidad de agua de riego. Dichos análisis mostraron que las aguas producidas contienen altas concentraciones de sales minerales además se detectaron hidrocarburos por lo que su uso directo podría causar toxicidad al cultivo.

Con los resultados de los análisis se obtuvo la información necesaria para preparar los tratamientos, mezclando el agua producida con agua para riego, a las mezclas utilizadas se les realizó un análisis de calidad de agua de riego.

Se utilizaron dos variedades de tomate, el primer año se utilizó una variedad de tomate de hábito de crecimiento determinado y el segundo una de tipo indeterminado.

La aplicación de las mezclas en los tratamientos, se realizó a las 9 y 18 hrs., mas in riego con solución Steiner a las 13 hrs., en el testigo se aplicaron tres riegos a las horas ya mencionadas con solución Steiner. Al inicio se aplicó un volumen de 0.4 L el

cual se fue incrementando hasta llegar a un volumen de 2.5. Las mezclas afectaron significativamente la absorción mineral, lo cual disminuyó la producción de biomasa, reflejándose en la generación de hojas pequeñas, tallos delgados así como en el número y tamaño de frutos. Sobre todo en el caso de las plantas tratadas con el agua producida de la estación Buena Suerte.

Las aguas provenientes de las estaciones Forasteros y Monclova 1 son factibles para utilizarse para la producción de tomate, ya que la mayoría de las variables morfológicas del cultivo evaluadas, de las plantas regadas con estas aguas no fueron estadísticamente diferentes a las de las plantas del testigo. El tratamiento de la estación Buena Suerte no es apto para la agricultura por sus elevados contenidos de hidrocarburos y Cu^{++} , además de que afectó negativamente las variables evaluadas en las plantas de tomate y la absorción de minerales esenciales.

ABSTRACT

**USE OF PRODUCED WATER
IN THE PRODUCTION OF TOMATO (*Solanum lycopersicum* L.) IN
GREENHOUSE**

By

JOSÉ FERNANDO MARTEL VALLES

**DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. JULY 2013.

Dr. Adalberto Benavides Mendoza –*Adviser*–

Keywords: congenital water, salt content, agriculture, NOM-143-SEMARNAT-2003.

According to the NOM-143-SEMARNAT-2003, congenital water or formation water, is salt water found within the pore spaces of the rock and particles confined aquifers forming, associated with the presence of hydrocarbons. Containing dissolved salts, such as calcium chlorides and sodium, sodium carbonates, potassium chlorides,

calcium sulfates or barium sulfates, and so on; may even contain some metals. These components in high concentration may cause negative impacts to the environment when handling and disposal are not suitable

Geological structures which yield hydrocarbon production typically contain congenital water, to be extracted during the production of oil or gas, and which composition is modified with the addition of surfactants and inhibitors gels (Veil et al., 2004), which facilitate the extraction of oil or gas and is then called "produced water". The composition of these waters is highly variable and depends on the extraction site, in some cases it has being considered be used in agriculture. The objective of this research was to characterize and assess the feasibility of the agricultural use of produced water from the gas production area of Sabinas-Piedras Negras, Coahuila, in the North of Mexico, in the production of tomato plants grown under greenhouse conditions.

The study was conducted in years 2011 and 2012 using produced water from stations (Buena Suerte, Forasteros and Monclova 1), plus a control in which only Steiner fertilizer solution was used. The produced waters were analyzed under the NOM-143-SEMARNAT-2003, also underwent an analysis of irrigation water quality, these analyzes showed that the produced waters containing high concentrations of minerals salts, besides hydrocarbons were detected so direct use would cause crop toxicity.

From the results of the analysis was obtained the information necessary to preparing treatments, mixing the produced water with irrigation water, the mixtures water underwent an analysis of its water quality according to irrigation quality standards. The first year a variety of tomato with determinate growth habit was used and the second year one of undetermined tomato type was used.

The application of mixtures to the treatments was performed at 9 and 18 hrs., More in irrigation Steiner solution at 13 hrs., In the witness three irrigations were applied at the times mentioned above with Steiner solution. Initially, we applied a volume of 0.4 L which was increased up to a volume of 2.5. The application of mixtures water in tomato plants, significantly affect mineral absorption, decreasing biomass production, reflected in small leaves, slender stems, the number and size of fruits. Especially in the case of the plants treated with the produced water from Buena Suerte station.

Water from the stations Monclova 1 and Forasteros are feasible for use in tomato cultivation, since most of the crop morphological variables evaluated, plants irrigated with these waters are not statistically different from to plants of the the control, Treatment from Buena Suerte station it is unfit for agriculture because of its high oil content and Cu^{++} and negatively affected the variables evaluated in the tomato plants and the absorption of essential minerals.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
HIPÓTESIS.....	5
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
INDICE DE CUADROS DEL ARTICULO: DESARROLLO DE PLANTAS DE TOMATE (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) EN INVERNADERO REGADAS CON AGUAS PRODUCIDAS.....	19
III. ARTÍCULO. DESARROLLO DE PLANTAS DE TOMATE (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) EN INVERNADERO REGADAS CON AGUAS PRODUCIDAS.....	20
RESUMEN.....	21
ABSTRACT	23
INTRODUCCIÓN.....	24
MATERIALES Y MÉTODOS	27
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
CONCLUSIONES.....	42
LITERATURA CITADA	43
ÍNDICE DE CUADROS ARTÍCULO EFECTO DE LA APLICACIÓN DE AGUAS PRODUCIDAS EN EL CRECIMIENTO, LA CONCENTRACIÓN DE MINERALES Y COMPUESTOS TÓXICOS EN TOMATE BAJO INVERNADERO	48
IV. ARTÍCULO EFECTO DE LA APLICACIÓN DE AGUAS PRODUCIDAS EN EL CRECIMIENTO, LA CONCENTRACIÓN DE MINERALES Y COMPUESTOS TÓXICOS EN TOMATE BAJO INVERNADERO	49
RESUMEN.....	50
SUMMARY	51
INTRODUCCIÓN.....	52
MATERIALES Y MÉTODOS	55
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
CONCLUSION	64
REFERENCIAS	65

V. CONCLUSIONES..... 75
VI. LITERATURA CITADA 77

I. INTRODUCCIÓN

El agua congénita o connata es el agua atrapada en los poros de los sedimentos en el momento de su formación. Puede alcanzar gran contenido de sales, llegar a formar parte de las rocas y de los minerales como agua adsorbida en las partículas de arcilla y considerando que no es agua que se evapore o se mueva entre diferentes estratos, no se considera parte del ciclo hidrológico (Leet y Judson, 1974; Llamas, 1993). Las estructuras geológicas productoras de hidrocarburos normalmente contienen aguas congénitas (SEMARNAT, 2003a). Cuando el agua congénita es extraída durante el proceso de producción de gas o petróleo, su composición es modificada en el proceso industrial y se le llama entonces “agua producida” (Manfra *et al.*, 2010).

En cuanto a su composición fisicoquímica y volumen, las aguas producidas muestran variación dependiendo del sitio de extracción, la antigüedad y la geología de la formación de la que se produce el petróleo o el gas (Lee *et al.*, 2002; Veil *et al.*, 2004; Clark y Veil, 2009). Diversos estudios indican una gran variabilidad en las características de salinidad y contenido de elementos del agua producida, dicha variabilidad se presenta inclusive entre sitios de extracción de hidrocarburos relativamente cercanos. Esta variación se presenta igualmente en el agua producida procedente de plataformas marinas (Veil *et al.*, 2004; Manfra *et al.*, 2010). Algunas

fuentes de agua producida contienen hasta cinco o seis veces más sal que el agua de mar, llegando a presentar concentraciones de Cl^- de 150,000 a 180,000 mg L^{-1} (el agua de mar tiene en promedio 35,000 mg L^{-1}) y mostrando en promedio una conductividad eléctrica (CE) de 3,200 dS m^{-1} (Chave y Cox, 1982). Con estos niveles de sales el agua es tóxica para muchas formas de vida (Tinu y Amit, 2011; ARPEL, 2012), en particular para las plantas de cultivo, en donde el agua con conductividad eléctrica mayor a 3 dS m^{-1} o 2000 mg L^{-1} de sólidos disueltos totales (SDT) se le considera salina (FAO, 1994; GWPRF, 2003; Clark y Veil, 2009). Además, el agua producida puede contener compuestos de bajo peso molecular, ácidos orgánicos, condensados, aceites y grasas, hidrocarburos aromáticos como el benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, hidrocarburos policíclicos (HAP) y fenoles. Estos compuestos cuando están presentes en el agua, contribuyen a su toxicidad tanto en forma individual como de manera colectiva (Veil *et al.*, 2004; Clark y Veil, 2009). También puede incluir aditivos químicos usados durante la perforación y operaciones de producción (Clark y Veil, 2009). En cuanto a la concentración de metales en el agua producida, esta depende del sitio específico, ya que la antigüedad y la geología de la formación de la que se produce el petróleo o el gas modifican la disponibilidad y acumulación de los metales (Veil *et al.*, 2004). Normalmente el agua proveniente de pozos de producción de gas, contiene varias veces mayor concentración de metales que la proveniente de pozos de producción de petróleo (Jacobs *et al.*, 1992).

En México durante 2002, se obtuvieron $12.09 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua producida (SEMARNAT, 2003a) y en el 2010 de acuerdo al informe de responsabilidad social de la empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX, 2010), fueron $12.04 \times 10^6 \text{ m}^3$. En los Estados Unidos de América en el 2007, se generaron aproximadamente $3.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ de agua

producida, en cerca de un millón de pozos productores de petróleo y gas (Clark y Veil, 2009).

En México la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2003a), establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita (en realidad agua producida), asociada a la explotación de hidrocarburos. Dicha norma ambiental indica los límites seguros de los compuestos encontrados en el agua producida, así como la forma autorizada en México de realizar la disposición de dicho material, que consiste en la inyección en formaciones receptoras subterráneas como los pozos no productivos, la descarga del agua producida en cuerpos receptores de agua dulce, en aguas costeras y zonas marinas o bien a través de su disposición en el mar. La inyección de agua en pozos productores es la técnica más utilizada para mejorar la recuperación de hidrocarburos (SEMARNAT, 2003a; CNH, 2010). Por su parte, en los Estados Unidos de América las normas de disposición y uso del agua producida distinguen entre el agua que resulta de la actividad petrolera en plataformas marinas y la de zonas terrestres (DOE, 2012; USEPA, 2012). Para el caso del agua producida derivada de las actividades de producción en el mar, el manejo consiste en la descarga al mar después de un tratamiento, de acuerdo a los límites de composición química establecidos en los permisos expedidos por la EPA (1993). Para las actividades de producción en tierra el agua producida es llevada a sitios de disposición por medio de inyección subterránea o bien es canalizada a sitios de evaporación o almacenamiento.

Otra alternativa para el agua producida es el uso industrial y agropecuario (Clark y Veil, 2009; DOE, 2012). La primera opción contempla el uso industrial para el control de polvo y de incendios. La segunda incluye el riego de cultivos en suelo y vegetales hidropónicos, abrevadero para el ganado o para la fauna silvestre (Veil *et al.*, 2004;

NPC, 2011). En este sentido, se sabe que algunos tipos de agua producida presentan contenidos de sales que las hacen factibles para uso agrícola y su aplicación se ha probado experimentalmente (Veil *et al.*, 2004; DOE, 2012).

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar y evaluar la factibilidad de uso agrícola de aguas producidas, provenientes de la zona de producción de gas de Sabinas-Piedras Negras del norte de México en la producción de plantas de tomate cultivadas bajo condiciones de invernadero

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las aguas producidas de tres estaciones de pozos productores de gas natural, de acuerdo a la NOM-143-SEMARNAT-2003.
- Analizar las aguas producidas de tres estaciones de pozos productores de gas natural, de acuerdo a los estándares de calidad de agua de riego.
- Determinar el contenido mineral en los tejidos de plantas de tomate regadas con aguas producidas provenientes de tres estaciones de pozos productores de gas.
- Verificar el efecto en las variables morfológicas de plantas de tomate regadas con aguas producidas provenientes de tres estaciones de pozos productores de gas.
- Evaluar la concentración de HTP y BTEX, en frutos de tomate regados con aguas producidas provenientes de tres estaciones de pozos productores de gas.

HIPÓTESIS

Es posible utilizar aguas producidas con fines de irrigación de cultivos, sin alterar de manera significativa la producción y calidad de los frutos de plantas de tomate.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El agua congénita o de formación, es agua salada que se encuentra dentro de la roca, asociada a la presencia de hidrocarburos. Contiene sales disueltas, como cloruros de calcio y sodio, carbonatos de sodio, cloruros de potasio, sulfatos de calcio o de bario, entre otros; puede incluso contener algunos metales. La concentración de estos componentes puede ocasionar impactos negativos al medio ambiente cuando su manejo y disposición no son adecuados (SEMARNAT, 2003a).

En las formaciones subterráneas, naturalmente existen rocas impregnadas de fluidos como agua, petróleo o gas (o una combinación de ellos). Se cree que la roca en la mayoría de formaciones petrolíferas fue completamente saturada con agua antes de la invasión y la captura de petróleo (Amyx *et al.*, 1960).

Al agua se le ha llamado solvente universal, ya que hasta cierto punto disolverá casi todos los compuestos inorgánicos, la mayoría de los problemas con el agua producida se origina en este hecho ya que han estado presentes en la capa freática asociada el petróleo o gas durante cientos de millones de años, además ha tenido contacto con las formaciones rocosas y ha disuelto algunos compuestos (ARPEL, 2012). Manfra *et al.* (2007) realizaron un trabajo en el que se analizaron los minerales de los sedimentos localizados en los alrededores de una plataforma marítima productora de petróleo para correlacionarlos con los encontrados en el agua producida, encontrando que la mayoría de los elementos altos en los sedimentos correspondían a los

cuantificados en el agua producida y que además las concentraciones componentes de los sedimentos coincidían los elementos que se encontraban en altas concentraciones.

Durante el tiempo de explotación de un pozo productor de gas o crudo, la concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua producida no permanece constante, es variable con el tiempo y difícil de predecir (Veil *et al.*, 2004). Manfra *et al.* (2007) realizaron una serie de muestreos por tres años agua producida proveniente de cuatro plataformas en pozos productores de gas en los que se encontró que un mismo pozo puede tener variación en la concentración de sus componentes orgánicos e inorgánicos a través del tiempo, sin mostrar alguna tendencia predecible. Los resultados de los muestreos realizados por Kuipers *et al.* (2004), mostraron que las características de agua producida varían entre sitios distintos e incluso en aquellos que se encuentran cercanos entre ellos.

Los constituyentes de las aguas producidas que reciben mayor atención en las operaciones de mar y tierra por los problemas que pueden ocasionar, son el aceite y las grasas, mientras que el contenido de sales (expresado en salinidad, CE o SDT), es el más preocupante de las operaciones en tierra; adicionalmente el agua puede contener componentes orgánicos e inorgánicos que en altas concentraciones podrían ocasionar problemas de toxicidad (Veil *et al.*, 2004).

La caracterización de las aguas producidas ha sido muy extensa y variable. En un análisis de diferentes publicaciones (SEMARNAT, 2003a; Veil *et al.*, 2004; Hum *et al.*, 2006; Manfra *et al.*, 2007; ARPEL, 2012), se recopiló información de los componentes, elementos, compuestos, características y propiedades del agua producida que hasta el momento se han analizado, entre los que se encuentran: calcio (Ca), fósforo (P), sodio

(Na), magnesio (Mg), potasio (K), cloro (Cl), molibdeno (Mo), manganeso (Mn), zinc (Zn), hierro (Fe), cobre (Cu), azufre (S), plomo (Pb), plata (Ag), cromo (Cr), titanio (Ti), boro (B), litio (Li), arsénico (As), vanadio (V), bario (Ba), cobalto (Co), flúor (F), selenio (Se), cadmio (Cd), estroncio (Sr), níquel (Ni), mercurio (Hg), bromuros (Br^{-1}), dióxido de silicio (SiO_2), nitrato (NO_3^{-1}), carbonato (CO_3^{-2}), bicarbonato (HCO_3^{-1}), amoníaco (NH_3), sulfato (SO_4^{-2}), ácido benzóico ($\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$), dióxido de carbono (CO_2), ácido hexánico ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_2$), antraceno ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$), methylnapthalene ($\text{C}_{11}\text{-H}_{10}$), dimetilfenol ($\text{C}_8\text{H}_{10}\text{O}$), butano (C_4H_{10}), hexano (C_6H_{14}), clorobenceno ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$), n-alcanos ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$), p-cloro-m-cresol ($\text{C}_7\text{H}_7\text{ClO}$), fenol, esteranos, naftalina, di-n-butylphthalate, p-cresol, o-cresol, n-tetradecano, n-octadecano, n-hexadecano, n-eicosano, n-dodecano, n-decano, titerpanes, benzopireno, benceno, tolueno, xileno, etilbenceno (BTEX), butil hidroxil tolueno (BHT), glicoles polialcohol (DEG), dureza total ($\text{CaCO}_3\text{mg L}^{-1}$) carbono orgánico total (COT), oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), contenido total de microorganismos (CTM), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), saturación con bases, conductancia, alcalinidad, turbidez, salinidad, humedad, aceite y grasa total recuperable, conductividad, pH, aditivos, químicos inhibidores de corrosión, biocidas, desemulsionantes, coagulantes, sulfuro de hidrógeno, productos removedores de químicos tensoactivos, solventes, absorción de sodio, Ra 226, Ra 228, arqueos bacterias. Pudiendo contener otros elementos o compuestos no especificados en este trabajo.

Algunos de los componentes orgánicos e inorgánicos del agua producida pueden tener variación de estados físicos incluyendo solución, suspensión, emulsión, adsorbido en partículas y partículas de dichos componentes (Tibbetts *et al.*, 1992).

No solo las características y concentración de los componentes del agua producida pueden cambiar con el tiempo, también el volumen del agua extraído de los pozos productores de petróleo o gas se modifica a través del tiempo. La relación agua-petróleo puede cambiar según la antigüedad del pozo, cuando el pozo es nuevo el porcentaje de agua es menor en relación al del petróleo, pero con el tiempo ocurre lo contrario, el porcentaje de agua se incrementa y disminuye el de petróleo, al grado de obligar a suspender las actividades productivas del pozo (Khatib y Verbeek, 2003). En el caso del gas ocurre lo inverso que con el petróleo, cuando el pozo es reciente normalmente se extrae una gran cantidad de agua, de manera que el gas converge al reservorio en donde se encontraba el agua incrementándose el volumen de gas y disminuyendo con el tiempo la cantidad de agua producida (Lee *et al.*, 2002).

Algunas fuentes de agua producida puede tener una elevada concentración de sales las cuales incrementan la CE, si esta es mayor de 3 dS m^{-1} se considera salina según los criterios de calidad de agua de riego (FAO, 1994). La mayoría de las aguas producidas tienen más salinidad que las aguas del mar (Cline, 1998). Valores de CE superiores a los límites máximos para agua de riego, al aplicarse directamente en cultivos daría lugar a estrés inducido por salinidad (Pessaraki, 2011).

Asimismo algunas aguas pueden tener concentraciones elevadas de cloruros y al usarse en irrigación de cultivos podrían acumularse en los suelos y al entrar en contacto con las plantas induciría disminución del crecimiento y necrosis celular (Razateo, 1993). También el agua producida puede contener, altas concentraciones de bicarbonatos, las cuales pueden afectar la asimilación de Mg (Vivot *et al.*, 2010) y otros elementos.

Una alta DBO en el agua producida utilizada en el riego, puede inhibir la actividad microbiana disminuyendo la oxidación de la materia orgánica presente en el

agua, (Hudson *et al.*, 2008). Altas concentraciones de sólidos volátiles totales (SVT), sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos volátiles (SV) en las aguas producidas al aplicarlas en riego causarían estrés hiperosmótico (Pessarakli, 2011 y Yokoi *et al.*, 2002).

El agua producida puede contener hidrocarburos aromáticos como el benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, hidrocarburos policíclicos (HAP) y fenoles, los cuales contribuyen a su toxicidad (Glickman, 1998; Adam y Duncan, 2002; Quiñones-Aguilar *et al.*, 2003; SEMARNAT, 2003b; Veil *et al.*, 2004; Clark y Veil, 2009). La fracción soluble puede ser absorbida y por bioacumulación puede ocasionar problemas de toxicidad en algunos organismos (Martínez-Jerónimo, 2005).

Según Powell (1997) los hidrocarburos causan problemas fisiológicos como inhibición de la germinación, disminución del crecimiento vegetal y muerte de las plantas. Las aguas producidas pueden causar un efecto adverso en las plantas, mostrando daños en los tejidos e incluso la muerte por efecto de estas aguas (Venkata-RumanaRau *et al.*, 2011).

Para el caso de las plantas los hidrocarburos pueden ser absorbidos por las raíces o pueden entrar a través de los estomas (Navas *et al.*, 2006), aunque no necesariamente los hidrocarburos deben absorberse para causar toxicidad en las plantas, al estar en contacto con la raíz pueden causar daños severos en los tejidos de la planta (Srogi, 2007) ocasionando disminución del peso seco.

Normalmente las aguas producidas provenientes de plataformas productoras de gas es mucho más tóxicas que las provenientes de plataformas productoras de petróleo (Jacobs *et al.*, 1992).

En el trabajo realizado por Manfra *et al.* (2010) se encontró que existen diferentes grados de sensibilidad a las aguas producidas entre los organismos de diferentes niveles tróficos. Por otra parte la composición química de las aguas producidas es variable en cada tipo y concentración de los compuestos que contiene. Por ello algunos organismos que pueden ser tolerantes a un tipo de aguas producidas pueden ser sensibles a otras fuentes de agua. Como consecuencia un estudio amplio para determinar la factibilidad de uso de las aguas producidas idealmente debe realizarse utilizando diferentes especies.

En México la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2003a) establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita (en realidad agua producida) asociada a la explotación de hidrocarburos. Dicha norma ambiental indica los límites seguros de los compuestos encontrados en el agua producida, así como la forma autorizada en México de realizar la disposición de dicho material, que consiste en la inyección en formaciones receptoras subterráneas como los pozos no productivos, la descarga del agua producida en cuerpos receptores de agua dulce, en aguas costeras y zonas marinas o bien a través de su disposición en el mar. (SEMARNAT, 2003a; Cruz-Hernández *et al.*, 2005; CNH, 2012). El límite máximo permisible de hidrocarburos, para la descarga de agua producida en cuerpos receptores de agua dulce, es de 15 mg L^{-1} y en aguas costeras y zonas marinas es de 40 mg L^{-1} . El límite máximo permisible de sólidos disueltos totales (SDT) para la descarga de agua congénita, en cuerpos receptores de agua dulce es de 500 mg L^{-1} . El límite máximo permisible de sólidos disueltos totales (SDT) para la descarga de agua congénita en aguas costeras es de $32,000 \text{ mg L}^{-1}$, y su descarga debe ser a una distancia que sobrepase los 2 km de la costa. Cuando las concentraciones de sólidos disueltos totales sobrepasen las del cuerpo de agua receptor

la descarga debe efectuarse través de difusores, que permitan la dispersión y asimilación inmediata. Esta norma hace referencia a la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 1996) que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Igualmente dicha norma indica como caracterizar los contaminantes básicos y metales pesados referenciados en la misma cuando se descargue el agua congénita en cuerpos receptores.

En los Estados Unidos de América las normas de disposición y uso del agua producida distinguen entre el agua que resulta de la actividad petrolera en plataformas marinas y la de zonas terrestres (DOE, 2012). La USEPA (2012) legisló los límites máximos permisibles de los componentes orgánicos e inorgánicos contaminantes en el agua producida y además coordina las oficinas regionales de la EPA en las diferentes regiones de ese país, las cuales establecen los límites máximos permisibles de contaminantes de acuerdo al sitio específico de descarga disposición o uso.

El código federal de regulaciones (CFR) en la norma 40 CFR Part 435 -Oil and Gas Extraction- establece que las descargas en tierra de agua producida para el parámetro de aceites y grasas no deben rebasar un límite máximo diario de 35 mg L^{-1} (USEPA, 2013).

Para las descargas en el mar se establecen límites de concentración de aceites y grasas de 29 mg L^{-1} como promedio mensual y de 42 mg L^{-1} como máximo diario. En las operaciones en tierra se establece un límite de $10,000 \text{ mg L}^{-1}$ de sólidos solubles totales para la inyección de agua congénita en suelo.

La EPA (1993) otorga permisos para descarga según la región, los permisos más importantes para explotación de crudo y gas son los del Este del Golfo de México (Región 4), Oeste del Golfo de México (Región 6), California (Región 9), Wyoming

(Región 8), la pendiente norte y Cook Inlet de Alaska (Región 10). Dependiendo del lugar de descarga así serán los límites permitidos para ese sitio en particular.

En el resto del mundo existen diferentes límites para descarga en mar o en tierra, así como para su caracterización. La Produced Water Society (PWS, 2010) recabó información de la reglamentación en varios países publicada en el 2002, dicho estudio muestra que en la mayoría de los reglamentos los límites considerados son muy similares a los de México.

Hasta hace algunos años la tendencia mundial apuntaba hacia que la opción óptima para la disposición del agua congénita (realmente agua producida) asociada a la producción de hidrocarburos, era su inyección en formaciones receptoras subterráneas, o su disposición en el mar después de un tratamiento (SEMARNAT, 2003a). Sin embargo, el agua producida puede utilizarse en actividades productivas, sin necesidad de tratamiento cuando el uso final no requiere de alta calidad. En otros casos, el agua debe ser tratada antes de que pueda ser reutilizada. Pero cuando estas aguas tienen bajas concentraciones de hidrocarburos y sales pueden ser utilizadas en actividades productivas comunes (Veil *et al.*, 2004). La calidad del agua determina las diferentes opciones de reutilización que se enumeran a continuación.

Inyección Subterránea para Incrementar Recuperación de Petróleo

Aunque un poco de agua producida se inyecta exclusivamente para su disposición, la mayoría del agua (71%) se inyecta para mantener la presión del yacimiento y para impulsar hidráulicamente petróleo hacia un pozo productor. Esta práctica se conoce como inoculación de agua (ALL, 2003), si el agua se calienta para producir vapor, la extracción de crudo se puede incrementar hasta en un 80 % (Mastouri,

2010). Cuando se utiliza para mejorar la recuperación de petróleo, el agua producida deja de ser un residuo y se convierte en un recurso.

Históricamente, las fuentes de agua dulce se han utilizado para este propósito. Sin embargo, debido a la creciente escasez de este recurso, otras fuentes de agua como el agua del mar o las aguas producidas normalmente se utilizan en lugar del agua dulce (ALL, 2003).

Inyección para uso futuro

Algunos tipos de agua producida pueden tener bajas concentraciones de sales y se pueden utilizar directamente con un tratamiento de filtrado (Manfra *et al.*, 2010). Esta agua puede utilizarse inmediatamente, para su reutilización beneficiosa o puede ser inyectada en un acuífero, para su uso posterior. Este proceso se conoce como almacenamiento y recuperación del acuífero (ALL, 2003). Brost (2002) describe una operación en el campo Kern River de California, en la que una mezcla de agua producida y agua subterránea tratada se filtra, luego es enviada al distrito de agua local para usarse en el riego y la recarga de acuíferos. Ese documento, no ofrece detalles sobre cómo el agua es tratada o inyectada.

El uso para los animales

Algunas de las aguas producidas tienen buena calidad (muestran bajas concentraciones de sales y de hidrocarburos) y son utilizadas directamente o después de algún grado de tratamiento para el consumo de animales (ganado o la fauna silvestre) como agua para beber o, en el caso de los peces y aves acuáticas, como hábitat. El ganado puede tolerar una amplia gama de contaminantes en su agua de abrevadero (ALL, 2003). Los animales son capaces de sobrevivir, en algunos casos el agua puede

provocar diarrea (ALL, 2003; Veil *et al.*, 2004). El agua con SDT menos de 1,000 ppm se considera como una fuente de agua excelente para el ganado. En algunas zonas de las Montañas Rocosas con disponibilidad de grandes volúmenes de agua producida se construyeron embalses que recogen y almacenan estas aguas. En algunos casos, estos embalses cuentan con superficies de varias hectáreas y constituyen una fuente de agua para la vida silvestre y el hábitat de peces y aves acuáticas (ALL, 2003).

La acuicultura y el cultivo de vegetales hidropónicos.

En experimentos en los que se utilizó agua producida en una combinación de hidroponía con acuicultura, se demostró que aunque es factible el uso de las aguas producidas en plantas, éstas dieron menor resultado que la solución fertilizante en cuanto a la producción de biomasa y el número de frutos. Los peces tilapia en tanques de agua producida crecieron con un mayor peso pero algunos de los peces murieron. Ninguno de los peces en el tanque con agua del tratamiento control murió. Las pruebas mostraron que el agua producida, podría servir como una fuente de agua para las hortalizas y peces, cuando otras fuentes de agua potable no están disponibles, o en lugares que carecen de este recurso (Jackson y Myers, 2002).

La irrigación de los cultivos.

En muchas partes de los Estados Unidos de América y del mundo no se dispone de suficiente agua dulce. El riego de los cultivos constituye el 39% de toda el agua extraída en las operaciones de tierra y en el mar, en los Estados Unidos de América, es decir, 150 mil millones de galones por día (Veil *et al.*, 2004). Si el agua producida tiene un porcentaje bajo de SDT, puede ser un recurso valioso para el riego de los cultivos.

ALL (2003) al analizar los minerales contenidos en las aguas producidas determinó que las variables más críticas son la salinidad (que afecta a las plantas), sodicidad (afecta el suelo) y la toxicidad (afecta a las plantas). Cada especie de cultivo tiene diferente susceptibilidad a la salinidad y por ello el impacto en el crecimiento y rendimiento será distinto (Paetz y Maloney, 2002).. Los valores altos de sodio conducen a la excesiva dispersión de las partículas del suelo y a la pérdida de la capacidad de infiltración. Cuando los suelos sódicos están mojados, se vuelven pegajosos, y cuando se seca, se forma una capa crujiente que es casi impermeable (ALL, 2003). Faltó la toxicidad.

Control de Polvo

En las zonas donde tradicionalmente los recursos hídricos superficiales y subterráneos son escasos, el agua producida puede ser utilizada en diversas prácticas industriales, siempre y cuando la calidad del agua con o sin tratamiento satisfaga las necesidades del proceso industrial.

En la mayoría de los campos petroleros los caminos sin pavimentar son una fuente sustancial de polvo. Algunos organismos de reglamentación del petróleo y gas permiten a los productores rociar el agua producida sobre los caminos de tierra para controlar el polvo. Esta práctica está generalmente controlada, de manera que el agua producida no se aplica más allá de los límites de la carretera o alrededor de cruces de arroyos y cerca de edificios (Murphree, 2002).

Vehículos y equipo de lavado

Algunas agencias estatales y federales recomiendan que los vehículos y equipos, se laven para controlar la posibilidad de distribuir semillas de las especies de malezas indeseables al dejar los centros de producción (ALL, 2003).

Generación de energía

El agua producida se utiliza para el abastecimiento de agua para producir vapor. Cerca de 360.000 barriles diarios de una instalación de ChevronTexaco en el centro de California se ablandan y se envían a una planta de cogeneración como fuente de agua de alimentación de calderas (Brost, 2002).

Otro uso potencial del agua congénita es como agente de enfriamiento. La industria de la energía eléctrica, es el segundo mayor consumidor de agua dulce en los Estados Unidos de América (Veil *et al.*, 2004).

Control de Incendios

Los incendios a menudo ocurren durante los períodos más áridos del año. El agua producida puede utilizarse para la lucha contra el fuego en estas áreas. Aunque la aplicación de grandes volúmenes de solución salina puede tener un impacto sobre los suelos, dicho efecto es mucho menos devastador que un gran incendio. ALL (2003) informa que los bomberos cerca de Durango, Colorado, utilizaron agua congénita almacenada en embalses como fuente de alimentación para llenar tanques aéreos (helicópteros que rocían agua sobre los incendios) durante el verano de 2002.

Dependiendo de los resultados de la caracterización del agua producida será el uso potencial de la misma, ya sea como agua potable, abrevadero, irrigación, etc. Para esto se sugiere guiarse con los estándares de compuestos de calidad de agua de superficial enumerados a continuación (FAO, 1994; Hum *et al.*, 2006; ARPEL, 2012):

- a) Guía de calidad de agua de riego para uso agrícola.
- b) Límites de metales pesados en agua.
- c) Estándares de compuestos orgánicos e inorgánicos de calidad de agua de los Estados Unidos de América.
- d) Criterios para agua potable y agua de irrigación.
- e) Concentración de elementos traza en tejidos de las plantas para diagnóstico y soluciones en condiciones de crecimiento normal y tóxico.
- f) Concentraciones normales y tóxicas de elementos rastreados en suelos relacionados con el crecimiento de las plantas.
- g) Concentración de elementos en plantas relacionados con la toxicidad y las tolerancias en los alimentos de animales.
- h) Cargas totales acumuladas máximas para elementos en suelo.

INDICE DE CUADROS DEL ARTICULO: Desarrollo de plantas de tomate
(*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero regadas con aguas producidas

Cuadro I Descripción de tratamientos. Se presenta la proporción de agua producida con el agua de riego.	29
Cuadro II Análisis de las aguas producidas de acuerdo a la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2003a). Se analizó a modo de referencia la solución fertilizante steiner (steiner 1961) al 75% de concentración. Todas las concentraciones se expresan en mg L ⁻¹ con excepción del pH.	32
Cuadro III Análisis de calidad de agua de riego realizado a las aguas producidas. Para fines de comparación se analizó también la solución fertilizante Steiner (1961) al 50% y el agua de riego.	34
Cuadro IV Análisis de calidad de agua de riego realizados a los tratamientos utilizados. En el caso del testigo (T0) se usó la solución fertilizante Steiner (1961) al 100%. ..	35
Cuadro V Variables morfológicas en medidas en las plantas de tomate. Se muestran las etapas floración ¹ y fructificación ² . ALT y LR se expresan en cm; DT en mm; PSP, PSH, PST y PF en g.	37
Cuadro VI Concentración de minerales en la raíz de la planta de tomate en las etapas de floración ¹ y fructificación ² . N, P, K, Ca, Mg y Na se expresan en % en base a materia seca. Fe, Cu, Zn y Mn se expresan en mg L ⁻¹	38
Cuadro VII Concentración de minerales en diferentes órganos de la planta en la etapa de floración (parte aérea ¹) y fructificación (hoja ² y tallo ³). N, P, K, Ca, Mg y Na se expresan en % en base a materia seca. Fe, Cu, Zn y Mn se expresan en mg L ⁻¹	39
Cuadro VIII Concentración de minerales en el fruto. Se presentan los resultados del primero ¹ y sexto corte ² . N, P, K, Ca, Mg y Na se expresan en % en base a materia seca. Fe, Cu, Zn y Mn se expresan en mg L ⁻¹	39

III. ARTÍCULO. DESARROLLO DE PLANTAS DE TOMATE
(*Solanum lycopersicum* L.) EN INVERNADERO REGADAS
CON AGUAS PRODUCIDAS

**DESARROLLO DE PLANTAS DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) EN
INVERNADERO REGADAS CON AGUAS PRODUCIDAS**

**GROWTH OF TOMATO PLANTS, (*Solanum lycopersicum* L.) IN
GREENHOUSE IRRIGATED WITH PRODUCED WATER**

José Fernando MARTEL-VALLES¹, Adalberto BENAVIDES-MENDOZA^{1*}, Rosalinda
MENDOZA-VILLARREAL¹, Alejandro ZERMEÑO-GONZALEZ².

¹Departamento de Horticultura, ²Departamento de Riego y Drenaje, Universidad
Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, C.P. 25315, México.

*Autor para correspondencia abenmen@uaaan.mx

RESUMEN

Las estructuras geológicas productoras de hidrocarburos normalmente contienen aguas congénitas que al ser extraídas durante el proceso de producción de gas o petróleo su composición es modificada en el proceso industrial llamándosele entonces “agua producida”. Esta agua por su alto contenido de sales puede ser usada en la agricultura, y ya que estas pueden tener efectos adversos en plantas y suelo el objetivo del presente estudio fue caracterizar y evaluar la factibilidad del uso de aguas producidas provenientes de la zona de producción de gas de Sabinas-Piedras Negras del norte de México en el riego de plantas de tomate cultivadas en invernadero. Para ello se estableció un cultivo de tomate en invernadero. Los tratamientos consistieron en la aplicación de aguas producidas provenientes de la región productora de gas (Buena Suerte, Forasteros y Monclova 1) más un testigo en el que se usó una solución Steiner. Las aguas producidas utilizadas se analizaron bajo la NOM-143-SEMARNAT-2003. Además, a los tratamientos utilizados (agua producida mezclada con agua de riego), se

les realizó un análisis de calidad de agua de riego. Con los resultados de los análisis se obtuvo la información necesaria para caracterizar las diferentes aguas producidas usadas. En cuanto a su uso en el cultivo, los resultados mostraron que las aguas provenientes de las estaciones Forasteros y Monclova 1 son factibles para utilizarse para riego en el cultivo del tomate. El tratamiento de la estación Buena Suerte no es apto para la agricultura por que afectó negativamente DT, PSH y LR en las plantas de tomate.

Palabras clave: aguas congénitas, contenido de sales, agricultura, NOM-143-SEMARNAT-2003

ABSTRACT

GROWTH OF TOMATO PLANTS, (*Solanum lycopersicum* L.) IN GREENHOUSE IRRIGATED WITH PRODUCED WATER

Geological structures which yield hydrocarbon production typically contain congenial water, that when extracted during the production of oil or gas, its composition is modified in the manufacturing process and is then called "produced water". This water, because of its high salt content, can be used in agriculture, and since can have adverse effects on plants and soil the objective of this study was to evaluate and verify the feasibility of use of produced water from the gas production area of Sabinas-Piedras Negras located at the North of México for watering tomato plants in greenhouse conditions. For this study the treatments were applied with produced water from the gas producing region (Buena Suerte, Forasteros and Monclova 1), plus a control in which only Steiner fertilizer solution was used. The produced waters used were analyzed under the NOM-143-SEMARNAT-2003. In addition, an analysis of water according to the norms for water for irrigation purposes was performed on treatment water (produced water mixed with fresh water). From the results of the analysis were obtained the information necessary to characterize the different produced waters used. The results showed that water from stations of Monclova 1 and Forasteros were feasible using it for irrigation in tomato crop. Water from Buena Suerte station is unfit for agriculture because negatively affected SD, LDW and RL in the tomato plants.

Keywords: congenial water, salt content, agriculture, NOM-143-SEMARNAT-2003.

INTRODUCCIÓN

El agua congénita o connata es el agua atrapada en los poros de los sedimentos en el momento de su formación. Puede alcanzar gran contenido de sales, llegar a formar parte de las rocas y de los minerales como agua adsorbida en las partículas de arcilla y considerando que no es agua que se evapore o se mueva entre diferentes estratos, no se considera parte del ciclo hidrológico (Leet y Judson 1974, Llamas 1993). Las estructuras geológicas productoras de hidrocarburos normalmente contienen aguas congénitas (SEMARNAT 2003a). Cuando el agua congénita es extraída durante el proceso de producción de gas o petróleo, su composición es modificada en el proceso industrial con la adición de surfactantes geles e inhibidores (Veil *et al.*, 2004), los cuales facilitan la extracción de gas o petróleo y se le llama entonces “agua producida” (Manfra *et al.* 2010).

En cuanto a su composición fisicoquímica y volumen, las aguas producidas muestran variación dependiendo del sitio de extracción, la antigüedad y la geología de la formación de la que se produce el petróleo o el gas (Lee *et al.* 2002, Veil *et al.* 2004, Clark y Veil 2009). Diversos estudios (Veil *et al.* 2004, Manfra *et al.* 2010). indican una gran variabilidad en la composición, concentración y características de salinidad del agua producida, dicha variabilidad se presenta inclusive entre sitios de extracción de hidrocarburos relativamente cercanos¹. Esta variación se presenta igualmente en el agua producida procedente de plataformas marinas (Veil *et al.* 2004, Manfra *et al.* 2010).

¹Benavides-Mendoza, A. 2008. Proyecto de Manejo de Agua Congénita para el Desarrollo Sustentable del Activo Integral Burgos (Análisis de Variables Básicas del Agua). Reporte Técnico entregado al Activo Integral Burgos de Pemex Exploración y Producción.

Algunas fuentes de agua producida contienen altos contenidos de sales, hasta cinco o seis veces más que el agua de mar, llegando a presentar concentraciones de Cl⁻ de 150,000 a 180,000 mg L⁻¹ (el agua de mar tiene en promedio 35,000 mg L⁻¹) y mostrando en promedio una conductividad eléctrica (CE) de 3,200 dS m⁻¹ (Chave y Cox 1982). Con estos niveles de sales el agua es tóxica para muchas formas de vida (Tinu y Amit 2011, ARPEL 2012), en particular para las plantas de cultivo, en donde el agua con CE mayor a 3 dS m⁻¹ o 2000 mg L⁻¹ de sólidos disueltos totales (SDT) se le considera salina (FAO 1994, GWPRF 2003, Clark y Veil 2009). Además, el agua producida puede contener compuestos de bajo peso molecular, ácidos orgánicos, condensados, aceites y grasas, hidrocarburos aromáticos como el benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, hidrocarburos policíclicos (HAP) y fenoles. Estos compuestos cuando están presentes en el agua, contribuyen a su toxicidad tanto en forma individual como colectiva (Veilet *al.* 2004, Clark y Veil 2009). También puede incluir aditivos químicos usados durante la perforación y operaciones de producción (Clark y Veil 2009). En cuanto a la concentración de metales en el agua producida, esta depende del sitio específico, ya que la antigüedad y la geología de la formación de la que se produce el petróleo o el gas modifican la disponibilidad y acumulación de los metales (Veil *et al.* 2004). Normalmente el agua proveniente de pozos de producción de gas, contiene varias veces mayor concentración de metales que la proveniente de pozos de producción de petróleo (Jacobs *et al.* 1992).

En México durante 2002, se produjeron $12.09 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua producida (SEMARNAT 2003a) y en el 2010 de acuerdo al informe de responsabilidad social de la empresa Petróleos Mexicanos (PEMEX 2010), fueron $12.04 \times 10^6 \text{ m}^3$. En los Estados Unidos de América en el año 2007, se generaron aproximadamente $3.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ de agua

producida, en cerca de un millón de pozos productores de petróleo y gas (Clark y Veil 2009). En México la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2003a), establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita (en realidad agua producida), asociada a la explotación de hidrocarburos. Dicha norma ambiental indica los límites seguros de los compuestos encontrados en el agua producida, así como la forma autorizada en México de realizar la disposición de dicho material, que consiste en la inyección en formaciones receptoras subterráneas como los pozos no productivos, la descarga del agua producida en cuerpos receptores de agua dulce, en aguas costeras y zonas marinas o bien a través de su disposición en el mar. La inyección de agua en pozos productores es la técnica más utilizada para mejorar la recuperación de hidrocarburos (SEMARNAT 2003a, CNH 2010). Por su parte, en los Estados Unidos de América las normas de disposición y uso del agua producida distinguen entre el agua que resulta de la actividad petrolera en plataformas marinas y la de zonas terrestres (DOE 2012, USEPA 2012). Para el caso del agua producida derivada de las actividades de producción en el mar, el manejo consiste en la descarga al mar después de un tratamiento, de acuerdo a los límites de composición química establecidos en los permisos expedidos por la EPA (1993). Para las actividades de producción en tierra el agua producida es llevada a sitios de disposición por medio de inyección subterránea o bien es canalizada a sitios de evaporación o almacenamiento.

Otra alternativa para el agua producida es el uso industrial y agropecuario (Clark y Veil 2009, DOE 2012). La primera opción contempla el uso industrial para el control de polvo y de incendios. La segunda incluye el riego de cultivos en suelo y vegetales hidropónicos, abrevadero para el ganado o para la fauna silvestre (Veil *et al.* 2004, NPC 2011). En este sentido, se sabe que algunos tipos de agua producida presentan

contenidos de sales que las hacen factibles para uso agrícola y su aplicación se ha probado experimentalmente (Veil *et al.* 2004, DOE 2012).

En México no se dispone de suficiente información sobre la composición de las aguas producidas y tampoco se han publicado pruebas para comprobar la posibilidad de su uso en la producción de cultivos, además de que estas aguas tienen un costo de extracción, separación, almacenamiento, acarreo y disposición, por lo que además de la reinyección para incrementar la presión de los pozos, podría aprovecharse para otros fines productivos. El objetivo del presente estudio fue caracterizar y evaluar la factibilidad del uso de aguas producidas provenientes de la zona de producción de gas de Sabinas-Piedras Negras del norte de México en la producción de plantas de tomate cultivadas en invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental se llevó a cabo en un invernadero de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México cuyas coordenadas geográficas son: 25° 22' Latitud Norte, 101° 00' Longitud Oeste, ubicado a una altitud de 1760 msnm.

El agua producida utilizada para este estudio se obtuvo de tres estaciones de pozos productores de gas natural de PEMEX (Buena Suerte, Monclova 1 y Forasteros) ubicados en los municipios de San Buenaventura, Monclova y Abasolo, correspondientes a la zona de producción de gas Sabinas-Piedras Negras del Estado de Coahuila, México. Cada estación recibe aportes de agua producida de hasta 25 pozos, así que el agua de cada estación fue una mezcla de diferentes fuentes de las áreas circundantes. Estas estaciones fueron seleccionadas por contar con agua producida con

valores altos de CE, indicativo de la cantidad de iones disueltos en el agua, los cuales son absorbidos por la planta para su nutrición (Steiner, 1961).

Para caracterizar el agua producida tomada de las tres estaciones, se analizaron muestras de acuerdo a la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2003a). Para fines comparativos, también una muestra de solución fertilizante Steiner (Steiner, 1961) al 75% de concentración fue analizada bajo esta norma. Los análisis realizados consideraron los hidrocarburos (fracción ligera, media y pesada), grasas y aceites, así como las concentraciones de Zn^{+2} , Pb^{+2} , Ni^{+2} , Cd^{+2} , Cu^{+2} , Hg^{+2} , As^{+3} , Cr^{+3} , fósforo total, nitrógeno total, nitrógeno como nitritos, nitrógeno como nitratos. Además se verificó el pH, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los sólidos sedimentables, la materia flotante, los sólidos totales, los sólidos disueltos totales (SDT), los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos volátiles totales (SVT).

Adicionalmente, las muestras anteriores más una muestra del agua de un pozo cercano al invernadero usada para el riego, fueron analizadas para evaluar su calidad como agua de riego (FAO, 1994). En éstas se determinó su CE, pH, sólidos totales disueltos (TDS), así como los minerales disueltos (K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , CO_3^{-2} y SO_4^{-2}). Además se obtuvo la relación de adsorción de sodio (RAS) y la salinidad efectiva ($SE = \text{Suma de Aniones} - [Ca + Mg]$).

Se realizó una dilución de las aguas producidas con el agua de riego disponible en el invernadero hasta lograr un valor de CE de alrededor de 1.5 dS m^{-1} (valor promedio de CE de la solución fertilizante aplicada) y se determinó al final de la dilución el pH de cada una. La relación final de estas mezclas fue utilizada para los tratamientos de riego de las plantas (**Cuadro I**). Como tratamiento testigo (T0) se usó

solución fertilizante Steiner (Steiner 1961), la cual se aplicó en diferentes concentraciones de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo.

Cuadro I. Descripción de tratamientos. Se presenta la proporción de agua producida con el agua de riego.

Tratamiento	Estación	Agua producida (L)	Agua de riego (L)	pH	C.E. (mS cm ⁻¹)
T0	Solución fertilizante	0.0	1.0	6.5	*
T1	Buena Suerte	1.0	7.5	7.22	1.509
T2	Monclova 1	1.0	290.0	7.96	1.487
T3	Forasteros	1.0	8.0	7.92	1.491

*Siguiendo el manejo tradicional del cultivo la CE fue diferente para cada etapa fenológica, iniciando con 1.08 y terminando con 2.83 mS cm⁻¹.

Una vez determinadas las proporciones para los tratamientos utilizados, se analizaron muestras de estas mezclas para verificar la concentración de nutrimentos minerales esenciales disueltos. Para esto se usó un espectrómetro de emisión atómica, marca Thermo Jarrel ASH, según el método de absorción atómica con acoplamiento inductivo de plasma ICP/AA.

El ciclo de crecimiento del cultivo fue del 23 de junio al 4 de noviembre de 2011 (134 días). El cultivo utilizado fue tomate tipo saladette (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Río Grande, con hábito de crecimiento determinado. La plántula usada se produjo en charolas de poliestireno de 200 cavidades, usando como sustrato una mezcla de peatmoss y perlita (3:1). El trasplante se realizó en macetas de polietileno color negro con un volumen de 16 L en un sistema de cultivo sin suelo utilizando la misma concentración de sustrato. Se usó un sistema de riego dirigido con estacas de alto flujo en cada maceta. El cultivo de tomate se guió a un tallo y se le aplicaron las labores culturales tradicionales.

Con el fin de tener plantas con un vigor y crecimiento homogéneos estas fueron regadas sólo con solución fertilizante durante 20 días antes de iniciar la aplicación de los tratamientos. La aplicación del riego se realizó en tres diferentes horarios por día (9:00, 13:00 y 18:00 hrs.), aplicando alrededor de 800 ml por planta en cada uno. La aplicación de los tratamientos se realizó en el primero y tercer riegos, mientras que para todos los casos en el segundo riego se aplicó solución fertilizante.

Las variables morfológicas evaluadas en las plantas de tomate fueron: diámetro del tallo (DT) medido en el entrenudo de la base del tallo utilizando un calibrador vernier digital, la altura de la planta (ALT) medida de la base del tallo a la yema terminal y la longitud de la raíz (LR) medida del cuello a la cofia de la raíz más larga. En la etapa de floración se obtuvo el peso seco de la parte aérea de la planta (hojas + tallo) (PSP) y en la etapa de fructificación se obtuvo el peso seco de hojas (PSH) y tallos (PST) por separado. En ambas etapas el peso se cuantificó después de secar en estufa deshidratadora a 60°C por tres días. Se utilizó una balanza analítica marca OHAUS, modelo SCOUTPROSP 6000. Para determinar el número de frutos por planta (NF) se seleccionaron al azar cinco plantas por tratamiento durante la etapa de fructificación en las que se contabilizó el número de frutos cosechados en cada corte. La producción de fruto por planta (PF) se obtuvo de la sumatoria de seis cortes durante la etapa de cosecha entre los 93 y 128 días después del trasplante.

Para la determinación de minerales (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn y Mn) se seleccionaron cinco plantas al azar por cada tratamiento en las etapas de floración (93 días después del trasplante) y fructificación (128 días después del trasplante). En la etapa de floración se colectaron muestras de raíz y parte aérea, mientras que en la fructificación se colectaron muestras de raíces, tallos, hojas y frutos. Las muestras

fueron secadas en una estufa deshidratadora a 60 °C, molidas y sometidas a digestión ácida para posteriormente ser analizadas con un espectrofotómetro de absorción atómica Varian AA, según AOAC (1980). El fósforo se determinó por el método de Olsen (AOAC 1980) utilizando un espectrofotómetro UV-Vis modelo Helios Epsilon a una longitud de onda de 640 nm. Para la determinación del nitrógeno se utilizó el método macro Kjeldhal conforme a las técnicas estándar (AOAC 1980).

El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con 26 repeticiones por tratamiento para el caso de las variables morfológicas, mientras que para los análisis minerales sólo se consideraron cinco repeticiones. La unidad experimental fue una maceta con una planta. Para el análisis de los datos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de medias según Tukey ($\alpha \leq 0.05$), para ello se utilizó el software SAS (SAS Institute Inc. 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el **cuadro II** se muestran los resultados del análisis realizado en las aguas producidas de acuerdo a la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2003a). Además se incluyó para fines comparativos la solución fertilizante Steiner (Steiner 1961) al 75 % de su concentración, verificada bajo la misma norma oficial. Los resultados muestran que el agua producida proveniente tanto de la estación Buena Suerte como de la estación Forasteros tienen alto contenido de hidrocarburos según la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2003a). Estas aguas podrían causar toxicidad al cultivo y suelo si se utilizan como agua de riego (Adam y Duncan 2002, Quiñones-Aguilar *et al.* 2003, SEMARNAT 2003b), originando problemas fisiológicos como inhibición de la germinación, disminución del crecimiento vegetal y muerte de las

plantas (Powell 1997). Ninguna de las aguas producidas excedió el límite máximo permisible de grasas y aceites para uso como agua de riego agrícola de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996). Asimismo, el agua producida de la estación Buena Suerte está fuera del rango óptimo de pH para su uso como agua de riego (FAO 1994, De Kreij 1999). Se observó que los SVT, SDT y SV de las aguas producidas de las estaciones Buena Suerte y Monclova 1 están por encima del límite de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996). Además, el P total en las aguas producidas de todas las estaciones se encuentra en nivel adecuado (SEMARNAT 1996) al igual que el nivel de nitritos y nitratos de acuerdo a la FAO (1994). Por el contrario, el nivel de nitrógeno total en el agua de la estación Monclova 1 y el de la solución fertilizante está por encima de lo que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996). El agua de la estación Monclova 1 está fuera de los límites permisibles para el Pb según la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996), pero se encuentran fuera del umbral tóxico según la guía ARPEL (2012). Todos los demás minerales se encuentran dentro de los límites marcados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 1996).

Cuadro II Análisis de las aguas producidas de acuerdo a la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2003a). Se analizó a modo de referencia la solución fertilizante Steiner (Steiner 1961) al 75% de concentración. Todas las concentraciones se expresan en mg L⁻¹ con excepción del pH.

Parámetro	Buena Suerte	Monclova 1	Forasteros	Sol. Steiner al 75%
Hidrocarburos fracción ligera	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30
Hidrocarburos fracción media	103.20	1.80	20.70	<0.50
Hidrocarburos fracción pesada	<4.10	<4.10	<4.10	<4.10
pH	4.43	6.50	6.67	4.29
Demanda bioquímica de	12353.00	499.30	1515.30	1.50

oxígeno				
Fosforo total	<0.30	<0.30	<0.30	11.09
Nitrógeno total Kjeldahl	30.50	66.90	15.10	73.10
Nitrógeno de nitritos	0.06	<0.02	<0.02	<0.02
Nitrógeno de nitratos	4.34	0.93	5.61	0.29
Sólidos sedimentables	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos totales	10760.00	153750.00	5120.00	2070.00
Sólidos disueltos totales	10732.00	153750.00	5120.00	2070.00
Sólidos suspendidos totales	28.00	<9.00	<9.00	<9.00
Sólidos volátiles totales	6110.00	20570.00	670.00	560.00
Suma de Nitrógenos	34.90	67.83	20.71	73.39
Grasas y aceites	18.10	10.40	6.60	9.10
Zn ⁺²	0.78	0.17	0.11	0.94
Pb ⁺²	<0.50	1.77	<0.50	<0.50
Ni ⁺²	<0.10	1.22	<0.10	<0.10
Cd ⁺²	<0.05	0.37	<0.05	<0.05
Cu ⁺²	<0.10	0.148	<0.10	0.65
Hg ⁺²	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
As ⁺³	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cr ⁺³	<0.10	0.39	<0.10	<0.10

En el **cuadro III** se muestran los resultados en cuanto a calidad de agua de riego de las muestras de las aguas producidas de las tres estaciones además de la solución Steiner al 50% y agua de riego (la muestra fue tomada en la etapa de floración). Los resultados muestran que las aguas producidas provenientes de las estaciones Buena Suerte y Monclova 1 presentaron valores de CE superiores a los límites máximos para agua de riego (De Kreij y Van Den Berg 1990, FAO 1994, GWPRF 2003). Así mismo, el pH del agua de Buena Suerte, Forasteros y el agua de riego, están fuera del rango óptimo de 5.5 a 6.5 (De Kreij 1999) pero aún dentro de los rangos recomendados para agua de riego según la FAO (1994). Por otro lado el agua producida de Monclova 1

también presentó valores altos de Ca^{+2} y Mg^{+2} (FAO 1994). Además todas las aguas rebasaron el límite de bicarbonatos (FAO 1994). El agua producida de la estación Forasteros rebasó el límite para cloruros (FAO 1994, SEMARNAT 2003a). Adicionalmente el agua producida de la estación Monclova 1 rebasó los límites de SDT y RAS (FAO 1994, SEMARNAT 2003a).

Cuadro III Análisis de calidad de agua de riego realizado a las aguas producidas. Para fines de comparación se analizó también la solución fertilizante Steiner (1961) al 50% y el agua de riego.

Parámetro	Unidades	Buena Suerte	Monclova 1	Forasteros	Sol. Steiner al 50%	Agua de riego
CE	mS cm^{-1}	6.47	103.20	3.75	1.39	0.72
pH	adimensional	4.7	6.1	8.5	6.1	8.0
K^{+}	mg L^{-1}	51.1	53.3	52.2	50.6	48.4
Ca^{+2}	mg L^{-1}	194.8	10,198.3	294.3	147.2	82.2
Mg^{+2}	mg L^{-1}	84.0	3,113.6	18.4	70.9	47.3
Na^{+}	mg L^{-1}	114.8	103.8	113.6	106.2	78.1
Carbonatos	mg L^{-1}	ND	ND	ND	ND	12.9
Bicarbonatos	mg L^{-1}	65.9	144.9	105.4	92.2	263.6
Sulfatos	ppm	955.6	587.7	59.0	781.3	340.5
Rel. de adsorción de sodio (RAS)	adimensional	1.73	0.23	1.73	1.80	1.69
Cloruros	ppm	421.9	44,325.0	1,854.6	49.6	39.0
Total de sólidos disueltos	mg L^{-1}	1,108.5	66,048.0	1,111.0	890.2	1,086.7
Salinidad efectiva	meq L^{-1}	21.85	768.42	20.75	17.58	7.87

ND = no detectado.

En el **cuadro IV** se muestran los resultados de los análisis de calidad de agua de riego realizados a los tratamientos usados (mezcla de agua producida + agua de riego) así como a la solución fertilizante Steiner (1961) al 100% de su concentración como

testigo (la muestra fue tomada en la etapa de llenado de fruto). Se puede observar que la concentración de iones en solución de los diferentes tratamientos con agua producida está por debajo de lo recomendado por Steiner (1961) para una solución fertilizante al 100%, aunque según la guía ARPEL (2012) se encuentran en los márgenes adecuados. Se observa también que la concentración de Mn, Ca, Mo, Fe, Cu y sulfatos es menor en los tres tratamientos en comparación con el testigo, mientras que el Mg se encuentra bajo en los tratamientos Monclova 1 y Forasteros al igual que el Zn en los tratamientos Buena Suerte y Monclova 1. La concentración de Na y cloruros es mayor en los tratamientos que en el testigo. Aunque el Na⁺ rebasó el límite recomendado por Steiner (1961), este se encuentra aún por debajo de los niveles máximos permitidos para usos generales en hidroponía (Jones 2005). El pH de los tratamientos está elevado en comparación con el testigo, pero dentro de los límites de calidad de agua de riego según la FAO (1994).

Cuadro IV Análisis de calidad de agua de riego realizados a los tratamientos utilizados. En el caso del testigo (T0) se usó la solución fertilizante Steiner (1961) al 100%.

Parámetro	Unidades	T1	T2	T3	T0
CE	mS cm ⁻¹	2.06	1.202	1.134	2.30
pH	adimensional	7.1	8.1	7.9	5.4
K ⁺	mg L ⁻¹	53.271	51.101	50.016	45.135
Ca ⁺²	mg L ⁻¹	75.751	68.563	57.715	130.466
Mg ⁺²	mg L ⁻¹	52.531	15.321	21.888	41.587
Na ⁺	mg L ⁻¹	111.144	100.116	102.566	84.185
Fe ⁺²	mg L ⁻¹	ND	ND	ND	1.2
Cu ⁺²	mg L ⁻¹	0.1202	0.1099	0.1204	0.4835
Zn ⁺²	mg L ⁻¹	0.1948	0.1879	0.3511	0.3296
Mn ⁺²	mg L ⁻¹	0.4124	0.1599	0.1965	2.4790
Mo ⁺⁶	mg L ⁻¹	ND	ND	ND	0.2667

Carbonatos	mg L ⁻¹	0.0	15.60	7.8	0.0
Bicarbonatos	mg L ⁻¹	126.9	142.762	126.90	63.450
Sulfatos	mg L ⁻¹	65.032	71.372	57.251	544.372
Rel. de absorción de sodio (RAS)	adimensional	2.40	2.847	2.917	1.631
Cloruros	ppm	400.69	216.306	237.58	88.65
Total de sólidos disueltos	mg L ⁻¹	1,318.48	769.28	725.75	1043.84
Salinidad efectiva	meq L ⁻¹	12.21	7.482	8.082	13.85

ND = no detectado. T0: Testigo (Solución fertilizante Steiner al 100%). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

EFFECTO DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LAS VARIABLES MORFOLÓGICAS DE LAS PLANTAS

En el **cuadro V** se muestran los resultados de las variables morfológicas evaluadas en las plantas de tomate durante las etapas de floración y fructificación. En la etapa de floración no existen diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en las variables ALT, DT y PSP. Hasta esta etapa solamente la LR presentó diferencias estadísticas, ya que las plantas con el tratamiento Monclova 1 superaron a aquellas con los tratamientos Buena Suerte y Forasteros, probablemente porque estas aguas tenían menor concentración de hidrocarburos (**Cuadro II**).

En la etapa de fructificación se puede apreciar que las variables DT, PSH y LR fueron afectadas significativamente (**Cuadro V**). Se observó que las plantas del tratamiento Buena Suerte tuvieron valores menores de DT y PSH con una disminución de aproximadamente 19% y 43% respectivamente en comparación con el testigo. Las plantas con el tratamiento Buena Suerte también fueron las de menor LR, pero en este caso sólo fue diferente estadísticamente con el tratamiento Monclova 1, siendo este último superior con aproximadamente un 67%. En el resto de las variables morfológicas

evaluadas (ALT, PST, NF y PF) se observa que todos los tratamientos fueron iguales estadísticamente. Este hecho coincide con el trabajo realizado por Jackson y Myers (2002), en el que demostró que aunque es factible el uso de las aguas producidas en la producción de plantas, la producción de biomasa y número de frutos fue menor en comparación con las plantas tratadas con solución fertilizante.

Los resultados presentados comprueban que las plantas regadas con agua del tratamiento Buena Suerte presentaron efectos negativos en algunas de las variables evaluadas (DT, PSH y LR).

Cuadro V Variables morfológicas en medidas en las plantas de tomate. Se muestran las etapas floración¹ y fructificación².

TRAT	ALT cm	DT mm	PSP g	LR cm			
T0 ¹	78.6a [†]	13.92a	70.33a	57.8ab			
T1 ¹	70.8a	10.42a	41.04a	44.4b			
T2 ¹	75.1a	13.01a	65.75a	79.6a			
T3 ¹	73.2a	11.25a	53.14a	46.2b			
TRAT	ALT cm	DT mm	PSH g	PST g	LR cm	NF pieza	PF g
T0 ²	82.4a	15.83a	111.32a	32.07a	64.6ab	21.0a	1836.4a
T1 ²	77.2a	12.85b	63.86c	19.14a	52.4b	22.8a	1420.4a
T2 ²	75.2a	16.11a	100.85ab	26.78a	87.3a	17.6a	1821.6a
T3 ²	79.0a	14.46a	84.64bc	19.87a	68.6ab	14.6a	1420.4a

Nota: ALT altura; DT diámetro de tallo; PFP peso fresco de planta; PSH peso seco de hoja; PFH peso fresco de hojas; PFT peso fresco de tallo; PSH peso seco de hojas; PST peso seco de tallo; LR longitud de raíz; NF número de frutos por planta; PF producción de fruto. [†]Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). T0: Testigo (Solución fertilizante Steiner). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

Cabe mencionar que durante el desarrollo del cultivo, las plantas recibieron el riego con agua de Buena Suerte mostraron daños en tallos y hojas, además de provocaron que 15 plantas murieran. Es posible que esto sea resultado del efecto negativo de los hidrocarburos (Razeto 1991, Venkata-RumanaRau *et al.* 2012), ya que el

agua producida utilizada para el riego de plantas de este tratamiento presentó alto contenido de hidrocarburos de fracción media (SEMARNAT 2003a) siendo mayor que el de las otras dos estaciones (**Cuadro II**); del mismo modo fue la que presentó menor dilución para el tratamiento (**Cuadro I**). En concordia con lo anterior algunos estudios sugieren que las aguas con altos contenidos de hidrocarburos pueden causar toxicidad en cultivos y en suelo si se utilizan como agua de riego (Adam y Duncan 2002, Quiñones-Aguilar *et al.* 2003, SEMARNAT 2003b), originando problemas fisiológicos como inhibición de la germinación, disminución del crecimiento vegetal y muerte de las plantas (Powell 1997). Lo anterior sugiere que no deben utilizarse aguas producidas con altas concentraciones de hidrocarburos para riego de cultivos. Es importante recalcar que el uso de aguas producidas en los tratamientos no mostro efecto en NF y PF.

EFFECTO DE LOS TRATAMIENTOS EN EL CONTENIDO DE MINERALES EN LAS PLANTAS DE TOMATE

En el **cuadro VI** se muestran los resultados de la concentración de minerales en la raíz de las plantas de tomate, tanto en la etapa de floración como en la etapa de fructificación.

Cuadro VI Concentración de minerales en la raíz de la planta de tomate en las etapas de floración¹ y fructificación². N, P, K, Ca, Mg y Na se expresan en % en base a materia seca. Fe, Cu, Zn y Mn se expresan en mg L⁻¹.

TRAT	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn
T0 ¹	2.04b [†]	0.26a	2.34a	0.33a	0.71a	0.10a	514.6a	10.8a	220.4a	356.6a
T1 ¹	1.99b	0.27a	1.67a	0.30a	0.52b	0.27a	307.4a	13.0a	153.8ab	327.6a
T2 ¹	1.89b	0.22a	2.17a	0.29a	0.77a	0.27a	365.4a	10.8a	182.8ab	269.4a
T3 ¹	2.52a	0.22a	2.12a	0.27a	0.64ab	0.17a	442.0a	10.8a	123.8b	230.8a
T0 ²	2.89a	0.22a	0.74b	1.68a	0.38a	0.16b	57.4b	32.0a	248.6a	163.4a
T1 ²	2.48ab	0.13b	1.52a	1.45a	0.33a	0.33b	107.0ab	19.0ab	118.6c	134.4ab

T2 ²	1.89b	0.09b	1.79a	1.51a	0.40a	0.91a	175.0a	13.4b	173.0b	38.6c
T3 ²	2.57ab	0.08b	1.52a	1.37a	0.35a	0.44ab	170.2a	15.4b	96.8c	75.2bc

[†]Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). T0: Testigo (Solución fertilizante Steiner). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

En el **cuadro VII** se presentan los resultados de la concentración de minerales en la parte aérea correspondiente a la etapa de floración, y en hojas y tallos correspondientes a la etapa de fructificación.

Cuadro VII Concentración de minerales en diferentes órganos de la planta en la etapa de floración (parte aérea¹) y fructificación (hoja² y tallo³). N, P, K, Ca, Mg y Na se expresan en % en base a materia seca. Fe, Cu, Zn y Mn se expresan en mg L⁻¹.

TRAT	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn
T0 ¹	3.84a [†]	0.49a	1.95ab	0.50a	1.06a	2.29a	99.0a	18.4c	81.2a	272.2a
T1 ¹	3.09a	0.43a	2.74a	0.41a	0.86b	0.36b	96.0a	76.6a	66.8a	146.0b
T2 ¹	3.24a	0.40a	1.37b	0.41a	0.88b	0.22b	75.6a	18.2c	85.4a	303.4a
T3 ¹	2.87a	0.37a	1.84ab	0.41a	0.90b	0.25b	82.8a	32.0b	74.0a	232.0ab
T0 ²	2.46a	0.62a	2.04a	2.01b	0.25b	0.05a	107.0a	10.8a	53.8b	804.8a
T1 ²	2.43a	0.28b	1.04c	3.60a	1.01a	0.08a	53.8a	7.6a	116.6a	323.8c
T2 ²	2.59a	0.21b	1.45b	1.92b	0.54b	0.12a	154.2a	8.2a	88.2ab	634.0ab
T3 ²	2.64a	0.27b	1.53b	1.92b	0.36b	0.21a	134.4a	9.0a	102.2ab	607.2b
T0 ³	2.67a	0.39a	0.75b	0.92b	0.07b	0.10b	67.8b	8.8a	234.6a	185.0a
T1 ³	1.82b	0.17b	1.29b	1.28a	0.40a	0.22ab	28.2b	3.4b	93.6b	97.2c
T2 ³	1.81b	0.15b	1.70ab	0.72b	0.15b	0.22ab	247.8a	8.2a	230.4a	144.8b
T3 ³	1.92b	0.20b	1.95a	0.80b	0.11b	0.34a	69.8a	7.4ab	163.8ab	103.8c

[†]Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). T0: Testigo (Solución fertilizante Steiner). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

Finalmente en el **cuadro VIII** se presentan los contenidos minerales en el fruto de tomate, en este caso corresponden al primero y sexto corte.

Cuadro VIII Concentración de minerales en el fruto. Se presentan los resultados del primero¹ y sexto corte². N, P, K, Ca, Mg y Na se expresan en % en base a materia seca. Fe, Cu, Zn y Mn se expresan en mg l⁻¹.

TRAT	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn
T0 ¹	3.52a [†]	0.28a	2.24a	0.28a	0.04 ^a	0.08a	162.2a	12.0a	78.2a	40.6a
T1 ¹	3.02a	0.19a	1.69a	0.25a	0.04 ^a	0.09a	136.4a	6.4b	57.8a	17.8b
T2 ¹	2.98a	0.19a	2.16a	0.16a	0.04ab	0.07a	172.4a	9.8ab	54.0a	22.4b
T3 ¹	2.33a	0.24a	2.11a	0.17a	0.03b	0.13a	85.6a	8.6ab	41.6a	21.0b
T0 ²	3.20a	0.26a	1.88ab	0.19a	0.02b	0.08a	78.0a	15.0a	32.8a	51.4a
T1 ²	2.35a	0.24a	2.02ab	0.17a	0.03 ^a	0.06a	80.6a	9.2b	27.4a	18.8b
T2 ²	2.62a	0.25a	2.28a	0.18a	0.03ab	0.09a	64.6a	10.0b	28.4a	13.2b
T3 ²	2.67a	0.19a	1.54b	0.15a	0.03 ^a	0.10a	83.4a	9.0b	30.2a	18.4b

[†]Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). T0: Testigo (Solución fertilizante Steiner). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

La concentración de P, K, Ca, Na, Fe, Cu y Mn en la raíz no se vio afectada por los tratamientos, siendo iguales entre sí en la etapa de floración. Así mismo se observó que la concentración de N en la raíz en donde se aplicó el tratamiento Forasteros, fue mayor al resto de los tratamientos incluido el testigo, sin embargo todos están dentro de los rangos normales en la raíz (Barker y Pilbeam 2007). En el caso del Zn se observó lo opuesto ya que el tratamiento Forasteros presentó la menor concentración de ese elemento. En la etapa de fructificación sólo el Ca y Mg no mostraron diferencias significativas. Así mismo se observó que la concentración de P, Cu, Zn y Mn fue menor en las raíces de los tres tratamientos con aguas producidas en comparación con el testigo, siendo lo opuesto en el caso del K y Fe donde este último tratamiento fue el de menor concentración (**Cuadro VI**). En el caso del Mn lo observado puede ser debido a que la concentración de este elemento en los tratamientos con agua producida fue mucho menor que en el testigo lo que pudo limitar su absorción (**Cuadro IV**). Aunque en el caso del N existieron diferencias entre tratamientos, estas no presentaron una tendencia clara además de encontrarse dentro de los rangos normales para la raíz (Barker y

Pilbeam 2007). En cuanto a la concentración de los minerales en la parte aérea correspondiente a la etapa de floración se observó que no hubo diferencias significativas en N, P, Ca, Fe, y Zn, mientras que en el caso de Mg y Na se observó que la concentración de estos fue significativamente menor en los tratamientos con aguas producidas en comparación con el testigo (**Cuadro VII**), tal vez porque los tratamientos presentaron mayor concentración de bicarbonatos (Vivot *et al.* 2010) y además, el K superó la concentración normal en la parte aérea (Salisbury y Ross 1992) lo cual puede sugerir algún tipo de competencia en la absorción de los diferentes cationes que favoreció al K. También se encontró que en la parte aérea de la planta la concentración de Cu en el tratamiento Buena Suerte fue de tres veces más que en el testigo (**Cuadro VII**) superando el nivel tóxico en la planta según la guía ARPEL (2012). Cui *et al.* (2010) mencionan que altas concentraciones de Cu disminuyen el crecimiento por destrucción de membranas y especies reactivas de oxígeno (ERO) y aunado al efecto negativo de los hidrocarburos (Razeto 1991, Venkata-RumanaRau *et al.* 2012) como se explicó anteriormente, podemos atribuir a ello los efectos negativos de las variables DT, PSH y LR (**Cuadro V**) así como la muerte de 15 plantas durante el desarrollo del cultivo que presentó cuando se aplicó el tratamiento Buena Suerte.

En la etapa de fructificación no se observaron diferencias en N, Na, Fe y Cu en las hojas, mientras que en el tallo en todos los minerales existieron diferencias estadísticas. Además en esta misma etapa se observó en las hojas del testigo una concentración de P, K y Mn mayor que en los tratamientos con aguas producidas, misma situación se observó en el tallo en la concentración de P, N y Mn. También se encontró en el tejido foliar que la menor concentración de Zn la presentó el testigo (**Cuadro VII**).

En cuanto al fruto, el contenido de minerales no presentó diferencias entre tratamientos en N, P, K, Ca, Fe y Zn, esto correspondiente al primer corte, sólo el Mn presentó valores significativamente mayores en el testigo en comparación con el resto de los tratamientos. En el sexto corte no se observaron diferencias en N, P, Ca, Fe y Zn. Se verificó también que la concentración de Cu y Mn fueron estadísticamente mayores en el testigo que en el resto de los tratamientos siendo lo opuesto en el caso del Mg donde el testigo presentó la menor concentración (**Cuadro VIII**). En el caso del Mn la concentración de este elemento fue mayor en la solución utilizada para el riego de las plantas (**Cuadro IV**), por lo que se puede atribuir a esto lo observado ya que sucedió lo mismo en los frutos así como en el tallo y en las hojas en la etapa de fructificación (**Cuadro VII**).

CONCLUSIONES

En base a la caracterización de las aguas producidas provenientes de tres estaciones de la zona de producción de gas Sabinas-Piedras Negras del Estado de Coahuila, México, se determinó que por el nivel elevado de CE no pueden ser usadas directamente como agua de riego.

Se demostró que es factible el uso de aguas producidas diluidas con agua de riego del invernadero, en la producción de tomate en condiciones de invernadero. Solamente en el caso del agua proveniente de la estación Buena Suerte no se encontró factible su uso como agua de riego, debido a los altos contenidos de hidrocarburos de fracción media, en conjunto con los elevados niveles de Cu, que se asociaron con daños en tallos y hojas de las plantas e incluso con la muerte de algunas.

LITERATURA CITADA

- Adam G. y Duncan H. (2002). Influence of diesel fuel on seed germination. *Environ. Poll.* 120, 363-370.
- AOAC (1980). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Association of Official Analytical Chemists. Washington DC, USA. 1018 pp.
- ARPEL (2012). Disposición y tratamiento de agua producida. Asociación Regional de Empresas de Petróleo y gas natural en Latinoamérica y el Caribe. Guía. Alberta, Canadá. 111 pp.
- Barker A. V. y Pilbeam D. J. (2007). *Handbook of plant nutrition*. Taylor & Francis Group. Boca Raton, London, New York. 613 pp.
- Chave A. D. y Cox C. S. (1982). Controlled electromagnetic sources for measuring electrical conductivity beneath the oceans. *J. Geophys. Res.*, B. 87, 5327-5338.
- Clark C.E. y Veil J.A. (2009). Produced Water Volumes and Management Practices in the United States. [en línea]. <http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2009/07/64622.pdf> 03/01/13
- CNH (2010). Documento Técnico 1 (DT-1). Factores de recuperación de aceite y gas en México. [en línea]. http://www.cnh.gob.mx/_docs/DOCUMENTOTECHNICO1FINAL.pdf. 02/01/2012
- Cui X. M., Zhang Y. K., Wu X. B. y Liu C. S. (2010). The investigation of the alleviated effect of copper toxicity by exogenous nitric oxide in tomato plants. *Plant soil environ.* 56, 274-281.
- De Kreij C. and Van Den Berg T. H. J. M. (1990). Nutrient uptake, production and quality of *Rosa hybrida* in rockwool as affected by electrical conductivity of the

nutrient solution. En: *Plant nutrition-physiology and applications*. (M. L. van Beusichem, Ed.). Springer Netherlands, Wageningen, Netherlands. Vol. 41, pp. 519-523.

De Kreij C. (1999). *BemestingsadviesbasisSubstraten. ProefstationvoorBloemisterij en Glasgroente*. VestigingNaaldwijk, The Netherlands. 145 pp.

DOE (2012). Produced water management technology descriptions.Fact Sheet-Agricultural Use. Departamento de Energía de los Estados Unidos. Laboratorio Nacional de Tecnología y Energía (NETL). [en línea]. <http://www.netl.doe.gov/technologies/pwmis/techdesc/aguse/index.html>.

11/02/2012

EPA (1993). Development document for effluent limitations guidelines and new source performance standards for the offshore subcategory of the oil and gas extraction point source category. [en línea].

<http://yosemite.epa.gov/water/owrccatalog.nsf/1ffc8769fdecb48085256ad3006f39fa/969ed536d932393a85256d83004fd95c!OpenDocument> 02/01/13

FAO (1994). Water quality for agriculture [en línea].

<http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm> 07/05/11

Jackson L. y Myers J. (2002). Alternative use of produced water in aquaculture and hydroponic systems at naval petroleum reserve No. 3. Memorias. The 2002 Ground Water Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, Oct.

16–17, 2002. [en línea]. http://www.gwpc.org/e-Library/Proceedings/library_proceedings_main.htm 25/09/11

- Jacobs R. P. W. M., Grant E., Kwant J., Marqueine J. M. and Mentzer E. (1992). The composition of produced water from shell operated oil and gas production in the north sea. En: *Produced Water*. (J.P. Ray and F.R. Englehart, Eds.). Plenum Press, New York, Vol. 46, pp. 13-21.
- Jones J. B. Jr. (2005). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. 2^a ed. CRC Press, Boca Raton, London, New York Washington, D.C. 423 pp.
- Lee R., Seright R., Hightower M., Sattler A., Cather M., Mc. Pherson B., Wrotenbery L., Martin D. and Whitworth M. (2002). Strategies for produced water handling in New México. [en línea]. <http://wrii.nmsu.edu/publish/watcon/proc47/lee.pdf> 24/04/12
- Leet L. D. y Judson S. (1974). *Fundamentos de geología física*. Editorial Limusa-Wiley. México, D.F. 450 pp.
- Llamas J. (1993). *Hidrología general. Principios y Aplicaciones*. Editorial Universitaria del País Vasco. Bilbao, España. 635 pp.
- Manfra L., Maggi C., Bianchi J., Mannozi M., Faraponova O., Mariani L., Onorati F., Tornambè A., Virno-Lamberti C. y Magaletti E. (2010). Toxicity evaluation of produced formation waters after filtration treatment. *Natural Science*. 2, 33-40.
- NPC (2011). Management of produced water from oil and gas wells. The National Petroleum Council. Manual. [en línea]. http://www.npc.org/Prudent_DevelopmentTopic_Papers/217_Management_of_Produced_Water_Paper.pdf
- PEMEX (2010). Informe de Responsabilidad Social. [en línea]. http://www.pemex.com/informes/pdfs/descargas/pemex_irs_completo_2011.pdf
- 10/03/2012

- Powell R. (1997) The use of plants as "field" biomonitors. En Wang W, Gorsuch J, Hughes J (Eds.) *Plants for Environmental Studies*. Lewis. Raton, FL, EEUU. pp. 47-61.
- Quiñones-Aguilar E. E., Ferrera-Cerrato R., Gavi-Reyes F., Fernández-Linares L., Rodríguez-Vázquez R. y Alarcón A. (2003). Emergence and growth of maize in a crude oil polluted soil. *Agrociencia*. 37, 585-594.
- Razeto M. B. (1991). *La nutrición mineral de los frutales: deficiencias y excesos*. SOQUIMICH. Santiago, Chile. 105 pp.
- Salisbury F. B. y Ross C. W. (1992). *Plant Physiology Wadsworth*. 4ª ed. Wadsworth Publishing Company. Belmont, California, USA. 682 pp.
- SAS (2002). JMP User's guide. Versión 5.0.1. SAS Institute Inc. [en línea]. <http://support.sas.com/archive/installation/admindoc/installation/JMP501AdminGuide.pdf> 25/04/12
- SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario oficial de la Federación. 24 de Junio de 1997.
- SEMARNAT (2003a). Norma Oficial Mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003. Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación. 3 de marzo de 2005.
- SEMARNAT (2003b). Norma Oficial Mexicana NOM-138-Semarnat/SS-2003. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su

- caracterización y remediación. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación. 29 de marzo de 2005.
- Steiner A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*. 15, 134-154.
- Tinu A. y Amit L. (2011). Socio-economic & technical assessment of photovoltaic powered membrane desalination processes for India. *Desalination*. 268, 238-248.
- USEPA (2012). Oil and gas production wastes. [en línea]. <http://www.epa.gov/radiation/tenorm/oilandgas.html> 13/04/2012
- Veil J. A., Puder M. G., Elcock D. and Redweik R. J. Jr. (2004). A White paper describing produced water from production of crude oil natural gas and coal bed methane. [en línea]. http://www.evs.anl.gov/pub/dsp_detail.cfm?PubID=1715. 8/09/12
- Venkata-RumanaRau M., Weindorf D., Breitenbeck G. and Baisackh N. (2012). Differential expression of the transcripts of *spartina alterniflora* loisel (smooth cordgrass) induced in response to petroleum hydrocarbon. *Molecular biotechnol*. 51, 18-26.
- Vivot E. P., Rugnaa C. M., Gioco A. M., Sánchez C. I., Ormaecheaa M. V. y Sequin C. J., (2010). Calidad del agua subterránea para usos agropecuarios en el departamento Villaguay, Entre Ríos. *AUGMDOMUS*. 2, 1-15.

ÍNDICE DE CUADROS ARTÍCULO EFECTO DE LA APLICACIÓN DE AGUAS PRODUCIDAS EN EL CRECIMIENTO, LA CONCENTRACIÓN DE MINERALES Y COMPUESTOS TÓXICOS EN TOMATE BAJO INVERNADERO

Cuadro 1. Descripción de tratamientos. Se presenta la proporción de agua producida con el agua de riego usada en las diferentes etapas fenológicas..... 70

Cuadro 2. Análisis de las aguas producidas de acuerdo a la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2003a). Se analizó a modo de referencia la solución fertilizante Steiner (Steiner 1961) al 75% de concentración. Todas las concentraciones se expresan en mg L⁻¹ con excepción del pH. 70

Cuadro 3. Variables morfológicas evaluadas en las plantas de tomate. Se muestran las etapas floración¹ y fructificación². 72

Cuadro 4. Concentración de minerales en la raíz de la planta de tomate en las etapas de floración¹ y fructificación². 72

Cuadro 5. Concentración de minerales en el tallo de la planta de tomate en las etapas de floración¹ y fructificación². 73

Cuadro. Concentración de minerales en la hoja de la planta de tomate en las etapas de floración¹ y fructificación². 73

Cuadro 7. Concentración de minerales en el fruto de la planta de tomate. Se presentan los resultados del primero¹ y sexto corte². 74

Cuadro 8. Concentración de Hidrocarburos de Fracción Media (HFM) e hidrocarburos aromáticos en el fruto de las plantas de tomate..... 74

**IV. ARTÍCULO EFECTO DE LA APLICACIÓN DE AGUAS
PRODUCIDAS EN EL CRECIMIENTO, LA
CONCENTRACIÓN DE MINERALES Y COMPUESTOS
TÓXICOS EN TOMATE BAJO INVERNADERO**

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE AGUAS PRODUCIDAS EN EL CRECIMIENTO, LA CONCENTRACIÓN DE MINERALES Y COMPUESTOS TÓXICOS EN TOMATE BAJO INVERNADERO

José Fernando Martel-Valles¹, Adalberto Benavides-Mendoza^{1*}, Norma Angélica Ruiz-Torres², Luis Alonso Valdez-Aguilar¹, Antonio Juárez-Maldonado

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Buenavista, Saltillo, Coah. 25315 México.

² Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Fitomejoramiento, Buenavista, Saltillo, Coah. 25315 México.

*Autor para correspondencia: abenmen@uaaan.mx

Palabras clave: aguas congénitas, contenido de sales, HTP, NOM-143-SEMARNAT-2003.

RESUMEN

Durante la producción de petróleo o gas se obtiene un subproducto llamado agua congénita de composición muy variable depende de la historia geológica de la formación de donde se extrae. Al ser extraídas durante el proceso de producción de gas o petróleo son modificadas en su composición, con la adición de surfactantes geles e inhibidores (Veil *et al.*, 2004), los cuales facilitan la extracción de gas o petróleo y se les llama entonces “agua producida”. Estas aguas pueden contener compuestos orgánicos, además de altas concentraciones de sales minerales, las cuales pudieran ser aprovechadas para la nutrición de cultivos, por lo que el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de aguas producidas en la producción de plantas de tomate cultivadas en condiciones de invernadero, así como determinar los contenidos de minerales en las plantas, además de determinar la concentración de Benceno, Tolueno, Etilbenceno,

Xileno (BTEX) e Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP) en el fruto; las aguas producidas utilizadas provienen de la zona de producción de gas de Sabinas-Piedras Negras del norte de México. Las aguas producidas utilizadas se analizaron bajo la NOM-143-SEMARNAT-2003. Aguas producidas provenientes de estaciones productoras de gas (Buena Suerte, Forasteros y Monclova 1), fueron mezcladas con agua de riego para obtener los tratamientos aplicados a las plantas. Como testigo se usó solución Steiner. Los resultados mostraron que las aguas producidas afectaron la absorción de la mayoría de los minerales esenciales de las plantas de tomate, Se observó que la concentración mineral en los tejidos de las plantas fue mayor en las plantas testigo, con excepción del Na, el cual mostró altas concentraciones en las plantas regadas con aguas producidas. Los tratamientos con aguas producidas también afectaron negativamente la longitud de raíz, el peso seco de hoja, el peso seco de tallo, el número de frutos por planta, y el peso seco de fruto. A pesar de lo anterior, no se detectaron BTEX ni HTP en los frutos de tomate, tal vez porque la raíz impidió la absorción de estos.

Keywords: congenital water, salt content, THP, NOM-143-SEMARNAT-2003

SUMMARY

During the production of petroleum and gas, a by-product known congenital water, is obtained, which varies in composition depending on the geological formation from which it is extracted. To be extracted during the process of production of gas or oil are modified in its composition, with the addition of surfactants and inhibitors gels (Veil et al., 2004), which facilitate the extraction of oil or gas and then they are called “produced water”. These waters can contain high concentrations of mineral salts that can

potentially be used for crop fertilization. The objective of this study was to evaluate in tomato cultivated in greenhouse the effects of the use of produced water in tomato plants production, and to determine the mineral contents in plants and the levels of Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene (BTEX) and Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) in the fruits. The produced waters used were derived from gas producing zone of Sabinas-Piedras Negras in northern Mexico. These waters were analyzed according to NOM-143-SEMARNAT-2003. Waters from three different stations, (Buena Suerte, Forasteros and Monclova 1), were mixed with fresh water to obtain the treatment waters used. As a control, Steiner solution was used. The results showed that the produced waters modified the absorption of most essential minerals in tomato plants; it was observed that the mineral concentration in plant tissues was highest in the control plants, except for Na, in which the plants irrigated with produced water had the highest concentrations. The treatments with produced waters also affected negatively root length, leaf and stem dry weight, number of fruits per plant, and the fruit dry weight. Despite the results, BTEX or TPH were not detected in tomato fruits, perhaps because the root prevents the absorption of these.

INTRODUCCIÓN

El agua congénita o connata es el agua atrapada en los poros de los sedimentos en el momento de su formación. Puede alcanzar gran contenido de sales, llegar a formar parte de las rocas y de los minerales como agua adsorbida en las partículas de arcilla. Considerando que no es agua que se evapore o se mueva entre diferentes estratos, no se considera parte del ciclo hidrológico [1,2]. En México durante 2002, se produjeron $12.09 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua producida [3] y en el 2010 de acuerdo al informe de

responsabilidad social de la empresa Petróleos Mexicanos [4], fueron $12.04 \times 10^6 \text{ m}^3$. En México la NOM-143-SEMARNAT-2003 [3] establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita (en realidad agua producida), asociada a la explotación de hidrocarburos. Dicha norma ambiental indica los límites aceptables de los compuestos contenidos en el agua producida, así como la forma autorizada en México para la disposición de dicho material. La inyección de agua en pozos productores es la técnica más utilizada para mejorar la recuperación de hidrocarburos [3,5].

En cuanto a su composición fisicoquímica y volumen, las aguas producidas muestran variación dependiendo del sitio de extracción, la antigüedad y la geología de la formación de la que se produce el petróleo o el gas [6, 7, 8]. Diversos estudios indican una gran variabilidad en las características de salinidad y contenido de elementos del agua producida, dicha variabilidad se presenta inclusive entre sitios de extracción de hidrocarburos relativamente cercanos.¹ Esta variación se presenta igualmente en el agua producida procedente de plataformas marinas [4, 9]. Algunas fuentes de agua producida contienen altas concentraciones de sales, hasta cinco o seis veces más que el agua de mar, llegando a presentar concentraciones de Cl^- de 150,000 a 180,000 mg L^{-1} (el agua de mar tiene en promedio 35,000 mg L^{-1}) y mostrando en promedio una conductividad eléctrica (CE) de 3,200 dS m^{-1} [10]. Con estos niveles de sales el agua es toxica para muchas formas de vida [11, 12], en particular para las plantas de cultivo, ya que el agua con CE mayor a 3 dS m^{-1} o 2000 mg L^{-1} de sólidos disueltos totales (SDT) se le considera salina [13, 14, 8]. Además, el agua producida puede contener compuestos de bajo peso molecular, ácidos orgánicos, condensados, aceites y grasas, hidrocarburos

¹Benavides-Mendoza, A. 2008. Proyecto de Manejo de Agua Congénita para el Desarrollo Sustentable del Activo Integral Burgos (Análisis de Variables Básicas del Agua). Reporte Técnico entregado al Activo Integral Burgos de Pemex Exploración y Producción.

aromáticos como el benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, hidrocarburos policíclicos (HAP) y fenoles [7]. Estos compuestos contribuyen a la toxicidad del agua tanto en forma individual como colectiva [7, 8]. El agua producida también puede contener aditivos químicos usados durante la perforación y operaciones de producción [8]. En cuanto a la concentración de metales en el agua producida, esta depende del sitio específico, ya que la antigüedad y la geología de la formación de la que se produce el petróleo o el gas modifican la disponibilidad y acumulación de los metales [7]. Normalmente el agua proveniente de pozos de producción de gas, contiene varias veces más concentración de metales que la proveniente de pozos de producción de petróleo [15].

Una alternativa para el agua producida es el uso industrial y agropecuario [8, 16]. La primera opción contempla el uso en el control de polvo y de incendios. La segunda incluye el riego de cultivos en suelo y vegetales hidropónicos, abrevadero para el ganado o para la fauna silvestre [7, 17]. En este sentido, se sabe que algunos tipos de agua producida presentan contenidos de sales que las hacen factibles para uso agrícola y su aplicación se ha probado experimentalmente [7, 16].

Ya que en México no se dispone de suficiente información sobre el uso de aguas producidas y sus efectos en la producción de cultivos bajo invernadero, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de aguas producidas en la producción de plantas de tomate cultivadas en invernadero así como determinar los contenidos de minerales y compuestos tóxicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El agua producida utilizada para este estudio se obtuvo de tres estaciones de pozos productores de gas natural de PEMEX (Buena Suerte, Monclova 1 y Forasteros) ubicados en los municipios de San Buenaventura, Monclova y Abasolo, correspondientes a la zona de producción de gas Sabinas-Piedras Negras del Estado de Coahuila, México. Cada estación recibe aportes de agua producida de hasta 25 pozos, así que el agua de cada estación fue una mezcla de diferentes pozos de las inmediaciones. Estas estaciones fueron seleccionadas por contar con agua producida con valores altos de CE.

Para caracterizar el agua producida tomada de las tres estaciones, se analizaron muestras de acuerdo a la NOM-143-SEMARNAT-2003 [3]. Para fines comparativos, también una muestra de solución fertilizante Steiner [18] al 75% de concentración fue analizada bajo esta norma. Los análisis realizados consideraron los hidrocarburos (fracción ligera, media y pesada), grasas y aceites, así como las concentraciones de Zn^{+2} , Pb^{+2} , Ni^{+2} , Cd^{+2} , Cu^{+2} , Hg^{+2} , As^{+3} , Cr^{+3} , fósforo total, nitrógeno total, nitrógeno como nitritos, nitrógeno como nitratos y suma de nitrógenos. Además se verificó el pH, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los sólidos sedimentables, la materia flotante, los sólidos totales, los sólidos disueltos totales (SDT), los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos volátiles totales (SVT).

Para determinar los tratamientos aplicados al cultivo de tomate se consideró la CE de cada una de las muestras de agua producida analizadas. Se realizó una dilución de las aguas producidas con el agua de riego disponible en el invernadero hasta lograr un valor de CE aproximada al valor promedio de CE de la solución Steiner aplicada en cada una de las etapas fenológicas (desarrollo vegetativo, floración, fructificación y llenado

de fruto). Al final de la dilución el pH de cada mezcla se ajustó a un valor aproximado a 6.0. La relación final de estas mezclas fue utilizada para los tratamientos de riego de las plantas (Cuadro 1), al incrementar el factor de dilución de las aguas producidas se incrementa la CE. Como tratamiento testigo (T0) se usó la solución fertilizante Steiner [18], la cual se manejó en diferentes concentraciones de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo.

El desarrollo del cultivo de tomate en el invernadero fue del 30 de abril al 24 de agosto de 2012. Se utilizó como material biológico tomate tipo saladette (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido “El Cid”, con hábito de crecimiento indeterminado. La plántula usada se produjo en charolas de poliestireno de 200 cavidades, usando como sustrato una mezcla de peat moss y perlita (3:1). El trasplante se realizó en macetas de polietileno color negro con un volumen de 16 L en un sistema de cultivo sin suelo utilizando la misma mezcla. Se usó un sistema de riego dirigido con estacas de alto flujo en cada maceta. El cultivo de tomate se guió a un tallo y se le aplicaron las labores culturales tradicionales.

Con el fin de tener plantas con un vigor y crecimiento homogéneos estas fueron regadas sólo con solución fertilizante durante 23 días después del trasplante (DDT), antes de iniciar con la aplicación de los tratamientos. La aplicación del riego se realizó en tres diferentes horarios por día (9:00, 13:00 y 18:00 hrs.), aplicando alrededor de 800 ml por planta en cada uno. La aplicación de los tratamientos se realizó en el primero y tercer riegos, mientras que para todos los casos en el segundo riego se aplicó solución fertilizante.

Las variables morfológicas determinadas en las plantas fueron el diámetro del tallo (DT) medido en el entrenudo de la base del tallo utilizando un calibrador vernier

digital, la altura de la planta (ALT) medida de la base del tallo a la yema terminal y la longitud de la raíz (LR) medida del cuello a la cofia de la raíz más larga. En la etapa de floración (30 DDT) se obtuvo el peso seco de las hojas (PSH) y tallo (PST). En la etapa de fructificación (108 DDT) se obtuvo el peso seco de hojas, tallos y frutos por separado. En ambas etapas el peso seco se cuantificó después de secar en estufa deshidratadora a 60 °C por tres días. Se utilizó una balanza analítica marca OHAUS, modelo SCOUTPROSP 6000. Para determinar el número de frutos por planta (NF) se seleccionaron al azar cinco plantas por tratamiento durante la etapa de fructificación en las que se contabilizó el número de frutos cosechados en cada corte. La producción de fruto seco por planta (PFS) se obtuvo de la sumatoria de seis cortes durante la etapa de cosecha entre los 78 y 108 DDT. Para este caso el peso seco se cuantificó después de secar en estufa deshidratadora a 60 °C por cuatro días.

Para la determinación de minerales (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, Ni, Cd, Pb y Cr) se seleccionaron cinco plantas al azar por cada tratamiento en las etapas de floración (30 DDT) y fructificación (108 DDT). En la etapa de floración se colectaron muestras de raíz, tallo, y hoja mientras que en la fructificación se colectaron muestras de raíz, tallo, hojas, y frutos. Las muestras fueron secadas en una estufa deshidratadora a 60 °C, molidas y sometidas a digestión ácida para posteriormente ser analizadas con un espectrofotómetro de absorción atómica Varian AA, según AOAC [19]. El P se determinó por el método de Olsen [19] utilizando un espectrofotómetro UV-Vis modelo Helios Epsilon a una longitud de onda de 640 nm. Para la determinación del nitrógeno se utilizó el método macro Kjeldhal [19].

Para verificar la posible acumulación de sustancias tóxicas en los frutos producidos por las plantas de tomate tratadas con las mezclas de aguas producidas, se

analizaron frutos para medir la concentración de hidrocarburos de la fracción media (HFM) así como los hidrocarburos aromáticos benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX). Para los análisis de los HFM se utilizó el método EPA 8015B-1996 [20] mientras que para el análisis de los BTEX se usó el método EPA-8260C-2006 [21].

El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con 26 repeticiones por tratamiento para el caso de las variables morfológicas, mientras que para los análisis minerales sólo se consideraron cinco repeticiones. La unidad experimental fue una maceta con una planta. Para el análisis de los datos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de medias según Tukey ($\alpha \leq 0.05$), para ello se utilizó el software SAS [22].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se muestran los resultados del análisis realizado en las aguas producidas de acuerdo a la NOM-143-SEMARNAT-2003 [3] y la solución fertilizante Steiner [18] al 75% de su concentración. Los resultados muestran que el agua producida proveniente tanto de la estación Buena Suerte como de la estación Forasteros, tiene un alto contenido de hidrocarburos según la NOM-143-SEMARNAT-2003 [3]. Estas aguas podrían causar toxicidad en cultivos y suelo si se utilizan como agua de riego [23, 24, 25], originando problemas fisiológicos como inhibición de la germinación, disminución del crecimiento vegetal y muerte de las plantas [26]. Ninguna de las aguas producidas excedió el límite máximo permisible de grasas y aceites para uso como agua de riego agrícola de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 [27]. Asimismo, el agua producida de la estación Buena Suerte está fuera del rango óptimo de pH para su uso como agua de riego [13, 28]. Se observó que los SVT, SDT y SV de las aguas

producidas de las estaciones Buena Suerte y Monclova 1 están por encima del límite de la NOM-001-SEMARNAT-1996 [27]. Además, el P total en las aguas producidas de todas las estaciones se encuentra en nivel adecuado [26] al igual que el nivel de nitritos y nitratos de acuerdo a la FAO [13]. Por el contrario, el nivel de nitrógeno total en el agua de la estación Monclova 1 y el de la solución fertilizante está por encima de lo que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996 [27] ya que incluye los compuestos orgánicos e inorgánicos. En cuanto a los minerales, el agua de la estación Monclova 1 está fuera de los límites permisibles para el Pb según la NOM-001-SEMARNAT-1996 [27], y se encuentra fuera del umbral tóxico según la guía ARPEL [12] Todos los demás minerales se encuentran dentro de los límites marcados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 [27].

VARIABLES MORFOLÓGICAS EVALUADAS

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de las variables morfológicas evaluadas en las plantas de tomate durante el desarrollo del cultivo. Se muestran los resultados de las etapas de floración (30 DDT) y fructificación (108 DDT).

Se puede observar que en la etapa de floración la LR muestra diferencias estadísticas mientras que el resto de las variables evaluadas en esta etapa (ALT, DT, PSH y PST) son iguales entre tratamientos. Es notable que el T2 correspondiente a la estación Monclova 1, fue el que promovió la mayor LR, mientras que el T1 correspondiente a la estación Buena Suerte fue el que promovió la menor LR (Cuadro 3).

En la etapa de fructificación solamente las variables ALT y DT no presentaron diferencias significativas. En cuanto a las variables LR, PSH, PST, NF y PFS se observaron diferencias muy claras mostrando en todos los casos que el T1

estadísticamente fue en el que se presentó un menor crecimiento de las planta. La solución Steiner fue el mejor estadísticamente al promover el crecimiento en variables como PSH, PST, NF y PFS (Cuadro 3). Los resultados obtenidos en esta etapa se pueden atribuir al contenido de minerales en los tejidos de las plantas, ya que consistentemente el T1 se presentó las más baja concentraciones (Cuadros 4-7), lo anterior también puede atribuirse al alto contenido de hidrocarburos en las aguas producidas utilizadas para el T1 ya que se ha registrado que pueden causar toxicidad en las plantas [23, 24] así como estrés oxidativo [29]; Estos resultados concuerdan con Jackson y Myers [30], ya que aunque es factible el uso de aguas producidas en las plantas, las que fueron tratadas sólo con solución nutritiva (T0) presentaron mejores resultados (Cuadro 3).

CONTENIDO DE MINERALES EN LOS ÓRGANOS DE LAS PLANTAS

En el Cuadro 4 se muestran los resultados de la concentración de minerales en la raíz de las plantas de tomate tanto para la etapa de floración como para la etapa de fructificación. En la etapa de floración se observa que la concentración de N, P, K, Ca, Fe, Cu, Mn, Mo, Ni, Cd, Pb y Cr no presentó diferencias estadísticas significativas. En ésta etapa sólo en la concentración de Mg, Na y Zn se mostraron diferencias estadísticas, apreciándose que consistentemente el agua correspondiente a la estación Buena Suerte estuvo asociada con una menor concentración en los minerales antes mencionados (Cuadro 4). En la etapa de fructificación se encontraron diferencias estadísticas significativas en los minerales N, Na, Cu, Mn y Mo. En el resto de los minerales (P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Ni, Cd, Pb y Cu) no se presentaron diferencias estadísticas. Siendo las plantas irrigadas con la solución Steiner las que presentaron la mayor concentración de

N, Cu, Mn y Mo, caso contrario en Na donde las plantas irrigadas con el T0 fueron las de menor concentración (Cuadro 4).

En el Cuadro 5 se presentan los resultados de la concentración de minerales en el tallo de las plantas de tomate considerando las etapas de floración y fructificación. En la etapa de floración, se aprecia que solamente se presentan diferencias estadísticas en la concentración de N, el Mg y el Na. Se puede observar que las plantas el T0 presentaron la concentración más alta de N, siendo lo contrario en el Na ya que fueron las de menor concentración. Las plantas con el T1 presentaron la mayor concentración de Na, mientras que en Mg fue todo lo contrario (Cuadro 5). En la etapa de fructificación se encontró que solamente las concentraciones de Fe, Mo, Ni, Cd, y Pb fueron estadísticamente iguales entre tratamientos. Además se observa que en cuanto a la concentración de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Mn y Cr, el T0 fue el mayor, siendo lo contrario para el T1 ya que con excepción del Mg, presentó la menor concentración en todos los casos antes mencionados (Cuadro 5).

La concentración de minerales en la hoja de la planta de tomate se presenta en el Cuadro 6; al igual que en los casos anteriores se consideran las etapas de floración y fructificación. En la etapa de floración, se detectó que en la concentración de N, Ca, Na, Cu y Mo, se presentaron diferencias estadísticas significativas, mientras que el resto los promedios fueron iguales (P, K, Mg, Fe, Zn, Mn, Ni, Cd, Pb y Cr). Se observa además que en N, Ca, Cu y Mo, en plantas con el T0 se presenta la mayor concentración, mientras que el T1 fue el de mayor concentración de Na (Cuadro 6). En el caso de la etapa de fructificación se observó que solamente la concentración de N y P presentó diferencias estadísticas entre tratamientos. En ambos minerales se observa que el T0 presentó la mayor concentración (Cuadro 6).

La concentración de minerales en el fruto de las plantas de tomate, considerando el primero y sexto corte se muestra en el Cuadro 6. Se puede apreciar que sólo la concentración de P, K, Cu, Zn y Mn presentan diferencias estadísticas entre tratamientos, mientras que el resto de los minerales (N, Ca, Mg, Na, Fe, Mo, Ni, Cd, Pb y Cr) no presentan diferencias entre tratamientos. Se observa que en cuanto a P, K, Cu y Mn las plantas irrigadas con el T0 presentan fue el de mayor concentración, mientras que para el Zn las del T2 fue mayor al resto de los tratamientos. En la etapa de fructificación se observó que existieron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en la concentración de N, P, K, Ca, Mg, Na, Cu y Mn. Así mismo se aprecia que consistentemente en todos los casos, con excepción del Na, que las plantas del T1 fueron las de menor concentración. Además en cuanto a la concentración de Na, el T1 fue el de mayor concentración (Cuadro 7).

Sistemáticamente se observó que en los minerales, con excepción del Na, cuando existieron diferencias entre tratamientos, las plantas con el T0 fueron las que en la mayoría de los minerales evaluados presentaron las mayores concentraciones (Cuadros 4-7). Este comportamiento puede explicarse debido a que en el T0 sólo se irrigó con la solución Steiner, lo cual garantizó que todos los elementos minerales necesarios por la planta estuvieran disponibles [18], facilitando así su absorción por la planta. En el caso de los tratamientos con aguas producidas, se sabe que estas presentan gran variabilidad en cuanto a su composición fisicoquímica y contenido de sales [6, 7, 8] lo que pudo interferir en la absorción de diferentes minerales por las plantas. Aunado a esto, la presencia de hidrocarburos en las aguas producidas dañó la estructura radical de la planta de tomate debido a su efecto tóxico [7, 8], lo cual consecuentemente limitó la absorción de los minerales necesarios para la planta y disminuyó la LR (Cuadro 3).

En la mayoría de los casos en que se presentaron diferencias significativas en la concentración de Na en diferentes tejidos, las plantas con el T1 mostraron el mayor nivel (Cuadros 5-7). Es sabido que el Na es uno de los principales iones citotóxicos [31], además desencadena desequilibrios iónicos en las plantas por la excesiva absorción de éstos, lo que genera como efectos secundarios toxicidad y problemas nutricionales vinculados a la absorción de iones esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas [32]. Entonces, se puede atribuir a esto que el T1 presentara los menores resultados en cuanto a las variables morfológicas evaluadas (Cuadro 3) en las plantas de tomate, así como los bajos contenidos de los elementos minerales evaluados en los diferentes órganos de la planta (Cuadros 4-7).

CONTENIDO DE HFM Y BTEX EN FRUTO

En el Cuadro 8 se presentan los resultados de los análisis realizados a los frutos de las plantas de tomate. Se observó que los tratamientos no presentaron acumulación de algún compuesto tóxico (HFM, benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos). Existe evidencia de que los hidrocarburos totales de petróleo (HTP) pueden causar toxicidad en múltiples organismos por diferentes razones. A nivel celular son capaces de producir radicales libres los cuales pueden dañar la estructura celular y el ADN [33], también se ha reportado daño por contacto directo [34], e incluso, pueden ser absorbidos a través de los estomas de las plantas o raíces [35]. Considerando lo mencionado, los resultados obtenidos pueden ser un indicador de que en este caso particular las plantas posiblemente fueron incapaces de absorber algún compuesto de tipo HFM y BTEX (Cuadro 8). Sin embargo, existió un efecto negativo en la raíz, ya que el tratamiento correspondiente a la estación Buena Suerte fue menor que el resto de los tratamientos

por aproximadamente 30% con base en la longitud (Cuadro 3), lo cual pudo ser debido a daños por contacto directo [34]. Considerando ambos hechos, es posible que las raíces de las plantas de tomate sean muy susceptibles a compuestos derivados del petróleo, por lo que al entrar en contacto con estos, se genera un daño directo en la raíz lo cual impide su absorción por la misma.

CONCLUSION

El uso de aguas producidas para el desarrollo de tomate en invernadero es factible, sin embargo, la efectividad de su uso dependerá de las características y concentración de sus componentes.

Las aguas producidas utilizadas en el presente estudio tienen altas concentración de sales y deben ser diluidas con agua de mejor calidad antes de irrigar cultivos de tomate, pero dicha dilución afecta el rendimiento de la planta.

Con excepción del Na, las aguas producidas afectan la absorción de minerales esenciales por las plantas de tomate, lo cual se ve reflejado en el crecimiento de las mismas, por lo que se debe prestar particular atención al contenido de sales por las diferentes aguas producidas si se desean utilizar para el cultivo de hortalizas en invernadero.

Los frutos de las plantas de tomate no presentaron acumulación de compuestos tóxicos derivados del petróleo tales como hidrocarburos de Fracción Media, ni compuestos aromáticos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos.

En este momento no podemos decir que los frutos de tomate pueden ser aptos para consumo humano, este trabajo es una base para investigaciones futuras y tal vez primero se debe experimentar en la nutrición de animal.

REFERENCIAS

- [1] L. D. Leet and Judson, “*Fundamentos de geología física*,” Editorial Limusa-Wiley, México, D.F., 1974, pp. 450.
- [2] J. Llamas, “*Hidrología general. Principios y Aplicaciones*,” Editorial Universitaria del País Vasco. Bilbao, España, 1993, pp. 635.
- [3] SEMARNAT, “Norma Oficial Mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003, Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos,” Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, Diario Oficial de la Federación, 2005.
- [4] PEMEX, Informe de Responsabilidad Social 2010.
http://www.pemex.com/informes/pdfs/descargas/pemex_irs_completo_2011.pdf
- [5] CNH, “Documento Técnico 1 (DT-1), Factores de recuperación de aceite y gas en México,” 2010. http://www.cnh.gob.mx/_docs/DOCUMENTOTECNICO1FINAL.pdf.
- [6] R. Lee, R. Seright, M. Hightower, A. Sattler, M. Cather, B. McPherson, L. Wrotenbery, D. Martin and M. Whitworth, “Strategies for produced water handling in New Mexico,” 2002
<http://wrrri.nmsu.edu/publish/watcon/proc47/lee.pdf>
- [7] J. A. Veil, M. G. Puder, D. Elcock and R. J. Redweik Jr., “A White paper describing produced water from production of crude oil natural gas and coal bed methane,” 2004,
http://www.evs.anl.gov/pub/dsp_detail.cfm?PubID=1715
- [8] C.E. Clark and J.A. Veil, “Produced Water Volumes and Management Practices in the United States,” 2009, <http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2009/07/64622.pdf>

- [9] L. Manfra, C. Maggi, J. Bianchi, M. Mannozi, O. Faraponova, L. Mariani, F. Onorati, A. Tornambè, C. Virno-Lamberti and E. Magaletti, “Toxicity evaluation of produced formation waters after filtration treatment,” *Natural Science*, Vol. 2, 2010, pp. 33-40.
- [10] A. D. Chave and C. S. Cox, “Controlled electromagnetic sources for measuring electrical conductivity beneath the oceans,” *J. Geophys. Res.*, B. 87, 1982, pp. 5327-5338.
- [11] A. Tinu and L. Amit, “Socio-economic & technical assessment of photovoltaic powered membrane desalination processes for India,” *Desalination*. 268, 2011, 238-248.
- [12] ARPEL, “Disposición y tratamiento de agua producida. Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe,” Gude. Alberta, Canada, 2012, 111 pp.
- [13] FAO, “Water quality for agriculture,” 1994, <http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm> 07/05/11
- [14] GWPRF, Ground Water Protection Research Foundation, U.S. Department of Energy, and U.S. Bureau of Land Management. “Handbook on Coal Bed Methane Produced Water: Management and Beneficial Use Alternatives,” 2003, <http://www.ela-iet.com/EMD/CoalBedMethaneWater.pdf>
- [15] R. P. W. M. Jacobs, E. Grant, J. Kwant, J. M. Marqueine and E. Mentzer, “The composition of produced water from shell operated oil and gas production in the North Sea,” (J. P. Ray and F. R. Englehart, Eds.). *Produced water. Technological/Environmental Issues and Solutions*. Plenum Press, New York, Vol. 46, 1992, pp. 13-21.
- [16] DOE, “Produced water management technology descriptions. FactSheet-Agricultural Use,” Departamento de Energía de los Estados Unidos. Laboratorio Nacional de

- Tecnología y Energía (NETL). 2012,
<http://www.netl.doe.gov/technologies/pwemis/techdesc/aguse/index.html>.
- [17] NPC, “Management of produced water from oil and gas wells,” The National Petroleum Council, Manual, 2011,
http://www.npc.org/Prudent_DevelopmentTopic_Papers/217_Management_of_Produced_Water_Paper.pdf
- [18] A. A. Steiner, “A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition,” *Plant Soil*. 15, 1961, 134-154.
- [19] AOAC, “*Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*,” Association of Official Analytical Chemists. Washington DC, USA. 1980, 1018 pp.
- [20] USEPA 8015B, “Nonhalogenated Organics Using GC/FID,” EPA, Revision 2, 1996, 28 pp.
- [21] US EPA-8260C-2006 “Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS),” EPA Revision 3, 2006, 92 pp.
- [22] SAS JMP “User’s guide. Versión 5.0.1. SAS Institute Inc.,” 2002,
<http://support.sas.com/archive/installation/admindoc/installation/JMP501AdminGuide.pdf>
- [23] G. Adam and H. Duncan, “Influence of diesel fuel on seed germination,” *Environ. Poll.*, 120, 2002, 363-370.
- [24] E. E. Quiñones-Aguilar, R. Ferrera-Cerrato, F. Gavi-Reyes, L. Fernández-Linares, R. Rodríguez-Vázquez and A. Alarcón, “Emergence and growth of maize in a crude oil polluted soil,” *Agrociencia*, 37, 2003, 585-594.

- [25] SEMARNAT, Norma Oficial Mexicana NOM-138-Semarnat/SS-2003, “Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación,” Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación, 2003b.
- [26] R. Powell, “The use of plants as "field" biomonitors,” En Wang W, Gorsuch J, Hughes J (Eds.) *Plants for Environmental Studies*. Lewis. Raton, FL, EEUU., 1997, pp. 47-61.
- [27] SEMARNAT, Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. “Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales,” Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Diario oficial de la Federación, 1996.
- [28] C. De Kreij and T. H. J. M. Van Den Berg, “Nutrient uptake, production and quality of *Rosa hybrida* in rockwool as affected by electrical conductivity of the nutrient solution,” In: *Plant nutrition-physiology and applications*. (M. L. van Beusichem, Ed.). Springer Netherlands, Wageningen, Netherlands. Vol. 41, 1990, pp. 519-523.
- [29] M. Alkio , T. M. Tabuchi, X. Wang y A. Colón-Carmona, “Stress responses to polycyclic aromatic hydrocarbons in *Arabidopsis* include growth inhibition and hypersensitive response-like symptoms” *Journal of Experimental Botany*. Volume 56, Issue 421, 2005, pp. 2983-2994.
- [30] L. Jackson and J. Myers, “Alternative use of produced water in aquaculture and hydroponic systems at naval petroleum reserve No. 3,” *Memoirs*. The 2002 Ground Water Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, Oct. 16–17, 2002, http://www.gwpc.org/e-Library/Proceedings/library_proceedings_main.htm

- [31] V. Chinnusamy, A. Jagendorf, Z. Jian-Kang, "Understanding and improving salt tolerance in plants," *Crop Science*. 45, 2005, 437-448.
- [32] S. Yokoi, R. A. Bressan and P. M. Hasegawa, "Salt Stress Tolerance of Plants," Center for Environmental Stress Physiology, Purdue University, (Iwanaga M, ed.), JIRCAS Working Report, 2002, 25-33.
- [33] D. P. Arfsten, D. J. Schaeffer, and D. C. Mulveny, "The Effects of Near Ultraviolet Radiation on the Toxic Effects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Animals and Plants," Review, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 33,1996, 1-24.
- [34] J.M. Navas, M. Babín, S. Casado, C. Fernández, J.V. Tarazona, "The Prestige oil spill: a laboratory study about the toxicity of the water-soluble fraction of the fuel oil," *Mar Environ Res*. 62, 2006, Suppl:S352-5.
- [35] K. Srogi, "Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review," *Environ ChemLett*, 5, 2007, 169-195

CUADROS

Cuadro 1. Descripción de tratamientos. Se presenta la proporción de agua producida con el agua de riego usada en las diferentes etapas fenológicas.

Tratamiento	Estación	Agua producida (L)	Agua de riego (L)	pH	C.E. (mS cm ⁻¹)
T0	Solución fertilizante (desarrollo vegetativo)	0.0	1.0	6.0	0.98
T1	Buena Suerte	1.0	7.5	6.0	0.98
T2	Monclova 1	1.0	315.6	6.0	0.98
T3	Forasteros	1.0	8.0	6.0	0.98
T0	Solución fertilizante (floración)	0.0	1.0	6.0	1.50
T1	Buena Suerte	1.0	4.9	6.0	1.50
T2	Monclova 1	1.0	189.4	6.0	1.50
T3	Forasteros	1.0	5.2	6.0	1.50
T0	Solución fertilizante (fructificación)	0.0	1.0	6.0	1.94
T1	Buena Suerte	1.0	3.79	6.0	1.94
T2	Monclova 1	1.0	157.8	6.0	1.94
T3	Forasteros	1.0	4.0	6.0	1.94
T0	Solución fertilizante (Llenado de fruto)	0.0	1.0	6.0	2.78
T1	Buena Suerte	1.0	2.6	6.0	2.78
T2	Monclova 1	1.0	105.2	6.0	2.78
T3	Forasteros	1.0	2.8	6.0	2.78

Cuadro 1. Análisis de las aguas producidas de acuerdo a la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT 2003a). Se analizó a modo de referencia la solución fertilizante Steiner (Steiner 1961) al 75% de concentración. Todas las concentraciones se expresan en mg L⁻¹ con excepción del pH.

Parámetro	Buena Suerte	Monclova 1	Forasteros	Sol. Fertilizante
Hidrocarburos fracción ligera	<0.30	<0.30	<0.30	<0.30
Hidrocarburos fracción media	103.20	1.80	20.70	<0.50

Hidrocarburos fracción pesada	<4.10	<4.10	<4.10	<4.10
pH	4.43	6.50	6.67	4.29
Demanda bioquímica de oxígeno	12353.00	499.30	1515.30	1.50
Fosforo total	<0.30	<0.30	<0.30	11.09
Nitrógeno total Kjeldahl	30.50	66.90	15.10	73.10
Nitrógeno de nitritos	0.06	<0.02	<0.02	<0.02
Nitrógeno de nitratos	4.34	0.93	5.61	0.29
Sólidos sedimentables	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Materia flotante	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos totales	10760.00	153750.00	5120.00	2070.00
Sólidos disueltos totales	10732.00	153750.00	5120.00	2070.00
Sólidos suspendidos totales	28.00	<9.00	<9.00	<9.00
Sólidos volátiles totales	6110.00	20570.00	670.00	560.00
Suma de Nitrógenos	34.90	67.83	20.71	73.39
Grasas y aceites	18.10	10.40	6.60	9.10
Zn ⁺²	0.78	0.17	0.11	0.94
Pb ⁺²	<0.50	1.77	<0.50	<0.50
Ni ⁺²	<0.10	1.22	<0.10	<0.10
Cd ⁺²	<0.05	0.37	<0.05	<0.05
Cu ⁺²	<0.10	0.148	<0.10	0.65
Hg ⁺²	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
As ⁺³	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Cr ⁺³	<0.10	0.39	<0.10	<0.10

Cuadro 2. Variables morfológicas evaluadas en las plantas de tomate. Se muestran las etapas floración¹ y fructificación².

TRAT	ALT (cm)	DT (mm)	LR (cm)	PSH (g)	PST (g)	NF -	PFS (g)
T0 ¹	65.0a [†]	9.46a	65.0ab	20.83a	4.34a	nd	nd
T1 ¹	60.4a	9.14a	47.1b	13.61a	3.64a	nd	nd
T2 ¹	68.4a	9.34a	92.2a	18.30a	4.40a	nd	nd
T3 ¹	64.4a	8.70a	65.7ab	15.24a	3.63a	nd	nd
T0 ²	257.4a	16.46a	65.4a	243.1a	75.5a	108.6a	414.9a
T1 ²	215.0a	14.44a	46.2b	68.6c	31.7c	53.2c	262.2b
T2 ²	255.8a	13.38a	72.2a	131.7b	54.2b	90.0b	385.3ab
T3 ²	259.8a	15.50a	69.2a	132.8b	63.0ab	91.4b	374.9ab

- Adimensional. nd: no disponible. ALT: altura. DT: diámetro de tallo. LR: longitud de raíz. PSH: peso seco de hoja. PST: peso seco de tallo. NF: número de frutos por planta. PFS producción de fruto seco por planta. [†]Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). T0: Testigo (Solución fertilizante Steiner). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

Cuadro 3. Concentración de minerales en la raíz de la planta de tomate en las etapas de floración¹ y fructificación².

TRAT	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	Mo	Ni	Cd	Pb	Cr
T0 ¹	1.63a [†]	0.50a	0.80a	1.08a	0.22ab	0.08ab	279.7a	31.30a	152.5a	59.95a	15.99a	121.7a	4.29a	0.00a	38.95a
T1 ¹	1.51a	0.39a	0.43a	0.89a	0.18b	0.05b	261.7a	30.32a	94.5b	54.91a	15.39a	301.7a	2.25a	1.06a	39.37a
T2 ¹	1.57a	0.32a	1.21a	0.92a	0.26a	0.12a	473.8a	27.57a	110.9ab	50.15a	14.98a	375.2 a	2.48a	0.03a	41.03a
T3 ¹	1.64a	0.41a	0.77a	0.90a	0.23ab	0.08ab	327.6a	31.01a	114.3ab	57.95a	15.80a	87.8a	3.49a	0.00a	42.17a
T0 ²	1.85a	0.40a	0.80a	1.22a	0.23a	0.15b	218.2a	24.84a	149.8a	75.72a	2.10a	17.9a	0.0a	0.0a	3.22a
T1 ²	1.41ab	0.25a	0.96a	1.52a	0.22a	0.56a	206.2a	13.41b	107.3a	71.32ab	0.32b	13.3a	0.0a	0.0a	1.82a
T2 ²	1.39ab	0.19a	0.61a	1.04a	0.21a	0.40a	178.2a	11.48b	137.0a	34.08b	0.00b	32.6a	0.0a	0.0a	2.55a
T3 ²	1.31b	0.24a	1.17a	0.98a	0.23a	0.56a	145.6a	10.29b	157.9a	42.91ab	0.21b	19.7a	0.0a	0.0a	2.40a

Las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y Na se expresan en % en base a materia seca. Las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, Ni, Cd, Pb y Cr se expresan en mg L⁻¹. [†]Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). T0: Testigo (Solución fertilizante

Steiner). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

Cuadro 4. Concentración de minerales en el tallo de la planta de tomate en las etapas de floración¹ y fructificación².

TRAT	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	Mo	Ni	Cd	Pb	Cr
T0 ¹	2.51a [†]	0.60a	1.15a	1.19a	0.25a	0.02b	145.5a	26.17a	125.2a	52.19a	15.81a	7.74a	7.50a	0.0a	39.03 a
T1 ¹	2.42a	0.52a	1.27a	0.63a	0.18b	0.09a	219.8a	23.86a	93.4a	40.49a	14.72a	35.66a	6.48a	0.0a	40.73a
T2 ¹	1.42b	0.51a	0.98a	1.61a	0.25a	0.03b	242.2a	24.23a	128.3a	60.17a	15.25a	29.90a	6.78a	0.0a	39.45a
T3 ¹	1.98ab	0.60a	1.17a	1.52a	0.24a	0.03b	290.1a	24.71a	127.4a	55.11a	15.25a	27.84a	6.48a	0.0a	40.39a
T0 ²	1.40a	0.98a	2.79a	1.45a	0.45a	0.06b	167.6a	14.65a	241.2a b	90.03a	0.0a	30.29a	0.0a	0.0a	3.53a
T1 ²	0.96b	0.37b	1.22c	0.76b	0.37ab	0.30a	277.4a	3.67b	120.3b	39.10b	0.0a	31.50a	0.0a	0.0a	0.94b
T2 ²	1.33ab	0.49b	1.60bc	1.16ab	0.15b	0.19ab	125.8a	6.74b	324.2a	56.00b	0.0a	53.48a	0.0a	0.0a	2.55ab
T3 ²	1.06ab	0.40b	2.29ab	1.02ab	0.34ab	0.28a	163.4a	4.12b	135.5b	44.75b	0.0a	24.84a	0.0a	0.0a	1.89ab

Las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y Na se expresan en % en base a materia seca. Las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, Ni, Cd, Pb y Cr se expresan en mg L⁻¹. [†]Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). T0: Testigo (Solución fertilizante Steiner). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

Cuadro 5. Concentración de minerales en la hoja de la planta de tomate en las etapas de floración¹ y fructificación².

TRAT	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	Mo	Ni	Cd	Pb	Cr
T0 ¹	3.22a [†]	0.60a	1.15a	3.38a	0.31a	0.03b	233.98a	26.76a	56.46a	94.47a	16.61a	26.50 a	6.76a	0.0a	41.14a
T1 ¹	1.90b	0.52a	0.88a	2.41ab	0.28a	0.11a	177.25a	22.82b	75.37a	63.14a	15.13b	10.98a	7.37a	0.0a	39.93a
T2 ¹	2.48ab	0.48a	0.89a	2.26b	0.30a	0.03b	103.47a	23.57ab	102.3a	69.21a	15.65a b	12.20a	7.35a	0.0a	39.57a
T3 ¹	2.87ab	0.47a	0.86a	2.53ab	0.28a	0.03b	183.51a	23.63ab	63.04 a	74.24a	15.28a b	18.23a	7.15a	0.0a	38.72a
T0 ²	2.94a	0.88a	1.27a	2.78a	0.56a	0.06a	150.2a	5.51a	56.05a	273.1a	0.00a	16.57a	0.0a	0.0a	4.48a
T1 ²	1.98b	0.49b	0.75a	2.76a	0.57a	0.18a	459.6a	4.65a	92.04a	192.4a	0.60a	24.59a	0.0a	0.0a	5.19a
T2 ²	2.34ab	0.56b	0.95a	3.32a	0.67a	0.11a	98.8a	1.61a	41.73a	273.8a	0.24a	2.89a	0.0a	0.0a	4.52a
T3 ²	2.66ab	0.47b	1.46a	3.28a	0.36a	0.19a	156.8a	2.40a	48.62a	278.7a	0.02a	6.73a	0.0a	0.0a	2.55a

Las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y Na se expresan en % en base a materia seca. Las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, Ni, Cd, Pb y Cr se expresan en mg L⁻¹. †Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). T0: Testigo (Solución fertilizante Steiner). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

Cuadro 6. Concentración de minerales en el fruto de la planta de tomate. Se presentan los resultados del primero¹ y sexto corte².

TRAT	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	Mo	Ni	Cd	Pb	Cr
T0 ¹	1.78a [†]	0.61a	1.43a	0.30a	0.11a	0.02a	277.0a	30.95a	75.78ab	42.1a	14.57a	3.08 a	7.51a	0.00a	38.98a
T1 ¹	1.47a	0.40b	0.89b	0.26a	0.10a	0.03a	239.2a	23.41b	63.02b	34.6b	14.22a	3.37 a	7.53a	0.00a	37.90a
T2 ¹	1.81a	0.42b	0.90b	0.32a	0.10a	0.04a	251.4a	25.01b	103.48a	37.09 ab	14.22a	2.86 a	7.56a	0.01a	39.05a
T3 ¹	1.49a	0.46b	0.96b	0.32a	0.37a	0.03a	181.6a	23.47b	58.83b	35.19 ab	14.49a	2.89 a	7.66a	0.00a	37.94a
T0 ²	1.64a	0.57a	2.58a	0.20a	0.13a	0.02b	366.8a	7.97a	35.94a	10.58a	0.0a	60.8a	0.0a	0.0a	2.99a
T1 ²	1.22b	0.33b	1.04b	0.07b	0.09b	0.14a	238.2a	2.47b	12.34a	1.43b	0.0a	46.2a	0.0a	0.0a	2.80a
T2 ²	1.75a	0.40b	1.81ab	0.17a	0.11ab	0.06ab	173.6a	4.97ab	30.63a	6.28ab	0.0a	40.3a	0.0a	0.0a	3.53a
T3 ²	1.71a	0.39b	1.86ab	0.16a	0.11ab	0.08ab	432.2a	4.38b	38.56a	3.58b	0.0a	48.9a	0.0a	0.0a	2.26a

Las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y Na se expresan en % en base a materia seca. Las concentraciones de Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, Ni, Cd, Pb y Cr se expresan en mg L⁻¹. †Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). T0: Testigo (Solución fertilizante Steiner). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

Cuadro 7. Concentración de Hidrocarburos de Fracción Media (HFM) e hidrocarburos aromáticos en el fruto de las plantas de tomate.

Parámetro	T0	T1	T2	T3
HFM	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Benceno	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Tolueno	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Etilbenceno	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Xilenos	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

Las concentraciones se expresan en mg L⁻¹. T0: Testigo (Solución fertilizante Steiner). T1: Tratamiento con agua producida de la estación Buena Suerte. T2: Tratamiento con agua producida de la estación Monclova 1. T3: Tratamiento con agua producida de la estación Forasteros.

V. CONCLUSIONES

- La caracterizaron las aguas producidas provenientes de tres estaciones de la zona de producción de gas Sabinas-Piedras Negras del Estado de Coahuila, México, en base a la NOM-143-SEMARNAT-2003, indica que debido a su CE no pueden ser usadas directamente como agua de riego.
- En el caso del agua producida proveniente de las estaciones Monclova 1 y Forasteros, es factible el uso de aguas producidas diluidas con agua de riego en la producción de tomate bajo condiciones de invernadero.
- Para el agua producida proveniente de la estación Buena Suerte, no se encontró factible su uso como agua de riego, debido a los altos contenidos de hidrocarburos de fracción media y de Cu que se asociaron con daños en las plantas e incluso con la muerte de algunas.
- La efectividad de las aguas producidas como agua de riego depende de sus características químicas.
- Las aguas producidas afectaron significativamente la absorción de minerales esenciales por las plantas de tomate, lo cual se vió reflejado en el crecimiento de las mismas.

- Los frutos de las plantas de tomate no presentaron acumulación de compuestos tóxicos derivados del petróleo tales como hidrocarburos de fracción media, ni compuestos aromáticos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos.

VI. LITERATURA CITADA

- Adam, G. y H. Duncan. 2002. Influence of diesel fuel on seed germination. *Environ Poll.* 120: 363-370.
- ALL. 2003. Handbook on Coal Bed Methane Produced Water: Management and Beneficial Use Alternatives,” prepared by ALL Consulting for the Ground Water Protection Research Foundation, U.S. Department of Energy, and U.S. Bureau of Land Management. July. [en línea] <http://pttc.mines.edu/CBM/handbook/handbook.pdf>
- Amyx, J., D. Bass y R.L. Whiting. 1960. *Petroleum Reservoir Engineering*. McGrawHill Company, New York, U.S.A, 610 pp. [en línea] <http://es.scribd.com/doc/121758593/Amyx-J-Petroleum-Reservoir-Engineering-Physical-Properties>
- ARPEL. 2012. Disposición y tratamiento de agua producida. Asociación Regional de Empresas de Petróleo y gas natural en Latinoamérica y el Caribe. Guía. Alberta, Canadá. 111 pp.
- Brost, D.F. 2002. Water Quality Monitoring at the Kern River Field. Presented at the 2002 Ground Water Protection Council Produced Water Conference. Colorado Springs, CO, Oct. 16-17. [en línea] <http://www.gwpc.org/Meetings/PW2002/Papers-Abstracts.htm>.
- Clark, C.E. y J.A. Veil. 2009. Produced Water Volumes and Management Practices in the United States. [en línea] <http://www.ipd.anl.gov/anlpubs/2009/07/64622.pdf> 03/01/13
- Cline, J.T. 1998. Treatment and discharge of produced water for deep offshore disposal. Memorias. API Produced Water Management Technical Forum and Exhibition, Lafayette, LA, USA, November 17-18.
- CNH. 2012. Documento Técnico 1 (DT-1), Factores de recuperación de aceite y gas en México. Comisión Nacional de Hidrocarburos. [en línea] http://www.cnh.gob.mx/_docs/DOCUMENTOTECNICO1FINAL.pdf. 02/01/2012

- Cruz-Hernández, J., R. Islas-Juárez, E. Márquez-Ramírez y A. Medina-González. 2005. Influencia del agua de inyección durante un proceso de recuperación secundaria en yacimientos areno-arcillosos. Instituto Mexicano del Petróleo. [en línea] <http://www.cedip.edu.mx/graficacion/petroleros/Administraci%C3%B3n%20de%20Pemex%20Exploracion/Yacimientos/20%20INFLUENCIA%20DEL%20AGUA%20DE%20INYECCION%20DURANTE.pdf> 19/10/12
- De Kreijl, C. y T. H. J. M. Van Den Berg. 1990. Nutrient uptake, production and quality of Rosa hybrida in rockwool as affected by electrical conductivity of the nutrient solution. En: Plant nutrition-physiology and applications. (M. L. van Beusichem, Ed.) Springer Netherlands, Wageningen, Netherlands. 41: 519-523.
- DOE. 2012. Produced Water Management Technology Descriptions. Fact Sheet-Agricultural Use. Departamento de Energía de los Estados Unidos, Laboratorio Nacional de Tecnología y Energía (NETL). [en línea] <http://www.netl.doe.gov/technologies/pwmis/techdesc/aguse/index.html>. 11/02/2012
- EPA. 1993. Development document for effluent limitations guidelines and new source performance standards for the offshore subcategory of the oil and gas extraction point source category. [en línea] <http://yosemite.epa.gov/water/owrcatalog.nsf/1ffc8769fdecb48085256ad3006f39fa/969ed536d932393a85256d83004fd95c!OpenDocument> 02/01/13
- FAO. 1994. Food and Agriculture Organization of the United Nations Water. Quality for Agriculture: 1.4 Water Quality Guidelines. [en línea] <http://www.fao.org/DOCREP/003/T0234E/T0234E00.htm> 07/05/11
- Glickman, A.H. 1998. Produced Water Toxicity: Steps You Can Take to Ensure Permit Compliance. Memorias. API Produced Water Management Technical Forum and Exhibition, Lafayette, LA, Nov. 17-18.
- GWPRF. 2003. Ground Water Protection Research Foundation, U.S. Department of Energy, and U.S. Bureau of Land Management. Handbook on Coal Bed Methane Produced Water: Management and Beneficial Use Alternatives, [en línea] <http://www.ela-iet.com/EMD/CoalBedMethaneWater.pdf>
- Hudson, N., A. Baker, D. Ward, D.M. Reynolds, C. Brunson, C.C. Marquet y S. Browning. 2008. Can fluorescence spectrometry be used as a surrogate for the Biochemical Oxygen Demand (BOD) test in water quality assessment? An example from South West England. Science of the Total Environment. 391: 149–158.
- Hum, F., P. Tsang, T. Harding y A. Kantzas. 2006. Review of Produced Water Recycle and Beneficial Reuse. [en línea] www.iseee.ca/iseee/files/iseee/ABEnergyFutures-19.pdf
- Jackson, L. y J. Myers. 2002. Alternative use of produced water in aquaculture and hydroponic systems at naval petroleum reserve No. 3. Memorias. The 2002 Ground

Water Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, Oct. 16–17, 2002. [en línea]. http://www.gwpc.org/e-Library/Proceedings/library_proceedings_main.htm 25/09/11

- Jacobs, R.P.W.M., E. Grant, J. Kwant, J.M. Marqueine y E. Mentzer. 1992. The composition of produced water from shell operated oil and gas production in the north sea. En: Produced Water. (J.P. Ray and F.R. Englehart, Eds.). Plenum Press, New York. 46: 13-21.
- Khatib, Z. y P. Verbeek. 2003. Water to Value – Produced Water Management for Sustainable Field Development of Mature and Green Fields. *Journal of Petroleum Technology*. 26-28.
- Kuipers, J.R., K.A. MacHardy, W. Merschat y T. Myers. 2004. Coal bed Methane-Produced Water: Management Options for Sustainable Development. Northern Plains Resource Council, April 2004.
- Lee, R., R. Seright, M. Hightower, A. Sattler, M. Cather, B. McPherson, L. Wrotenbery, D. Martiny M. Whitworth. 2002. Strategies for produced water handling in New México. [en línea]. <http://wrri.nmsu.edu/publish/watcon/proc47/lee.pdf> 24/04/12
- Manfra, L., G. Moltedo, C. Virno, C.M. Lamberti, M.G. Finoia, S. Giuliani, F. Onorati, M. Gabellini, R. Di Mentoy A.M. Cicero. 2007. Metal Content and Toxicity of Produced Formation Water (PFW): Study of the Possible Effects of the Discharge on Marine Environment. *Environ. Contam. Toxicol.* 53: 183–190.
- Manfra, L.C., M.J. Bianchi, M.O. Mannozi, L.M. Faraponova, F.A. Onorati, C. Tornambè, Virno-Lamberti y E. Magaletti. 2010. Toxicity evaluation of produced formation waters after filtration treatment. *Natural Science*. 2: 33-40.
- Martínez-Jerónimo, F., R. Villaseñor, G. Ríos y F. Espinosa-Chavez. 2005. Toxicity of the crude oil water-soluble fraction and kaolin-adsorbed crude oil on *Daphnia magna* (Crustacea: Anomopoda). *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 48(4): 444-449.
- Mastouri, R., S.M. Borghei, F. Nadim y E. Roayaei. 2010. The investigation of induced gas flotation (IGF) performance at elevated temperatures and high total dissolved solids (tds) produced water. *Academic Search Journal: Petroleum Science and Technology - PET SCI TECHNOL.* 28(14): 1415-1426. [en línea]. http://ipec.utulsa.edu/Conf2009/Papers%20received/Mastouri_66.pdf
- Murphree, P.A. 2002. Utilization of Water Produced from Coal Bed Methane Operations at the North Antelope/Rochelle Complex, Campbell County, Wyoming. Presented at the 2002 Ground Water Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, Oct. 16-17. [en línea]. <http://www.gwpc.org/Meetings/PW2002/Papers-Abstracts.htm>.

- Navas, J.M., M. Babín, S. Casado, C. Fernández y J.V. Tarazona. 2006. The Prestige oil spill: a laboratory study about the toxicity of the water-soluble fraction of the fuel oil. *Mar. Environ. Res.* 62 Suppl:S352-5.
- Paetz, R.J. y S. Maloney. 2002. Demonstrated Economics of Managed Irrigation for CBM Produced Water. Presented at the 2002 Ground Water Protection Council Produced Water Conference, Colorado Springs, CO, Oct. 16-17. [en línea]. <http://www.gwpc.org/Meetings/PW2002/Papers-Abstracts.htm>.
- Pessarakli, M. 2011. Handbook of plant and crop stress. 3^a ed., CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton London New York, pp. 1195.
- Powell, R. 1997. The use of plants as "field" biomonitors. En: Wang W, Gorsuch J, Hughes J (Eds.). *Plants for Environmental Studies*. Lewis. Raton, FL, EEUU. pp. 47-61.
- PWS. 2010. Produced water society. Produced Water regulatory requirements around the world. [en línea]. http://70.86.131.22/~produced/page.php?page_name=protocols
- Quiñones-Aguilar, E.E., Ferrera-Cerrato R., Gavi-Reyes F., Fernández-Linares L., Rodríguez-Vázquez R. y Alarcón A. 2003. Emergence and growth of maize in a crude oil polluted soil. *Agrociencia*. 37: 585-594.
- Razateo, B. 1993. La nutrición mineral de los frutales, deficiencias y excesos SOQUIMICH. 105. P
- SEMARNAT. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales". Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Diario oficial de la Federación, 1996.
- SEMARNAT. 2003^a. Norma Oficial Mexicana NOM-143-SEMARNAT-2003. "Que establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos". Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. Diario Oficial de la Federación, 3 de marzo de 2005.
- SEMARNAT. 2003^b. Norma Oficial Mexicana NOM-138-Semarnat/SS-2003. Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, Diario Oficial de la Federación, 29 de marzo de 2005.
- Srogi, K. 2007. Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: a review. *Environ. Chem. Lett.* 5: 169–19.

- Tibbetts, P.J.C., I.T. Buchanan, L.J. Gawel, y R. Large. 1992. A Comprehensive Determination of Produced Water Composition. En: Produced Water, J.P. Ray and F.R. Englehart (eds.). Plenum Press, New York. pp 97–112.
- USEPA. 2012. Region 6. USEPA's Produced Water Permitting Requirements. United States Environmental Protection Agency. [en línea]. <http://www.touchbriefings.com/pdf/2590/Wilson.pdf>. 12/02/2012
- USEPA. 2013. Title 40: Protection of Environment, Chapter I: environmental protection agency, subchapter n: effluent guidelines and standards, part 435: oil and gas extraction point source category, Subpart E: Agricultural and Wildlife Water Use Subcategory, 435.52 [en línea], <http://cfr.vlex.com/vid/435-52-representing-practicable-currently-19829950> 10/06/13
- Veil, J.A., M.G. Puder, D. Elcock y R.J. Redweik Jr. 2004. A White paper describing produced water from production of crude oil natural gas and coal bed methane. [en línea] http://www.evs.anl.gov/pub/dsp_detail.cfm?PubID=1715. 8/09/12
- Venkata-RumanaRau, M., D. Weindorf, G. Breitenbeck y N. Baisackh. 2012. Differential expression of the transcripts of *spartinaalternifloraloisel* (smooth cordgrass) induced in response to petroleum hydrocarbon. *Molecular biotechnol.* 51: 18-26.
- Vivot, E.P., C.M. Rugnaa, A.M. Giéco, C.I. Sáncheza, M.V. Ormaecheaa y C.J. Sequina. 2010. Calidad del agua subterránea. Asociación de Universidades Grupo Montevideo ISSN: 1852-2.
- Yokoi, S., R.A. Bressan y P.M. Hasegawa. 2002. Salt Stress Tolerance of Plants. Center for Environmental Stress Physiology, Purdue University, (Iwanaga M, ed.). JIRCAS Working Report 25-33.