

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Respuesta de Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) al Riego con
Distintas Concentraciones de Benceno, Gasolina y Diésel

Por:

ISELA DÍAZ LÓPEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México.

Noviembre 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Respuesta de Plantas de Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) al Riego con
Distintas Concentraciones de Benceno, Gasolina y Diésel

Por:

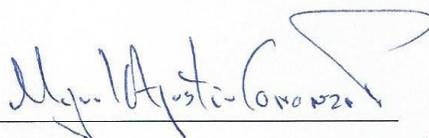
ISELA DÍAZ LÓPEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



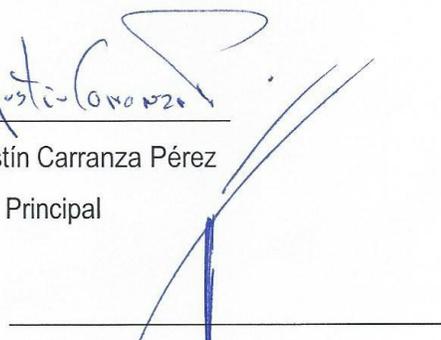
Biol. Miguel Agustín Carranza Pérez

Asesor Principal



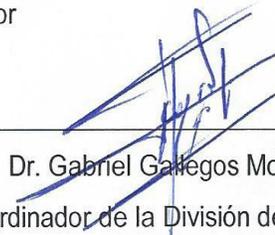
Dr. José Fernando Martel Valles

Coasesor



Dr. Adalberto Benavides Mendoza

Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales

Coordinador de la División de Agronomía



Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.

Noviembre 2016

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Terra Mater

Gracias a la universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme la oportunidad de ser parte de ella, por todo el aprendizaje y experiencias compartidas por parte de profesores, personal académico y compañeros, principalmente al Departamento de Botánica por ser parte importante de mi formación académica.

A mis asesores de tesis

Al Dr. José Fernando Martel Valles, por darme la oportunidad de ser parte de su investigación, por su paciencia y por qué desde el principio estuvo apoyándome para llevar a cabo tesis. ¡Gracias!

Al Biólogo Miguel Agustín Carranza Pérez, por sus consejos y conocimientos brindados durante la carrera y por la asesoría en la realización de esta tesis.

Al Dr. Adalberto Benavides Mendoza por su asesoría y contribución en el desarrollo de esta tesis.

A Juan López Trujillo y Adalilia Cifuentes Díaz, gracias por estar ahí y formar parte de cada momento vivido durante esta etapa, por sus consejos, paciencia cariño, amistad incondicional y sobre todo por darme ánimos cuando más lo necesito. Son y serán siempre una bendición en mi vida.

DEDICATORIA

A Dios primeramente por darme las fuerzas necesarias cada día, ser mi fortaleza en momentos difíciles, por acompañarme y por concluir una tapa de mi vida, sin ti nada hubiese sido posible.

A mis padres

Josefa López López y Heraldo Díaz Gonzales, por todo el apoyo, amor y consejos que han brindado a lo largo de vida, por creer en mí desde el principio, por todo su esfuerzo que hacen día a día para sacar adelante a la familia, estoy muy agradecida con ustedes porque cada meta alcanzada, ustedes son mi inspiración para cumplir cualquier reto.

A mis hermanas

Anayeli y Elizabeth porque siempre están dándome muchos ánimos, por todos los momentos alegres y especiales que hemos pasado juntas y por qué son parte de mi motivación para seguir adelante.

A mis abuelitos †

Consuelo y Teófilo, gracias por cuidar con tanto amor desde pequeña, por todo ese tiempo grato que pase a su lado y por creer en mi hasta el último momento. Todos esos recuerdos, enseñanzas y sabios consejos, los llevo siempre en mi mente y corazón.

A todo el resto de mi familia, gracias por su apoyo incondicional, por su cariño y buenos consejos que siempre me brindar

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
AGRADECIMIENTOS -----	i
DEDICATORIA -----	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO -----	iii
ÍNDICE DE FIGURAS-----	iv
1. RESUMEN -----	1
2. INTRODUCCIÓN -----	2
2.1 Objetivo general -----	4
2.2 Objetivos específicos -----	5
2.3 Hipótesis -----	5
3. REVISION DE LITERATURA -----	6
3.1 Hidrocarburos -----	6
3.2 Hidrocarburos comunes -----	6
3.3 Parámetros de medición analítico -----	7
3.4 Aguas congénita asociada a la presencia de hidrocarburos -----	7
3.5 Comportamiento de los hidrocarburos en el medio ambiente -----	8
3.5.1 En el suelo -----	8
3.5.2 En el agua -----	8
3.5.3 En el aire -----	9
3.6 Fuentes de contaminación por hidrocarburos -----	9
3.7 Estudios de toxicidad en plantas y seres vivos -----	10
3.7.1 Biorremediación -----	11

	Página
3.8 Tomate -----	12
3.8.1 Características generales -----	12
4. MATERIALES Y MÉTODOS -----	14
4.1 Ubicación -----	14
4.2 Establecimiento del cultivo de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) -----	14
4.3 Irrigación de las plantas -----	14
4.4 Aplicación de los tratamientos -----	14
4.5 Monitoreo y Evaluación de los lixiviados -----	15
4.6 Evaluación de las variables morfológicas -----	15
4.7 Diseño experimental -----	16
5. RESULTADOS -----	17
5.1 pH y CE en etapa de floración y fructificación -----	17
5.2 Variables morfológicas -----	18
5.2.1 Etapa de floración -----	18
5.2.2 Etapa de fructificación -----	19
5.3 pH, CE y ° Brix evaluados en frutos de tomate -----	20
6. DISCUSIÓN -----	21
6.1 pH, CE en la etapa de floración y fructificación -----	21
6.2 Variables morfológicas en la etapa de floración -----	21
6.3 Variables morfológicas en la etapa de fructificación -----	22
6.4 pH, CE y ° Brix evaluados en frutos de tomate -----	23
7. CONCLUSIONES -----	24
8. REFERENCIAS -----	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. pH y CE de los lixiviados de plantas de tomate en etapa de floración y fructificación, tratados con hidrocarburos, el testigo fue regado con solución nutritiva Steiner. Letras diferentes en las columnas indican efectos significativos de acuerdo con el procedimiento de Fisher ($\alpha \leq 0.05$). Las barras representan el error estándar de la media ----- 17

Figura 2. Diámetro de tallo, altura, peso seco de hoja, y peso seco de tallo en la etapa de floración, de plantas de tomate tratadas con hidrocarburos, el testigo fue regado con solución nutritiva Steiner. Letras diferentes en las columnas indican efectos significativos de acuerdo con el procedimiento de Fisher ($\alpha \leq 0.05$). Las barras representan el error estándar de la media ----- 18

Figura 3. Diámetro de tallo, altura, peso seco de hoja, peso seco de tallo, peso seco de la hoja y peso seco de fruto en la etapa de fructificación, de plantas de tomate tratadas con hidrocarburos, el testigo fue regado con solución nutritiva Steiner. Letras diferentes en las columnas indican efectos significativos de acuerdo con el procedimiento de Fisher ($\alpha \leq 0.05$). Las barras representan el error estándar de la media ----- 19

Figura 4. Variables evaluadas en frutos de plantas de tomate tratadas con hidrocarburos, el testigo es producto de lixiviados regados con solución nutritiva Steiner. Letras iguales en las columnas indican efectos no significativos de acuerdo con el procedimiento de Fisher ($\alpha \leq 0.05$). Las barras representan el error estándar de la media ----- 20

1. RESUMEN

La industria extractiva y de transformación en su proceso genera desechos tóxicos. Tal es el caso de la industria petrolera, la cual genera entre otros contaminantes aguas residuales, denominadas aguas congénitas, aguas de formación, aguas producidas, entre otros. Su composición y concentración es muy variable, sus características dependen de cada sitio en particular, pueden contener metales pesados, aceites, hidrocarburos, sales minerales, etc. y cuando se vierten en suelo o agua representan una amenaza al medio ambiente. Los hidrocarburos que contienen, en las plantas pueden producir alteraciones en las variables morfológicas, necrosis o muerte. Sin embargo, el daño depende del tipo de hidrocarburo, concentración, estado físico y tiempo de exposición. Por lo anterior, se decidió aplicar junto con el riego tres tipos de hidrocarburos a diferentes concentraciones: gasolina a 40, 50 y 60 mg L⁻¹, diésel a 20 y 25 mg L⁻¹ y benceno a 75 mg L⁻¹, directas al sustrato de plantas de tomate durante el riego para determinar su efecto en el pH y CE de los lixiviados de la planta y en las variables morfológicas durante las etapas de floración y fructificación. En el fruto se evaluó el pH, CE y °Brix. Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de medias de Fisher LSD para determinar diferencias estadísticas en las variables evaluadas. Los resultados mostraron que las plantas de todos los tratamientos llegaron hasta el sexto corte de fruto. Que los hidrocarburos dependiendo de su tipo y concentración aumentaron o disminuyeron pH y CE de los lixiviados. Que los hidrocarburos produjeron cambios en las variables morfológicas y que dichos cambios se incrementaron con el tiempo de exposición. En el fruto, el tratamiento de diésel con 25 mg L⁻¹ incremento la CE. La aplicación de los hidrocarburos favoreció la concentración de SST.

Palabras clave: hidrocarburos, lixiviados, pH, CE, tomate.

Correo electrónico: ise_dl3@hotmail.com

2. INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados principalmente por carbono e hidrógeno, entre ellos se encuentran el petróleo, gas natural, asfaltos y ceras minerales entre otros (Demirbas, 2008), los principales productos derivados del petróleo obtenidos por el proceso de destilación y rangos de ebullición son el diésel, gasolina, turbosina, kerosenos y gasóleo (Herod *et al.* 2007), el benceno junto con el tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX) forman parte del petróleo crudo y la gasolina (SEMARNAT 2003a). Según la NOM-138-SERMANAT/SS-2003 (SEMARNAT, 2003a), se dividen en hidrocarburos fracción ligera (HFL) hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre cinco y diez átomos de carbono (C_5 a C_{10}), hidrocarburos fracción media (HFM) hidrocarburos cuyas moléculas contengan cadenas lineales entre diez y veintiocho átomos de carbono (C_{10} a C_{28}), hidrocarburos fracción pesada (HFP) hidrocarburos cuyo peso molecular sea mayor a C_{18} .

Los hidrocarburos ligeros o volátiles a temperatura ambiente como los BTEX, representan un riesgo de contaminación del aire (Jiménez y Marín, 2004), las gasolinas y el diésel de suelos y aguas subterráneas (CENAPRED, 2001), dicha contaminación es ocasionada por fugas en estaciones de servicio, tanques de almacenamiento subterráneos, ductos corroídos o en el transporte terrestre y marítimo (CENAPRED, 2001).

Gran parte de las aguas residuales industriales se vierten con o sin tratamiento en los cuerpos de agua a cielo abierto (Heiss-Blanquet *et al.*, 2005), se ha identificado la industria petroquímica como una fuente de emisión de contaminantes orgánicos (Nadal *et al.*, 2007) y de las de mayor riesgo en cuanto a la liberación de metales pesados (UNESCO, 2009). Los hidrocarburos extraídos por la industria petrolera incrementan el número de sitios contaminados alrededor del mundo (Heiss-Blanquet *et al.*, 2005).

Además como subproducto de la extracción de crudo y gas natural se obtienen aguas congénitas (Martel-Valles *et al.*, 2014), las cuales pueden contener

compuestos de bajo peso molecular (benceno, tolueno, xileno y otros), ácidos orgánicos, condensados, aceites, grasas, hidrocarburos aromáticos (PAH), metales pesados, fenoles y microorganismos (SEMARNAT, 2003b; Martel-Valles *et al.*, 2013), debido a su alto contenido de sales puede alterar la conductividad eléctrica (CE), la relación de adsorción de Na y el pH del suelo (Adams *et al.*, 2008). El límite máximo permisible de hidrocarburos para la descarga de agua congénita en cuerpos receptores de agua dulce es de 15 mgL⁻¹ y en aguas costeras y zonas marinas es de 40 mgL⁻¹ según la NOM-143-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2003b).

Los hidrocarburos contenidos en las aguas congénitas, representando un riesgo ecológico para la flora y fauna, terrestre y acuática (Heiss-Blanquet *et al.*, 2005), mediante contacto, absorción, captación, inhalación de vapores y partículas e ingestión directa (Ranjan *et al.*, 2006). Los hidrocarburos interrumpen la interacción entre las partículas del suelo y los cationes, reduciendo la capacidad del suelo para retenerlos (Adams *et al.*, 2000), inhiben el crecimiento vegetativo y reducen la biomasa de las plantas (Rivera y Trujillo, 2004), produciendo asfixia en las raíces, dañando o matando el follaje y algunos tejidos leñosos expuestos eliminando la vegetación por sus propiedades fitotóxicas (Bravo, 2005); además representa un riesgo significativo para las poblaciones de microorganismos responsables de los procesos biogeoquímicos (Joner *et al.*, 2006); está comprobado que los bencenos que contienen son carcinógenos debido a sus metabolitos hidroxilados (FAO y OMS, 2009), estudios recientes muestran que producen tumores en roedores, leucemia en las personas y en las plantas puede producir daños en los cromosomas (FAO y OMS, 2009). Aunque la intensidad del daño ocasionado por los hidrocarburos depende de la cantidad, composición, tiempo de exposición, de su estado físico (Ortíz *et al.*, 2003) y del tipo de hidrocarburo (Pentreath *et al.*, 2015).

La norma NMX-AA-117-SCFI-2001 (CONAGUA, 2001) considera que los hidrocarburos pueden estar presentes en aguas naturales, potables, residuales o residuales tratadas; Mendez *et al.* (2006), demostraron que aguas con bajas

concentraciones de hidrocarburos pueden utilizarse para el riego de cultivos y que en el suelo y que pueden estimular al crecimiento de especies vegetales, mientras que en altas concentraciones éstas pueden impactar de manera negativa e incluso causar la muerte (Martínez y López, 2001). Por lo que la determinación de la presencia y concentración de los hidrocarburos en el agua, es de gran importancia para las entidades ambientales (Santa *et al.*, 2002).

Es importante mencionar que las aguas congénitas o de formación, a pesar de tener hidrocarburos y otros contaminantes (Ruggieri, 2009), contienen minerales esenciales para la nutrición de las plantas como K, Ca, Mg, Na, Zn, Cu, SO₄, CO₃, Cl, NO₃, entre otros (Martel-Valles *et al.*, 2014), por lo que es esencial caracterizar tales aguas para determinar la factibilidad de uso en actividades productivas (SEMARNAT, 2003a), y ya que en la actualidad la producción agrícola, ganadera y forestal enfrenta grandes retos para alimentar a la creciente población humana, debido a la escasez y demanda de recursos hídricos (CONAGUA, 2010), y que el sector agrícola utiliza el 76.9% del agua dulce disponible y la mayor parte del agua proviene de la extracción de acuíferos subterráneos, provocando una sobre explotación de ellas (CONAGUA, 2010). Por lo que es necesario buscar fuentes de agua no convencionales.

2.1 Objetivo general

Aplicación al riego de tres tipos de hidrocarburos (gasolina con 40, 50, y 60 mg L⁻¹, diésel a 20 y 25 mg L⁻¹ y benceno a 75 mg L⁻¹), al sustrato de plantas de tomate, para evaluar el efecto en los lixiviados del riego, en las variables morfológicas, en la producción de biomasa de la planta, en las etapas de floración y fructificación, además de calidad de fruto.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de gasolina a 40, 50, y 60 mg L⁻¹, diésel a 20 y 25 mg L⁻¹ y benceno a 75 mg L⁻¹ en el pH y CE de los lixiviados del riego de plantas de tomate en las etapas de floración y fructificación.
- Determinar el efecto de gasolina a 40, 50, y 60 mg L⁻¹, diésel a 20 y 25 mg L⁻¹ y benceno a 75 mg L⁻¹ en el diámetro de tallo, altura, peso seco de tallo y peso seco de hoja de plantas de tomate, en las etapas de floración y fructificación.
- Determinación del efecto de gasolina a 40, 50, y 60 mg L⁻¹, diésel a 20 y 25 mg L⁻¹ y benceno a 75 mg L⁻¹ en los ° Brix, CE, pH y biomasa de frutos plantas de tomate.

2.3 Hipótesis

El agua contaminada con hidrocarburos a concentraciones superiores a la NOM-143-SEMARNAT-2003 cuando se utiliza con fines de riego agrícola, altera la producción y calidad de los frutos de la planta de tomate.

3. REVISION DE LITERATURA

3.1 Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos formados por átomos de carbono e hidrogeno. Son una mezcla compleja de gases, líquidos y sólidos con cantidades combinadas de nitrógeno, oxígeno y azufre; además contienen compuestos de hierro, níquel, vanadio, metales pesados (Ortínez et al., 2003). Están formados por alcanos, cicloalcanos y compuestos aromáticos con al menos un anillo bencénico en su estructura (Botello, 2005). Se originan como consecuencia de la degradación aeróbica y anaeróbica de la materia orgánica, a determinadas condiciones de presión y temperatura, desprenden oxígeno, nitrógeno y azufre como parte de los compuestos volátiles. Además existen los hidrocarburos antrópicos, estos resultan de la actividad humana (Silos 2008). Los hidrocarburos son considerados contaminantes prioritarios por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US Enviromental Protection Agency, EPA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comunidad Europea (CE) debido a sus efectos carcinogénicos (Menzie *et al.*, 1992).

3.2 Hidrocarburos comunes

Entre los combustibles destilados del petróleo comunes, se encuentran la gasolina, kerosina o queroseno, turbosina, diésel, gasóleo y combustóleo (Lesser y Saval 2001). El diésel contiene una gran variedad de hidrocarburos poliaromaticos, entre ellos: antraceno, fenantreno, fluoranteno, acenafteno, fluoreno y pireno, los cuales son toxico pero no cancerígenos (Lesser y Saval 2001). La gasolina es una mezcla compleja manufacturada que no existe naturalmente en el ambiente, está constituida aproximadamente por 70 % de compuestos alifáticos saturados y 30 % de hidrocarburos aromáticos como el benceno, tolueno e isómeros del xileno conocidos en su conjunto como (BTEX) (Coates *et al.*, 2002). El benceno, cuya fórmula condensada es C_6H_6 , es el más simple de los hidrocarburos aromáticos, su molécula consta de seis átomos de carbono con enlace alternativamente simple y doble que forman una estructura cíclica hexagonal (Castro 2007).

3.3 Parámetros de medición analíticos.

Según la NOM 138-SEMARNAT//SS-2003, el parámetro de medición analítico utilizado para determinar la concentración de hidrocarburos en suelo y agua, se denomina hidrocarburos totales de petróleo (HTP), y representa todo el conjunto de hidrocarburos (SEMARNAT, 2003a). De acuerdo a la mencionada norma, se dividen en hidrocarburos fracción ligera (HFL), entre los que se encuentran gasavión, gasolvente, gasolina, gasnafta mezclas y petróleo crudo. Hidrocarburos fracción media (HFM), a los que pertenece el gasóleo, diésel, turbosina, keroseno, creosota, mezclas y petróleo crudo. Hidrocarburos fracción pesada (HFP), entre ellos están las mezclas, petróleo crudo, combustóleo, parafinas, petrolatos y aceites. Además contienen benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX). La NOM 138-SEMARNAT//SS-2003 establece los límites máximos permisibles de contaminación en suelos por hidrocarburos, la caracterización del sitio y los procedimientos para la remediación para identificar los causantes de la contaminación (SEMARNAT, 2003a); el límite máximos permisibles de hidrocarburos en el suelo son 200, 1200 y 3000 (mg kg^{-1} base seca), para los HFL, HFM y HFP respectivamente.

3.4 Aguas congénita asociada a la presencia de hidrocarburos

Las estructuras geológicas productoras de hidrocarburos normalmente contienen aguas congénitas (SEMARNAT, 2003b), al ser extraídas durante el proceso de producción de gas o petróleo su composición es modificada, con la adición de surfactantes, geles e inhibidores, los cuales facilitan la extracción de gas o petróleo y se les llama entonces “aguas producidas” (Veil *et al*, 2004). Estas aguas generalmente tienen un alto contenido de sales disueltas, sin embargo existe una gran variabilidad entre los diferentes sitios de extracción (Martel *et al.*, 2013). Las aguas producidas pueden alterar la CE, la relación de adsorción de Na y el pH del suelo (Adams RH *et. al*, 2008), también contienen minerales esenciales para la nutrición de las plantas, tales como K, Ca, Mg, Na, Zn, Cu, SO_4 , CO_3 , Cl, NO_3 y otros. (Martel Valles *et al.*, 2014). Las fuentes de aguas con bajas concentraciones de sales y de hidrocarburos pueden ser utilizadas como

una fuente de agua para los animales de vida silvestre, hábitat de peces y aves, dicha agua no debe contener más de 1000 mg L⁻¹ de SDT (GWPRF, 2003).

3.5 Comportamiento de los hidrocarburos en el medio ambiente

3.5.1 En el suelo.

La persistencia de hidrocarburos liberados en el suelo depende de la biodegradabilidad intrínseca, sobre la presencia de la microflora activa en las áreas contaminadas y de factores ambientales locales (Marshal *et al.*, 2003). También está en función de sus características físicas, químicas y las características del medio como son: la unidad del suelo, permeabilidad, estructura, tamaño de las partículas, contenido de humedad y de materia orgánica, la profundidad del manto freático, factores climatológicos como la temperatura y la precipitación pluvial (Ortínez *et al.*, 2003). Pueden afectar la fertilidad a través de varios mecanismos: toxicidad directa a los organismos en el suelo, reducción en la retención de humedad y/o nutrientes, compactación, así como cambios en pH y salinidad (Adams RH *et al.*, 2008). Además los hidrocarburos impiden el intercambio gaseoso con la atmosfera (Restrepo, 2002). Los hidrocarburos son esencialmente no polares o tienen una polaridad muy baja, cuando cubren la superficie del suelo, interrumpen la interacción electrostática entre la superficie de las partículas del suelo y el agua, reduciendo su capacidad de retención de agua (Adams RH *et al.*, 2008).

3.5.2 En el agua:

Los derrames de petróleo han provocado un fuerte problema de contaminación en las fuentes de abastecimiento subterráneas y superficiales, los hidrocarburos con mayor número de carbonos tienden a flotar y están en forma libre (Reeves, 2000). Por el contrario, las moléculas más pequeñas tienden a formar emulsiones con el agua y son más difíciles de remover (Reeves, 2000). A medida que pasa el tiempo los hidrocarburos se pueden adherir fuertemente a los sedimentos o debido a su baja solubilidad en agua y a su carácter hidrofóbico (Ke *et al.*, 2002). También pueden impedir la entrada de luz y el intercambio gaseoso, dando

comienzo a la solubilización de compuestos hidrosolubles y a la afección de poblaciones como el plancton (Menezes *et al*, 2003).

3.5.3 En el aire

Los compuestos orgánicos volátiles (COV), son hidrocarburos en estado gaseoso a la temperatura ambiente, o que son muy volátiles a dicha temperatura (Camargo *et al.*, 2010). Existe gran cantidad de estos compuestos y dentro de los más abundantes en el aire se encuentran: metano, tolueno, n-butano, isopentano, etano, benceno, npentano, propano y etileno. Tienen un origen tanto natural (COV biogénicos) como antropogénico (Ramos, 2013). Dentro de la fuente antropogénica se destaca, la evaporación de disolventes, la combustión industrial, que contribuyen con la contaminación debido principalmente al humo generado por la quema del carbón, combustibles fósiles, petróleo refinado, al transporte, etc. (Ortínez, 2003). Los COV biogénicos además de intervenir en la química troposférica, pueden interactuar con las emisiones procedentes de las actividades antropogénicas produciendo efectos nocivos a la atmósfera como la formación de oxidantes fotoquímicos (principalmente ozono troposférico), participan en el balance de ciclo global del carbono y en la producción de ácidos orgánicos que contribuyen a la deposición ácida en zonas rurales, y la exposición a largo plazo puede causar daños a la salud (Sabillón y Cremades, 2001).

3.6 Fuentes de contaminación por hidrocarburos

Los derrames de hidrocarburos son una de las principales fuentes de contaminación de suelos y aguas (Vasudevan y Rajaram, 2001), son causados principalmente por fugas en estaciones de servicio, tanques de almacenamiento subterráneos, ductos corroídos y en el transporte terrestre y marítimo (Altamirano y Fernández, 2001). Por lo general la extensión de un derrame es una mancha de aproximadamente 5 ha, en la cual la concentración de hidrocarburos puede ser hasta de 30% (Padilla, 1989). Los compuestos químicos de las gasolinas representan el 60% de los contaminantes presentes en el agua subterránea (Altamirano y Fernández, 2001). Las contingencias ambientales por hidrocarburos originan efectos directos sobre la biota, ya que el petróleo contiene

compuestos tóxicos que producen daños a plantas, animales y humanos, pero principalmente sobre poblaciones de microorganismos, los cuales representan parte importante del ecosistema y son clave para los procesos biogeoquímicos (Vasudevan y Rajaram, 2001). Los procesos de combustión industrial contribuyen a la contaminación, debido al humo generado por la quema del carbón, combustibles fósiles y petróleo refinado, las actividades de transporte (Ortínez, 2003). Los bencenos están presentes en el medio ambiente por actividades humanas y por una variedad de procesos industriales, también se producen naturalmente, se producen por la combustión de combustibles fósiles, el humo de los cigarrillos y también por los vapores de la gasolina (FAO y OMS 2009).

3.7 Estudios de toxicidad en plantas y seres vivos

La fitotoxicidad estudia los cambios perjudiciales en el funcionamiento, aspecto y crecimiento de las especies vegetales y seres vivos en respuesta a una sustancia dada (Vázquez-Luna *et al.* 2010). Chaineau *et al.* (1996) registraron disminución en el rendimiento en cultivos de maíz y trigo en suelos con 200 a 800 mg kg⁻¹ de aceite combustible. Li *et al.* (1997) concluyeron que un cultivo de cebada en suelos con 20 000 y 40 000 mg kg⁻¹ de HTP, fue afectado en el rendimiento de biomasa. Así mismo, los hidrocarburos poliaromaticos (PHA) en ecosistemas forestales y plantas madereras, provocaron un efecto de necrosis foliar (Schmidt, 2000). En suelos de climas templados, con concentraciones residuales de la fracción media de hasta 10000mg TPH kg⁻¹ de suelo, se ha observado una afectación temporal a la vegetación que solo dura un ciclo de cultivo (Deuel, 1991). Está demostrado que los hidrocarburos pueden destruir la estructura terciaria de las proteínas, desnaturalizar enzimas y deshidratar células, lo cual es letal para muchos microorganismos (Siva *et al.*, 2004). Estudios de laboratorio muestran que los hidrocarburos puede provocar el deterioro de diversas funciones fisiológicas, como por ejemplo la respiración, movimiento y reproducción, incrementando la probabilidad de mutaciones genéticas en huevos y larvas (ITOPF, 2011). Los bencenos no son mutagénicos pero pueden producir

daños en los cromosomas de las plantas y en las células somáticas de los mamíferos, tanto in vitro como in vivo (FAO y OMS 2009). El benceno, por ser volátil puede ser inhalado, y por su alta solubilidad en el agua puede ser ingerido o estar en contacto con la piel de individuos, lo que lo hace un elemento en riesgo (ATSDR, 2007; Lesser y Saval, 2001).

Su potencial clastofénico se debe en parte a sus metabolitos hidroxilados. Dentro de las metodologías estandarizadas para establecer condiciones controladas, *Lactuca sativa* L. (lechuga) y *Solanum lycopersicum* L. (tomate) han sido recomendadas por la US EPA y la FDA para ensayos de fitotoxicidad, encontrándose entre las especies más sensibles (Pentreath, 2015). Martel-Valles *et al.* (2013 y 2014), utilizaron aguas producidas de tres fuentes diferentes para el riego de plantas de tomate, demostrando que pueden ser usadas en dilución con agua de riego debido a alto valor de CE, también se demostró que estas aguas pueden tener altos contenidos de Cu que pueden ocasionar daños en tallos y hojas de planta, incluso la muerte de algunas. El riego con aguas producidas puede afectar la absorción de la mayoría de los minerales, en plantas de tomate con excepción del Na (Martel-Valles *et al.*, 2014). Debido a que existe evidencia de daños y muerte de plantas al irrigarlas con agua que contiene hidrocarburos Martel-Valles *et al.* (2016), hicieron ensayos sobre el riego de plantas de tomate con diferentes concentraciones de diésel, gasolina y benceno, estudiando la distribución de minerales y la respuesta en las plantas, los resultados mostraron que los hidrocarburos producen desbalance de nutrientes en las plantas y que con la aplicación de 30 mgL⁻¹ de diésel causo la muerte del 55% de las plantas, incrementando la CE en los lixiviados; mientras que la aplicación de benceno y gasolina de 15 mgL⁻¹ y 30 mgL⁻¹ no ocasionaron daños a las variables morfológicas de la planta.

3.7.1 Biorremediación

La biorremediación consiste en la digestión de las sustancias orgánicas por los microorganismos, de la cual obtienen la fuente de carbono necesaria para el crecimiento de sus células y energía para llevar a cabo todas las funciones

metabólicas que necesitan sus células para su crecimiento (Olguín *et al.*, 2007). Hay dos aspectos de dicho estudio: 1) la caracterización de las propiedades físico-químicas del material (suelo, lodo, sedimento) a tratar y del contaminante, y 2) la determinación del potencial de los microorganismos del sitio para descomponer los hidrocarburos (Adams-Schroeder, 1999). De igual modo, la adición de nutrimentos inorgánicos, especialmente nitrógeno y fósforo establecen en gran medida un estímulo para la biorremediación, esto se debe a que los hidrocarburos de petróleo son casi exclusivamente hidrógeno y carbón, por lo que contienen muy pocas cantidades de otros elementos esenciales para las células bacterianas, como son nitrógeno, fósforo, potasio y algunos minerales traza (Adams-Schroeder, 1999).

Por otro lado, existe la remediación intrínseca en donde sólo la flora microbiana nativa es la responsable de la degradación o transformación de los contaminantes. Actualmente se realiza un gran número de investigaciones sobre la estrategia llamada "monitoreo de la atenuación natural", que consiste en tener un seguimiento analítico de la degradación y transformación de los contaminantes por parte de la flora microbiana autóctona (Olguín *et al.*, 2007). Su característica principal es la utilización de los procesos físico-químicos de interacción contaminante-suelo y está englobada dentro de las técnicas de remediación in situ de muy bajo costo (Herrera, 2000).

3.8 Tomate

3.8.1 Características generales.

El tomate es una planta perteneciente a la familia de las solanáceas denominadas científicamente *Lycopersicon esculentum* L., potencialmente perenne y muy sensible a las heladas, lo que determina su ciclo anual con distinta duración según la variedad (Rodríguez *et al.*, 2001). La planta presenta raíz pivotante que crece unos 3 cm al día hasta que alcanza los 60 cm de profundidad; tallo erguido y cilíndrico con tricomas (vellosidades) en la mayor parte de sus órganos, puede llegar a medir de 40 a 250 cm; la hoja está compuesta, con folíolos peciolados, lobulados y con borde dentado, en número de 7 a 9 y recubiertos de pelos

glandulares; la flor forma formando inflorescencias que pueden ser racimo simple, cima unípara, cima bípara y cima multípara, pudiendo llegar a tener hasta 50 flores por racimo (Anaïs, 1981).

Las temperaturas optimas según el ciclo de vida son entre 15 y 18 °C en la noche y diurnas entre 24 a 25 °C, la temperatura ideal en la floración de 21 °C, humedad media no superiores al 50%, y suelos no encharcados (Rodríguez *et al.*, 2001). La CE es una medida de la concentración de sales disueltas en un sustrato de crecimiento, los valores de CE proveen una idea de la cantidad de fertilizante que se encuentra disponible en el medio para el crecimiento de las plantas o indica si existe acumulación de sales en el mismo (Torres, 2010). El pH ideal del suelo para tomate es de 6.0 a 6.5, este intervalo favorece la absorción de la mayoría de los micro y macro nutrientes por la planta (Holwerda, 2006).

Cuando el tomate se destina a la agroindustria, sus principales parámetros de calidad son peso seco, sólidos solubles °Brix, acidez titulable (equivalente de ácido cítrico), pH, viscosidad (flujo Bostwick) y color (Renquist y Reid, 1998). Se le conoce como °Brix, a las sustancias solubles en agua que reflejan la calidad de sólidos totales que contienen los frutos en porciento, un valor mayor o igual a 4.0 es considerado bueno. Además existe una correlación directa entre sólidos solubles y firmeza, a mayor concentración de éstos es mayor la firmeza (Santiago *et al.* 1998).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación.

El experimento se llevó a cabo en el invernadero de alta tecnología del Departamento de Forestal 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, con una altitud de 1 760 msnm.

4.2 Establecimiento del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

El periodo del cultivo fue del 14 de febrero al 17 de julio del 2015; la siembra de las semillas de tomate tipo bola (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Montecarlo con hábito de crecimiento indeterminado se realizó en charolas de poliestireno; 31 días después se efectuó el trasplante en contenedores de polietileno rígido color negro con un volumen de 16 L, usando como sustrato una mezcla de turba ácida y perlita (1:1 v/v). Antes de iniciar los tratamientos las plantas fueron fortalecidas por 14 días con solución nutritiva Steiner al 25 % (Steiner 1961).

4.3 Irrigación de las plantas

La irrigación de las plantas fue diariamente a través de un sistema de riego por goteo, proporcionado por estacas de alto flujo tres veces al día (09:00, 13:00 y 18:00 h.). En los primeros dos riegos se aplicó solución nutritiva Steiner, la cual se fue incrementando en concentración de acuerdo a cada etapa fenológica (25, 50, 75 y 100 %), el pH se controló con la adición de H₂SO₄, en el último riego del día se aplicó solamente agua, el volumen de agua aplicado por riego fue de 500 mL.

4.4 Aplicación de los tratamientos

Los tratamientos consistieron en la aplicación diaria al sustrato de tres tipos de hidrocarburos: diésel marca PEMEX el cual contiene HFM, gasolina marca PEMEX, la cual contiene HFL a y benceno marca Faga Lab, correspondiente a HFL (SEMARNAT 2003a), a una concentración por producto de 20 y 25; 40, 50

y 60; y 75 mg L⁻¹ respectivamente; dichas concentraciones se fijaron en base a los resultados obtenidos por Martel-Valles *et al.* (2016). Sin embargo normas oficiales mexicanas NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 y NOM-001-ECOL-1996 (SEMARNAT 1996, 2003a) establecen un límite de 15 mg L⁻¹. La concentración se calculó para un volumen de 500 mL, y dicho volumen se mantuvo durante todo el ciclo, los µL calculados para cada caso fueron inoculados a cada planta durante el tercer riego, El manejo del cultivo consistió en la realización de labores estándar para tomate bajo invernadero.

4.5 Monitoreo y Evaluación de los lixiviados

Se monitoreó el pH y la CE en los lixiviados de las macetas, para esto se eligieron aleatoriamente cinco plantas por tratamiento, en las cuales se colocaron recipientes plásticos para captar el agua de riego lixiviada y tomar las lecturas. Las lecturas iniciaron a los 14 días después del trasplante (DDT) y se mantuvieron hasta el final del experimento a los 128 DDT, totalizando 40 lecturas por repetición total 200 lecturas (45 en la etapa de floración y 155 en la etapa de fructificación). Estas lecturas se tomaron inmediatamente después del tercer riego usando un equipo portátil marca HANNA modelo HI 98130.

4.6 Evaluación de las variables morfológicas

Para evaluar las variables morfológicas se seleccionaron al azar otras cuatro plantas por tratamiento; en las etapas de floración y fructificación a los 32 y 128 días después del trasplante (DDT) respectivamente, en ellas se determinaron la altura medida de la base del tallo a la parte apical, el diámetro de tallo, el peso seco de hoja, y el peso seco del tallo.

La determinación de peso seco de los frutos se obtuvo de la sumatoria de seis cortes (uno por semana) realizados a cinco plantas por cada tratamiento a los 93, 100, 107, 114, 121 y 128 DDT. Para determinar el peso seco, las muestras fueron deshidratadas en una estufa a 60 °C durante 72 h.

4.7 Diseño experimental

El diseño experimental fue completamente al azar con 20 repeticiones por tratamiento, teniendo un total de seis tratamientos, los cuales consistieron en la aplicación de tres tipos de hidrocarburos: gasolina, diésel, y benceno a una concentración por producto de 20 y 25; 40, 50 y 60; y 75 mg L⁻¹ respectivamente, más el testigo sin hidrocarburos; la unidad experimental fue una maceta con una planta.

Para el análisis estadístico de las variables, se utilizó un análisis de varianza (ANVA) y una prueba de medias DMS Fisher ($\alpha \leq 0.05$) utilizando el paquete estadístico Statsoft, Statistica. (Statistica 2007).

5. RESULTADOS

5.1 pH y CE en etapa de floración y fructificación

En la Figura 1, se muestran los resultados de la aplicación de hidrocarburos en la etapa de floración y fructificación. En ella se observa que en la etapa de floración disminuyó el pH de los lixiviados de los tratamientos de diésel con 25 mg L⁻¹ y benceno con 75 mg L⁻¹ Figura 1A, pero no mostró diferencia significativa en la CE. Mientras que en la etapa de fructificación, incrementó el pH con el tratamiento con gasolina de 50 mg L⁻¹ Figura 1B e incrementó la CE con el tratamiento de gasolina de 60 mg L⁻¹ Figura 1C.

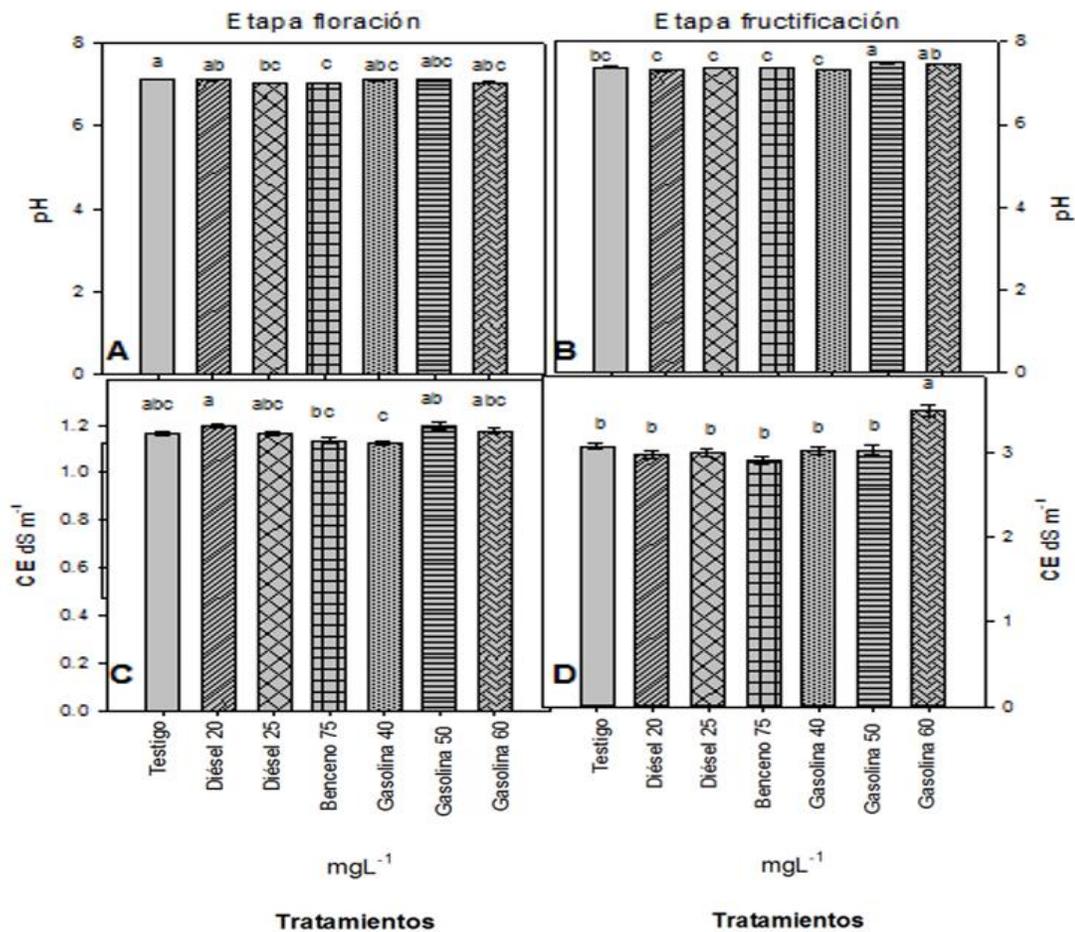


Figura 1. pH y CE de los lixiviados de plantas de tomate en etapa de floración y fructificación, tratados con hidrocarburos, el testigo fue regado con solución nutritiva Steiner. Letras diferentes en las columnas indican efectos significativos de acuerdo con el procedimiento de Fisher ($\alpha \leq 0.05$). Las barras representan el error estándar de la media.

5.2 Variables morfológicas

5.2.1 Etapa de floración

Respecto a las variables morfológicas en la etapa de floración (figura 2), el diésel con 20 mg L⁻¹ incrementó el diámetro del tallo (DT) y la altura. El tratamiento con gasolina de 40 mg L⁻¹ incrementó el DT, en tanto que el tratamiento de diésel con 25 mg L⁻¹ disminuyó el peso seco de hoja (PSH) y peso seco de tallo (PST).

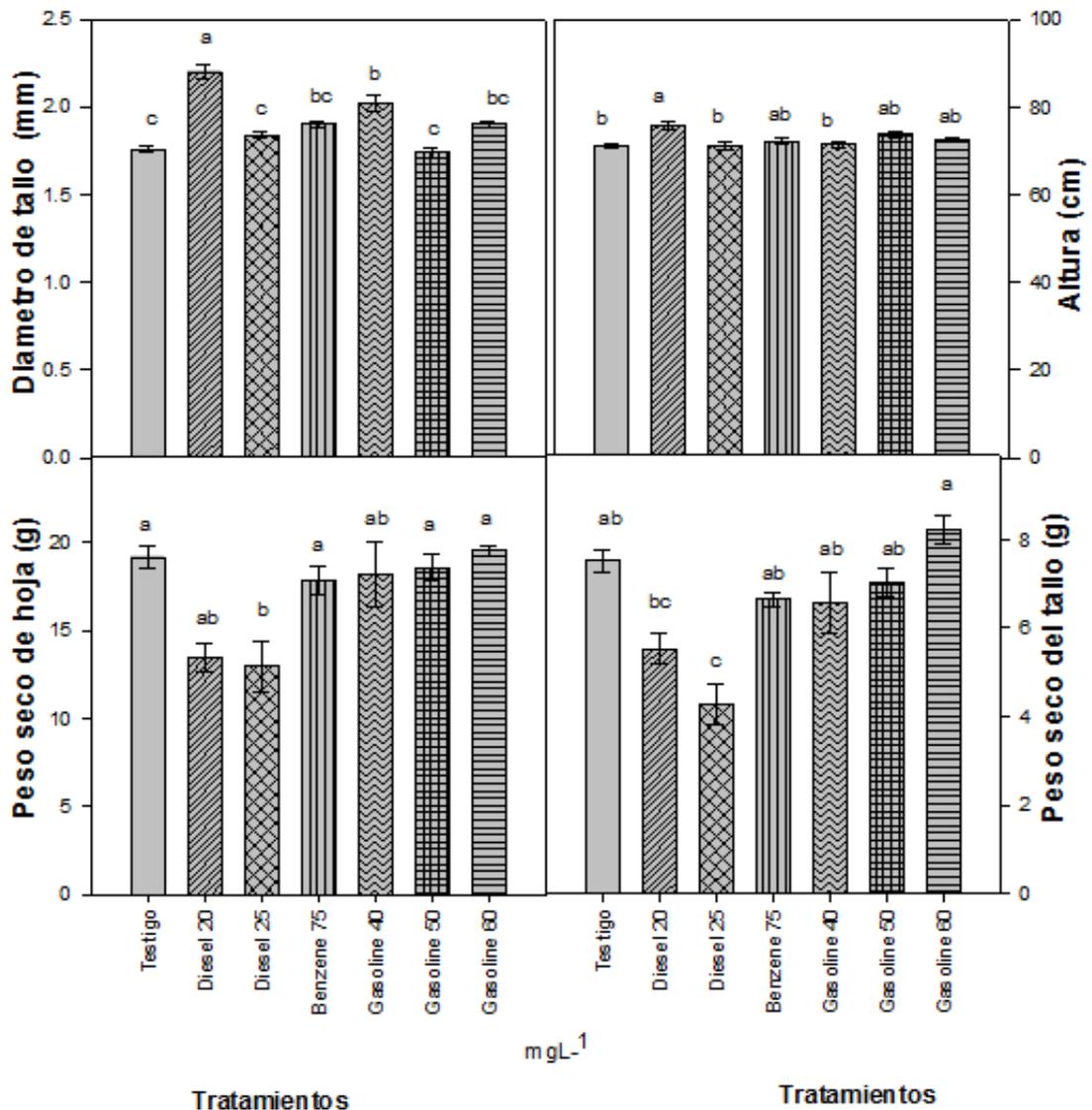


Figura 2.- Diámetro de tallo, altura, peso seco de hoja, y peso seco de tallo en la etapa de floración, de plantas de tomate tratadas con hidrocarburos, el testigo fue regado con solución nutritiva Steiner. Letras diferentes en las columnas indican efectos significativos de acuerdo con el procedimiento de Fisher ($\alpha \leq 0.05$). Las barras representan el error estándar de la media.

5.2.2 Etapa de fructificación

En la etapa de fructificación (Figura 3), el DT se incrementó con el tratamiento con 60 mg L⁻¹ de gasolina. El tratamiento de gasolina con 50 mg L⁻¹ limitó el PSH y PST pero incrementó la ALT y el PSH, la gasolina con 40 mg L⁻¹ disminuyó el PST, el de benceno con 75 mg L⁻¹ disminuyó el DT y PST pero incrementó el peso seco de fruto (PSF), en tanto que el diésel con 25 mg L⁻¹ disminuyó el PST.

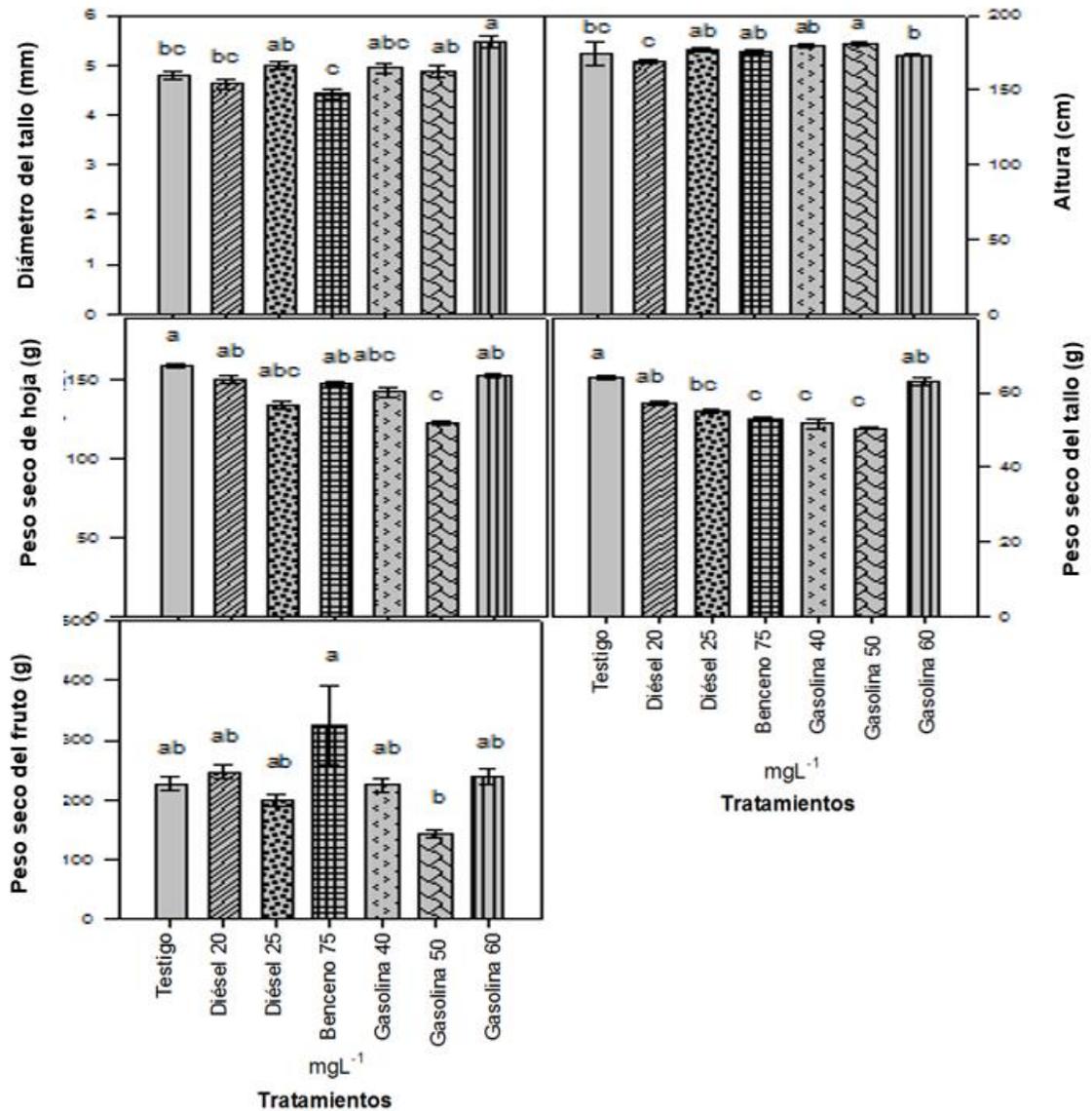


Figura 3.- Diámetro de tallo, altura, peso seco de hoja, peso seco de tallo, peso seco de la hoja y peso seco de fruto en la etapa de fructificación, de plantas de tomate tratadas con hidrocarburos, el testigo fue regado con solución nutritiva Steiner. Letras diferentes en las columnas indican efectos significativos de acuerdo con el procedimiento de Fisher ($\alpha \leq 0.05$). Las barras representan el error estándar de la media.

5.3 pH, CE y ° Brix evaluados en frutos de tomate

En el fruto, el pH no presentó diferencias significativas (figura 4), sin embargo, el tratamiento de diésel con 25 mgL⁻¹ aumentó la CE, pero el de 20 mgL⁻¹ la disminuyó. Los °Brix favorecieron su concentración con los tratamientos de diésel y los de 50 y 60 mg L⁻¹ de gasolina, 20 y 25 mg L⁻¹ de diésel.

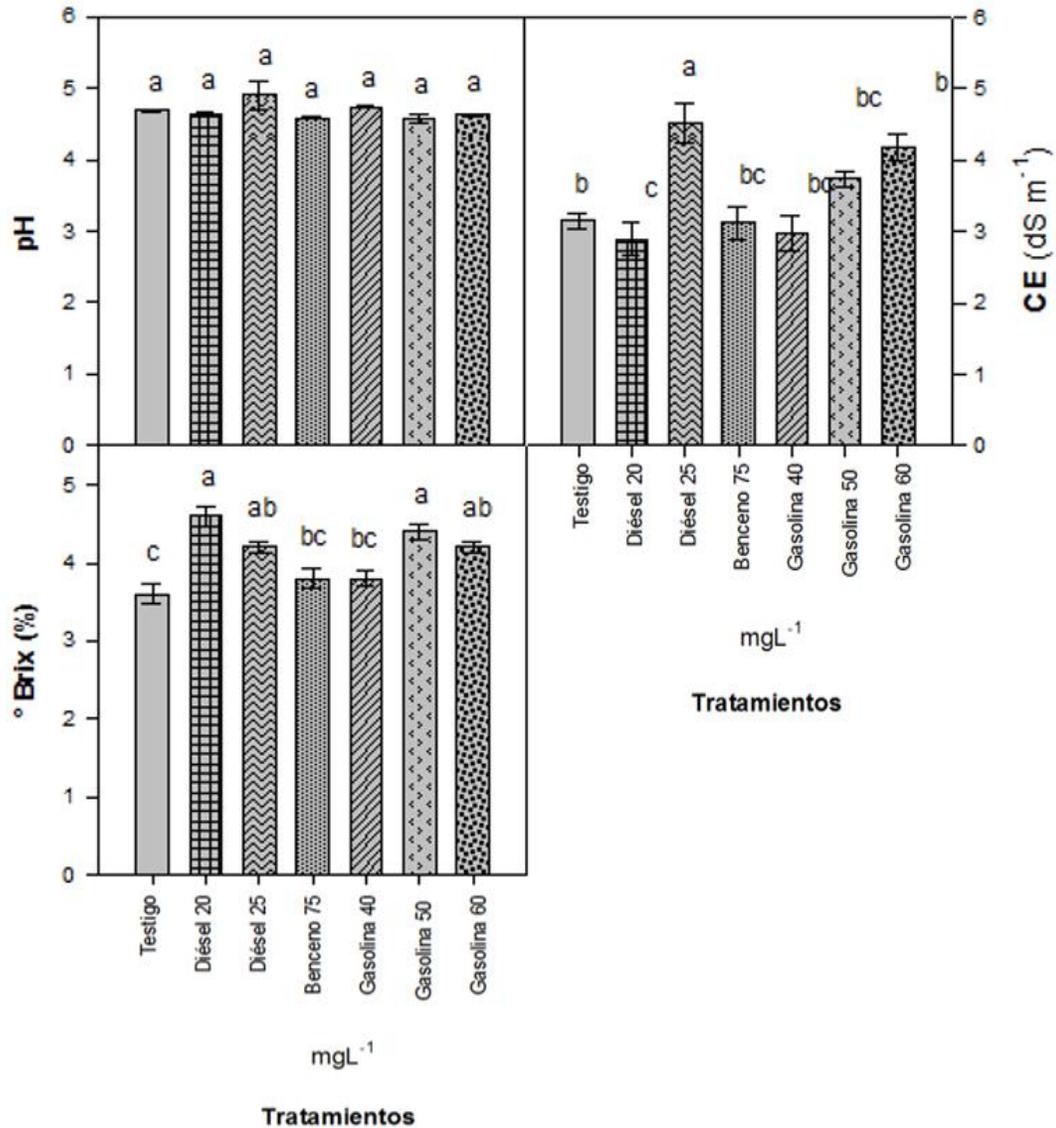


Figura 4.- Variables evaluadas en frutos de plantas de tomate tratadas con hidrocarburos, el testigo es producto de lixiviados regados con solución nutritiva Steiner. Letras iguales en las columnas indican efectos no significativos de acuerdo con el procedimiento de Fisher ($\alpha \leq 0.05$). Las barras representan el error estándar de la media.

6. DISCUSIÓN

6.1 pH, CE en la etapa de floración y fructificación

Los resultados en el pH y CE en la etapa de floración y fructificación (figura 1), mostraron que el diésel a 25 mg L⁻¹ disminuyó el pH en los lixiviados de la planta, debido a que los hidrocarburos pueden ocasionar efectos tóxicos (Petenello, 2014), provocando estrés en la planta, y en esta condición las raíces tienden a acidificar (Baracaldo *et al.*, 2014); el benceno con 75 mg L⁻¹ disminuyó el pH porque se aplicó a una concentración 4 veces mayor que el límite permisible (SEMARNAT, 2003b) y se sabe que los hidrocarburos de bajo peso molecular pueden modificar el pH (Adams *et al.* 2008), resultados semejantes fueron obtenidos por (Martel-Valles *et al.*, 2014) al aplicar benceno a 15 y 30 mg L⁻¹. En la etapa de fructificación la gasolina con 50 mg L⁻¹ incrementó el pH, por la capacidad que tienen los hidrocarburos de modificar el pH y relación de absorción de Na (Adams *et al.*, 2008); mientras que la gasolina con 60 mg L⁻¹ incrementó la CE porque el efecto toxico de los hidrocarburos (Petenello, 2014) limitó asimilación de nutrimentos reflejándose en una mayor acumulación de sales en el lixiviado (Cadahía, 2005).

6.2 Variables morfológicas en la etapa de floración

El diésel con 20 mg L⁻¹ favoreció el DT y la altura (Figura 2), ya que este contiene HFM los cuales provocan toxicidad (Trejo *et al.*, 2013) y como cualquier agente estresante si se aplica en proporciones inferiores a su límite toxico favorecen el crecimiento y desarrollo de las plantas (Pessarakli, 2011). La gasolina con 40 mg L⁻¹ incrementó el DT, porque los hidrocarburos dependiendo de su concentración y tiempo de exposición pueden estimular al crecimiento de especies vegetales (Martínez y López, 2001). El tratamiento con diésel con 25 mg L⁻¹ disminuyó el PSH y PST, dado que el diésel pertenece a los HFM y estos provocan disminución de biomasa (Martel-Valles *et al.*, 2013, 2014).

6.3 Variables morfológicas en la etapa de fructificación

En la etapa de fructificación las variables morfológicas presentaron mayor cambio comparada con el etapa de floración (Figura 3); el benceno con 75 mg L^{-1} disminuyó el DT y PST porque produce efectos negativos en plantas tanto *in vitro* como *in vivo* (FAO y OMS, 2009), sin embargo el incremento en el PSF seguramente fue porque se aplicó en mayor concentración provocando estrés en la planta (Pessarakli, 2011) y cuando las plantas presentan algún grado de estrés movilizan azúcares y nutrimentos hacia los sitios de reserva (de la O-Quezada *et al.*, 2011), coincidiendo con lo reportado por Martel-Valles *et al.* (2016) quienes al aplicar aguas contaminadas con hidrocarburos a plantas de tomate estas trasladaron minerales esenciales hacia el fruto. El tratamiento de gasolina a 60 mg L^{-1} incrementó el DT dado que ese tratamiento tiene la mayor cantidad de iones en solución (Figura 1), viéndose reflejado en mayor producción de biomasa (Rivera *et al.*, 2004). La altura fue mayor con el tratamiento de gasolina con 50 mg L^{-1} porque a esta concentración provoco estrés en la planta estimulando el crecimiento y desarrollo de la planta (Pessarakli, 2011), sin embargo disminuyó el PSH y PST porque en esa etapa el pH de los lixiviados fue el mayor (Figura 1), limitando la disponibilidad de micro nutrientes en solución (Holwerda, 2006). El PST del tratamiento con diésel con 25 mg L^{-1} al igual que la etapa de floración disminuyó por la influencia negativa de los HFM (Martel-Valles *et al.*, 2013, 2014). El diésel con 25 mg L^{-1} disminuyó el PST, debido a que los hidrocarburos pueden causar toxicidad lo cual se refleja en menor producción de biomasa (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2003). El efecto negativo de los hidrocarburos se vio reflejado en los tallos de la mayoría de los tratamientos, coincidiendo con el trabajo de Martel-Valles *et al.* (2016), en donde plantas irrigadas con agua que contenían HFM causaron danos en la parte basal ocasionando la muerte de plantas de tomate.

6.4 pH, CE y ° Brix evaluados en frutos de tomate

Respecto a las variables evaluadas en el fruto (figura 4). Es probable el diésel con 25 mg L⁻¹ haya incrementado la CE por el efecto tóxico del hidrocarburo (Pettenello, 2014) que favorece la asimilación de nutrimentos hacia sitios de reserva (Cadahía-López *et al.*, 2005). Por su parte el tratamiento de diésel con 20 mg L⁻¹ limitó la CE en el fruto tal vez por el efecto tóxico causado por los HFM (Martel *et al.*, 2014a), es sabido que los hidrocarburos causan desbalance nutricional en la planta (Hawkesford *et al.*, 2012). Los sólidos solubles totales, en la mayoría de los tratamientos se incrementaron en el fruto porque los hidrocarburos que favorecen la traslocación de nutrimentos hacia sitios de reserva (Cadahía-López *et al.*, 2005).

7. CONCLUSIONES

- Dependiendo del tipo de hidrocarburo, su concentración y tiempo de exposición los hidrocarburos modifican el pH y CE en los lixiviados.
- El diésel con 25 mg L⁻¹ y benceno 25 mg L⁻¹ disminuyeron el pH de los lixiviados en la etapa de floración. En tanto que en la etapa de fructificación los tratamientos de gasolina con 50 mg L⁻¹ incrementaron el pH y la gasolina con 60 mg L⁻¹ incrementó la CE.
- Dependiendo del tipo de hidrocarburo, su concentración y tiempo de exposición los hidrocarburos producen cambios en las variables morfológicas.
- En la etapa de floración tratamiento de diésel con 20 mg L⁻¹ favoreció del diámetro de tallo y la altura; la gasolina con 40 mg L⁻¹ incrementó el diámetro de tallo; el diésel con 25 mg L⁻¹ disminuyó el peso seco de hoja y tallo.
- En la etapa de fructificación, el benceno disminuyó el diámetro de tallo y peso seco de tallo, la gasolina con 60 mg L⁻¹ incrementó el diámetro de tallo.
- La aplicación de los hidrocarburos favorece la concentración de °Brix en el fruto plantas de tomate.

8. REFERENCIAS

- Adams, RH., Zavala-Cruz, J. Morales-García, F. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en suelo del trópico.II: afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia*. 33(7): 483-489.
- Adams, RH. (2000). Recuperación con mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) de áreas impactadas por hidrocarburos y su manejo como agrosilvo-ecosistema en la zona costera de Huimanguillo y Cárdenas, Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. M076. México D. F.
- Adams-Schroeder, R., Domínguez-Rodríguez, V. y García-Hernández(1999). Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico Mexicano. *Terra*. 17(2):159-174.
- Altamirano, S. y Fernández, V. (2001). Prácticas apropiadas para disminuir los riesgos ambientales por el manejo de gasolina en estaciones de servicio. Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de prevención de Desastres. Área de Riesgos Químicos. Informes técnicos. P.19-40. Disponible en: <http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/Tecnicos/practicasApropiadas.pdf>. Consulta: 28/05/16
- Anais, G., Clairon, F., Daudet, A., Kermarrec y P. Daly. (1981). La tomate aux Antilles. INRA-Center de Recherches Agronomiques des Antilles et de la Guyane. Monographie pour le développement local. p. 30.
- AOAC (1980). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 13th Edition. Washington, DC, USA. p.1018 .
- ASTDR (1998). Reseña Toxicológica de los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH). Atlanta, EE.UU, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. Disponible en: www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts123.html. Consulta: 14/05/16

- ATSDR. (2007). Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Benzene. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service [online] <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp3.html>. [Viewed 18/05/16]
- Baracaldo, A., Carvajal, R., Romero, Á. P., Prieto, A., García, F. J., Fischer, G., & Miranda, D. (2014). Waterlogging affects the growth and biomass production of chonto tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.), cultivated under shading. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 8(1): 92-102.
- Botello, A. V., Rendon, V. O., Gold-Bouchot, R., y Agraz-Hernandez. (2005). Características composición y propiedades fisicoquímicas del petróleo. En: *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. 2ª ed. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología. Campeche, México. Pp.261–268.
- Bravo E. (2005). Impactos de la explotación petrolera en América Latina. *Revista Biodiversidad*. 43: 1- 9
- Camargo, Y., Bolaño, T. y Álvares, A. (2010). Emisiones de compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico y su contribución a la dinámica atmosférica. *Revista Intropica*. 5: 77-86
- Castro, V. G. (2007). Informe final, diseño monitoreo frente a derrames de hidrocarburos. *Proyectos y Asesorías Ambientales*. Gobierno de Chile, Ministerio de Agricultura. Disponible en: http://www.sag.cl/sites/default/files/INFORME_FINAL_ASESORIA_SAG_HCS2.pdf. consulta: 28/04/16
- CENAPRED (2001). Centro Nacional de Prevención de Desastres. *Prácticas apropiadas para disminuir los riesgos ambientales por el manejo de gasolina en estaciones de servicio*. Informes Técnicos. Coordinación de Investigación, Área de Riesgos Químicos Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de prevención de Desastres. Disponible en:

<http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/Tecnicos/practicasApropiadas.pdf>. consulta: 28/0416.

Chaîneau, C. H., Morel, J. L. y Oudot, J. (1997). Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. *J. Environ. Qual.* 26:1470-1483.

Coates J., Chakraborty R. y McInerney J. (2002). Anaerobic benzene biodegradation—a new era. *Microbiology.* 153: 621–628.

CONAGUA (2001) Análisis de agua - Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. Comisión Nacional del Agua. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de Septiembre de 2001

CONAGUA (2010). Estadísticas del agua en México. Edición 2010. "10 años de presentar al agua en cifras". Disponible en: www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EAM2010.pdf. Consulta: 18/05/16

De la O-Quezada, G., Ojeda-Barrios D., Hernández-Rodríguez O., Sánchez-Chávez, E. y Martínez-Tellez, J. (2011). Biomasa, prolina y parámetros nitrogenados en plántulas de nogal bajo estrés hídrico y fertilización nitrogenada. *Revista Chapingo. Serie Horticultura.* 17(1): 13-18.

Demirbas, A. (2008). Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy conversion and management.* 49(8): 2106-2116.

E. Quiñones-Aguilar, R. Ferrera-Cerrato, F. GaviReyes, L. Fernández-Linares, R. Rodríguez-Vázquez and A. Alarcón, (2003). Emergence and Growth of Maize in a Crude Oil Polluted Soil. *Agrociencia.* 37. pp. 585- 594.

FAO y OMS (2009). Los bencenos, documento de debate sobre, and E. N. los refrescos. "Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias comité del CODEX sobre contaminantes de los alimentos tercera reunión Róterdam. Food and Agriculture Organization of the United Nations y

Organización Mundial de la Salud. Países Bajos. Pp.23–27. Disponible en:
www.fao.org/input/download/report/722/al32_41s.pdf. consulta: 17/05/16

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. [Online] <http://www.ela-iet.com/Emd/CoalBedMethaneWater.pdf>. [viewed 25/06/16]

Heiss-Blanquet, S., Benoit, C., Maréchaux, F. y Monot. (2005). Assessing the role of alkane hydroxylase genotypes in environmental samples by competitive PCR, J. Microbiol. 99:1392–1403.

Herod, A., Bartle, K. y Kandiyoti, R. (2007). Characterization of heavy hydrocarbons by chromatographic and mass spectrometric methods: An overview. Energy & Fuels. 21 (4): 2176-2203.

Herrera, R. (2000). Descontaminación de suelos y aguas subterráneas contaminadas por hidrocarburos mediante biopilas activas. Geotecnia. Grupo ATISAE. Disponible en:
<http://www.geotecnia2000.com/files/archivos/DESCONTAMINACION%20DE%20SUELOS%20Y%20AGUAS%20SUBTERRANEAS%20CONTAMINADAS%20POR%20HIDROCARBUROS%20MEDIANTE%20BIOPILAS%20ACTIVAS.pdf>. Consulta: 07/05/16

Holwerda, T. 2006. Nutricion vegetal de especialidad, tomate. Guia de manejo SQM. Cropkit. Pp: 1-84. Disponible en:
www.sqm.com/Portals/0/pdf/cropKits/SQM-Crop_Kit_Tomato_L-ES.pdf
consulta: 13/04/16 .

Jimenez, B. y Marin, L. (2004). El agua en México vista desde la academia. Contaminación de acuíferos con hidrocarburos: causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención. México DF. 1ª ed. Academia Mexicana de ciencias.. Pp. 233-249.

- Joner E., leyval C. y Colpaert J. (2006) Ectomycorrhizas impede phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) both within and beyond the rhizosphere. *Environ Poll.*142:34-38
- Ke L., Wong T., Wong Y. y Tam N. (2002). Fate of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) contamination in a mangrove swamp in Hong Kong following an oil spill. *Mar. Pollut. Bull.*45: 339–347.
- ITOPF. (2011). Efectos de la contaminación por hidrocarburos en el sector de la pesca y acuicultura. Documentos de información técnica. Disponible en: http://www.itopf.com/uploads/translated/TIP11_SPEffectsofOilPollutiononFisheriesandMariculture.pdf. Consulta: 23/05/16
- Lesser, M. y Saval S. (2001). Principales hidrocarburos contaminantes de suelos y acuíferos: identificación y características. División de Educación Continua, facultad de ingeniería. UNAM
- Li, X., Feng, Y. y Sawatsky N. (1997). Importance of soil-water relations in assessing the endpoint of bioremediated soils: plant growth. *Plant Soil* 192: 219-226.
- Marchal, R. Penet, S., Solano-Serena, F. y Vandecasteele, JP. (2003). Gasoline and diesel oil biodegradation. *Oil and Gas Science and Technology* 58(4): 441-448.
- Maroto, A. y Rogel, Q. (2004). Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos. GEOCISA. Div. Protección Ambiental de Suelos. Disponible en: <http://uniciencia.ambientalex.info/infoCT/Aplsisbiosueaguconhidint.pdf>. Consulta: 25/07/2016
- Maroto, B. 2002. Horticultura herbácea especial. Madrid. 3ª ed. mundi- prensa. pp. 702
- Martel-Valles JF., Benavides-Mendoza A, Valdez-Aguilar LA, Juárez-Maldonado A y Ruiz-Torres NA (2013) Effect of the application of produced water on

the growth, the concentration of minerals and toxic compounds in tomato under greenhouse. *Journal of Environmental Protection* 4(7): 138-146.

Martel-Valles, JF., Benavides-Mendoza, A., Mendoza-Villarreal, R., Zermeño-Gonzalez, A. y Juárez-Maldonado A. (2014) Agronomic use of produced water in tomato plants (*Lycopersicon Esculentum* L.) under greenhouse conditions. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 30(4): 365-377.

Martel-Valles, J., Benavides-Mendoza, A. y Valesz-Aguilar, LA. (2016). Mineral composition and growth responses of tomato (*solanum lycopersicum* l.) plants to irrigation with produced waters from the oil industry. *Journal of Plant Nutrition*. Aceptado para publicación: Decision on Manuscript ID LPLA-2014-0398.R1.

Martínez, M. V. López, S. F. (2001). Efecto de los hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra*. 19 (1): 9-17

Mayer. (1987). *Métodos de la industria química en esquema de flujo en colores. Parte 2.ª: Orgánica. Una visión panorámica y moderna de los métodos de la industria química.* Barcelona. Editorial Reverte S.A. p. 33.

Méndez, F. M., Ricardo, C. P., Pérez, P. J., Hernández, G. C. y Campos O. (2006). Uso de las aguas residuales para el riego de cultivos agrícolas, en la agricultura urbana. *Revista Ciencias Tecnicas Agropecuarias*. 15(3): 17-21

Menezes, B. F., Oliveira, C. F., Okeke, B. y Frankenberger, W. T. (2003). Bioremediation of soil contaminated by diesel oil. *Environmental and soil microbiology. Brazilian Journal Microbiology*. 34(1): 65-58

Menzie, C. A., Potocki B. B. y Santodonato J. (1992). Exposure to Carcinogenic Polycyclic Hydrocarbons in the Environment. *Environmental Science & Technology*. 26:1278-1284.

- Nadal, M., Schuhmacher, M., & Domingo, J. L. (2007). Levels of metals, PCBs, PCNs and PAHs in soils of a highly industrialized chemical/petrochemical area: Temporal trend. *Chemosphere*. 66(2), 267–276.
- Olguín, E., Hernández, M. y Sanchez, G. (2007). Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 23(3): 139-154.
- Ortíz, B., Ize, I. y Gavilán, A. (2003). La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Gaceta Ecológica*. 69:83-92
- Padilla, R. (1989). Determinación de los Niveles de Hidrocarburos en Sedimentos Recientes del Río Calzadas en la Región del Bajo Río Coatzacoalcos, Veracruz. México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM
- Pentreath, V., González, E., Barquín, M., Ríos S. y Perales S. (2015). Bioensayo de toxicidad aguda con plantas nativas para evaluar un derrame de petróleo. *Rev. Salud y ambiente*.15(1):13-20
- Pessaraki, M. (2011). *Handbook of plant and crop stress*. 3a ed. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton London. New York. Pp. 1195.
- Petenello, M. C. y Feldman, S. R. (2014). Efecto del agregado de diésel-oil sobre algunos parámetros microbiológicos del suelo con y sin presencia de plantas. *Revista Terra Latinoamericana*. 32(4): 301-309.
- Ramon, J. D. (2013). Determinación de compuestos orgánicos volátiles biogénicos en una atmósfera rural (Parque Natural de Valderejo). *Revista ambiental: agua, aire y suelo*. 4(1): 1-12
- Renquist, R. A. y Reid, J. B. (1998). Quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum*) fruit from four bloom dates in relation to optimal harvest timing. *New Zeal. J. Crop Hort. Sci.* 26:161-168
- Restrepo, R. (2002). Derrame de hidrocarburos. Impacto en los ecosistemas tropicales. ECOPETROL Instituto Colombiano de Petróleo.

- Reeves, G. (2000). Understanding and monitoring hydrocarbons in water. Oakville, Ontario, Canada: Arjay Engineering LTD.
- Rivera, C., Trujillo, y Narcía, A. (2004). Estudio de toxicidad vegetal en suelos con petróleos nuevo e intemperizado. *Interciencia*. 29(7): 69-76.
- Rodríguez, R., Tabares R. y Medina, J. (2001). Cultivo moderno del tomate 2ª. Ed. Ediciones Mundiprensa. España. p. 255
- Ruggieri, L., Nardini, I., Henriquez, E. y Arias, A. (2009). Variaciones termo-química de los fluidos hidrotermales del campo geotérmico de Berlín (El Salvador). En EGU General Asamblea Conferencia resúmenes. 11:103-108
- Santa, J., Serrano, M., Stashenko, E. (2002). Análisis comparativo de diferentes métodos de extracción de hidrocarburos presentes en aguas residuales industriales. *Ciencia, tecnología y futuro*. 2(3): 49-60
- Santiago, J., Mendoza, M. y Borrego, F. (1998) Evaluación de tomate (*Lycopersicon esculentum*, MILL) en invernadero: criterios fenológicos y fisiológicos. *Agronomía mesoamericana*. 9(1): 59-65.
- Saval, S., Lara, F., Lesser, J. y Nieto, J. contaminación de acuíferos con hidrocarburos: causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención. Disponible en: <http://www.lesser.com.mx/publicaciones.html>. consulta: 14/05/16
- Sabillón, D. y Cremades, L. (2001). Diurnal and seasonal variation of monoterpene emission rates for two typical Mediterranean species (*Pinus pinea* and *Quercus ilex*) from field measurements-relationship with temperature and PAR. *Atmos. Environ.* 35:4419-4431.
- Schmidt W. (2000). Suelos contaminados con hidrocarburos: la biorremediación como una solución ecológicamente compatible. Cooperación Técnica Alemana (GTZ). Disponible en:

http://www.ingenieroambiental.com/3021/Bioremed_Mex2.pdf. Consulta:
12/04/16

SEMARNAT (2003a) Norma Oficial Mexicana, NOM-138-SERMANAT/SS-2003. Límites permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de marzo de 2005.

SEMARNAT (2003b) 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 Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de marzo de 2005.

Silos. 2008. Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos. Servicio de Publicaciones Universidad de Cádiz. Pp: 27-39

Siva, S., Brett, R., Tessa, M., Vogeler, I., Clothier, B., Grant, L., Northcott, and McNaughton, D. (2004). Bioremediation of soils contaminated with organic compound [online]
http://www.regional.org.au/au/asssi/supersoil2004/s3/poster/1455_sivakumarans.htm. [Viewed 16/05/16]

Ranjan, Sri. R., Qian, Y., and Krishnapillai, M. (2006). Effects of electrokinetics and cationic surfactant cetyltrimethylammonium bromide [CTAB] on the hydrocarbon removal and retention from contaminated soils. *Environmental technology*, 27(7):767-776.

Srogy, k. (2007). Monitoring of environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: *Environ Chem Lett*. 5:169-195

Statsoft, Statistica (2007) "8.0, 2300 East 14 th St." Tulsa, OK 74104: 1984-2007.

Steiner AA (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*. 15(2): 134-154.

- Torres, P., Camberato, D., López, G. y Mickelbart, M. (2010). Producción comercial de cultivos bajo invernadero y vivero. Medición de pH y conductividad eléctrica en sustratos. Purdue. Extension HO-237-SW. Pp. 1-6
- UNESCO. (2009). Agua en un mundo en cambio. Programa mundial de evaluación de los recursos hídricos. Tercer Informe sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo (WWDR3). 5º Foro Mundial del Agua en Estambul, Turquía. Disponible en: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact-36-industrial-wastewater/>. Consulta 16/05/16
- Vasudevan, N. y Rajaram, P. (2001). Bioremediation of soil sludge-contaminated soil. *Environment International* 26:409-411.
- Vázquez-Luna, D., Catelan-Estrada, M., Rivera-Cruz, M., Ortiz-Cevallos e Izquierdo, F. (2010). *Crotalaria incana* L. y *Leucaena leucocephala* Lam. (*Leguminosae*): especies indicadoras de toxicidad por hidrocarburos de petróleo en el suelo. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 26(3): 183-191
- Veil, J., Puder, M., Elcock, D. y Redweik, R. (2004). A White paper describing produced water from production of crude oil natural gas and coal bed methane. [Online]. <http://www.touchbriefings.com/pdf/2590/Wilson.pdf>. [Viewed 24/04/2016]