



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

"Enseñar la explotación de la tierra, no la del hombre"

**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
INSTITUTO DE HORTICULTURA**

**USO DE AGUA RESIDUAL EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE
HIDROPÓNICO EN INVERNADERO**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

PRESENTA:

ERIK RAFAEL NAVARRO LÓPEZ

Chapingo, Estado de México. Junio de 2010.



Instituto de Horticultura

USO DE AGUA RESIDUAL EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE HIDROPÓNICO EN INVERNADERO.

Tesis realizada por **ERIK RAFAEL NAVARRO LÓPEZ** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR: _____


Dr. Raúl Nieto Ángel

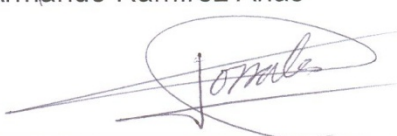
ASESOR: _____


Dra. María del Rosario García Mateos

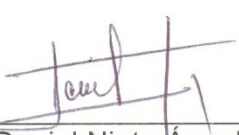
ASESOR: _____


Dr. Armando Ramírez Arias

ASESOR: _____


Dr. José Joel E. Corrales García

LECTOR EXTERNO: _____


Dr. Daniel Nieto Ángel

Chapingo, Estado de México, Junio de 2010.

DEDICATORIA

Con gran respeto y admiración a mis padres la Sra. María Elena López Ruíz y al Sr. Leonardo Navarro Palé, por su apoyo, comprensión y cariño que me brindan para que cada día dé un paso más hacia mis metas y sueños...

A mis hermanos Rocío, Adán, Ángel[†] y Semeí quienes siempre me han apoyado y alentando para seguir más adelante...

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, al Instituto de Horticultura por la oportunidad de brindarme una formación como Doctor en Ciencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de mis estudios de Doctorado.

Al Departamento de Fitotecnia y Departamento de Ingeniería Agroindustrial por sus facilidades en la realización de la presente investigación.

Al Dr. Raúl Nieto Ángel por su dirección, consejo, orientación y apoyo en la realización de esta tesis.

A la Dra. María del Rosario García Mateos por su asesoría, apoyo y tiempo dedicado en la culminación de esta investigación.

Al Dr. José Joel E. Corrales García por su asesoría, apoyo y facilidades para llevar a buen fin esta investigación.

Al Dr. Armando Ramírez Arias por su asesoría y apoyo para realizar esta investigación.

Al Dr. Daniel Nieto Ángel por sus comentarios y recomendaciones como lector externo de la presente tesis.

A los profesores Isaías Gil Vázquez y Georgina Flores Escobar por sus consejos, apoyo, confianza y amistad para concluir esta etapa de doctorado.

A mis compañeros, amigos y a todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron para la realización de este trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor de la presente tesis, Erik Rafael Navarro López, Ingeniero Agrónomo Especialista en Parasitología Agrícola, es originario de Cosautlán de Carvajal Veracruz. Realizó sus estudios de bachillerato en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, la licenciatura en la misma universidad de la cual egresó en 2000, titulándose con la tesis denominada “Determinación de plagas de importancias cuarentenaria, en esquejes de nochebuena (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch), para México”. Maestría en Horticultura en el Instituto de Horticultura titulándose en el 2003 con la tesis “Tolerancia a bajas temperaturas de genotipos cultivados, semicultivados y silvestre de nochebuena”. Ha participado como instructor en cursos de capacitación a productores, para el manejo de plagas y enfermedades de cultivos en hidroponía, impartido en la Preparatoria Agrícola. Desde 1997 forma parte del equipo de trabajo para el rescate y conservación de especies orquídeas nativas de México. Junto con el equipo de investigación de orquídeas, publicó el manual “Botánica e identificación de orquídeas” y es fundador del orquidario de la Universidad Autónoma Chapingo. Es instructor del curso “Introducción a la Reproducción y Manejo de Orquídeas Mexicanas”.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL ABSTRACT	xi
 INTRODUCCIÓN GENERAL	 1
REVISIÓN DE LITERATURA	4
LITERATURA CONSULTADA	11
 CAPÍTULO I. CALIDAD POSTCOSECHA DE FRUTOS DE TOMATE HIDROPÓNICO PRODUCIDOS CON AGUA RESIDUAL Y AGUA DE POZO	 16
1.1. Resumen	16
1.2. Abstract	17
1.3. Introducción	18
1.4. Materiales y métodos	19
1.5. Resultados y discusión	22
1.5.1. Ángulo de tono o <i>hue</i> del fruto	22
1.5.2. Pérdida de peso del fruto (%)	25
1.5.3. Firmeza del fruto	27
1.5.4. Sólidos solubles totales (SST) del fruto (°Brix)	29
1.5.5. Acidez titulable del fruto (AT)	32
1.5.6. pH del fruto	34
1.6. Conclusiones	35
1.7. Literatura citada	36
 CAPITULO II. AGUA RESIDUAL, UNA ALTERNATIVA PARA LA PRODUCCIÓN DE TOMATE HIDROPÓNICO EN INVERNADERO	 43
2.1. Resumen	43
2.2. Abstract	44
2.3. Introducción	45
2.4. Materiales y métodos	46

2.5. Resultados y discusión	49
2.5.1. Análisis de agua y suelo agrícola	49
2.5.2. Diámetro del fruto	50
2.5.3. Número de frutos	51
2.5.4. Peso promedio del fruto y racimo, y producción por planta	53
2.5.5. Rendimiento (m^2 , cama de cultivo (55.2 m^2), 1000 m^2 de invernadero y por ha^{-1} de invernadero a seis racimos)	54
2.6. Conclusiones	57
2.7. Literatura citada	57

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE CONTAMINATES EN FRUTOS DE PLANTAS DE TOMATE IRRIGADAS CON AGUA RESIDUAL EN HIDROPONIA

3.1. Resumen	62
3.2. Abstract	63
3.3. Introducción	64
3.4. Materiales y métodos	66
3.5. Resultados y Discusión	68
3.5.1. Análisis de contaminación por metales en muestras de agua	68
3.5.2. Contaminación por metales en muestras de frutos de tomate ...	69
3.5.3. Análisis de contaminación por algunos microorganismos en muestras de agua	76
3.5.4 Contaminación por algunos microorganismos en muestras de frutos de tomate	76
3.6. Conclusiones	79
3.7. Literatura citada	80

DISCUSIÓN GENERAL	87
LITERATURA CONSULTADA	98
CONCLUSIÓN GENERAL	104

ÍNDICE DE CUADROS

Página

CAPITULO 1: CALIDAD POSTCOSECHA DE FRUTOS DE TOMATE HIDROPÓNICO PRODUCIDOS CON AGUA RESIDUAL Y AGUA DE POZO

Cuadro 1. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.), en el porcentaje de pérdida de peso de frutos de tomate rojo, almacenados durante 40 días.	27
Cuadro 2. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.), en la firmeza o distancia de penetración en pulpa (mm) de frutos de tomate rojo, almacenados durante 40 días.	29
Cuadro 3. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.), en la acidez titulable de frutos de tomate rojo, almacenados durante 40 días.	33
Cuadro 4. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.), en el pH de frutos de tomate rojo, almacenados durante 40 días.	35

CAPITULO II. AGUA RESIDUAL, UNA ALTERNATIVA PARA LA PRODUCCIÓN DE TOMATE HIDROPÓNICO EN INVERNADERO

Cuadro 1. Resultados del análisis de muestras de agua de pozo y agua residual, en los parámetros de pH, conductividad eléctrica (CE) y contenido nutrimental; para el cultivo de tomate rojo en arena de tezontle y suelo agrícola de la zona de estudio (Tlahuelilpan, Hidalgo, México).	49
Cuadro 2. Resultados de los análisis de muestras de suelo agrícola regados con agua de pozo y agua residual; para los parámetros	

de pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO) y contenido nutrimental del para el cultivo de tomate rojo de la zona de estudio (Tlahuelilpan, Hidalgo, México).	50
Cuadro 3. Efecto del riego con solución nutritiva preparada con agua pozo o agua residual, y el cultivo en arena de tezontle o suelo agrícola; sobre el diámetro ecuatorial del fruto y diámetro polar del fruto. ...	52
Cuadro 4. Efecto de agua de riego (pozo y residual) y sustrato (tezontle y suelo) en el peso promedio del fruto, peso promedio del racimo y producción por planta.	54
Cuadro 5. Efecto del agua de riego (pozo y residual) y sustrato (tezontle y suelo) en el rendimiento por m ⁻² , cama, 1000 m ⁻² , ha de invernadero.	56
CAPITULO III. ANÁLISIS DE CONTAMINATES EN FRUTOS DE PLANTAS DE TOMATE IRRIGADAS CON AGUA RESIDUAL EN HIDROPONIA	
Cuadro 1. Análisis de contaminación por metales en muestras de agua de pozo y agua residual usada para cultivo hidropónico de tomate. ...	69
Cuadro 2. Análisis de contaminación por metales en muestras de frutos sin lavar y frutos lavados de tomate hidropónico irrigado con agua residual, y límites permitidos reportados.	75
Cuadro 3. Presencia de <i>Salmonella</i> sp., <i>Shigella</i> sp. y contenido de <i>E. coli</i> , en muestras de agua de pozo y agua residual usadas para cultivo hidropónico de tomate.	76
Cuadro 4. Presencia de <i>Salmonella</i> sp., <i>Shigella</i> sp. y contenido de <i>Escherichia coli</i> , en muestras de frutos sin lavar, frutos lavados y el agua de los frutos lavados de tomate hidropónico producido con agua residual.	78

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.) en el color (ángulo de tono o <i>hue</i>) de frutos de tomate rojo, almacenados durante 40 días.	23
Figura 2. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.) en el contenido de sólidos solubles totales o °Brix de frutos de tomate rojo.	31

USO DE AGUA RESIDUAL EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE HIDROPÓNICO EN INVERNADERO

THE USE OF WASTEWATER IN HYDROPONIC TOMATO PRODUCTION IN GREENHOUSE

Erik R. Navarro López¹ y Raúl Nieto Ángel².

RESUMEN GENERAL

El presente estudio fue llevado a cabo en la zona agrícola del Tula perteneciente al Valle Mezquital, Hidalgo, México. Con el objetivo de estudiar la influencia del agua residual sobre la calidad postcosecha, rendimiento y presencia de contaminantes en frutos de plantas de tomate irrigadas con agua residual en hidroponía. Los resultados indican que el agua residual favoreció la calidad postcosecha en los parámetros de color del fruto, sólidos solubles totales, y una menor acidez titulable. Aunque el agua residual afectó la producción por planta y el rendimiento, existe una posibilidad de producir 78.949 ton·ha⁻¹ en cultivo hidropónico en sustrato y de 88.587 ton·ha⁻¹ en cultivo en suelo. No hubo presencia de arsénico, cadmio, cromo hexavalente ni mercurio en los frutos. Las cantidades de plomo, cromo total, zinc, y los elementos traza (aluminio, bario, boro, cobre, fierro y manganeso) fueron menores a los niveles máximos de ingestión tolerable para el ser humano. Las mayores cantidades de estos elementos fueron encontrados en los frutos sin lavar, por lo que se considera como contaminación externa. No hubo presencia de *Salmonella* spp. ni *Shigella* spp., en los frutos, para *Escherichia coli* las cantidades encontradas en los frutos fueron menores a 3.0 UFC·g, estas cantidades están por debajo de la dosis infectiva (50-100 UFC·g).

Palabras clave: *Solanum lycopersicon* Mill.), *Shigella* spp., *Salmonella* spp., *E. coli*, metales pesados, elementos traza.

¹Autor de la tesis.

²Director de la tesis.

GENERAL ABSTRACT

This study was carried out in the agricultural zone belonging to the Mezquital Valley, Hidalgo, México. In order to study the wastewater influence in post-harvest quality, yield and presence of contaminants in fruits of tomato plants irrigated with wastewater in hydroponics system. The results indicate that wastewater favored post-harvest quality in fruit color, total solid soluble and less titratable acidity parameters. Although wastewater affected plant production and yield, there is a possibility to produce 78.949 ton·ha⁻¹ in hydroponic system and 88.587 ton·ha⁻¹ in soil cultivation. There was no presence of arsenic, cadmium, hexavalent chromium and mercury in fruits. The amounts of lead, total chromium, zinc, and the trace elements (aluminum, barium, boron, copper, iron and manganese) were less than the maximum levels of tolerable for human's diet. Larger quantities of these elements were found in the unwashed fruits, so it is considered as external contamination. There was no presence of *Salmonella* spp. or *Shigella* spp., in fruits, for *Escherichia coli* the quantities found in fruits were less than 3.0 CFU·g, these amounts are below the infective dose (50-100 CFU·g).

Keywords: *Solanum lycopersicon* Mill.), *Shigella* spp., *Salmonella* spp., *E. coli*, heavy metals, trace elements.

¹Thesis author

²Thesis director

INTRODUCCIÓN GENERAL

En algunas regiones de México y el mundo, a causa de la escasez de agua para riego en la agricultura desde principios del siglo XX, se ha utilizando agua residual en la producción de alimentos (Cuenca-Adame *et al.*, 2001). La irrigación con agua residual en la agricultura se realiza en muchas partes del mundo, estimaciones recientes indican que a nivel mundial existe unos 20 millones de hectáreas irrigadas usando agua residual sin tratamiento, tratada, y/o parcialmente diluida con agua (Hamilton *et al.*, 2006). En México, el lugar con una mayor extensión donde se usa agua residual para el riego agrícola es la zona del Valle del Mezquital, con aproximadamente unas 100 000 ha (con un volumen de $5 \times 10^7 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$), con una mezcla de agua residual y agua de lluvia (Vivanco *et al.*, 2001). En cultivos hidropónicos también se han usado aguas residuales tratadas, algunas hortalizas cultivadas bajo este sistema son: pepino (Morillo *et al.*, 2009a), pimiento (Morillo *et al.*, 2009b), tomate (Traka-Mavrona *et al.*, 1998), tomate cherry (Bertoldi *et al.*, 2009); así mismo, se han cultivado flores como la gerbera (Maloupa *et al.*, 1999).

El agua residual es usada por los agricultores, no sólo por la necesidad del líquido, sino por que incrementa la productividad por su contenido de materia orgánica, nitrógeno y fósforo (Jiménez *et al.*, 2005). Algunos de los elementos nutrimentales presentes en el agua residual son: nitrógeno de 20 a 40 mg L^{-1} (Vivanco *et al.*, 2001), potasio de 26.80 a 35 mg L^{-1} (Mañas-Ramírez *et al.*, 2002; Downs *et al.*, 1999), fósforo de 2.7 a 3.0 mg L^{-1} , calcio de 41.0 a 445.0 mg L^{-1} y magnesio de 24.0 a 29.0 mg L^{-1} entre otros; con un pH de 7.16 a 8.1 y una conductividad eléctrica de 1.44 a 1.69 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-2}$ (Jiménez y Chávez, 2004). Para la zona de estudio, el riego con agua residual sin tratamiento, parcialmente tratada o mezclada con agua de lluvia, produce un incremento en el rendimiento de

algunas hortalizas como frijol de 1.4 a 1.8 ton·ha⁻¹ (28 %), chile de 7 a 12 ton·ha⁻¹ (71 %) y tomate rojo de 18 a 35 ton·ha⁻¹ (94 %) (Anónimo, 2002; Jiménez *et al.*, 2005).

El uso de agua residual y lodo residual en la agricultura puede presentar riesgos por la presencia de agentes contaminantes biológicos, químicos y físicos (Nabulo *et al.*, 2008). Okafo *et al.* (2003) mencionan que las hortalizas que se encuentran en contacto directo con el agua de riego tienen mayor probabilidad de contaminarse con microorganismos patógenos; sin embargo, también pueden contaminarse durante la cosecha, procesamiento y distribución del producto. Algunos de los patógenos que afectan la salud pública son: *Shigella* (Reller *et al.*, 2006), *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*, helmintos, así como también virus entéricos que son la principal causa de muerte en infantes y personas de edad avanzada (Berney *et al.*, 2006). El otro riesgo potencial asociado con el uso de aguas residuales es la contaminación química, puede presentarse principalmente en aguas provenientes de desechos municipales y mayormente si son de origen industrial. Los agentes químicos dañinos incluyen metales pesados, fertilizantes y otros nutrientes como compuestos nitrogenados, fosforados, minerales, insecticidas, pesticidas, fungicidas, herbicidas y componentes orgánicos (Nabulo *et al.*, 2008). La agencia de protección al medio ambiente de Estados Unidos de América (EPA) menciona como metales pesados de importancia que contaminan el aire, suelo y agua so cadmio, plomo, zinc, mercurio, calcio, plata y arsénico. En el caso del agua potable la organización mundial para la salud (WHO por sus siglas en inglés) y la agencia nacional para la administración y control de drogas y alimento (NAFDAC), considera como metales pesados al zinc, arsénico, magnesio, calcio, cadmio, plomo, plata, y mercurio (Duruibe *et al.*, 2007).

El efecto del uso de aguas residuales en la producción de tomate hidropónico sobre en la calidad postcosecha, rendimiento y presencia de contaminantes en hortalizas ha sido poco investigado, de acuerdo a lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue:

- 1) estudiar el efecto del agua residual y agua de pozo en soluciones nutritivas hidropónicas sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de tomate (color o ángulo de tono (*hue*), pérdida de peso (%), firmeza, sólidos solubles totales, acidez titulable y pH de frutos, almacenados a 4, 10 y 20 °C durante 40 días);
- 2) estudiar también el efecto del agua residual sobre algunos parámetros de rendimiento (diámetro polar, diámetro ecuatorial; número de frutos por racimo, planta y m⁻²; peso promedio del fruto, racimo, producción por planta, rendimiento por m⁻², cama de cultivo (1.2 m x 46 m = 55.2 m⁻²), 1000 m⁻² y por hectárea (ha⁻¹) de invernadero);
- y 3) estudiar el efecto del agua residual en la presencia de contaminación por metales [Arsénico (As), cadmio (Cd), cromo total (Cr), cromo hexavalente (Cr-VI), mercurio (Hg), plomo (Pb), zinc, (Zn), Aluminio (Al), Bario (Ba), boro (B), cobre (Cu), fierro (Fe) y manganeso (Mn)], y contaminación por algunos microorganismos (*Shigella* sp., *Salmonella* sp. y *E.coli*), en frutos de tomate producidos con agua residual.

REVISIÓN DE LITERATURA

Uso de aguas residuales en el cultivo de especies hortícolas para el consumo humano

El problema del agua en el momento actual es de tal relevancia que se puede afirmar que la disponibilidad y manejo de este recurso fijarán los márgenes del desarrollo sustentable. Del uso total del agua en México, 78 % se emplea para la agricultura, 11.5 % para fines públicos urbanos, 8.5 % para la industria y 2 % para fines pecuarios y la acuicultura. Si bien la agricultura es la actividad que emplea más agua, hay que recordar que las 6.3 millones de hectáreas bajo riego (alrededor de 30 % de la superficie agrícola) aportan más de la mitad de la producción agrícola nacional y son el pilar de la cultura rural de nuestro país (Jiménez *et al.*, 2005a).

En la Ciudad de México, 80 % del agua se emplea para fines municipales, 5 % para la industria y 15 % para riego. En otras palabras, el “usuario principal” son los habitantes. A partir de esta agua se genera en promedio anual $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de aguas residuales. De las cuales se trata alrededor de $6.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que se reúsan dentro del Valle de México. Los $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ restantes de aguas negras que salen del valle sin tratar, se emplean para el riego del Valle de Tula (Mezquital), Chiconautla y Zumpango, así como para alimentar la Presa Endhó ($1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) cuya agua se emplea posteriormente, también para riego. El agua negra se usa por los agricultores, no sólo por la necesidad del líquido sino por que incrementa la productividad pues contiene materia orgánica (demanda bioquímica de oxígeno) y nutrimentos del suelo (Jiménez *et al.*, 2005b).

Las perspectivas del riego agrícola se inclinan hacia la reutilización del agua residual en los cultivos. El agua residual es un elemento de desarrollo del recurso agua y dirección

innovadora que mantiene una alternativa para la agricultura. El reutilizar el agua recuperada para el riego refuerza la productividad agrícola; esta provee de agua y nutrientes, y mejora rendimientos de los cultivos (Jiménez *et al.*, 2005b). Sin embargo, requiere protección a la salud pública, apropiada tecnología de tratamiento, confiabilidad del tratamiento, usos del agua, aceptación y participación del público, también debe ser económicamente y financieramente viable (Bahri, 1999). Para las zonas áridas y semiáridas el recurso agua de buena calidad está volviéndose más escasa y se asigna con prioridad a satisfacer la demanda urbana. Por esta razón, se está incrementado la necesidad de regar con aguas que tienen contenidos de sales, las cuales puede ser de origen subterráneo, agua residual cruda o tratada (Martínez, 1999).

Daño por frío en el almacenamiento postcosecha

La mayoría, sino es que todos los frutos, vegetales y plantas ornamentales de origen tropical están sujetos a daños fisiológico cuando son expuestos a bajas temperaturas alrededor de 12.5 °C pero por arriba del punto de congelación; este daño no involucra llegar el congelamiento y es conocido como *daño por frío*. Los síntomas que se desarrollan por efecto del daño por frío y que ocasionan pérdidas en postcosecha son: lesiones superficiales (manchas hundidas, áreas húmedas y decoloración), ablandamiento del tejido, decoloración interna (pulpa), daño del tejido, falla en la maduración, aceleración en el índice de senescencia, incremento de la susceptibilidad en la pudrición, acortamiento en la vida de almacenaje o vida de anaquel, cambios en la composición (sabor) y pérdida del crecimiento o rebrote en propágulos (Morris, 1982).

El mecanismo que sigue el desarrollo de daño por frío propone que existe una serie de cambios fisiológicos y bioquímicos asociados con este desorden. Estos cambios

originan una alteración en los procesos metabólicos y fisiológicos de la planta. En plantas sensibles a daños por frío, éste inicia con la exposición a bajas temperaturas pero que no lleguen a punto de congelamiento (entre 10 y 12.5 °C para especies de origen tropical). Después de esta exposición a bajas temperaturas se presenta la *respuesta primaria* inducida por temperaturas críticas de daño por frío, donde a nivel de la membrana celular se presenta una fase física de transición de cristal-líquido flexible a una estructura de gel sólido (Lyons, 1973; Wang, 1982).

Como consecuencia de este primer evento se presenta la *respuesta secundaria*, en la que surgen una serie de cambios (bioquímicos y fisiológicos) en la planta, produciéndose una estimulación en la producción de etileno, incremento en la tasa de respiración, existe una interferencia en la producción de energía, hay una mayor activación de la energía, disminución del fluido protoplasmático, incremento en la permeabilidad, reducción de la fotosíntesis y una alteración en la estructura celular. Después de estos fenómenos a nivel celular se presenta el *Efecto Directo*, por ejemplo se produce la reducción de la actividad de la enzima PEP carboxilasa (Lyons, 1973; Wang, 1982).

Hasta este momento si la exposición a bajas temperaturas es por un corto tiempo, todos los cambios que se dieron a nivel celular pueden ser reversibles. Si el tiempo de exposición a bajas temperaturas continúa los daños son irreversibles y aparecen los síntomas típicos de daño por frío como: decoloración, mancha superficial, rompimiento interno, pérdida de la capacidad de maduración (en frutos), inhibición de crecimiento, deterioro, etc. (Lyons, 1973; Wang, 1982).

Influencia del agua residual en el rendimiento de cultivos hortícolas

El agua residual es usada por los agricultores, no sólo por la necesidad del líquido sino por que incrementa la productividad ya que contiene materia orgánica, nitrógeno y fósforo (Jiménez *et al.*, 2005b). Para la zona del Valle del Mezquital, el riego con agua residual sin tratamiento, parcialmente tratada o mezclada con agua de lluvia, produce un incremento en el rendimiento de algunas hortalizas como en frijol de 1.4 a 1.8 ton·ha⁻¹ (28 %), chile de 7 a 12 ton·ha⁻¹ (71 %) y tomate rojo de 18 a 35 ton·ha⁻¹ (94 %) (Anónimo, 2002; Jiménez *et al.*, 2005b). Algunos de los elementos nutrimentales presentes en el agua residual son: nitrógeno de 20 a 40 mg L⁻¹ (Vivanco Estrada *et al.*, 2001), potasio de 26.80 a 35 mg L⁻¹ (Mañas Ramírez *et al.*, 2002; Downs *et al.*, 1999), fósforo de 2.7 a 3.0 mg L⁻¹, calcio de 41.0 a 445.0 mg L⁻¹ y magnesio de 24.0 a 29.0 mg L⁻¹ entre otros; con un pH de 7.16 a 8.1 y una conductividad eléctrica de 1.44 a 1.69 dS·m⁻² (Jiménez y Chávez, 2004). Méndez-García *et al.* (2000) mencionan que el uso de agua residual sin aplicación de fertilizantes produce altos rendimientos en hortalizas. Sin embargo, otros de los elementos presentes son los metales pesados.

Metales pesados

Se definen como “metales pesados” aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a 5 g·cm⁻³ cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior a 0.1% y casi siempre menor de 0.01%. No obstante, en primer lugar, conviene aclarar que el término “metales pesados” es impreciso. En verdad se pretende indicar con este término aquellos metales que, siendo elementos pesados, son “tóxicos” para la célula. Sin embargo en realidad cualquier

elemento que *a priori* es beneficioso para la célula, y que en concentraciones excesivas puede llegar a ser tóxico, por lo que se seguirá manteniendo el término “metales pesados” para definir estos elementos. Junto a ellos hay otros elementos que, aunque son metales ligeros o no metales, se suelen englobar con ellos por orígenes y comportamientos asociados; es este el caso de As, B, Ba y Se. Los metales pesados se clasifican en dos grupos:

1. Oligoelementos o micronutrientes. Necesarios en pequeñas cantidades para los organismos, pero tóxicos una vez pasado cierto umbral. Incluyen As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn.
2. Sin función biológica conocida. Son altamente tóxicos, e incluyen a: Ba, Cd, Hg, Pb, Sb, Bi (Navarro-Aviñón *et al.*, 2007; Duffus, 2002; Järup, 2003).

Los elementos pertenecientes a estos dos grupos también varían según autores, además, cuando se habla de metales pesados tampoco se especifica el estado del elemento, es decir, si se trata del elemento puro, o de algunos o la totalidad de sus diversos estados de oxidación (compuestos), que no presentan las mismas propiedades físicas, químicas, tóxicas, ni ecotóxicas. Este aspecto complica todavía más su clasificación. Por ejemplo, algunos compuestos de cromo hexavalente (Cr-VI) son citados como carcinógenos a humanos, pero prácticamente no se encuentra información sobre algún tipo de cáncer ocasionados por exposición a ese metal puro. Además, el cromo y algunas de sus aleaciones se emplean sin problemas, desde hace tiempo, en prótesis médicas y dentales (Navarro-Aviñón *et al.*, 2007; Duffus, 2002).

Contaminación externa de metales pesados

Dependiendo del tipo de cultivo, las concentraciones y movimiento de metales pesados presentan diferente comportamiento. En cultivos de lechuga, rábano, frijol y tomates cultivados en desechos mineros y en suelos mezclados con residuos mineros, con presencia de plomo, cadmio, arsénico y zinc, se determinó la concentración de metales pesados en el tejido de las plantas para conocer la absorción y distribución de metales en las partes comestibles de las plantas. Los resultados de las cuatro especies de plantas indican que existe acumulación y traslocación efectiva de plomo, cadmio, arsénico y zinc. Las plantas de tomate y frijol presentaron los cuatro metales mayormente en las raíces, un poco fue traslocado a los frutos. Las raíces de rábano acumularon menos metales comparado con las hojas, mientras que las hojas y raíces de lechuga acumularon concentraciones similares de los cuatro metales. Las hojas de lechuga y las raíces de rábano acumularon significativamente más metales que los frutos de frijol y tomate. Este comportamiento en la acumulación de metales pesados, sugiere que el consumo de hojas de lechuga o raíces de rábano proveniente plantas cultivadas en residuos mineros con contenidos de plomo, cadmio, arsénico y zinc; podrían representar gran riesgo a humanos y la vida silvestre, en comparación con semillas de frijol y frutos de tomates cultivados en la misma área (Cobb *et al.*, 2000).

Otras investigaciones en maíz cultivado con diferentes dosis de compostas de lodos residuales se encontraron diferencias en la absorción y distribución de metales pesados (Cu, Zn, Ni, Cd, Pb y Cr). Los valores de Ni y Cd en tallos y hojas fueron bajos; mientras que el 100 % del Pb y Cr quedó retenido en las raíces y no pasaron a la parte aérea (Cuevas y Walter, 2004).

Contaminación externa de microorganismos

Fue posible asociar *Salmonella* spp., con tejidos aéreos en plántulas de tomate producido en sistema hidropónico con inoculación de la bacteria; por lo que los resultados dan evidencias de que la *Salmonella* sp. puede ser transportada de una solución nutritiva inoculada a los hipocotilos – cotiledón, tallo y hojas. Hara-Kudo *et al.* (1997) estudiaron la distribución de *E. coli* sobre rábano cultivados con agua inoculada con este patógeno. Encontraron que los hipocotilos y cotiledones fueron extremadamente contaminados con el patógeno cuando fueron germinados de semillas embebidas con agua contaminada por *E. coli* O157:H7, así mismo, reportaron poblaciones de 3.0 a 3.1 log₁₀ CFU/ml. Los patógenos también fueron detectados en hipocotilos y cotiledones después de 18 horas de exposición de las raíces con agua inoculada con esta bacteria. Itoh *et al.* (1998) también detectó *E. coli* O157:H7 en el tejido interior y estomas de cotiledones de rábano brotados y crecidos en una suspensión acuosa del patógeno.

La literatura menciona que los puntos de entrada de bacterias en plantas incluyen estomas, hidatodos, nectarios, lenticelas, radículas en germinación y áreas emergentes de las raíces laterales (Hallmann *et al.*, 1997; Huang, 1986; Sturz *et al.*, 2000). Sin embargo, se desconoce si este fenómeno podría ocurrir cuando las raíces de plantas adultas (en plantas cercanas a la cosecha) se encuentran expuestas a *Salmonella*. De igual manera, el potencial de la asociación sistémica de *Salmonella* con plantas creciendo en suelos no ha sido demostrado. Por lo que estudios adicionales son necesarios para demostrar inequívocamente que *Salmonella* puede existir internamente en plantas de tomate creciendo bajo condiciones que simulen prácticas agrícolas comúnmente usadas (Gou *et al.*, 2002).

LITERATURA CONSULTADA

- ANÓNIMO, 2002. Estudio Complementario del Caso Mezquital, Estado de Hidalgo, Proyecto Regional. Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial. Convenio IDRC – OPS/HEP/CEPIS. México. 52 p.
- BAHRI. 1999. Agricultural reuse of wastewater and global water management water Sciencia Technology. 40 (4-5): 339-346.
- BERNEY, M.; WEILENMANN, H. U.; IHSEN, J.; BASSIN, C.; EGLI, T. 2006. Specific Growth Rate Determines the Sensitivity of *Escherichia coli* to Thermal, UVA, and solar disinfection. Applied and Environmental Microbiology 72(4): 2586-2593.
- BERTOLDI, F. C., E. S. SANT'ANNA, J. L. BARCELOS-OLIVEIRA AND R. SIMONI, 2009. Antioxidant properties of hydroponic cherry tomato cultivate in desalinized wastewater. Acta Hort. 843:197-202.
- COBB, G. P.; K. SANDS; M. WATERS; B. G. WIXSON; E. DORWARD-KING. 2000. ACCUMULATION OF HEAVY METALS BY VEGETABLES GROWN IN MINE WASTES. Environmental Toxicology and Chemistry 19(3): 600-607.
- CUENCA-ADAME, E.; Riestra-Díaz, D.; Pérez-Mangas, J. M.; EcheGARay-Aleman, A. 2001. Uso de aguas residuales y control de organismos patógenos en la producción de cebolla. Agrociencia 35: 255-265.
- CUEVAS, G; WALTER, I. 2004. Metales pesados en maíz (*Zea mays* L.) cultivado en un suelo enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual. Rev. Int. Contam. Ambient. 20(2): 59-68.

- DOWNS, T. J., E. CIFUENTES-GARCÍA AND I. M. SUFFET. 1999. Risk Screening for Exposure to Groundwater Pollution in a Wastewater Irrigation District of the Mexico City Region. *Environmental Health Perspectives* 107(7): 553-561.
- DUFFUS, J. H. 2002. Heavy metal: a meaningless term. *Pure Appl. Chem.* 74(5): 793-807.
- DURUIBE, J. O.; OGWUEGBU, M. O. C; EGWURUGWU, J. N. 2007. Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences* 2 (5): 112-118.
- GUO, X.; VAN IERSEL, M. W.; CHEN, J.; BRACKETT, E. B.; BEUCHAT, L. R. 2002. Evidence of Association of Salmonellae with Tomato Plants Grown Hydroponically in Inoculated Nutrient Solution. *Appl Environ Microbiol* 68(7): 3639–3643.
- HALLMANN, J.; A. QUADT-HALLMAN; W. F. MAHAFFEE; J. W. KLOEPPER. 1997. Bacterial endophytes in agricultural crops. *Can. J. Microbiol.* 43:895-914.
- HAMILTON, A. J., F. STAGNITTI, R. PREMIER, A-M. BOLAND AND G. HALE. 2006. Quantitative microbial risk assessment models for consumption of raw vegetables irrigated with reclaimed water. *Appl. Environ. Microbiol.* 72(5): 3284-3290.
- HARA-KUDO, Y.; H. KONUMA; M. IWAKI; F. KASUGA; Y. SUGITA-KONISHI, Y. ITO; S. KUMAGAI. 1997. Potential hazard of radish sprouts as a vehicle of *Escherichia coli* O157:H7. *J. Food Prot.* 60:1125-1127.
- HUANG, J. S. 1986. Ultrastructure of bacterial penetration in plants. *Annu. Rev. Phytopathol.* 24:141-157.

- ITOH, Y.; Y. SUGITA-KONISHI; F. KASUGA; M. IWAKI; Y. HARA-KUDO; N. SAITO; Y. NOGUCHI; H. KONUMA; S. KUMAGAI. 1998. Enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 present in radish sprouts. *Appl. Environ. Microbiol.* 64:1532-1535.
- JÄRUP, L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin* 68: 167–182.
- JIMÉNEZ, B.; CHÁVEZ, A. 2004. Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: “El Mezquital Valley” case. *Water Science and Technology* 50(2): 269-276.
- JIMÉNEZ C., B., CH. SIEBE G. Y E. CIFUENTES G. 2005. El Reúso Intencional y no Intencional del Agua en el Valle de Tula. pp. 33-55. *In: El Agua en México Vista desde la Academia.* Jiménez, B.; Marín, L. (eds.). Ed. Academia Mexicana de Ciencias. México D.F., México.
- JIMÉNEZ, B. E.; MARÍN. L. E.; MORÁN, D. 2005a. El Agua en México Vista desde la Academia. Academia Mexicana de Ciencias. México. 411 p.
- JIMÉNEZ C., B; MAZARI H., M.; DOMÍNGUEZ M., R.; CIFUENTES G., E. 2005b. El Agua en el Valle de México. pp. 8-32. *In: El Agua en México Vista desde la Academia.* JIMÉNEZ, B. E.; MARÍN. L. E.; MORÁN, D (Eds). 2005. Academia Mexicana de Ciencias. México.
- LYONS M. J. 1973. Chilling injury in plants. *Annual Review of Plant Physiology* 24:445-466.
- MALOUPA, E., K. TRAKA-MAVRONA, A. PAPADOPOULOS, F. PAPADOPOULOS, AND D. PATERAS. 1999. Wastewater re-use in horticultural crops growing in soil and soilless media. *Acta Hort.* 481:603-608.

- MAÑAS-RAMÍREZ, P., E. CASTRO-BARRILERO, J. DE LAS HERAS-IBÁÑEZ Y J. C. SÁNCHEZ-TEBAR. 2002. Aptitud agronómica del agua residual depurada procedente de la E.D.A.R. de Albacete. Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg. 17(1): 163-171.
- MARTÍNEZ, B.J. 1999. Irrigation with saline Water; Benefits and Environmental impact. Agricultural Water Management 40: 183-194.
- MÉNDEZ-GARCÍA, T., L. RODRÍGUEZ-DOMINGUEZ Y S. PALACIOS-MAYORGA. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. Terra 18(4): 277-288.
- MORILLO, G., R. MONSALVE, J. MENDOZA, D. ISEA, I. ARAUJO, L. VARGAS, AND N. ANGULO. 2009a. Chemical and microbiological evaluation of cucumber (*Cucumis sativus* L.) using wastewaters irrigation. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. 32(1): 68-76.
- MORILLO, G., B. ORTEGA, I. ARAUJO, D. ISEA, N. ANGULO, Y L. VARGAS. 2009b. Utilización de aguas residuales tratadas en cultivos hidropónicos de pimentón, *Capsicum annum* L. CIENCIA 17(1): 98-106.
- MORRIS, L. L. 1982. Chilling injury of horticultural crops: an overview. Hortscience 17: 161-162.
- NABULO, G.; ORYEM ORIGA, H.; NASINYAMA, G. W.; COLE, D. 2008. Assessment of Zn, Cu, Pb and Ni contamination in wetland soils and plants in the Lake Victoria basin. Int. J. Environ. Sci. Tech. 5(1): 65-74.
- NAVARRO-AVIÑÓN, J.P.; AGUILAR ALONSO, I.; LÓPEZ-MOYA, J.R. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Ecosistemas 16 (2): 10-25.

- OKAFO, C. N.; V. J. UMOH; M. GALADIMA. 2003. Occurrence of pathogens on vegetables harvested from soils irrigated with contaminated streams. *Sci. Total Environ.* 311(1-3): 49-56.
- RELLER, M. E.; J. M. NELSON; K. MØLBAK; D. M. ACKMAN; D. J. SCHOONMAKER-BOPP; T. P. ROOT; E. D. MINTZ. 2006. A large, multiple-restaurant outbreak of infection with *Shigella flexneri* serotype 2a traced to tomatoes. *Clinical Infectious Diseases* 42(2): 163-169.
- STURZ, A. V., B. R. CHRISTIE; J. NOWAK. 2000. Bacterial endophytes: potential role in developing sustainable systems of crop production. *Crit. Rev. Plant Sci.* 19:1-30.
- TRAKA-MAVRONA, E. K.; MALOUPA, E.; PAPADOPOULOS, F.; PAPADOPOULOS, A. 1998. Response of greenhouse tomatoes to wastewater fertigation in soilless cultivation. *Acta Hort.* 458:411-416.
- VIVANCO E., R. A.; F. GAVI R.; J.J. PEÑA C.; J. DE J. MARTÍNEZ H. 2001. Flujos de nitrógeno en el suelo cultivado con forraje y regado con agua residual urbana. *Terra Latinoamericana* 19(4): 301-308.
- WANG, C. Y. 1982. Physiological and biochemical responses of plants to chilling stress. *HortScience* 17(2): 173-186.

CAPITULO 1: CALIDAD POSTCOSECHA DE FRUTOS DE TOMATE HIDROPÓNICO PRODUCIDOS CON AGUA RESIDUAL Y AGUA DE POZO

POSTHARVEST QUALITY OF HYDROPONIC TOMATO FRUIT CULTIVATED WITH WASTEWATER AND WELL WATER

E. R. Navarro-López^{1¶}; R. Nieto-Ángel¹; J. J. E. Corrales-García²; M. del R. García-Mateos¹; A. Ramírez-Arias³.

¹Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México, C.P. 56230. MÉXICO. Correo-e: naeri@yahoo.com.mx (¶Autor responsable).

²Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. MÉXICO.

³Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. MÉXICO.

RESUMEN

Se estudió la calidad postcosecha de frutos de tomate rojo producidos con agua residual (FAR) y frutos producidos con agua de pozo (FAP) en hidroponía. Los frutos fueron cosechados siguiendo criterios comerciales y almacenados durante 40 días, bajo las siguientes condiciones aproximadas: 4 °C con 90 % HR; 10 °C con 82 % HR y 20 °C con 62 % HR. Cada 10 días, se midieron algunos parámetros de calidad. El ángulo de tono (*hue*) tuvo diferencias en los frutos refrigerados a 4 °C durante 10, 20, 30 y 40 días de almacenamiento (dda), los FAR tuvieron respectivamente menores valores (54.6, 51.6, 51.8 y 50.4°) que los FAP (60.2, 57.6, 56.9 y 55.6°). A 10 °C por 10, 20 y 30 dda, el *hue* de los FAR fue menor (34.4, 29.3 y 25.9°) que en los FAP (42.9, 33.2 y 27.6°); esto indica que los FAR tuvieron un color más rojo. Los sólidos solubles totales (°Brix) en frutos no refrigerados durante 10, 20, 30 y 40 dda respectivamente fueron mayores en los FAR (5.0, 4.9, 5.3 y 4.6 °Bx) que en los FAP (3.8, 4.0, 4.0 y 3.5 °Bx). A 10 °C por 30 y 40 dda, y a 4 °C por 30 dda, los FAR presentaron respectivamente mayores contenidos (4.8, 4.4 y 4.9 °Bx) que los FAP (3.8, 3.6 y 4.1 °Bx). En acidez titulable sólo a 4 °C por 20 dda; los FAP presentaron un mayor valor (0.43 %) que los FAR (0.36 %). La firmeza, pérdida de peso y pH del fruto no presentaron diferencias.

PALABRAS CLAVE: *Solanum lycopersicon* Mill., porcentaje de pérdida de peso, ángulo de tono (*hue*), sólidos solubles totales, acidez titulable, pH del fruto.

ABSTRACT

The postharvest quality in fruit of tomato plants irrigated with wastewater (WAF) and fruit of tomato plants irrigated with well water (WEF) in hydroponic system was studied. Fruits were harvested according to commercial criterion and stored during 40 days, under following approximate conditions: 4 °C with 90 % HR; 10 °C with 82 % HR and 20 °C with 62 % HR. Each 10 days, some quality parameters were determined. The tone angle (*hue*) only had differences ($P \leq 0.05$) for the fruits cooled at 4 °C during 10, 20, 30 and 40 storage days (sd); WAF respectively had smaller *hue* registries (54.6, 51.6, 51.8 and 50.4°) than WEF (60.2, 57.6, 56.9 and 55.6°). At 10 °C by 10, 20 and 30 sd; WAF also had smaller values (34.4, 29.3 and 25.9°) than WEF (42.9, 33.2 and 27.6°); this indicates a greater red color in the WAF than WEF. Total soluble solids content (°Brix) showed differences in not cooled fruits during 10, 20, 30 and 40 sd; WAF respectively had a greater content (5.0, 4.9, 5.3 and 4.6 °Bx) than WEF (3.8, 4.0, 4.0 and 3.5 °Bx). At 10 °C by 30 and 40 sd; and at 4 °C by 30 sd, WAF had greater °Brix content (4.8, 4.4 and 4.9 °Bx) than WEF (3.8, 3.6 and 4.1 °Bx) respectively. Titratable acidity only had difference in fruits cooled at 4 °C by 20 sd; WEF had a greater values (0.43 %) than WAF (0.36 %). Firmness, fruit loss weight (%) and fruit pH did not showed differences.

KEY WORDS: *Solanum lycopersicon* Mill., percentage of loss of weight, *hue*, total soluble solids, titratable acidity, pH of the fruit.

INTRODUCCIÓN

En algunas regiones de México y el mundo, a causa de la escasez de agua para riego en la agricultura desde principios del siglo XX, se ha utilizando agua residual en la producción de alimentos (Cuenca *et al.*, 2001). En México el lugar con una mayor extensión donde se usa agua residual para el riego agrícola es la zona del Valle del Mezquital con aproximadamente unas 100,000 ha ($5 \times 10^7 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{año}^{-1}$), con una mezcla de agua residual y agua de lluvia (Vivanco *et al.*, 2001). Algunos de los principales cultivos irrigados con agua residual a campo abierto en este Valle son: alfalfa, maíz, trigo, avena, frijol, cebada, café, cítricos, melón, tomate verde, tomate rojo, chile y betabel (Anónimo, 2002). El uso de aguas residuales en la producción agrícola puede presentar algunos problemas de contaminación por organismos dañinos como: bacterias, helmintos y virus; así mismo, otros contaminantes como metales pesados, residuos de fertilizantes y plaguicidas (Cuadra, 1981). Jiménez y Chávez (2004) reportan que el agua residual proveniente del Distrito Federal contiene algunos componentes nutrimentales disueltos como: nitrógeno total = 37.0-38.0, fósforo = 2.7-3.0, calcio = 41.0-445.0, magnesio = 24.0-29.0, sulfatos = 3.0-3.5, fierro = 1.0-1.2, manganeso = 0.03-0.2, boro = 1.0-1.2, cobre = 0.05-0.07 ($\text{mg} \cdot \text{litro}^{-1}$); más carbono orgánico total = 35-188 $\text{mg} \cdot \text{litro}^{-1}$, un pH de 7.16 y una conductividad eléctrica de 1.437 a 1.689 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-2}$. El agua residual sin tratamiento alguno, parcialmente tratada o mezclada con agua de lluvia es muy demandada por los agricultores del Valle del Mezquital, principalmente por su efecto tan significativo en el incremento de la producción, por ejemplo en maíz la producción se ha incrementado de 2 a 5 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ (150 %), alfalfa de 70 a 120 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ (71 %), avena forrajera de 12 a 22 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ (83 %), cebada de 2 a 4 $\text{ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ (100 %),

frijol de 1.4 a 1.8 ton·ha⁻¹ (28 %), chile de 7 a 12 ton·ha⁻¹ (71 %) y tomate rojo de 18 a 35 ton·ha⁻¹ (94 %). De acuerdo con los productores, esto permite una disminución en el requerimiento de fertilizantes e incrementa su calidad postcosecha (Anónimo, 2002; Jiménez *et al.*, 2005). Tzortzakis y Economakis (2008) mencionan que la presencia de componentes orgánicos en los sustratos de tomates producidos en hidroponía, afectan positivamente algunos parámetros de calidad postcosecha como: el contenido de sólidos solubles totales, acidez titulable, contenido de carotenoides, ácido ascórbico y la firmeza del fruto; así mismo, favorecen algunos parámetros de producción como: número de frutos por planta y peso del fruto. La influencia del uso de aguas residuales en la calidad postcosecha de hortalizas ha sido poco investigada, de acuerdo a lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue: estudiar el efecto del agua residual y agua de pozo en soluciones nutritivas hidropónicas, sobre algunos parámetros de calidad postcosecha como: color o ángulo de tono (*hue*), pérdida de peso (%), firmeza, sólidos solubles totales, acidez titulable y pH de frutos de tomate rojo, almacenados a 4, 10 y 20 °C durante 40 días.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron frutos de tomate rojo de la variedad Reserva F1 de crecimiento indeterminado, producidos en hidroponía durante los meses de junio a diciembre de 2007 con dos tipos de agua para riego: 1) frutos producidos con agua de pozo (FAP), cultivados en un invernadero del Campo Agrícola Experimental (19° 29' latitud norte, 98° 52' longitud oeste y altitud de 2250 msnm) de la Universidad Autónoma Chapingo

(UACH); y 2) frutos producidos con agua residual (FAR), cultivados en un invernadero en la comunidad de Tlahuelilpan (20° 08' latitud norte, 99° 14' longitud oeste y altitud de 2050 msnm) estado de Hidalgo, correspondiente al Distrito de Riego Núm. 03 de Tula. Los análisis de agua de pozo y agua residual mostraron los siguientes contenidos respectivamente (en meq·litro⁻¹): calcio (1.39 y 6.22), magnesio (1.23 y 2.05), sodio (1.58 y 4.28), potasio (0.20 y 0.89), carbonatos (no detectados), bicarbonatos (2.0 y 6.87), cloruros (0.5 y 6.72), sulfatos (2.05 y 1.23), boro (0.05 y 1.02 mg·litro⁻¹); así mismo, el pH (7.10 y 6.82) y conductividad eléctrica (0.42 y 1.45 dS·m⁻¹).

Fueron cosechados 128 frutos, 64 de cada tipo de agua de riego en el mes de diciembre, siguiendo criterios comerciales, cuando tenían de 30 a 60 % de la superficie de color rosa o rojo, que corresponde al estado de maduración rosado o *pink* (USDA, 1991). De estos frutos, se tomaron cuatro FAR y cuatro FAP para el análisis inicial de los caracteres evaluados en la investigación, que adelante se describen. Los 60 FAR y 60 FAP restantes, se empacaron en las cajas de cartón de 15 x 23 x 40 cm (20 frutos por caja) para su almacenamiento. Para cada temperatura de almacenamiento se usó una caja por tipo de fruto (FAR y FAP). Así, los seis tratamientos quedaron definidos de la siguiente manera: tratamiento testigo con FAP y tratamiento 1 con FAR, almacenados a 20±2.0 °C y H.R. de 62.8±12.0 %; tratamiento 2 con FAP y tratamiento 3 con FAR, almacenados a 10±1.5 °C y H.R. de 82.2±6.0 %; tratamiento 4 con FAP y tratamiento 5 con FAR almacenados a 4±1.0 °C y H.R. de 90.4±2.5 %.

Después de 10, 20, 30 y 40 días de almacenamiento (dda) los tratamientos se evaluaron con dos tipos de variables: *no destructivas* (pérdida de peso y color), para cuatro repeticiones por tratamiento; y *destructivas* (firmeza, grados Brix o sólidos solubles totales del jugo, la acidez titulable y el pH del mesocarpio del fruto), para cinco

repeticiones por tratamiento, considerando un fruto como unidad experimental. Para determinar el color más representativamente de cada unidad experimental, se tomaron lecturas por duplicado (en lados opuestos de la región ecuatorial del fruto), con un colorímetro MiniScan XE Plus (HunterLab, serie 5348), que proporciona los registros Hunter de L*, a* y b*, con los cuales se calculó el ángulo de tono (*hue*) mediante la fórmula $\text{arc tan } \frac{b^*}{a^*}$ (McGuire, 1992), los resultados se expresan en grados. La pérdida de peso del fruto se evaluó con una balanza granataria digital Lab-Tech Modelo ADP 2100L; los frutos fueron pesados antes de establecer cada tratamiento y posteriormente cada 10 días, para obtener la pérdida de agua acumulada en relación con su peso inicial, expresado en unidades porcentuales (%). La firmeza se determinó indirectamente con un texturómetro universal de la marca Sommer & Ruge KG Berlin-Frideman, con un puntal de acero de sección cónica de 150.07 g de masa, y un tiempo de caída libre de cinco segundos, la distancia de penetración en pulpa de este puntal se registró en milímetros. Los sólidos solubles totales (°Brix) fueron medidos con un refractómetro manual marca Hand Refractometer ATAGO N1 °Brix 0~32 %, empleando para ello dos gotas de jugo del fruto, expresados en °Brix o porcentaje de sólidos solubles totales. Para la medición del pH del fruto se utilizó un potenciómetro de la marca HANNA (pH METER HI 98230); y la acidez titulable se estimó mediante la metodología de AOAC (1995), expresados en porcentaje de ácido cítrico. Estos análisis de calidad física y química fueron realizados en el laboratorio de postcosecha de la UACH.

El experimento se realizó bajo un diseño experimental completamente al azar, en arreglo factorial de 2x3; el prime factor fue el tipo de agua de riego (pozo y residual) y el

segundo factor fue la temperatura de almacenamiento (20, 10 y 4 °C). El análisis estadístico incluyó un análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el programa estadístico SAS (SAS, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ángulo de tono o *hue* del fruto

En el almacenamiento no refrigerado (20 °C), los FAP (testigo) y los FAR (T1) presentaron valores similares de ángulo de tono (*hue*) en todos los muestreos, ambos con un color rojo mayor al estado de maduración “rojo oscuro” (*hue* = 37°) (Cantwell, 2006) (Figura 1). Para el almacenamiento a 10 °C, los FAR (T3) tuvieron menores valores de *hue* (mayor color rojo) que en los FAP (T2) en los muestreos a 10, 20 y 30 dda (ambos en estado de maduración mayor al “rojo oscuro”) (Cantwell, 2006), excepto los FAP a los 10 dda, los cuales tuvieron un menor color rojo. En el almacenamiento a 4 °C, los FAR (T5) tuvieron un menor *hue* (mayor color rojo) que en los FAP (T4), en todos los muestreos. Ambos tipos de frutos presentaron un color mayor al estado de maduración “rojo” (*hue* = 59.3°) (López y Gómez, 2004), excepto los FAP a los 10 dda, los cuales presentaron un menor color rojo. En general, en las dos temperaturas de almacenamiento refrigerado los FAR tuvieron un color más rojo que los FAP.

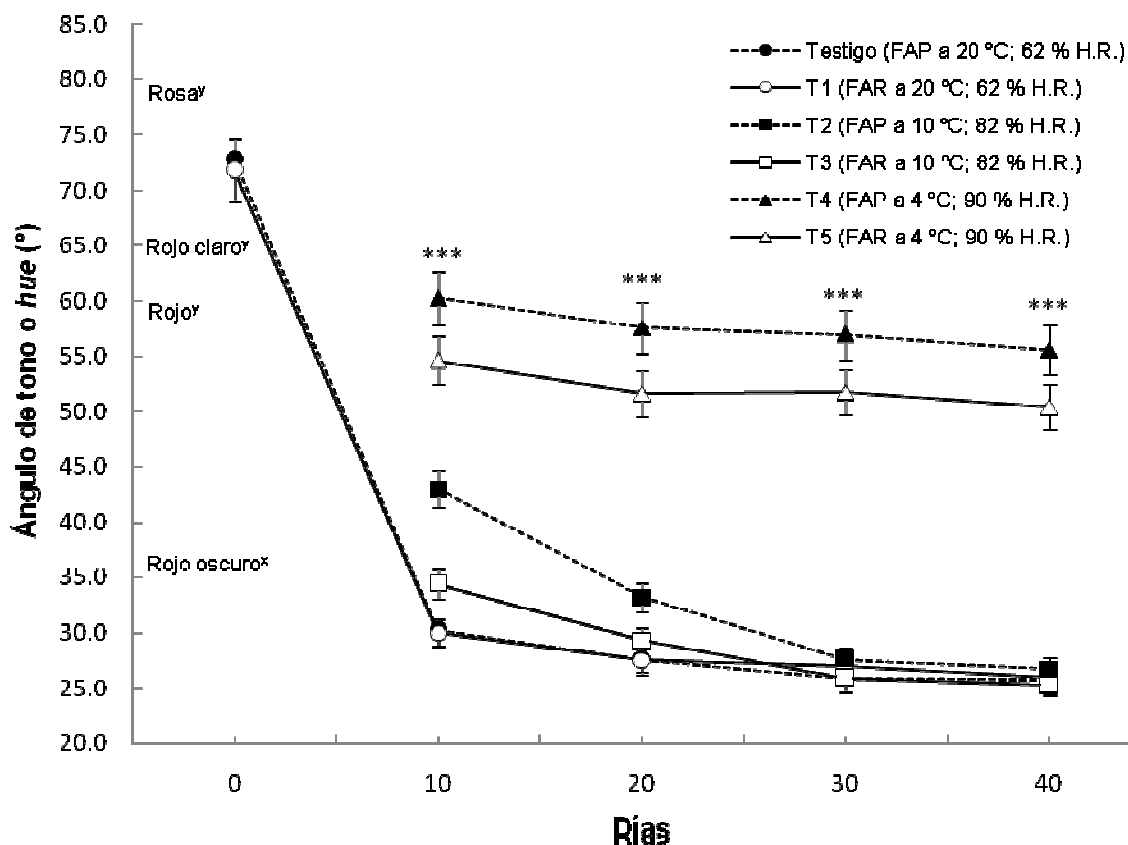


FIGURA 1. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.) en el color (ángulo de tono o *hue*) de frutos de tomate rojo, almacenados durante 40 días. Cada punto representa la media de cuatro repeticiones $\pm$ errores estándar. ***: significativo a una $P \leq 0.001$, de acuerdo con la prueba de Tukey. FAP: frutos producidos con agua de pozo; FAR: frutos producidos con agua residual. ^y: Escala de maduración de acuerdo con López y Gómez (2004); ^x: Escala de maduración de acuerdo con Cantwell (2006).

En el almacenamiento a 4 °C en todos los muestreos, y a 10 °C en los tres primeros muestreos, los FAP tuvieron un color menos rojo; este comportamiento pudo haberse debido a un daño por frío, ya que este desorden se presenta a temperaturas de almacenamiento de 13 °C y menores (Lurie y Klein, 1991; Wang, 1994). Los síntomas característicos son: maduración anormal (Morris, 1982) o falta de maduración,

manchado, decoloración, manchas hundidas y húmedas, ablandamiento interno, pérdida de sabor, aroma y decaimiento (Wang, 1994; Couey, 1982). La maduración del fruto está relacionada con el aumento de pigmentos rojos (Riquelme, 1999), producidos por una reducción de la clorofila y un rápido incremento de licopeno, que es el principal carotenoide de tomate y aporta alrededor del 83 % del color rojo (Urrestarazu, 2004), estos cambios en color del fruto es un atributo importante de calidad (Noodén, 1988). En el caso del mayor desarrollo del color rojo de los FAR, pudo haberse debido a la presencia de una alta conductividad eléctrica en la solución nutritiva (4.83 a $5.41 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), la cual fue menor en la solución nutritiva de los FAP (3.38 a $3.39 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$). Para el agua residual, la mayor conductividad eléctrica es producto de la cantidad de bicarbonatos disueltos, ya que el análisis mostró una concentración de $6.87 \text{ meq}\cdot\text{litro}^{-1}$, que cambia con la presencia de días lluviosos o soleados; mientras que el agua de pozo tuvo una concentración menor ($2.0 \text{ meq}\cdot\text{litro}^{-1}$) la cual es más constante.

Se ha reportado que una alta conductividad eléctrica en el agua de riego (mayor a $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) aunque reduce el tamaño, afecta el peso del fruto y la producción; aumenta el contenido de pigmentos (Mizrahi *et al.*, 1986), se incrementa el contenido de β -caroteno y licopeno (Stamatakis *et al.*, 2003; De Pascale *et al.*, 2003; Fanasca *et al.*, 2007). El licopeno puede incrementar entre 34 a 85 %, aunque el biomecanismo específico de esta deposición en el fruto no es claro, evidencias sugieren que el incremento de antioxidantes es una respuesta fisiológica primaria de la planta al estrés salino (Kubota *et al.*, 2006). Wu y Kubota (2008) mencionan que en tomates maduros rojos, una conductividad eléctrica de $4.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ produjo un incremento de 30 a 40 % en el contenido de licopeno (1.29 - $1.39 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ materia seca), comparada con una conductividad eléctrica de $2.3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ($0.99 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). Krauss *et al.* (2006) y Krauss *et al.*

(2007), reportan que una conductividad eléctrica de 6.5, 10.0 y 13.5 dS·m⁻¹, favorecen la calidad del fruto incrementando el contenido de vitamina C, vitamina E, fenoles, licopeno y β-caroteno. El contenido de potasio en la solución nutritiva también puede mejorar la calidad del tomate, favoreciendo la síntesis del carotenoides, la concentración de licopeno y β-caroteno (Ramírez *et al.*, 2009).

En el almacenamiento a 20 °C, no hubo diferencias entre los FAR y FAP, posiblemente porque a esta temperatura, en general, existe un mayor desarrollo de color y no se percibe una gran diferencia. Chiesa *et al.* (1998), mencionan que existe un mayor desarrollo del color en tomates almacenados a 20 °C que a 10°C, o temperaturas menores ya que este proceso se reduce. Toor y Savage (2006), encontraron que después de 10 días de almacenamiento a 15-25 °C, el contenido de licopeno en tomate rojo fue mayor (7.5 mg·100 g) que a 7 °C (3.2 mg·100 g). Mientras que en rebanadas de tomate almacenadas a 8 y 16 °C, hubo un contenido mayor de licopeno que a 2 y 5 °C (Lana *et al.*, 2005). Esto concuerda con los resultados obtenidos en las diferentes temperaturas de almacenamiento.

Pérdida de peso del fruto (%)

En cada condición de almacenamiento (20, 10 y 4 °C), los FAR y los FAP presentaron el mismo porcentaje de pérdida de peso, en todos los muestreos. Sólo hubo diferencia entre frutos con distinta temperatura de almacenamiento, con una mayor pérdida de peso del fruto en el almacenamiento no refrigerados (20 °C), seguido de los frutos almacenados a 10 °C y al final los frutos almacenados a 4 °C (Cuadro 1). Los resultados obtenidos son similares a los reportados por De Castro *et al.* (2006), quienes indican que el porcentaje de pérdida de peso fue mayor en frutos de tomate

almacenados a 24 °C (4.16 %) en comparación con los almacenados a 13 (1.14 %) y 7 °C (1.56 %), debido principalmente a que a menor temperatura se presenta menor déficit de presión de vapor, entre la del aire de los espacios intercelulares del fruto y la del aire del entorno, lo que reduce la transpiración y la pérdida de peso del fruto. Javanmardi y Kubota (2006) también reportan en tomate, que una baja temperatura de almacenamiento de 5 °C comparada con 12 °C, inhibió la pérdida de peso durante 16 días. Villarreal *et al.* (2002), mencionan que en frutos de tomate almacenados a 20 °C con 70 % HR, la pérdida de peso a nueve días fue de 4.52 %, a 12 días de 5.33 % y a 20 días de 8.65 %; estos resultados concuerdan con los datos obtenidos en el presente estudio.

El límite en la pérdida de peso del fruto de tomate, bajo de la cual, éste pierde aceptación comercial, depende de diferentes características de tamaño y grado de madurez; sin embargo, la pérdida de agua no debe exceder del 7 % de su peso original (Riquelme, 1999), una mayor pérdida de peso afecta negativamente la calidad del fruto. Los resultados de este trabajo muestran que en el almacenamiento a 20 °C hubo un efecto negativo sobre la calidad con una pérdida de peso mayor a 7 % después de 20 dda en ambos tipos de frutos. A 10 °C, después de 30 dda en los FAR y a los 40 dda en los FAP, presentaron este mismo efecto; y para el almacenamiento a 4 °C, este efecto no se presentó aún después de 40 dda en ninguno de los dos tipos de agua.

CUADRO 1. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.), en el porcentaje de pérdida de peso de frutos de tomate rojo, almacenados durante 40 días.

Trat.	Almacenamiento	Pérdida de peso (%)			
		Días de evaluación			
		10	20	30	40
Testigo	FAP a 20 °C y 62 % H.R.	5.75 a ^z	11.44 a	16.90 a	23.59 a
1	FAR a 20 °C y 62 % H.R.	6.37 a	12.82 a	18.83 a	24.12 a
2	FAP a 10 °C y 82 % H.R.	2.27 b	3.89 bc	5.88 bc	7.73 bc
3	FAR a 10 °C y 82 % H.R.	2.91 b	4.81 b	7.40 b	10.77 b
4	FAP a 4 °C y 90 % H.R.	1.38 c	2.96 c	4.74 c	6.67 c
5	FAR a 4 °C y 90 % H.R.	1.27 c	2.50 c	3.90 c	5.32 c
DMS		0.85	1.48	2.14	3.63

^zValores con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.001$. DMS: diferencia mínima significativa; FAP: frutos producidos con agua de pozo; FAR: frutos producidos con agua residual; H.R.: humedad relativa; Trat.: tratamiento.

Firmeza del fruto

La distancia de penetración en pulpa (firmeza) del fruto, fue similar entre los FAP y los FAR, en todos los muestreos. Sólo hubo diferencias entre frutos almacenados a diferentes temperaturas; hubo una mayor distancia de penetración en pulpa (menor firmeza) en los frutos no refrigerados (20 °C), seguido de los almacenados a 10 °C y al final los almacenados a 4 °C (Cuadro 2). En términos generales, la calidad de los frutos depende de una buena firmeza, la cual indica que existe una buena madurez, frescura y que éstos estén libres de magulladuras o daño interno (Edan *et al.*, 1997). González *et al.* (2004), mencionan que la firmeza del fruto así como la firmeza de la pulpa, van disminuyendo desde el estado de verde-maduro al rojo maduro, esta disminución en la firmeza de los tejidos es una consecuencia de la maduración del fruto. Durante el

desarrollo de la maduración, se incrementa la actividad de la enzima poligalacturonasa sobre las pectinas y paredes celulares, ocasionando cambios en los tejidos que provocan el ablandamiento del fruto (González *et al.*, 2004). La firmeza del fruto también se ve afectada por la transpiración, la cual ocasiona que éste pierda agua y al no tener una fuente de suministro (planta madre) pierde turgencia y firmeza (Arias *et al.*, 2000; Villarreal *et al.*, 2002).

Los resultados obtenidos en este trabajo concuerdan con Fraschina *et al.* (1998), quienes reportan que frutos de tomate almacenados a 10 °C mostraron una menor reducción de la firmeza que los almacenados a 20 °C, debido a que a menor temperatura existe un menor déficit de presión de vapor entre la del aire de los espacios intercelulares del fruto y la del aire del entorno, lo cual produce un nivel más bajo de transpiración. Algunos autores han reportado que una alta salinidad puede reducir la firmeza del fruto de tomate (Segura *et al.*, 2009), cuando la conductividad eléctrica de la solución nutritiva se incrementada de 0.25, 2.5, 5.0 y 10 dS·m⁻¹ (Krauss *et al.*, 2006; Mizrahi *et al.*, 1986). Para este trabajo aún cuando la conductividad eléctrica de la solución nutritiva preparada con agua residual fue de 4.83-5.41 dS·m⁻¹, y la de agua de pozo fue de 3.38-3.39 dS·m⁻¹, no hubo diferencias estadísticas en firmeza del fruto.

CUADRO 2. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.), en la firmeza o distancia de penetración en pulpa (mm) de frutos de tomate rojo, almacenados durante 40 días.

Trat.	Almacenamiento	Distancia de penetración en pulpa (mm)				
		Días de evaluación				
		0	10	20	30	40
Testigo	FAP a 20 °C y 62 % H.R.	0.421	0.62 ab	0.77 ab	0.90 a	0.94 ab
1	FAR a 20 °C y 62 % H.R.	0.452	0.69 a ^z	0.84 a	0.92 a	1.08 a
2	FAP a 10 °C y 82 % H.R.	--	0.47 cd	0.58 cd	0.65 bc	0.84 bc
3	FAR a 10 °C y 82 % H.R.	--	0.55 bc	0.65 bc	0.81 ab	0.87 ab
4	FAP a 4 °C y 90 % H.R.	--	0.44 d	0.50 d	0.55 c	0.60 d
5	FAR a 4 °C y 90 % H.R.	--	0.44 d	0.47 d	0.52 c	0.63 cd
DMS			0.08	0.14	0.17	0.21

^zValores con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.001$. DMS: diferencia mínima significativa; Trat.: tratamiento; FAP: frutos producidos con agua de pozo; FAR: frutos producidos con agua residual; H.R.: humedad relativa.

Sólidos solubles totales (SST) del fruto (°Brix)

De los frutos almacenados a 20 °C, los FAR (T1) estadísticamente tuvieron un mayor contenido de sólidos solubles totales expresados en °Brix, en relación a los FAP (testigo) en todos los muestreos (Figura 2); para los frutos almacenados a 10 °C, los FAR (T3) también tuvieron un mayor contenido de SST que los FAP (T2), aunque sólo a los 30 y 40 dda; en tanto que para los frutos almacenados a 4 °C, los FAR (T5) también mostraron un mayor contenido de SST que los FAP (T4), pero únicamente a los 30 dda. En general, en las tres temperaturas de almacenamiento y en todos los muestreos, la concentración de SST fue mayor para los producidos con agua residual que para los frutos producidos con agua de pozo. Los sólidos solubles totales están compuestos por

azúcares solubles en forma de fructosa en 25 % y de glucosa en 22 %, y los ácidos orgánicos en forma de cítrico y málico (13 %); estas concentraciones van a determinar el sabor y aroma del fruto de tomate (Davies y Hobson, 1981; Urrestarazu, 2004). Los SST son un parámetro de calidad del fruto que varía con la maduración (Noodén, 1988), el cultivar, nutrición de la planta, conductividad eléctrica de la solución nutritiva, estrés hídrico (Mitchell *et al.*, 1991; Nichols *et al.*, 1995; Urrestarazu, 2004), y el daño por frío durante el almacenamiento (a temperaturas entre 13 y 10 °C o menores), como resultado de un desorden fisiológico por lo que se induce una maduración anormal, la pérdida de sabor y el aroma (Wang, 1994; Morris, 1982; Couey, 1982). De acuerdo con Cantwell (2006), los frutos de tomate rojo fresco deben contener de 3.5 a 7.0 °Brix, pero estos valores a diferentes días de almacenamiento pueden variar. González *et al.* (2004) mencionan que el contenido de SST se incrementa desde el estado verde-maduro hasta alcanzar la maduración total del fruto de tomate, lo cual concuerda con los resultados obtenidos. En la presente investigación, el mayor contenido de SST de los frutos producidos con agua residual, pudo deberse a que la solución nutritiva presentó una conductividad eléctrica mayor ($4.83\text{-}5.41\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) que a la solución nutritiva de los frutos producidos con agua de pozo ($3.38\text{-}3.39\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$). Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Stamatakis *et al.* (2003) y Segura *et al.* (2009), quienes mencionan que el agua para riego con alta conductividad eléctrica (valores mayores a $2.5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) desde 3.0 (Magán *et al.*, 2008) hasta $10\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, incrementan la cantidad de SST del fruto (Yurtseven *et al.*, 2005), el contenido de vitamina C y los ácidos orgánicos (Krauss *et al.*, 2006). Fanasca *et al.* (2007), mencionan que una conductividad eléctrica de $8\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ produce un incremento en la acidez titulable, glucosa, fructosa y ácido cítrico, componentes que tienen un impacto fuerte en el sabor y los beneficios para la

salud en el consumo de tomate. Wu y Kubota (2008) mencionan que una conductividad eléctrica de $4.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y la reducción del flujo de agua hacia el fruto ocasiona un estrés por sales y/o osmótico, que producen un incremento en la concentración de fructosa, glucosa y SST de frutos de tomate; así mismo, altas conductividades eléctricas (6.5, 10.0 ó $13.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), también favorece el incremento en el contenido de otros compuestos como los fenoles y vitamina E (Krauss *et al.*, 2007).

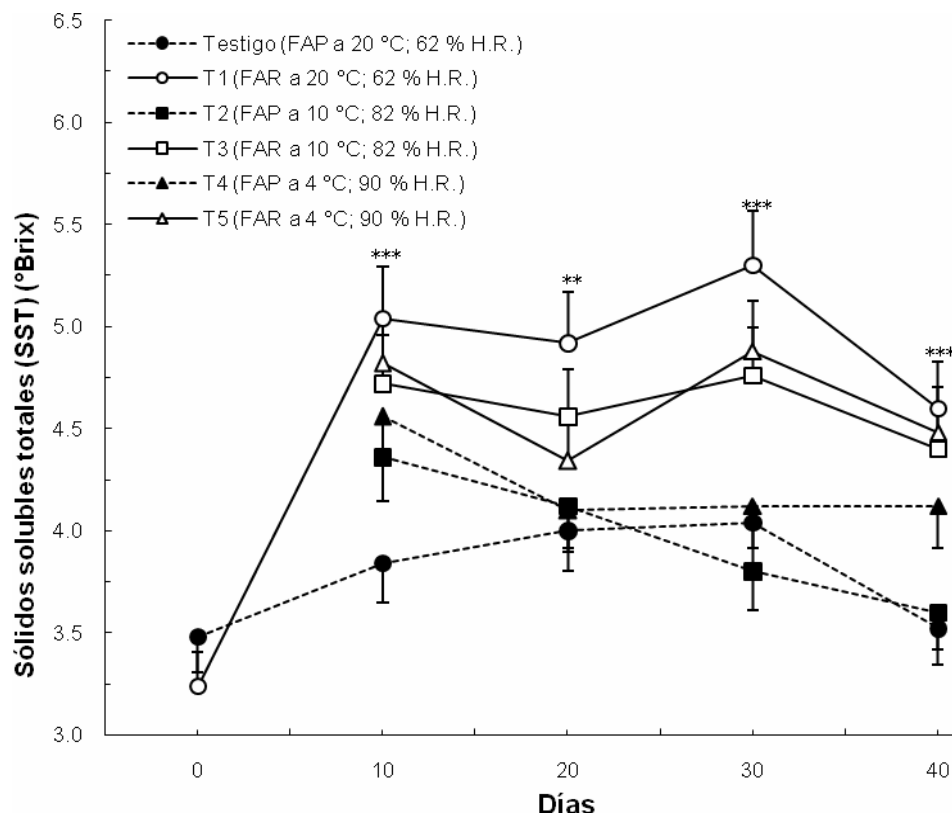


FIGURA 2. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.) en el contenido de sólidos solubles totales o °Brix de frutos de tomate rojo. Cada punto representa la media de cinco repeticiones $\pm$ errores estándar. **, ***: significativo a una $P \leq 0.01$ y $P \leq 0.001$, de acuerdo con la prueba de Tukey. FAP: frutos producidos con agua de pozo; FAR: frutos producidos con agua residual.

Acidez titulable del fruto (AT)

En los frutos almacenados a 20 y 10 °C, tanto los frutos producidos con agua de pozo como los frutos producidos con agua residual, presentaron valores de acidez titulable (AT = porcentaje de ácido cítrico) similares en cada muestreo. Para el almacenamiento a 4 °C, los FAP (T4) presentaron estadísticamente una mayor AT que los FAR (T5), pero únicamente hasta 20 dda (Cuadro 3). En los frutos almacenados a 4 y 10 °C durante los 10, 20 y 30 dda, se observaron mayores valores de AT particularmente en los FAP; una mayor acidez titulable en el fruto bajo estas condiciones de almacenamiento, es una manifestación de daño por frío (Wang, 1982). Dicho comportamiento es similar a lo reportado por Thorne y Efiuvwevwere (1988), quienes mencionan que la acidez titulable se incrementa con el tiempo de almacenamiento a temperaturas de daño por frío (de 13 °C y menores), y se reducen a temperaturas más cálidas (19 °C). Esto hace suponer que por alguna razón el riego con agua residual repercutió positivamente mitigando la manifestación de este daño por frío, al presentar menor acidez titulable en los frutos producidos con agua residual. Hidalgo *et al.* (1998) reportan que para la industria los frutos de tomate no deben tener una acidez titulable mayor al 0.2 %; mientras que Cantwell (2006) indica que la AT en tomate fresco puede ser de 0.2-0.6 %. En tomate fresco hidropónico Dobricevic *et al.* (2007), encontraron valores de AT de 0.19 a 0.45 % y Arias *et al.* (2000), de 0.63 %. Villarreal *et al.* (2002), en tomates almacenados a 20 °C reportan que a 15 dda los frutos tuvieron una acidez titulable de entre 0.35 y de 0.44 %; disminuyendo a los 22 dda hasta 0.32 a 0.41 %. González *et al.* (2004), mencionan que la AT es un parámetro que disminuye con el estado de maduración del fruto (verde-inmaduro al rojo maduro) y con el tiempo de almacenamiento, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en la presente

investigación. La salinidad evaluada mediante conductividad eléctrica de la solución nutritiva también puede afectar la acidez titulable. Magán *et al.* (2008) encontraron que con una conductividad de $3.3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ los frutos de tomate tuvieron mayor acidez titulable. Fanasca *et al.* (2007), mencionan que una conductividad de $8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en la zona radical tiene un impacto más fuerte en el sabor del fruto, en virtud de que se incrementan la AT y ácido cítrico, así como, los contenidos de glucosa y fructosa. En el almacenados a 10 y 4 °C, aun cuando los frutos producidos con agua residual tuvieron una solución nutritiva con una conductividad eléctrica alta ($4.83\text{-}5.41 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), éstos presentaron valores de acidez titulable menores que en los frutos producidos con agua de pozo.

CUADRO 3. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.), en la acidez titulable de frutos de tomate rojo, almacenados durante 40 días.

Trat.	Almacenamiento	Acidez titulable (ácido cítrico %)				
		Días de evaluación				
		0	10	20	30	40
Testigo	FAP a 20 °C y 62 % H.R.	0.399	0.38 a ^{NS}	0.27 c ^{***}	0.30 b ^{**}	0.27 a ^{NS}
1	FAR a 20 °C y 62 % H.R.	0.403	0.36 a ^z	0.28 c	0.32 b	0.27 a
2	FAP a 10 °C y 82 % H.R.	--	0.41 a	0.36 b	0.40 ab	0.29 a
3	FAR a 10 °C y 82 % H.R.	--	0.37 a	0.31 bc	0.33 b	0.30 a
4	FAP a 4 °C y 90 % H.R.	--	0.37 a	0.43 a	0.44 a	0.36 a
5	FAR a 4 °C y 90 % H.R.	--	0.35 a	0.36 b	0.39 ab	0.36 a
DMS			0.09	0.07	0.11	0.09

^zValores con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P\leq 0.001$. ^{NS}, **, ***; no significativo, significativo a una $P\leq 0.01$ y $P\leq 0.05$, respectivamente. DMS: diferencia mínima significativa; Trat.: tratamiento; FAP: frutos producidos con agua de pozo; FAR: frutos producidos con agua residual; H.R.: humedad relativa.

pH del fruto

Tanto en el almacenamiento no refrigerado a 20 °C como en el almacenamiento a 10 y 4 °C, los frutos producidos con agua residual como los frutos producidos con agua de pozo presentaron valores de pH del fruto similares, en todos los muestreos (Cuadro 4). Así mismo, no hubo diferencias entre temperaturas de almacenamiento, excepto para los frutos almacenados a 4 °C por 20 dda, los cuales tuvieron un pH mayor a los frutos almacenados a 20 y 10 °C. En general, el pH del fruto fue incrementado con el tiempo de almacenamiento; estos resultados concuerdan con González *et al.* (2004), quienes mencionan que el pH del fruto de tomate es un parámetro que se incrementa con la maduración del fruto y con el tiempo de almacenamiento.

Para la industria se reporta que los frutos de tomate deben tener un pH de 4.4 (Hidalgo *et al.*, 1998), mientras que para tomate en fresco debe ser de entre 4.17 a 4.59 (Cantwell, 2006); estos valores son similares a los registrados en esta investigación. Otras investigaciones, usando agua residual en la producción de tomate, reportan que este tipo de agua no afectó el pH del fruto (Traka-Mavrona *et al.*, 1998; Al-Lahhamo *et al.*, 2003), lo cual coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio.

CUADRO 4. Efecto del tipo de agua de riego (pozo o residual), temperatura y humedad relativa de almacenamiento (20 °C, 62 % H.R.; 10 °C, 82 % H.R.; 4 °C, 90 % H.R.), en el pH de frutos de tomate rojo, almacenados durante 40 días.

Trat.	Almacenamiento	pH del fruto				
		Días de evaluación				
		0	10	20	30	40
Testigo	FAP a 20 °C y 62 % H.R.	3.73	4.12 b [*]	4.26 b ^{***}	4.43 a ^{NS}	4.71 a ^{NS}
1	FAR a 20 °C y 62 % H.R.	4.22	4.21 ab ^z	4.24 b	4.61 a	4.65 a
2	FAP a 10 °C y 82 % H.R.	--	4.32 ab	4.25 b	4.56 a	4.53 a
3	FAR a 10 °C y 82 % H.R.	--	4.34 a	4.14 b	4.37 a	4.48 a
4	FAP a 4 °C y 90 % H.R.	--	4.21 ab	4.43 a	4.46 a	4.66 a
5	FAR a 4 °C y 90 % H.R.	--	4.24 ab	4.43 a	4.53 a	4.59 a
DMS			0.22	0.14	0.35	0.24

^zValores con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.001$. ^{NS}, ^{*}, ^{***}; no significativo, significativo a una $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.001$, respectivamente. DMS: diferencia mínima significativa; Trat.: tratamiento; FAP: frutos producidos con agua de pozo; FAR: frutos producidos con agua residual; H.R.: humedad relativa.

CONCLUSIONES

El uso de agua residual en la producción de tomate rojo hidropónico produjo un efecto favorable en el color, contenido de sólidos solubles y acidez titulable del fruto (hubo reducción del efecto negativo del almacenamiento a bajas temperaturas). Los frutos producidos con agua residual registraron un color más rojo (valores menores de *hue*) en el almacenamiento a 4 y 10 °C; así mismo, tuvieron un mayor contenido de sólidos solubles totales que los frutos producidos con agua de pozo. La acidez titulable fue menor en los frutos producidos con agua residual, particularmente en los refrigerados a 4 y 10 °C durante 10, 20 y 30 dda, que en los frutos producidos con agua de pozo. El tipo de agua de riego (pozo o residual), no afectó el porcentaje de pérdida de peso, la firmeza (distancia de penetración en la pulpa) y el pH del fruto.

LITERATURA CITADA

- AL-LAHHAM, O.; EL ASSI, N. M.; FAYYAD, M. 2003. Impact of treated wastewater irrigation on quality attributes and contamination of tomato fruit. *Agricultural Water Management*. 61(1): 51-62.
- ANÓNIMO, 2002. Estudio Complementario del Caso Mezquital, Estado de Hidalgo, Proyecto Regional. Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial. Convenio IDRC – OPS/HEP/CEPIS. México. 52 p.
- AOAC. 1995. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, (method 942.15 A). chapter 37. Arlington, Virginia. USA. 10 p.
- ARIAS, R.; LEE, T. C.; SPECCA, D.; JANES, H. 2000. Quality comparison of hydroponic tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) ripened on and off vine. *Journal of Science* 65(3): 545-548.
- CANTWELL, M. 2006. Report to the California tomato commission tomato variety trials: Postharvest evaluation for 2005. UCCE Fresh market tomato statewide report. California USA. 14 p.
- CHIESA, A.; SACKMANN VARELA, M.; FRASCHINA, A. 1998. Acidity and pigment changes in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit ripening. *Acta Hort.* 464:487-487.
- COUEY, H. M. 1982. Chilling injury of crops of tropical and subtropical origin. *HortScience* 17:162-165.

- CUADRA, M. J. 1981. Agricultural Land Irrigation with Wastewater in the Mezquital Valley, pp. 217-248. *In: Municipal Wastewater in Agriculture*. D'ITRI, F. M. (ed.). Academic Press. New York, USA.
- CUENCA-ADAME, E.; Riestra-Díaz, D.; Pérez-Mangas, J. M.; EcheGARay-Aleman, A. 2001. Uso de aguas residuales y control de organismos patógenos en la producción de cebolla. *Agrociencia* 35: 255-265.
- DAVIES, J. N.; HOBSON, G. E. 1981. The constituents of tomato fruit, the influence of environment, nutrition and genotype. *CRC. Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 15: 205-280.
- DE CASTRO, L. R.; CORTEZ, L. A. B.; VIGNEAULT, C. 2006. Effect of sorting, refrigeration and packaging on tomato shelf life. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 4 (1): 70-74.
- DE PASCALE, S.; MAGGIO, A.; ANGELINO, G.; GRAZIANI, G. 2003. Effect of salt stress on water relations and antioxidant activity in tomato. *Acta Horticulturae* 613: 39-46.
- DOBRICEVIC, N.; VOCA, S.; BENKO, B.; PLIESTIC, S. 2007. The quality of fresh tomato fruit produced by hydroponic. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 72(4): 351-355.
- EDAN, Y.; PASTERNAK, H.; SHMULEVICH, I.; RACHMANI, D.; GUEDALIA, D.; GRINBERG, S.; FALLIK, E. 1997. Color and firmness classification of fresh market tomatoes. *Journal of Food Science* 32(4): 793-796.
- FANASCA, S.; MARTINO, A.; HEUVELINK, E.; STANGHELLINI, C. 2007. Effect of electrical conductivity, fruit pruning, and truss position on quality in greenhouse tomato fruit. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 82(3): 488-494.

- FLORES M., J. P. 2006. Aguas residuales utilizadas en la producción agropecuaria del Valle de Juárez, Chihuahua. pp. 55-67. *In*: SALAS P. M., J. (ed.), Nuevos Estudios sobre Agua y Medio Ambiente en Ciudad Juárez. Vol. III, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Ciudad Juárez, México.
- FRASCHINA, A.; VARTORELLI, F.; MOCCIA, S.; MÓNACO, E.; CHIESA, A. 1998. Effect of maturity stage and temperature during tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) storage. *Acta Hort.* 464:486-486
- GONZÁLEZ CÉSPEDES, A.; SALAS SANJUÁN, M. del C.; URRESTARAZU GAVILÁN, M. 2004. Producción y calidad en el cultivo de tomate cherry. pp. 703-747. *In*: Tratado de Cultivos sin Suelo. URRESTARAZU GAVILÁN, M. (ed.). Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- HIDALGO GONZÁLEZ, J. C.; ALCANTARA GONZALES, G.; BACA CASTILLO, G. A.; SÁNCHEZ GARCÍA, P.; ESCALANTE ESTRADA, A. 1998. Efecto de la condición nutrimental de las plantas y de la composición, concentración y pH del fertilizante foliar, sobre el rendimiento y calidad en tomate. *Terra* 16(2): 143-148.
- JAVANMARDI, J.; KUBOTA, CH. 2006. Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest storage. *Postharvest biology and technology* 41(2): 151-155.
- JIMÉNEZ C., B.; SIEBE G., CH.; CIFUENTE G., E. 2005. El Reúso Intencional y no Intencional del Agua en el Valle de Tula. pp. 33-55. *In*: El Agua en México Vista desde la Academia. JIMÉNEZ, B.; MARÍN, L. (eds.). Ed. Academia Mexicana de Ciencias. México D.F., México.

- JIMÉNEZ, B.; CHÁVEZ, A. 2004. Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: "El Mezquital Valley" case. *Water Science and Technology* 50(2): 269-276.
- KRAUSS, S.; SCHNITZLER, W. H.; GRASSMANN, J.; WOITKE, M. 2006. The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless system on inner and outer fruit quality characteristics of tomato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54(2): 441-448.
- KRAUSS, S.; SCHNITZLER, W. H.; GRASSMANN, J.; WOITKE, M. 2007. Fruit quality characteristics of tomatoes at different EC values in a simplified recirculating soilless system. *Acta Hort.* 747: 457-463.
- KUBOTA, C.; THOMSON, C. A.; WU, M.; JAVANMARDI, J. 2006. Controlled environments for production of value-added food crops with high phytochemical concentrations: Lycopene in tomato as an example. *HortScience* 41(3): 522-525.
- LANA, M. M.; VAN KOOTEN, O.; DEKKER, M.; SUURS, P; LINSSEN, R. F. A. 2005. Effects of cutting and maturity on lycopene concentration of fresh-cut tomatoes during storage at different temperature. *Acta Hort.* 682:1871-1878.
- LÓPEZ C., A. F.; GÓMEZ, P. A. 2004. Comparison of color indexes for tomato ripening. *Horticultura Brasileira* 22(3): 534-537.
- LURIE, S.; KLEIN, J. D. 1991. Acquisition of low-temperature tolerance in tomatoes by exposure to high-temperature stress. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116: 1007-1012.
- MAGÁN, J. J.; GALLARDO, M.; THOMPSON, R. B.; LORENZO, P. 2008. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in

- greenhouses in Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management* 95(9): 1041-1055.
- McGUIRE, R. G. 1992. Reporting of objective color measurement. *HortScience* 27: 1254-1255.
- MITCHELL, J. P.; SHENNAN, C.; GRATTAN, S. R.; MAY, D. M. 1991. Tomato fruit yield and quality under water deficit and salinity. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 116: 215-221.
- MIZRAHI, Y.; ARAD, S.; MIZRAHI, Y.; ZOHAR, R. 1986. Salinity as a possible means of improving fruit quality in slow-ripening tomato hybrids. *Acta Hort.* 190: 223-224.
- MORRIS, L. L. 1982. Chilling injury of horticultural crops: an overview. *Hortscience* 17: 161-162.
- NICHOLS, M. A.; FADALIA, E. F.; FISHER, K. J.; MORGAN, L. M. 1995. The effect of osmotic stress on the yield and quality of tomatoes. *Acta Horticulturae* 379: 105-111.
- NOODÉN, L. D. 1988. The phenomena of senescence and aging. pp. 1-50. *In*: NOODÉN, L. D.; LEOPOLD, A. C. (eds.). *Senescence and Aging in Plants*. Academic Press, San Diego, California. USA.
- RAMÍREZ S., L. F.; MURO E., J.; SÁNCHEZ G., P. 2009. Potassium affects the lycopene and β -carotene concentration in greenhouse tomato. *Acta Hort.* 821: 223-228.
- RIQUELME B., F. 1999. Postcosecha del tomate para consumo en fresco. pp. 589-623. *In*: *El Cultivo del Tomate*. NUEZ, F. (ed.). Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- SAS. 2000. SAS. User's guide. Versión 8.1. SAS. Institute Inc. Cary, NC. USA. 1290 p.

- SEGURA, M. L.; CONTRERAS, J. I.; SALINAS, R.; LAO, M. T. 2009. Influence of salinity and fertilization level on greenhouse tomato yield and quality. *Soil Science and Plant Analysis* 40(1-6): 485-497.
- STAMATAKIS, A., PAPADANTONAKIS, N., SAVVAS, D., LYDAKIS-SIMANTIRIS, N.; KEFALAS, P. 2003. Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. *Acta Hort.* 609: 141-147.
- THORNE, S. N.; EFIUVWEVWERE, B. J. O. 1988. Changes in organic acids in chilled tomato fruit (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 44(4): 309-319.
- TOOR R., K.; SAVAGE G., P. 2006. Changes in major antioxidant components of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chemistry* 99(4): 724-727.
- TRAKA-MAVRONA, E. K.; MALOUPA, E.; PAPADOPOULOS, F.; PAPADOPOULOS, A. 1998. Response of greenhouse tomatoes to wastewater fertigation in soilless cultivation. *Acta Hort.* 458:411-416.
- TZORTZAKIS, N. G.; ECONOMAKIS, C. D. 2008. Impacts of the substrate medium on tomato yield and fruit quality in soilless cultivation. *Hort. Sci.* 35 (2): 83-89.
- URRESTARAZU G., M. 2004. *Tratado de Cultivos sin Suelo*. Edit. Mundi-Prensa. 3ª edición. Madrid, España. 914 p.
- USDA. 1991. United States. Standards for Grades of Fresh Tomatoes. USDA, Agr. Mktg. Serv., Washington, DC. 13 p.
- VILLARREAL ROMERO, M.; GARCÍA ESTRADA, R. S.; OSUNA ENCISO, T.; ARMENTA BOJORQUEZ, A. D. 2002. Efecto de dosis y fuente de nitrógeno en rendimiento y calidad postcosecha de tomate en fertirriego. *Terra* 20(3): 311-320.

- VIVANCO E., R. A.; F. GAVI R.; J.J. PEÑA C.; J. DE J. MARTÍNEZ H. 2001. Flujos de nitrógeno en el suelo cultivado con forraje y regado con agua residual urbana. *Terra Latinoamericana* 19(4): 301-308.
- WANG, C. Y. 1982. Physiological and biochemical responses of plants to chilling stress. *HortScience* 17(2): 173-186.
- WANG, C. Y. 1994. Chilling injury of tropical horticultural commodities. *HortScience* 29: 986-988.
- WU, M.; KUBOTA, CH. 2008. Effects of high electrical conductivity of nutrient solution and its application timing on lycopene, chlorophyll and sugar concentrations of hydroponic tomatoes during ripening. *Scientia Horticulturae* 116(2): 122-129.
- YURTSEVEN, E; KESMEZ, G. D.; ÜNLÜKARA, A. 2005. The effects of water salinity and potassium levels on yield, fruit quality and water consumption of a native central Anatolian tomato species (*Lycopersicon esculentum*). *Agricultural Water Management* 78(1-2): 128-135.

CAPITULO II. AGUA RESIDUAL, UNA ALTERNATIVA PARA LA PRODUCCIÓN DE TOMATE HIDROPÓNICO EN INVERNADERO

WASTEWATER, AN ALTERNATIVE FOR THE HYDROPONIC TOMATO PRODUCTION IN GREENHOUSE

RESUMEN

Con el objetivo de estudiar la posibilidad del uso del agua residual como una alternativa en la producción de tomate (*Solanum lycopersicon* L.) hidropónico bajo invernadero, se evaluó el efecto de este tipo de agua sobre algunos componentes del rendimiento y tamaño del fruto. Se usaron: a) una solución nutritiva preparada con agua residual (N1) en plantas cultivadas en arena de tezontle (N1S1) y en suelo agrícola (N1S2); y b) otra solución nutritiva preparada con agua de pozo (N2) en plantas cultivadas en arena de tezontle (N2S1 = testigo) y en suelo agrícola (N2S2). La variedad utilizada fue Sun-7705 de crecimiento indeterminado, y despuntadas al sexto racimo. Para todas las variables evaluadas (componentes del rendimiento) el testigo (hidroponía tradicional) fue mayor a los otros tratamientos, tanto el cultivo en sustrato, como en suelo. Las plantas irrigadas con agua residual cultivadas sustrato y en suelo, presentaron valores estadísticamente similares en las variables: diámetro ecuatorial del fruto (51.85 y 53.73 mm), diámetro polar el fruto (64.71 y 66.04 mm), peso promedio del fruto (94.95 y 102.79 g) y racimo (534.01 y 599.20 g), y producción por planta (3.20 y 3.59 kg⁻¹). De igual manera en el rendimiento por m⁻² (19.22 y 21.57 kg⁻¹), por cama de cultivo de 55.2 m⁻² (986.86 y 1 107.33 kg⁻¹) y por 1000 m⁻² (7 894.90 y 8 858.60 kg⁻¹), y rendimiento por ha⁻¹ de invernadero (78.95 y 88.59 ton⁻¹). Las estimaciones realizadas indicaron que cuando si se usara agua residual y un manejo a 12 racimos por planta en cultivo en sustrato y en suelo se podrían obtener rendimientos de 157.89 y 177.17 ton·ha⁻¹ respectivamente. También se obtuvieron un mayor número de frutos en las plantas cultivadas en suelo y regadas con agua residual. Los resultados mostraron que el uso de agua residual en cultivo hidropónico de tomate puede ser una alternativa de producción para la zona.

PALABRA CLAVE: *Solanum lycopersicon* L., producción, salinidad, conductividad eléctrica, tezontle y suelo agrícola.

SUMMARY

In order to consider the use of wastewater as an alternative in the hydroponic tomato (*Solanum lycopersicon* L.) production produce under greenhouse, the effect of wastewater was evaluated on some components of yield and the fruit size. Were used: a) a nutritive solution prepared with wastewater (N1) in plants cultivated in tezontle sand (N1S1) and agricultural soil (N1S2); and b) another nutritive solution prepared with water well (N2) in plants cultivated in tezontle sand (N2S1 = control) and agricultural soil (N2S2). The variety used was Sun-7705 indeterminate growth, until sixth cluster per plant. For all the variables evaluated the control (traditional hydroponics) was greater than other treatments, both sand and agricultural soil cultivation. Plants irrigated with wastewater cultivated in sand and soil, presented statistically similar values in variables: fruit equatorial diameter (51.85 and 53.73 mm), fruit polar diameter (64.71 and 66.04 mm), fruit weight average (94.95 and 102.79 g) and cluster weight average (534.01 and 599.20 g), and plant production (3.20 and 3.59 kg⁻¹). Similarly yield by m⁻²·kg⁻¹ (19.22 and 21.57), by bed cultivation of 55.2 m⁻² (986.86 and 1 107.33 kg⁻¹) and 1000 m⁻² (7 894.90 and 8 858.60 kg⁻¹), and yield per greenhouse ha⁻¹ (78.95 and 88.59 ton⁻¹). The estimates indicated that when using handling to 12 racemes per plant in soil and substrate cultivation and using wastewater irrigation it could obtain yields of 157.89 and 177.17 ton·ha⁻¹ respectively. Plants irrigated with wastewater and cultivated in sand and agricultural soil had more fruit per plant. The results showed that the use of wastewater in hydroponic tomato can be a production alternative for the zone.

KEYWORD: *Solanum lycopersicon* L., production, salinity, conductivity, tezontle and agricultural soil.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el problema del agua es de tal relevancia que se puede afirmar que la disponibilidad y manejo de este recurso fijarán los márgenes del desarrollo sustentable (Jiménez y Marín, 2005). La irrigación con agua residual en la agricultura se realiza en muchas partes del mundo, estimaciones recientes indican que a nivel mundial existen unos 20 millones de hectáreas irrigadas usando agua residual sin tratamiento, tratada, y/o parcialmente diluida (Hamilton *et al.*, 2006). La escases de agua para riego en México y a nivel mundial a motivado el uso de agua residual como una alternativa para la producción de alimentos (Cuenca-Adame *et al.*, 2001).

En México, el agua es usada en diferentes actividades como la agricultura el (78 %), para fines públicos urbanos (11.5 %), en la industria (8.5 %), y para fines pecuarios y la acuicultura (2 %) (Jiménez y Marín, 2005). En la Ciudad de México, 80 % del agua se emplea para fines municipales, 5 % en la industria y 15 % para riego, lo que genera en promedio anual $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de aguas residuales, de las cuales se tratan alrededor de $6.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, que se reusan dentro del Valle de México; los $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ restantes de aguas negras que salen del valle sin tratar, se emplean para el riego del Valle de Tula (Mezquital), Chiconautla y Zumpango, así como para alimentar la Presa Endhó ($1.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (Jiménez *et al.*, 2005a). Para México el lugar con una mayor extensión donde se usa agua residual para el riego agrícola es la zona del Valle del Mezquital con aproximadamente unas $100\,000 \text{ ha}^{-1}$ ($5 \times 10^7 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$), con una mezcla de agua residual y agua de lluvia (Vivanco-Estrada *et al.*, 2001).

El agua residual es usada por los agricultores, no sólo por la necesidad del líquido, sino por que incrementa la productividad ya que contiene materia orgánica, nitrógeno y fósforo (Jiménez *et al.*, 2005b). Al respecto, Méndez-García *et al.* (2000) mencionan

que el uso de agua residual sin aplicación de fertilizantes produce altos rendimientos en hortalizas. Para la zona del Valle del Mezquital, el riego a campo abierto con agua residual sin tratamiento, parcialmente tratada o mezclada con agua de lluvia, ha producido un incremento en el rendimiento de algunas hortalizas como en frijol (28 %), chile (71 %) y tomate rojo (94 %) (Anónimo, 2002; Jiménez *et al.*, 2005b). Se han usado aguas residuales tratadas en sistema hidropónico, en otros países como Venezuela, para cultivos hortícolas como pepino y pimiento (Morillo *et al.*, 2009a; 2009b).

En condiciones de campo abierto, la irrigación con agua residual ha mostrado un efecto favorable en el rendimiento del cultivo de tomate rojo, en comparación con el cultivo tradicional, sin embargo, en condiciones de cultivo hidropónico falta información sobre los efectos en el rendimiento de este cultivo. De acuerdo a lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue: estudiar el efecto del agua residual y del medio de cultivo (arena tezontle y suelo) en invernadero sobre algunos parámetros de rendimiento como una alternativa en la producción de tomate hidropónico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó durante los meses de junio a diciembre de 2008, en un invernadero de 1000 m², con cubierta de plástico blanco lechoso a 75 % de luz, temperatura de 18-35 °C y humedad relativa de 45-80 %, en la comunidad de Tlahuelilpan (20° 08' latitud norte, 99° 14' longitud oeste y altitud de 2050 msnm) del estado de Hidalgo, correspondiente al Distrito de Riego Núm. 03 de Tula. Se realizó el análisis de agua y suelo, para lo cual se tomaron dos tipos muestras: 1) agua de pozo (muestra tomada de la cisterna) y agua residual (muestra tomada de los canales de riego); 2) muestras de suelo agrícola regado con agua de pozo y suelo agrícola regado

con agua residual, en el invernadero donde se realizó el experimento. Los análisis de todas las muestras se realizaron en el Laboratorio de Central Universitario de la Universidad Autónoma Chapingo.

Se utilizaron plantas de tomate rojo, tipo saladette, de la variedad Sun-7705 (Sun seeds) de crecimiento indeterminado, sembradas en charolas germinadoras en mes de junio. A los 30 días después de la siembra (julio), una parte de las plantas fueron trasplantadas en suelo agrícola, y otra parte en bolsas de 40x35 cm con sustrato de arena de tezontle, con una planta por cepa o por bolsa respectivamente. La distancia de siembra fue de 30 cm entre plantas, 60 cm entre hileras (6 plantas m^{-2}), y 1.2 m entre pasillos. Las camas de cultivo fueron de $1.2 \text{ m} \times 23 \text{ m} = 27.6 \text{ m}^2$, hasta la mitad del invernadero, por lo que se tiene 55.2 m^2 a lo largo del invernadero de 50 m, donde se tuvieron un total de 4 258 plantas para $1\,000 \text{ m}^2$.

Se fertilizó y regó con soluciones nutritivas preparadas con agua de pozo y agua residual dependiendo del tratamiento, mediante sistemas de riego por goteo. Las concentraciones de nutrientes en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ fueron: nitrógeno 306, fósforo 90, potasio 263, calcio 303, azufre 148, magnesio 85, hierro 4.0, manganeso 1.0, boro 0.5, cobre 0.5 y zinc 0.5. El pH y conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva preparada con agua de pozo durante el ciclo de cultivo varió entre 6.0-7.2 y $3.38\text{-}3.39 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ respectivamente; mientras que en la solución nutritiva preparada con agua residual fue de entre 6.0-8.0 y $4.83\text{ a }5.41 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ respectivamente.

Dependiendo de la edad de la planta y las condiciones climáticas, se regó diariamente con $4\text{ a }15 \text{ litros}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$, con las soluciones respectivas de acuerdo a los tratamientos. Todas las plantas del experimento se condujeron a seis racimos a los cuales las plantas fueron despuntadas a los 156 días después del trasplante (ddt). Hubo raleo de frutos

pequeños que dando entre cinco y siete frutos por racimo. Los frutos fueron cosechados cuando estaban en estado de maduración rosa a rojo.

Los tratamientos fueron asignados a partir de la combinación de las condiciones de cultivo del tomate: a) tipo de agua de riego para preparar la solución nutritiva (pozo o residual) y b) el tipo de sustrato de cultivo (arena de tezontle o suelo agrícola). Por lo cual, los tratamientos quedaron de la siguiente manera: *tratamiento 1* (N1S1) = solución nutritiva preparada con agua residual + cultivo en arena de tezontle; *tratamiento 2* (N1S2) = solución nutritiva preparada con agua residual + cultivo en suelo agrícola; *tratamiento 3* (N2S2) = solución nutritiva preparada con agua de pozo + cultivo en suelo agrícola; y *tratamiento testigo* (N2S1) = solución nutritiva preparada con agua de pozo + cultivo en arena de tezontle.

Las variables estudiadas fueron diámetro polar del fruto, diámetro ecuatorial del fruto; número de frutos por racimo, número de frutos por planta y número de frutos por m^{-2} ; peso promedio del fruto, peso promedio del racimo, producción por planta, rendimiento por m^{-2} , rendimiento por cama de cultivo ($1.2\text{ m} \times 46\text{ m} = 55.2\text{ m}^{-2}$), rendimiento por 1000 m^{-2} y rendimiento por hectárea (ha^{-1}) de invernadero. Durante 12 cortes iniciando a los 94 ddt y terminando a los 173 ddt.

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con arreglo factorial de 2×2 ; donde el primer factor fue el tipo de agua utilizada para preparar la solución nutritiva (agua de pozo y agua residual), y el segundo factor fue el tipo de sustrato utilizado en el cultivo de tomate (arena de tezontle y suelo agrícola), con ocho repeticiones por tratamiento. La unidad experimental fue una maceta con una planta. El análisis estadístico incluyó un análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias con las pruebas de Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el programa estadístico SAS (SAS, 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de agua y suelo agrícola

En el Cuadro 1 se muestran los resultados de los análisis de los tipos de agua usados en el experimento. Los valores de pH y conductividad eléctrica (CE), contenido de magnesio y bicarbonatos fueron mayores en el agua de pozo; mientras que los de nitrógeno (amonio y nitratos), y el boro fueron mayores en el agua residual.

CUADRO 1. Resultados del análisis de muestras de agua de pozo y agua residual, en los parámetros de pH, conductividad eléctrica (CE) y contenido nutricional; para el cultivo de tomate rojo en arena de tezontle y suelo agrícola de la zona de estudio (Tlahuelilpan, Hidalgo, México).

Muestra	Valor		Contenido							
de agua	pH	CE	K	Ca	Mg	Na	CO ₃	HCO ₃	SO ₄	Cl
	unidades	dS·m ⁻²	meq L ⁻¹							
Pozo	7.06	1.77	0.98	6.25	3.54	4.22	ND	8.96	3.23	5.00
Residual	6.82	1.45	0.89	6.22	2.05	4.28	ND	6.87	1.23	6.72
	Contenido									
	N-NH ₄	N-NO ₃	P	Fe	Cu	Zn	Mn	B		
	mg L ⁻¹									
Pozo	0.19	0.10	0.42	0.05	0.01	0.03	ND	0.73		
Residual	15.11	2.78	0.38	0.13	0.01	0.05	0.11	1.02		

meq= miliequivalentes; CE = conductividad eléctrica; K = potasio, Ca = calcio, Mg = magnesio, Na = sodio, CO₃ = carbonatos, HCO₃ = bicarbonatos, SO₄ = sulfatos, Cl = cloro, N-NH₄ = nitrógeno como amonio, N-NO₃ = nitrógeno como nitrato, P = fósforo, Fe = hierro, Cu = cobre, Zn = zinc, Mn = manganeso, B = boro, ND = no detectado.

En el Cuadro 2 los resultados de los análisis de suelo regado con agua de pozo mostraron un pH, contenido de magnesio y zinc más altos. En el suelo regado con agua residual la CE (en extracto de paste), contenido de materia orgánica (MO), nitrógeno,

fósforo, potasio, calcio, fierro, cobre, manganeso, boro, sodio, cloro, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos fueron mayores que en el suelo regado con agua de pozo. .

CUADRO 2. Resultados de los análisis de muestras de suelo agrícola regados con agua de pozo y agua residual; para los parámetros de pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO) y contenido nutrimental del para el cultivo de tomate rojo de la zona de estudio (Tlahuelilpan, Hidalgo, México).

Suelo regado con:	Valor y contenido			Contenido nutrimental					
	pH [¶]	CE [¶]	MO	N	P	K	Ca	Mg	Fe
	Unid.	dS·m ⁻²	%	mg kg ⁻¹					
Agua de pozo	8.24	4.07	3.77	16.7	62.17	904.0	3 244.0	1 851.0	2.71
Agua residual	7.41	11.63	4.03	20.0	98.03	1 370.0	3 623.0	1 263.0	10.95
	Contenido				Contenido				
	Cu	Zn	Mn	B	Na	Cl	CO ₃	HCO ₃	SO ₄
	mg kg ⁻¹				meq L ⁻¹				
Agua de pozo	1.22	37.97	1.59	3.94	8.38	19.25	1.09	2.33	15.43
Agua residual	2.72	6.44	2.35	8.34	31.19	22.50	1.45	3.94	46.40

¶ = Valores de pH y CE en extracto de pasta; meq = miliequivalentes; MO = materia orgánica; N = nitrógeno inorgánico, P = fósforo, K = potasio, Ca = calcio, Mg = magnesio, Fe = fierro, Cu = cobre, Zn = zinc, Mn = manganeso, B = boro, Na = sodio, Cl = cloro, CO₃ = carbonatos, HCO₃ = bicarbonatos, SO₄ = sulfatos; Unid. = unidades.

Componentes del rendimiento

Diámetro del fruto

En diámetro ecuatorial el tratamiento testigo sólo fue mayor (estadísticamente) al tratamiento N1S1 (6.07 %). Para diámetro polar también el tratamiento testigo fue mayor al los tratamientos N1S1 (5.78 %), N2S2 (5.42 %) y N1S2 (3.84 %) (Cuadro 3). Las plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo y cultivadas en arena de tezontle produjeron frutos con un mayor diámetro polar y ecuatorial, que en las

plantas regadas con solución nutritiva preparada con agua residual y cultivadas en arena de tezontle y suelo agrícola.

Este comportamiento pudo haberse debido al efecto de una mayor CE en la solución nutritiva preparada con agua residual. Se ha encontrado que una alta conductividad eléctrica en el agua de riego (mayor a $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$), reduce el tamaño, peso del fruto y la producción de tomate; pero favorece el incremento del contenido de sólidos solubles totales, carotenoides y licopeno, lo cual mejora la calidad del fruto (Mizrahi *et al.*, 1986; Goykovic y Saavedra, 2007). Aun cuando los tratamiento con agua residual produjeron frutos con un diámetro ecuatorial menor al testigo, se ha reportado en la misma variedad de tomate (Sun 7705) en cultivo en sustrato de tepetzil y regadas con solución nutritiva completa tamaños similares de fruto (diámetro ecuatorial 51.0 mm y diámetro ecuatorial de 68.2 mm) (De la Cruz-Lázaro *et al.*, 2010)

Número de frutos

Los tratamientos N2S2, N1S2, y N1S1 fueron estadísticamente igual entre ellos pero diferentes al tratamiento testigo (N2S1), en el número de frutos por racimo⁻¹ los tratamientos mencionados anteriormente fueron mayores por un 6.22, 5.86 y 3.91 % respectivamente al tratamiento testigo. Para número de frutos por planta⁻¹ en el mismo orden tuvieron un 6.28, 5.93 y 4.09 % más comparados con el testigo. Y en número de frutos por m⁻² de cultivo, también estos tratamientos tuvieron un 6.30, 5.93 y 4.07 % más, respectivamente, que el testigo (Cuadro 3).

Se tuvieron un mayor número de frutos en plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua residual, cultivadas en sustrato y suelo; así como, en plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo pero cultivadas en suelo.

Esto pudo haberse debido a una mayor cantidad de boro, ya que los análisis de agua residual muestran una concentración de boro de $1.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y en agua de pozo de $0.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Por otra parte en el suelo regado con agua residual se encontró una concentración de boro de $8.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y en suelo regado con agua de pozo de $3.94 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Estas concentraciones de boro se consideran altas comparadas con los cantidades que existen en una solución nutritiva ideal ($1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (Douglas, 1976 citado por Morales *et al.*, 2008). Brown *et al.* (2002) mencionan que el boro forma parte de la pared celular, estimula la germinación del polen y la elongación del tubo polínico lo cual favorece a la polinización y amarre de frutos, lo que explica en parte los resultados obtenidos en esta investigación.

CUADRO 3. Efecto del riego con solución nutritiva preparada con agua pozo o agua residual, y el cultivo en arena de tezontle o suelo agrícola; sobre el diámetro ecuatorial del fruto y diámetro polar del fruto.

Tratamientos [†]	Diámetro		Número de de frutos		
	Ecuatorial	Polar	Racimo	Planta	m ⁻²
	----- mm -----		----- unidades -----		
N1S1	51.85 b	64.71 b	5.85 a	35.13 a	210.75 a
N1S2	53.73 ab	66.04 b	5.96 a	35.75 a	214.50 a
N2S2	53.46 ab	64.96 b	5.98 a	35.87 a	215.25 a
Testigo	55.20 a	68.68 a	5.63 b	33.75 b	202.50 b
DMS	2.09	2.48	0.19	1.12	6.70

Medias con la misma letra no son diferentes estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$)

[†]N1S1 = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua residual y cultivadas en arena de tezontle, N1S2 = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua residual y cultivadas en suelo agrícola, N2S2 = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo y cultivadas en suelo agrícola, Testigo = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo y cultivadas en arena de tezontle; DMS = Diferencia Mínima Significativa; m⁻² = metro cuadrado de cultivo en invernadero.

Peso promedio del fruto y racimo, y producción por planta

El peso promedio del fruto fue mayor en el tratamiento testigo que en los tratamientos N1S1 (17.19 %), N2S2 (10.99 %) y N1S2 (10.35 %). También en peso promedio por racimo fue mayor en el tratamiento testigo comparado con los tratamientos N1S1 (22.12 %), N1S2 (12.62 %) y N2S2 (11.22 %). De igual manera, la producción por planta fue mayor en el tratamiento testigo que en los tratamientos N1S1 (22.14 %), N1S2 (12.65 %) y N2S2 (11.19 %) (Cuadro 4).

Los resultados obtenidos indican que en el tratamiento testigo (riego con agua de pozo) produjo frutos de mayor peso, mientras que los tratamientos con agua residual produjeron frutos de menor peso, sin embargo, en ambos casos tuvieron en peso inferior al peso promedio reportado para la variedad 7705 que es de 120 a 140 g (Wehner, 2002).

Este comportamiento pudo haberse debido a las condiciones de CE de la solución nutritiva que son mayores para los tratamientos regados con agua residual. Investigación realizadas por Krauss *et al.* (2006) encontraron un comportamiento similar en tomate Durinta F1, ya que al utilizar tres soluciones nutritivas con diferente CE (3.0, 6.5 y 10 dS·m⁻¹) hubo una reducción del peso promedio del fruto a una mayor CE (70.2, 57.0 y 42.5 g respectivamente); así mismo se afectó la producción por planta (2.2, 2.1 y 1.7 kg⁻¹ respectivamente), y el crecimiento total de las plantas (4.56, 4.13 y 3.69 m de altura).

Esta variación en la CE también afecta la producción de frutos comerciales, por lo que de acuerdo con Caron *et al.* (1991), en tomate a medida en que se incrementa la CE en la solución nutritiva (1.4, 2.5 y 3.7 dS·m⁻¹) la producción de este tipo de frutos se reduce (3.3, 2.9 y 2.3 kg⁻¹·planta⁻¹ respectivamente).

CUADRO 4. Efecto de agua de riego (pozo y residual) y sustrato (tezontle y suelo) en el peso promedio del fruto, peso promedio del racimo y producción por planta.

Tratamientos [†]	Peso		Producción
	Fruto	Racimo	Planta
	----- g -----		----- kg ⁻¹ -----
N1S1	94.95 b	534.01 c	3.20 c
N1S2	102.79 b	599.20 bc	3.59 bc
N2S2	102.06 b	608.78 b	3.65 b
Testigo	114.66 a	685.72 a	4.11 a
DMS	11.27	66.49	0.39

Medias con la misma letra no son diferentes estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$)

[†]N1S1 = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua residual y cultivadas en arena de tezontle, N1S2 = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua residual y cultivadas en suelo agrícola, N2S2 = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo y cultivadas en suelo agrícola, Testigo = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo y cultivadas en arena de tezontle; DMS = Diferencia Mínima Significativa.

Rendimiento

Para las variables rendimiento por m⁻², por cama de cultivo (55.2 m⁻²), por 1000 m⁻² de invernadero y rendimiento por ha⁻¹ de invernadero (a seis racimos), el tratamiento testigo (N2S1) fue mayor a los tratamientos N1S1, N1S2, y N2S2 (Cuadro 5). Este comportamiento se puede asociar con las condiciones de la CE de la solución nutritiva que son mayores para los tratamientos regados con agua residual, cultivados en sustrato y en suelo.

Chinnusamy *et al.* (2005) indican que el tomate es una especie glicófito, medianamente sensible a las sales y que presenta un umbral respecto al contenido total de sales de 2.5 dS·m⁻¹ (cuantificadas en el extracto de saturación del suelo y expresado como CE),

y que por cada unidad de salinidad que se incrementa se reduce el rendimiento en un 9.9 %.

Eltez *et al.* (2002) mencionan que en plantas de tomate (cultivar Gökçe F1) irrigadas con soluciones nutritivas completas con diferentes conductividades eléctricas (2.0, 3.0, 4.0 y 5.0 dS·m⁻¹); el peso promedio del fruto disminuye con el aumento de la salinidad (CE), lo cual afectó el rendimiento. Este comportamiento es similar a lo encontrado por Tüzel *et al.* (2003), quienes reportan que en plantas de tomate irrigadas con solución nutritiva con CE de 2.0 dS·m⁻¹ obtuvieron un rendimiento de 13.6 kg⁻¹·m⁻² en el ciclo de otoño y de 14.3 kg⁻¹·m⁻² en el ciclo de primavera; y que comparadas con plantas irrigadas con una solución nutritiva con una CE de 6.0 dS·m⁻¹, hubo una reducción del rendimiento de 37 y 28 % en ambos ciclos.

Aun cuando los rendimientos obtenidos en las plantas irrigadas con agua residual (78.949 ton·ha⁻¹ en sustrato y 88.587 ton·ha⁻¹ en suelo) fueron menores al testigo (hidroponía normal); por otra parte, fueron mayores a los reportados por De la Cruz-Lázaro *et al.* (2009) en el mismo cultivar (Sun 7705) en producción orgánica (51.49 ton·ha⁻¹), y por De la Cruz-Lázaro *et al.* (2010) en sustrato de tepetzil y en hidroponía (61.488 ton·ha⁻¹). De igual forma, los rendimientos obtenidos con agua residual fueron mayores a los reportados por Salazar-Sosa *et al.* (2004), en tomate cv. Rio grande tipo saladette cultivado en sistema tradicional en suelo, con dosis de fertilización de 100-60-00 sin acolchado (57.50 ton·ha⁻¹) y con acolchado (55.9 ton·ha⁻¹).

Los rendimientos obtenidos utilizando agua residual son mayores a los reportados en la producción bajo sistema tradicional, sin embargo, si las plantas reciben un raleo de frutos y un manejo del cultivo a 12 racimos en cultivo en sustrato y suelo se podrían obtener rendimientos aproximados de 157.89 y 177.17 ton·ha⁻¹.

Una evaluación preliminar de la presente investigación donde se cuantificaron las variables sólidos solubles totales, color y pH del fruto, mostró un aumento en la calidad del fruto cuando las platas de tomate fueron regadas con agua residual en comparación con las plangas regadas con agua de pozo (Navarro-López *et al.*, 2010). Los resultados indican que el uso de agua residual para la producción de tomate en hidroponía bajo invernadero, puede ser una buena alternativa de producción para la zona del Valle de Tula.

CUADRO 5. Efecto del agua de riego (pozo y residual) y sustrato (tezontle y suelo) en el rendimiento por m⁻², cama, 1000 m⁻², ha de invernadero.

Tratamiento [†]	Rendimiento			
	m ⁻²	cama ⁻¹	1000 m ⁻²	ha ⁻¹
	----- kg ⁻¹ -----			--- ton ---
N1S1	19.22 c ^z	986.86 c	7 894.90 c	78.949 c
N1S2	21.57 bc	1 107.33 bc	8 858.60 bc	88.587 bc
N2S2	21.92 b	1 125.03 b	9 000.30 b	90.002 b
Testigo	24.69 a	1 267.22 a	10 137.70 a	101.377 a
DMS	2.39	122.87	982.94	9.83

^z: Medias con la misma letra no son diferentes estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$)

[†]N1S1 = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua residual y cultivadas en arena de tezontle, N1S2 = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua residual y cultivadas en suelo agrícola, N2S2 = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo y cultivadas en suelo agrícola, Testigo = Plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo y cultivadas en arena de tezontle; DMS = Diferencia Mínima Significativa; m⁻² = metro cuadrado de cultivo en invernadero, cama⁻¹ = área de 55.2 m⁻² de cultivo en invernadero, ha⁻¹ = de cultivo en invernadero.

CONCLUSIONES

El agua residual redujo el tamaño del fruto y lo cual afectó los componentes del rendimiento, sin embargo, incrementó el número de frutos. El agua residual en cultivo hidropónico de tomate (despuntado a seis racimos) produjo un rendimiento de 78.949 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ en sustrato y 88.587 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ en suelo, el cual puede incrementarse al doble (157.898 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ en sustrato y 177.174 $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ en suelo), con un raleo de frutos y un incremento a 12 racimos por planta.

El reuso de agua residual en la producción de tomate hidropónico bajo invernadero tanto en sustrato como en suelo, aunque produjo una reducción del rendimiento (22.12 % en cultivo en sustrato de tezontle y 12.62 % suelo agrícola), comparado con un cultivo hidropónico normal, es una buena alternativa de producción y aprovechamiento de las aguas residuales para la zona del Valle del Tula.

LITERATURA CITADA

- ANÓNIMO. 2002. Estudio Complementario del Caso Mezquital, Estado de Hidalgo, Proyecto Regional. Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial. Convenio IDRC – OPS/HEP/CEPIS. México. 52 p.
- BROWN, P.H., N. BELLALLOUI, M. A. WIMMER, E. S. BASSIL, J. RUIZ, H. HU, H. PFEFFER, F. DANNEL AND V. RÖMHELD. 2002. Boron in Plant Biology. Plant Biology 4: 211-229.
- CARON, J., L. E. PARENT AND A. GOSSELIN. 1991. Effect of nitrogen and salinity levels in the nutrient solution on the DRIS diagnosis of greenhouse

- tomato. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 22(9-10): 879-892.
- CHINNUSAMY, V., A. JAGENDORF AND J.-K. ZHU. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science* 45: 437-448.
- CUENCA-ADAME, E., D. Riestra-Díaz, J. M. PÉREZ-MANGAS Y A. ECHEGARAY-ALEMÁN. 2001. Uso de aguas residuales y control de organismos patógenos en la producción de cebolla. *Agrociencia* 35: 255-265.
- DE LA CRUZ-LÁZARO, E., M.A. ESTRADA-BOTELLO, V. ROBLEDO-TORRES, R. OSORIO-OSORIO, C. MÁRQUEZ-HERNÁNDEZ Y R. SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ. 2009. Producción de tomate en invernadero con composta y vermicomposta como sustrato. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo* 25(1): 59-67.
- DE LA CRUZ-LÁZARO, E., R. OSORIO-OSORIO, E. MARTÍNEZ-MORENO, A. J. LOZANO DEL RÍO, A. GÓMEZ-VÁZQUEZ Y R. SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ. 2010. Uso de compostas y vermicompostas para la producción de tomate orgánico en invernadero. *Interciencia* 35(5): 363-368.
- ELTEZ, R. Z., Y. TÜZEL, A. GÜL, I. H. TÜZEL AND H. DUYAR. 2002. Effects of different EC levels of nutrient solution on greenhouse tomato growing. *Acta Hort.* 573:443-448.
- GOYKOVIC C., V. Y G. SAAVEDRA DEL REAL. 2007. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *IDESIA* 25(3): 47-58.
- HAMILTON, A. J., F. STAGNITTI, R. PREMIER, A-M. BOLAND AND G. HALE. 2006. Quantitative microbial risk assessment models for consumption of raw

vegetables irrigated with reclaimed water. Appl. Environ. Microbiol. 72(5): 3284-3290.

JIMÉNEZ C., B., M. MAZARI H., R. DOMÍNGUEZ M. Y E. CIFUENTES G. 2005a. El Agua en el Valle de México. pp. 15-32. *In*: El Agua en México Vista desde la Academia. Jiménez, B.; Marín, L. (eds.). Ed. Academia Mexicana de Ciencias. México D.F., México.

JIMÉNEZ C., B., CH. SIEBE G. Y E. CIFUENTES G. 2005b. El Reúso Intencional y no Intencional del Agua en el Valle de Tula. pp. 33-55. *In*: El Agua en México Vista desde la Academia. Jiménez, B.; Marín, L. (eds.). Ed. Academia Mexicana de Ciencias. México D.F., México.

JIMÉNEZ, B. Y L. MARÍN. 2005. El Agua en México Vista Desde la Academia. Academia Mexicana de Ciencias. México D.F., México. 411 p.

KRAUSS, S., W. H. SCHNITZLER, J. GRASSMANN AND M. WOITKE. 2006. The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless system on inner and outer fruit quality characteristics of tomato. J. Agric. Food Chem. 54: 441-448.

MÉNDEZ-GARCÍA, T., L. RODRÍGUEZ-DOMÍNGUEZ Y S. PALACIOS-MAYORGA. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. Terra 18(4): 277-288.

MIZRAHI, Y., S. ARAD, Y. MIZRAHI AND R. ZOHAR. 1986. Salinity as a possible means of improving fruit quality in slow-ripening tomato hybrids. Acta Hort. 190: 223-224.

MORALES P., J. T., I. MIRANDA V., I. GIL V., A. BASTIDA T., A. RAMÍREZ A., J. HERNÁNDEZ O., D. S. REYES R., G. FLORES E. Y E. R. NAVARRO L.

2008. Introducción a la Hidropónica. Serie de Publicaciones AGRIBOT, Depto. de Preparatoria Agrícola. UACH. Chapingo Edo. de México, México. 160 p.
- MORILLO, G., R. MONSALVE, J. MENDOZA, D. ISEA, I. ARAUJO, L. VARGAS, AND N. ANGULO. 2009a. Chemical and microbiological evaluation of cucumber (*Cucumis sativus* L.) using wastewaters irrigation. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. 32(1): 68-76.
- MORILLO, G., B. ORTEGA, I. ARAUJO, D. ISEA, N. ANGULO, Y L. VARGAS. 2009b. Utilización de aguas residuales tratadas en cultivos hidropónicos de pimentón, *Capsicum annum* L. CIENCIA 17(1): 98-106.
- NAVARRO-LÓPEZ; R. NIETO-ÁNGEL; J. J. E. CORRALES-GARCÍA; M. DEL R. GARCÍA-MATEOS; A. RAMÍREZ-ARIAS. 2010. Calidad postcosecha de frutos de tomate hidropónico producidos con agua residual y agua de pozo. Revista Chapingo Serie Horticultura (en prensa).
- SALAZAR-SOSA, E., C. VÁZQUEZ-VÁZQUEZ, J. A. LEOS-RODRÍGUEZ, M. FORTIS-HERNÁNDEZ, J. A. MONTEMAYOR-TREJO, R. FIGUEROA-VIRAMONTES Y J. D. LÓPEZ-MARTÍNEZ. 2004. Mineralización del estiércol bovino y su impacto en la calidad del suelo y la producción de tomate (*Lycopersicum sculentum* Mill) bajo riego sub-superficial. Phyton 73: 259-273.
- SAS. 2000. SAS. User's guide. Versión 8.1. SAS. Institute Inc. Cary, NC. USA. 1290 p.
- TÜZEL, Y., I. H. TÜZEL AND F. ÜÇER. 2003. Effects of salinity on tomato growing in substrate culture. Acta Hort. (ISHS) 609:329-335.

- VIVANCO-ESTRADA, R.A., F. GAVI-REYES, J.J. PEÑA-CABRIALES Y J. DE J. MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ. 2001. Flujos de nitrógeno en un suelo cultivado con forrajes y regado con agua residual urbana. *Terra* 19(4): 301-308.
- WEHNER, T. C. 2002. Vegetable cultivar descriptions for North America list 26. *HortScience* 37(1). 15-78.

CAPITULO III. ANÁLISIS DE CONTAMINANTES EN FRUTOS DE PLANTAS DE TOMATE IRRIGADAS CON AGUA RESIDUAL EN HIDROPONIA

POLLUTANTS ANALYSIS IN FRUIT OF TOMATO PLANTS IRRIGATED WITH WASTEWATER IN HYDROPONIC SYSTEM

RESUMEN

Con el objetivo de conocer si el uso de agua residual en hidroponía produce contaminación en frutos de tomate, se analizó la presencia de metales (As, Cd, Cr total, Pb, Zn, Al, Ba, B, Cu, Fe, Mn, Hg por espectroscopia de emisión atómica, Cr-VI por el método colorimétrico) y algunos microorganismos (*Shigella* spp. y *E. coli* por el método usado por la FDA, y *Salmonella* spp., por método de la NOM-114-SSA1-1994). Se realizó una prueba de “t” para dos tipos de muestras: frutos sin lavar (FSL) y frutos lavados (FL). El agua resultante de los frutos lavados (AFL) también fue analizada. No hubo diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) entres los FSL y los FL en todos los contaminantes analizados. No se encontró As, Cd, Cr-VI ni Hg en los FSL y FL, solo Hg ($0.0007 \text{ mg} \cdot \text{litro}^{-1}$) en el AFL. Hubo Pb en los FSL ($0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), pero no hubo en los FL y en el AFL. Presencia de Cr total en los FSL ($860 \text{ } \mu\text{g} \cdot 100 \text{ g de fruto}$), en FL ($20 \text{ } \mu\text{g} \cdot 100 \text{ g de fruto}$), y en el AFL ($0.011 \text{ mg} \cdot \text{litro}^{-1}$). Zn en los FSL ($0.30 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g de fruto}$), en FL ($0.1 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g de fruto}$), y en el AFL ($0.053 \text{ mg} \cdot \text{litro}^{-1}$). Hubo presencia de los metales Al, Ba, B, Cu, Fe y Mn en los FL, sin embargo, todos los contaminantes analizados tuvieron cantidades menores a las consideradas como dañinas a la salud humana. No hubo presencia de *Shigella* spp. y *Salmonella* spp., en los FSL, FL y el AFL. La concentración de *E. coli* en FSL y FL fue menos de $3.0 \text{ UFC} \cdot \text{g}$, en el AFL fue menos de $1.1 \text{ UFC} \cdot 100 \text{ mL}$, en ambos casos las cantidades están por debajo de las dosis infectiva ($50\text{-}100 \text{ UFC} \cdot \text{g}$).

PALABRAS CLAVE: *Solanum lycopersicon* Mill., *Salmonella* sp., *Shigella* sp., y *Escherichia coli*, metales pesados, elementos traza.

ABSTRACT

In order to know if the wastewater use in hydroponics production can produce contamination in tomato fruits, were analyzed some metals (As, Cd, total Cr, Pb, Zn, Al, Ba, B, Cu, Fe, Mn, Hg by spectroscopy of Atomic emission, Cr-VI by colorimetric method) and some microorganisms (*Shigella* spp. and *E. coli* on the method used by the FDA, and *Salmonella* spp., by method of the NOM-114-SSA1-1994), in fruits of tomato plants irrigated with sewage in hydroponics were analyzed. Was performed a "t" test for two types of samples: unwashed fruits (UWF) and washed fruits (WF). The washed fruits water (WFW) was also analyzed. There was no difference statistics ($P \leq 0.05$) between the UWF and the WF on all pollutants analyzed. As, Cd, Cr-VI and Hg was not found in the UWF and WF, WFW had Hg ($0.0007 \text{ mg} \cdot \text{litro}^{-1}$). There were Pb in the UWF ($0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), but there the WF and WFW. There was Cr in the UWF ($860 \text{ } \mu\text{g}$ per 100 g of fruit), WF ($20 \text{ } \mu\text{g}$ per 100 g of fruit), and WFW ($0.011 \text{ mg} \cdot \text{litro}^{-1}$). There were Zn in the UWF (0.30 mg per 100 g of fruit), in WF (0.1 mg per 100 g of fruit), and in the WFW ($\text{mg} \cdot \text{litro}^{-1} 0.053$). There were contents of Al, Ba, B, Cu, Fe and Mn in the WF, however, all pollutants analyzed were less than the considered as harmful to human health. There not presence of *Shigella* spp. and *Salmonella* spp. in the UWF, WF and the WFW. *E. coli* concentration in UWF and WF was less than $3.0 \text{ UFC} \cdot \text{g}$, in the WFW was less than $1.1 \text{ UFC} \cdot 100 \text{ mL}$, both quantities are below the infective dose ($50\text{-}100 \text{ UFC} \cdot \text{g}$).

KEY WORDS: *Solanum lycopersicon* Mill., *Escherichia coli*, *Shigella* sp., *Salmonella* sp., heavy metals, trace elements.

INTRODUCCIÓN

El Valle del Mezquital es la zona de mayor extensión (100 000 ha) en México en donde se usa agua residual para el riego agrícola (Vivanco *et al.*, 2001). El uso de agua residual y lodo residual en la agricultura puede presentar riesgos a la salud por la presencia de agentes biológicos, químicos y físicos. La contaminación química es un riesgo potencial asociado con el uso de aguas residuales, principalmente de aguas proveniente de desechos municipales y de origen industrial. Los agentes químicos presentes en el agua incluyen metales pesados, fertilizantes y otros nutrientes (compuestos nitrogenados, fosforados y minerales), insecticidas, pesticidas, fungicidas, herbicidas y otras sustancias orgánicas típicas (Nabulo *et al.*, 2008).

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, considera que el arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc en concentraciones por encima de determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana en la flora y fauna (Anónimo, 1997). Para la Agencia de Protección al Medio Ambiente de Estados Unidos de América (EPA) menciona como metales pesados de importancia al cadmio, plomo, zinc, mercurio, calcio, plata y arsénico que contaminan el aire, suelo y agua. En agua potable, la Organización Mundial para la Salud (WHO) y la Agencia Nacional para la Administración y Control de Drogas y Alimentos (NAFDAC), considera como metales pesados al zinc, arsénico, magnesio, calcio, cadmio, plomo, plata, y mercurio (Duruibe *et al.*, 2007). En los estudios de contaminación de metales pesados en hortalizas de fruto, hoja y raíz, se han centrado principalmente en determinar la presencia de arsénico, cadmio, cromo y plomo (Prieto *et al.*, 2009).

En el caso de los microorganismos patógenos, cuando las hortalizas se encuentran en contacto directo con el agua de riego tienen mayor probabilidad de contaminarse (Okafo

et al., 2003); sin embargo, también pueden contaminarse durante la cosecha, procesamiento y distribución del producto (Beuchat, 1998). Algunos de los patógenos que afectan frecuentemente la salud pública son: *Shigella* (Reller *et al.*, 2006), *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*, helmintos, y virus entéricos que son la principal causa de muerte en infantes y personas de edad avanzada (Berney *et al.*, 2006).

Se ha encontrado *Salmonella* spp. en muestras de tomate, melón, fresas, jugo de naranja no pasteurizado, jugo de manzana, germinados de frijol, germinados de alfalfa, en muchas frutas y verduras que se consumen crudas (Beuchat, 1998; Wells y Butterfield, 1999; Gou *et al.*, 2001; Ávila-Quezada *et al.*, 2008). *Shigella* spp. se ha encontrado en alimentos y el agua contaminada con eses fecales, en frutas y vegetales crudos contaminados, así como en la transmisión de persona a persona; algunas de las frutas y verduras que pueden contaminarse por este medio son la lechuga, cebollín, pepino, olivos, tomate, pimientos, sandia, papaya, jícama, champiñones y ensalada de vegetales (Beuchat, 1998; Reller *et al.*, 2006; Ávila-Quezada *et al.*, 2008).

E. coli, es un organismo que forma parte de la microflora normal en el tracto intestinal de humanos y otros animales de sangre caliente; éste patógeno puede contaminar frutas y verduras como melón, sandia cortada, lechuga entera, lechuga picada, cilantro, perejil, sidra de manzana, rabanito, germinados de alfalfa, y pepino en rebanadas (Beuchat, 1998; Ávila-Quezada *et al.*, 2008; Ginestre Pérez *et al.*, 2009). Sin embargo, una de las alternativas para evitar la contaminación de hortalizas desde el cultivo, es el tipo de agua, la forma de cultivo y riego, aunque para este cultivo se use agua residual. De acuerdo a lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue investigar si el riego con

agua residual es la fuente directa de contaminación por metales y algunos microorganismos en frutos de tomate hidropónico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El cultivo de tomate del experimento se realizó durante los meses de junio a diciembre de 2007, en un invernadero de 1000 m², con cubierta de plástico blanco lechoso al 75 % de luz, con una humedad relativa entre 50 a 80 % y rango de temperatura de 10 a 35 °C; en la comunidad de Tlahuelilpan (20° 08' latitud norte, 99° 14' longitud oeste y altitud de 2050 m) del estado de Hidalgo, correspondiente al Distrito de Riego Núm. 03 de Tula.

Se utilizaron semillas de tomate rojo, tipo saladette, de la variedad Reserva F1 (Vilmorin) de crecimiento indeterminado, sembradas en charolas germinadoras el mes de junio. A los 30 días después de la siembra (julio), las plántulas fueron trasplantadas en bolsas de 40x35 cm con sustrato de arena de tezontle, con una planta por bolsa (unidad experimental).

Se fertilizó con una solución nutritiva preparada con agua residual con las siguientes concentraciones de nutrientes: nitrógeno 306, fósforo 90, potasio 263, calcio 303, azufre 148, magnesio 85, hierro 4.0, manganeso 1.0, boro 0.5, cobre 0.5 y zinc 0.5 mg·L⁻¹. Dependiendo de la edad de la planta y las condiciones climáticas, el cultivo tuvo un riego diario de 4 a 15 litros·m⁻²·día⁻¹, mediante un sistema de riego por goteo. Todas las plantas del experimento se condujeron a seis racimos, las plantas fueron despuntadas a los 156 días después del trasplante (ddt). Hubo raleo de frutos pequeños obteniendo entre cinco y siete frutos por racimo. Los frutos fueron cosechados a los seis meses del

establecimiento del cultivo (mes de diciembre), cuando tenían de 30 a 60 % de la superficie de color rosa o rojo, que corresponde al estado de maduración rosado o *pink* (USDA, 1991).

Se colectaron ocho muestras de agua residual utilizada para riego, proveniente de los canales de riego en la comunidad de Tlahuelilpan en el estado de Hidalgo, correspondiente al Distrito de Riego Núm. 03 de Tula; y una muestra de agua de pozo (testigo) usada para riego proveniente del pozo del Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Para el traslado al laboratorio las muestras se mantuvieron en una hielera a 10 °C. Se cosecharon ocho muestras de seis frutos (500 g en promedio) cada una y para su traslado se mantuvieron en las mismas condiciones.

Los análisis de contaminación por metales de todas las muestras fueron realizados por Grupo MICROMED, S.A de C.V., laboratorio certificado por la Entidad Mexicana de Acreditación, A.C (EMA). Los contenidos de As, Cd, Cr total, Pb, Zn, Al, Ba, B, Cu, Fe y Mn, fueron determinados mediante espectroscopia de emisión atómica de plasma inductivamente acoplado, descrito en el método de la EPA 6010B (EPA, 1998). El contenido de Cr-VI fue determinado mediante el método colorimétrico descrito en la NMX-AA-044-SCFI-2001. El contenido de Hg se determinó mediante absorción atómica por el método descrito en la NMX-AA-051-SCFI-2001.

Los análisis de contaminación por microorganismos en muestras de agua y frutos fueron realizadas (por triplicado) en el Centro de Control Total de Calidades, S.A. de C.V. (GRUPO CENCON® Centro de control), laboratorio certificado por la EMA. La determinación de *Shigella* spp., se realizó por el método usado por la Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA) reportado por Andrews y Jacobson

(1998). La determinación de *Salmonella* spp., se realizó de acuerdo al método establecido en la NOM-114-SSA1-1994. Y la determinación de *E. coli*, se realizó por el método usado en la FDA y reportado por Feng *et al.* (2001).

Las variables evaluadas fueron la determinación de contaminación por metales (As, Cd, Cr, Cr-VI, Hg, Pb, Zn, Al, Ba, B, Cu, Fe y Mn), y la determinación de la concentración de *Shigella* spp, *Salmonella* spp. y *E. coli*; en muestras de frutos sin lavar (FSL), frutos lavados (FL) (lavado de la parte externa del fruto con agua destilada-esterilizada, para quitar los contaminantes presentes en la epidermis del fruto), y también en el agua resultante de los frutos lavados (AFL). Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, y el análisis estadístico incluyó una prueba de t de student para compara las dos tipos de muestras (frutos sin lavar y frutos lavados).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de contaminación por metales en muestras de agua

El análisis de contaminación por metales indican que en la muestra de agua de pozo sólo hubo presencia de Al, Ba y B; mientras que en el agua residual se encontró Cd, Cr total, Pb, Zn, Al, Ba, B, Cu, Fe y Mn (Cuadro 1). Las concentraciones de metales encontradas en ambos tipos de agua fueron menores a los niveles máximos permisibles en agua proviene de ríos, embalses naturales y artificiales usadas en riego agrícola (NOM-001-ECOL-1996) (Cuadro 1); y a los niveles máximos permitidos en aguas residuales de origen urbano o municipal usadas para riego agrícola (NOM-CCA/032-ECOL-1993) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis de contaminación por metales en muestras de agua de pozo y agua residual usada para cultivo hidropónico de tomate.

Elemento	Contenido		Niveles permitidos en agua para uso agrícola	
	Agua de pozo [¶]	Agua residual [¶]	Ríos y embalses (naturales y artificiales) ^y	Residual ^x
	----- mg·litro ⁻¹ -----			
As	0.00	0.00	0.20	0.10
Cd	0.00	0.002	0.20	0.01
Cr	0.00	0.036	1.00 ^{¶¶}	0.10
Cr-VI	0.00	0.00	--	--
Hg	0.00	0.00	0.01	--
Pb	0.00	0.002	0.50	5.00
Zn	0.00	0.11	10.00	2.00
Al	0.015	0.508	--	5.00
Ba	0.016	0.063	--	--
B	0.06	0.757	--	1.50
Cu	0.00	0.030	4.00	0.20
Fe	0.00	0.439	--	5.00
Mn	0.00	0.101	--	0.20

¶: n=3; ¶¶: Cromo; As = Arsénico, Cd = Cadmio, Cr = Cromo total, Cr-VI = Cromo hexavalente, Hg = Mercurio, Pb = Plomo, Zn = Zinc. ^y: Promedio mensual (NOM-001-ECOL-1996); ^x: Contenido máximo (NOM-CCA/032-ECOL/1993).

Contaminación por metales en muestras de frutos de tomate

Los resultados muestran que entre en los FSL y los FL no hubo diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$, prueba de "t") en la presencia de metales. En los FSL no hubo presencia de arsénico, cadmio, cromo hexavalente y mercurio; sin embargo, hubo presencia de cromo, plomo y zinc. En los FL solo se encontró cromo total y zinc. Para el AFL los análisis mostraron la presencia de cromo total, mercurio y zinc, lo cual hace suponer que una porción de estos contaminantes se encuentra en la superficie del fruto. Para el caso del Pb, aunque se encontró en los FSL no se detectó en el AFL (Cuadro 2).

Alviter y Granados (2005) mencionan que el consumo diario *per capita* de tomate en México es de 36.16 g ($13.2 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$); para Hernández y Martínez (2003) es de 45.21 g

($16.5 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) y para Cortéz *et al.* (2004) de 50 g ($18.25 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$). Considerando estos datos de consumo *per capita* diario de tomate, las cantidades de metales encontradas en 100 g de muestra de frutos después de ser lavados (que es la forma de consumo habitual), estuvieron por debajo de la dosis oral de referencia (FfD) para As, Cr-VI, Hg y Ba (0.0003 , 0.003 , 0.0003 y $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ respectivamente (Cuadro 2) (EPA, 2006; Sobrino *et al.*, 2007; De Rosa *et al.*, 1998; Cabrera-Vique *et al.*, 2007; ATSDR, 2006).

Se han encontrado en la zona de Zimapán Hidalgo concentraciones de As de $12\ 735 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ de origen minero en forma de jales con contenido de sulfuros metálicos como arsenopirita (FeAsS) (Romero *et al.*, 2008), sin embargo no hubo presencia de este metal en las muestras de frutos ni en el agua residual.

El Cr-VI no se encontró en las muestras de frutos ni en el agua residual, para la zona de estudio las fuentes de contaminación de este elemento usualmente son de origen antropogénico; los dicromatos sódico y potásico son usados con frecuencia en la industria como fuente de otros compuestos del cromo, particularmente del óxido de cromo VI, y estos procesos son la mayor fuente de contaminación por cromo hexavalente (González y Aportela, 2001). En México existen concentraciones de Cr-VI de $12 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{litro}^{-1}$ atribuidas a las rocas ultramafic de la Sierra de Guanajuato (Oze *et al.*, 2007).

En el caso de Hg sólo se encontró en el AFL pero no en el agua residual, por lo que puede ser una posible contaminación aérea. Las fuentes de contaminación posibles de este metal incluyen la producción de cloruros (es decir, un proceso que utiliza mercurio en electrólisis de sal al cloruro de hidrógeno de productos y de hidróxido de sodio, cloro, sosa cáustica, lejía y otros productos), minería de mercurio y fundición, residuos

incineradores (desechos especialmente médicos), crematorios y volcanes; el mercurio elemental en forma líquida se encuentra en termómetros, barómetros y otros instrumentos, y en amalgamas dentales (un metal compuesto que es aproximadamente 50 % mercurio (Goldman *et al.*, 2001).

El Ba estuvo presente tanto en muestras de frutos, agua de pozo y agua residual, Duperly *et al.* (2006) mencionan que las posibles fuentes de contaminación de este metal pueden ser por la exploración minera, petrolera y la industria de la galvanoplastia, los plásticos, la curtiduría, la farmacéutica, y la petroquímica, incluyen operaciones que generan desechos sólidos y líquidos, los cuales poseen concentraciones significativas de bario. En los municipios vecinos de la zona de estudio, existen industrias relacionadas con la curtiduría de pieles y con el petróleo de donde puede provenir este contaminante (Cabrera Cruz *et al.*, 2003; Cabrera Cruz *et al.*, 2004).

La concentración de Cd estuvo por debajo de la concentración máxima permitida ($0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) en hortalizas (CMPH) (Cuadro 2) (CODEX, 1995). El Cd estuvo presente en el agua residual pero no en las muestras de fruto, Järup (2003) menciona que éste metal puede estar presente en el agua residual por efecto de residuos vertidos al drenaje de compuestos de cadmio usados como estabilizadores de productos de PVC, pigmentos de colores, aleaciones, como níquel-cadmio usado en baterías recargables, como cadmiación (agente corrosivo), y como contaminantes de fertilizante fosfatados.

La concentración de Pb también fue inferior a la concentración máximo permitido por peso fresco (CMPF) de frutas y hortalizas ($0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (Cuadro 2) (CODEX, 1995). En el caso del Pb hubo presencia en el agua residual y en los frutos sin lavar, por lo que se pensaría que la contaminación es aérea. Para la zona del Valle del Mezquital, la contaminación por Pb puede estar en lodos de aguas residuales que contienen plomo,

cromo y fenoles provenientes de la industria de la curtiduría, en el aire y agua; también proviene de las escorias provenientes del horno de plomo (Cabrera Cruz *et al.*, 2003; Cabrera Cruz *et al.*, 2004). En la Zona de Zimapán Hidalgo el Pb de origen minero resulta de los jales con contenido de sulfuro metálicos como galena (PbS) (Romero *et al.*, 2008). Otra fuente de contaminación es el agua del gran canal de la ciudad de México donde se han encontrado concentración de Pb de $0.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, y en la presa Endhó del Valle del Mezquita de $0.045 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Justin *et al.*, 2001).

Para Cr total y Zn, las concentraciones encontradas fueron menores a la cantidad de ingesta diaria (ID) permitida ($35 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{día}^{-1}$ y $15 \text{ mg}\cdot\text{día}^{-1}$, respectivamente) (Cuadro 2) (Hernández, 2004; Nirmal *et al.*, 2007). En ambos casos hubo presencia de estos metales en el agua residual y en las muestras de frutos, los FSL tuvieron las concentraciones más altas.

Para el Cr total la posible contaminación puede ser debido a las industrias que se encuentran en la zona de Hidalgo, ya que el Cr es un contaminante de soluciones gastadas y residuos proveniente del cromado; también de soluciones gastadas y sedimentos de los baños de cianuro en las operaciones de galvanoplastia de cromo; y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales en operaciones de cromado (metal); también de la manufactura de textiles, artículos de vestir e industria del cuero, curtido de pieles (Acosta *et al.*, 2008), manufactura de productos fabricados de metal, maquinaria y equipo (Cabrera Cruz *et al.*, 2003; Cabrera Cruz *et al.*, 2004).

En la zona de Hidalgo, el Zn es un contaminante de soluciones gastadas y sedimentos de los baños de cianuros en las operaciones de galvanoplastia de zinc; también de las soluciones gastadas de cianuros de los tanques de limpieza con sales en las operaciones de tratamiento caliente de metales del zincado; y de lodos de tratamientos

de aguas residuales provenientes del lavado de metales para remover soluciones concentradas de zincado; industria metálica básica y manufactura de productos fabricados de metal, maquinaria y equipo (Cabrera Cruz *et al.*, 2003; Cabrera Cruz *et al.*, 2004). En la Zona de Zimapán Hidalgo el zinc de origen minero proviene de los jales con contenido de sulfuro metálicos como la esfalerita (ZnS) (Romero *et al.*, 2008).

Las cantidades encontradas de Al también estuvieron por debajo del umbral de seguridad de consumo por peso corporal por semana (USCPCS) de $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cuadro 2) (Camean *et al.*, 2009). Este metal estuvo presente en el agua residual y en las muestras de frutos, mayormente en los FSL, lo que supondría una contaminación externa. Las fuentes de contaminación de Al son como contaminante proveniente de lodos de la solución de cal del lavado de gases en la fundición y refinado de aluminio, así como de las escorias del horno de fundición de chatarra de aluminio en la zona de Hidalgo (Cabrera Cruz *et al.*, 2003; Cabrera Cruz *et al.*, 2004).

Y finalmente, para los metales B, Cu, Fe y Mn las cantidades encontradas en las muestras de frutos fueron menores a los niveles máximos de ingestión tolerable (NMIT) de 20, 10, 8 a 11 y $11 \text{ mg}\cdot\text{día}^{-1}$ respectivamente (Cuadro 2) (Hernández, 2004; Nirmal *et al.*, 2007) (Cuadro 12).

Las posibles fuentes de contaminación o de aporte de B y Mn pueden ser la solución nutritiva, el agua residual y sus contenidos en el suelo, ya que el análisis realizados al suelo mostraron una concentración de B de $8.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y de Mn de $2.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Navarro *et al.*, 2010).

Para la contaminación por Cu, las posibles causas son las partículas provenientes de escorias del horno de fundición de cobre y residuos del proceso de extrusión de tubería de cobre (Cabrera Cruz *et al.*, 2003; Cabrera Cruz *et al.*, 2004). Por otro lado, el Cu de

origen minero se encuentra en forma de jales con contenido de sulfuros metálicos como la calcopirita (CuFeS_2) (Romero *et al.*, 2007). Fuentes adicionales de cobre pueden ser la solución nutritiva y el contenido de Cu presente en el suelo, ya que el análisis realizado indicó una concentración de $2.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Navarro *et al.*, 2010).

Finalmente, la contaminación por Fe puede ser por efecto de las escorias provenientes de hornos de fundición de acero y hierro gris; lodos y polvos del equipo de control de emisiones de hornos eléctricos en la fundición de acero y hierro gris; y residuos de aceites gastados en las operaciones de fundición de acero y hierro gris (Cabrera Cruz *et al.*, 2003; Cabrera Cruz *et al.*, 2004). Fierro de origen minero se presenta en forma de jales con contenido de sulfuro metálicos como la pirita (FeS_2), pirrotita (Fe_{1-x}S) y arsenopirita (FeAsS) (Romero *et al.*, 2008). Sin embargo, el suelo también es una fuente de contaminación de Fe ya que los análisis mostraron una concentración de $10.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Navarro *et al.*, 2010). De acuerdo a estos datos, se podría suponer que los frutos producidos con agua residual están dentro de los límites permitidos de contaminantes por metales.

CUADRO 2. Análisis de contaminación por metales en muestras de frutos sin lavar y frutos lavados de tomate hidropónico irrigado con agua residual, y límites permitidos reportados.

Elemento	Muestra			Límites permitidos	Fuente
	FSL	FL	AFL		
	mg·100 g		mg·litro ⁻¹		
As	0.000 ^N	0.000	0.000	0.0003 mg·kg ⁻¹ ·día ⁻¹ (RfD)	EPA (2006)
Cd	0.000 ^N	0.000	0.000	0.05 mg·kg ⁻¹ (CMPH)	CODEX (1995)
Cr[†]	86.00 ^N	20.00	0.011	35 µg·día ⁻¹ hombres y 25 µg·día ⁻¹ mujeres (ID)	Hernández (2004)
Cr-VI	0.000 ^N	0.000	0.000	0.003 mg·kg ⁻¹ ·día ⁻¹ (RfD)	Sobrinho <i>et al.</i> (2007)
Hg	0.000 ^N	0.000	0.001	0.0003 mg·kg ⁻¹ (RfD) Hgi y 1.6 µg·kg ⁻¹ (PC) Hgme	De Rosa <i>et al.</i> (1998) Cabrera-Vique <i>et al.</i> (2007)
Pb	0.020 ^N	0.000	0.000	0.10 mg·kg ⁻¹ (CMPF) F y H	CODEX (1995)
Zn	0.360 ^N	0.100	0.053	15 mg·día ⁻¹ hombres y 12 mg·día ⁻¹ mujeres (ID)	Nirmal <i>et al.</i> (2007)
Al	5.393 ^N	0.067	0.270	1.0 mg·kg ⁻¹ (USCPCS)	Camean <i>et al.</i> (2009)
Ba	0.037 ^N	0.027	0.052	0.2 mg·kg ⁻¹ ·día ⁻¹ (RfD)	ATSDR (2006)
B	0.103 ^N	0.063	0.007	20 mg·día ⁻¹ (NMIT)	Hernández (2004).
Cu	0.723 ^N	0.267	0.637	10 mg·día ⁻¹ adultos (NMIT)	Nirmal <i>et al.</i> (2007)
Fe	0.109 ^N	1.130	0.270	8 a 11 mg·día ⁻¹ niños y adultos (NMIT)	Nirmal <i>et al.</i> (2007)
Mn	0.107 ^N	0.053	0.009	11 mg·día ⁻¹ adultos (NMIT)	Nirmal <i>et al.</i> (2007)

^{NS}: No hay diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para la prueba de t-Student ($n=3$); [†]: µg·100 g de fruto; **As**= Arsénico, **Cd**= Cadmio, **Cr**= Cromo total, **Cr-VI**= Cromo hexavalente, **Hg**= Mercurio, **Pb**= Plomo, **Zn**= Zinc, **Al**= Aluminio, **Ba**= Bario, **B**= Boro, **Cu**= Cobre, **Fe**= Hierro, **Mn**= Manganeso; **RfD**: dosis oral de referencia (cantidad de xenobiotico que puede ser consumida diariamente sin que existan efectos nocivos a la salud durante el tiempo de vida); **CMPH**: concentración máxima permitida en hortalizas; **ID**: ingesta diaria; **Hgi**: mercurio inorgánico; **Hgme**: mercurio como metilmercurio; **PC**: peso corporal; **(CMPF) F y H**: concentración máxima por peso fresco en frutas y hortalizas; **USCPCS**: umbral de seguridad de consumo por peso corporal por semana; **NMIT**: nivel máximo de ingestión tolerable.

Análisis de contaminación por algunos microorganismos en muestras de agua

Para el análisis de microorganismos en agua de pozo fue negativo para *Salmonella* y *Shigella* sp.; mientras que *Escherichia coli*, estuvo presente. En la muestra de agua residual los resultados fueron negativos para *Salmonella* sp., hubo un positivo de tres muestras para *Shigella* sp.; mientras que para *E. coli*, el valor máximo fue de 8 NMP·100 ml (Cuadro 3).

CUADRO 3. Presencia de *Salmonella* sp., *Shigella* sp. y contenido de *E. coli*, en muestras de agua de pozo y agua residual usadas para cultivo hidropónico de tomate.

Tipo de muestra	Contaminantes biológicos		
	<i>Salmonella</i> sp.	<i>Shigella</i> sp.	<i>E. coli</i> [¶]
	----- Presencia en 25 mL ⁻¹ -----		-- NMP·100 mL ⁻¹ --
Agua de pozo ^y	0	0	< 1.1
Agua residual ^x	1	0	7.33

NMP: Número más probable; ^y: n=1; ^x: n=3; [¶]: No se refiere a *Escherichia coli* 0157:H7.

Contaminación por algunos microorganismos en muestras de frutos

El análisis estadístico no indicó diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$, prueba de “t”) entre los FSL y los FL para el contenido de *Salmonella* spp., *Shigella* spp., y *E. coli* (Cuadro 4). En los FSL y FL no hubo presencia de *Salmonella* spp., *Shigella* spp., pero sí de *E. coli* (No se refiere a *Escherichia coli* 0157:H7). El AFL tampoco tuvo presencia de *Salmonella* y *Shigella* sp., sin embargo, para *E. coli* la concentración fue de menos de 1.1 NMP·100 mL⁻¹.

Bhunja (2008) menciona que para *Salmonella* entérica la dosis infectiva es de 10 a 10⁹ UFC·g con un período de incubación es de seis a 24 horas; para *Shigella* spp., la dosis infectiva es de 10 a 100 UFC·g, y un período de incubación de 12 horas a siete días

(generalmente ocurre entre uno a tres días); y finalmente, para *Escherichia coli* O157:H7, la dosis infectiva es de 50-100 UFC·g, con un período de incubación de tres a nueve días. En el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA, 2009) para el subgrupo de frutas y hortalizas fresca, el criterio microbiológico de *E. coli* por debajo del cual el alimento no representa un riesgo para la salud es de 10 UFC·g, y por arriba de 10^2 UFC·g el alimento si representa un riesgo para la salud, en cinco unidades muestreadas con un máximo de dos unidades con presencia entre estos dos rangos. En el caso de *Salmonella* spp., el criterio es de ausencia del patógeno en un total de cinco muestras de 25 g. Los resultados obtenidos en los análisis de contaminantes biológicos en los frutos sin lavar y los frutos lavados están dentro de los niveles anteriormente mencionados.

La presencia del *E. coli* en los frutos de tomate sin lavar y lavados puede estar concentrada en la cicatriz del pedúnculo del fruto. Investigaciones realizadas por Hyun-Gyun *et al.* (2006) en muestras de Bell pepper, pepino y fresa inoculando un cocktail de *Salmonella* (10^7 UFC), y después de una hora de incubación encontraron que en la superficie de estos frutos había una menor concentración de bacterias (6.55 ± 0.32 , 6.97 ± 0.03 y $6.76 \pm 0.36 \log^{10}$ CFU respectivamente); en frutos con daño mecánico (tres perforaciones) se encontró una concentración un poco mayor (7.17 ± 0.08 , 6.68 ± 0.36 y $7.00 \pm 0.04 \log^{10}$ CFU respectivamente); y en la zona de la cicatriz del pedúnculo del fruto hubo la mayor concentración de *Salmonella* (7.32 ± 0.40 , 7.97 ± 0.04 y $7.71 \pm 0.13 \log^{10}$ CFU respectivamente).

CUADRO 4. Presencia de *Salmonella* sp., *Shigella* sp. y contenido de *Escherichia coli*, en muestras de frutos sin lavar, frutos lavados y el agua de los frutos lavados de tomate hidropónico producido con agua residual.

Tipo de muestra	Contaminantes biológicos		
	<i>Salmonella</i> sp.	<i>Shigella</i> sp.	<i>E. coli</i> [¶]
	----- UFC·25 g -----	-----	----- NMP·g -----
Frutos sin lavar	0.00 ^{NS}	0.00 ^{NS}	< 3.0 ^{NS}
Frutos lavados	0.00	0.00	< 3.0
	----- UFC·25 mL ⁻¹ -----	-----	--- NMP·100 mL ⁻¹ ---
Agua de frutos lavados	0.00	0.00	< 1.1

^{NS}: No hay diferencias significativas a una $P \leq 0.05$ para la prueba de t-Student, en las dos muestras de 500 g de frutos (n=3). UFC: Unidades formadoras de colonias. NMP: Número más probable. [¶]: No se refiere a *Escherichia coli* 0157:H7.

Con base a los resultados obtenidos en el presente estudio se infiere que la contaminación por metales y la contaminación por microorganismos de platas de tomate irrigadas con agua residual, están dentro de los rangos aceptables para el consumo.

CONCLUSIONES

No hubo presencia de arsénico, cadmio, cromo hexavalente, ni mercurio en las muestras de frutos sin lavar y frutos lavados; en el agua de los frutos lavados sólo se encontró mercurio ($0.0007 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) posiblemente contaminación externa. De acuerdo al consumo *per capita* diario de tomate, la presencia de algunos metales (Cr total, Pb, Zn, Al, Ba, B, Cu, Fe y Mn presentes en 100 g de muestra de fruto) estuvieron en un nivel inferior a las cantidades consideradas como riesgosas para la salud. Las cantidades más elevadas de los metales encontrados (Cr total, Pb, Zn, Al, Ba, B, Cu, Fe y Mn) se presentaron en los frutos sin lavar y en el agua de los frutos lavados, por lo que se asume que es éstos se encuentran en la parte externa del fruto, o en la cicatriz del pedúnculo del mismo.

No se detectó la presencia de *Shigella* spp. y *Salmonella* spp., en las muestras de frutos de tomate sin lavar, en los frutos lavados, ni en el agua de los frutos lavados; *E. coli* se presentó en los frutos sin lavar y en los frutos lavados, en cantidades menores 3 UFC·g; en ambos casos las cantidades fueron inferiores a la dosis que pudieran ocasionar una infección (50-100 UFC·g). En el agua de los frutos lavados hubo una concentración menor a 1.1 UFC·100 mL.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el uso de soluciones nutritivas preparadas con agua residual y riego por goteo en la producción de tomate hidropónico, no es una fuente directa de contaminación por algunos metales y microorganismos en el fruto, ya que el riego dirigido puede reducir el riesgo de estos contaminantes al no entrar en contacto el agua residual con la superficie del fruto.

LITERATURA CITADA

- ACOSTA, I.; J. F. CÁRDENAS; D. ALVARADO-HERNÁNDEZ; M. G. MOCTEZUMA-ZÁRATE. 2008. Remoción de cromo (VI) en solución acuosa por la biomasa celular de *Paecilomyces* sp. Información Tecnológica 19(1): 69-74.
- ALVITER P., D; D. GRANADOS S. 2005. Construcción y manejo de invernaderos en la producción de jitomate (*Lycopersicum esculentum*, Mill) para el Valle del Mezquital, Hidalgo. Revista Chapingo Serie Zonas Aridas 5: 13-18
- ANDREWS, W.H.; A. JACOBSON. 1998. Methods for Specific Pathogens. *Shigella*. Chapter 6.01-6.06. In: Bacteriological Analytical Manual (BAM), 8th Edition Revision 1998. G. J. JACKSON; R. I. MERKER and R. BANDLER. AOAC International published. USA.
- ATSDR. 2006. Barium Health Concern. Health Consultation. Texas EPA Facility ID: TXD987987179. Texas Department of State Health Services Under a Cooperative Agreement with the Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 15 p.
- ÁVILA-QUEZADA, G.; E. SÁNCHEZ; E. MUÑOZ; L. R. MARTÍNEZ; E. VILLALOBOS. 2008. Diagnóstico de la calidad microbiológica de frutas y hortalizas en Chihuahua, México. Phytón 77: 129-136.
- BERNEY, M.; WEILENMANN, H. U.; IHSEN, J.; BASSIN, C.; EGLI, T. 2006. Specific Growth Rate Determines the Sensitivity of *Escherichia coli* to Thermal, UVA, and solar disinfection. Applied and Environmental Microbiology 72(4): 2586-2593.
- BEUCHAT, L. R. 1998. Surface Decontamination of Fruits and Vegetables Eaten Raw: a Review. Food Safety Unit, World Health Organization. 49 p.

- BHUNIA, A.K. 2008. Foodborne Microbial Pathogens: Mechanisms and Pathogenesis. Food Science Text Series. Springer Science Business Media. New York, USA. 269 p.
- CABRERA CRUZ, R. B. E.; GORDILLO MARTÍNEZ, A. J.; CERÓN BELTRÁN, A. 2003. Inventario de contaminación emitida a suelo, agua y aire en 14 municipios del estado de Hidalgo, México. Rev. Int. Contam. Ambient. 19(4): 171-181.
- CABRERA CRUZ, R. B. E.; GORDILLO MARTÍNEZ, A. J.; CERÓN BELTRÁN, A. 2004. Inventario de residuos peligrosos industriales en 17 municipios del estado de Hidalgo, México. México. Rev. Int. Contam. Ambient. 20(1): 13-22.
- CABRERA-VIQUE, C.; M. D. RUÍZ-LÓPEZ; F. JAVIER. 2007. Mercurio en aguas del sureste de España: posibles fuentes de contaminación. Ars. Pharm. 48(1): 37-53.
- CAMEÁN F., A. M.; R. FARRÉ R.; M. FERRERO P. 2009. Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) en relación al posible riesgo del aluminio dietético. Revista del Comité Científico 10: 73-89.
- CODEX. 1995. Norma general del CODEX para los Contaminantes y las Toxinas Presentes en los Alimentos y Piensos (CODEX stan 193-1995). 48 p.
- CORTEZ, F.; E. HERNÁNDEZ L.; M. MORA. 2004. Elaboración de una Canasta Alimentaria para México. Secretaría de Desarrollo Rural SEDESOL. México, D.F. México. 54 p.
- DE ROSA, CH. T.; H. R. POHL; M. WILLIAMS; A. A. ADEMOYERO; C-H. S. CHOU. 1998. Public health implications of environmental exposures. Environmental Health Perspectives 106(1): 369-378.

- DUPERLY Y., G.; D. A. LAVERDE; H. ESCALANTE. 2006. Extracción líquido - líquido de bariocon DEPHA: equilibrio químico. Revista Facultad de Ingeniería 36: 110-121.
- DURUIBE, J. O.; OGWUEGBU, M. O. C; EGWURUGWU, J. N. 2007. Heavy metal pollution and human biotoxic effects. International Journal of Physical Sciences 2 (5): 112-118.
- EPA. 1998. Method 6010B. Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. United States Environmental Protection Agency. USA. 25 p.
- EPA. 2006. Inorganic Arsenic TEACH Chemical Summary. U.S. EPA, Toxicity and Exposure Assessment for Children's Health. USA. 20 p.
- FENG, P.; S. D. WEAGANT; M.A. GRANT. 2001. Enumeration of *Escherichia coli* and the Coliform Bacteria. Appendix 2. Most probable Number from Serial Dilutions. Chapter 4. U.S. Department of Health and Human Services. U.S. Food & Drug Administration. Center for Food Safety & Applied Nutrition. *In*: Bacteriological Analytical Manual (BAM), 8th Edition Revision 1998. G. J. JACKSON; R. I. MERKER and R. BANDLER. AOAC International published. USA.
- GINESTRE PÉREZA, M.; ROMERO AÑEZA, S.; RINCÓN VILLALOBOSB, G.; CASTELLANO GONZÁLEZA, M.; ÁVILA ROOA, Y.; COLINA LÓPEZA, G.; PEROZO MENAC, A. 2009. Indicadores entéricos en vegetales frescos que se comercializan en mercados populares de Maracaibo. Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología; 29: 52-56.
- GOLDMAN, L. R.; M. W. SHANNON; CEH. 2001. Technical Report: Mercury in the Environment: Implications for Pediatricians. Pediatrics 108(1): 197-205.

- GONZÁLES P., Y.; APORTELA G. , P. 2001. Determinación de la toxicidad aguda de dicromato de potasio en larvas de *Artemia salina*. Anuario Toxicología 1(1):104-108.
- GUO, X.; CHEN, J.; BRACKETT, R.E.; BEUCHAT, L.R. 2001. Survival of Salmonellae on and in Tomato Plants from the Time of Inoculation at Flowering and Early Stages of Fruit Development through Fruit Ripening. Applied and Environmental Microbiology 67(10): 4760–4764.
- HERNANDEZ O., J.; M. A. MARTÍNEZ D. 2003. Estimaciones de un sistema AIDS y elasticidades para cinco hortalizas en México. Comunicaciones en Socioeconomía, Estadística e Informática 7(2): 13-24.
- HERNÁNDEZ T., M. 2004. Recomendaciones nutricionales para el ser humano: actualización. Rev. Cubana Invest. Biomed. 23(4): 266-292.
- HYUN-GYUN, Y.; J. A. BARTZ; K. R. SCHNEIDER. 2006. The effectiveness of sanitizer treatments in inactivation of *Salmonella* spp. from Bell pepper, cucumber, and strawberry. Journal of Food Science 71(3): 95-99.
- JÄRUP, L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. British Medical Bulletin 68: 167–182.
- JUSTIN C., L.; A. VÁZQUEZ A.; CH. SIEBE G.; G. ALCÁNTARA G.; M. DE L. DE LA ISLA DE B. 2001. Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Agrociencia 35(3): 267-274.
- NABULO, G.; ORYEM ORIGA, H.; NASINYAMA, G. W.; COLE, D. 2008. Assessment of Zn, Cu, Pb and Ni contamination in wetland soils and plants in the Lake Victoria basin. Int. J. Environ. Sci. Tech. 5(1): 65-74.

- NIRMAL K., J. I.; H. SONI; R. N. KUMAR. 2007. Characterization of heavy metals in vegetables using inductive coupled plasma analyzer (ICPA). J. Appl. Sci. Environ. Manage. 11(3): 75 - 79
- NMX-AA-044-SCFI-2001. 2001. Análisis de Aguas-Determinación de Cromo Hexavalente en Aguas Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas-Método de Prueba (Cancela a la NMX-AA-044-1981).Secretaría de Economía. México. 21 p.
- NMX-AA-051-SCFI-2001. 2001. Análisis de Agua-Determinación de Metales por Absorción Atómica en Aguas Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas-Método de Prueba (Cancela a la NMX-AA-051-1981). Secretaría de Economía. México. 52 p.
- NOM-001-ECOL-1996. 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 MedioAmbiente, Recursos Naturales y Pesca. México. 21 p.
- NOM-001-ECOL-1996. 1997. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada en Diario Oficial de la Federación. México. 38 p.
- NOM-114-SSA1-1994. 1994. Norma oficial mexicana NOM-114-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método para la Determinación de *Salmonella* en Alimento. Secretaría de Salud. México D.F, México. 27 p.
- NOM-CCA/032-ECOL/1993. 1993. NORMA Oficial Mexicana NOM-CCA/032-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de

contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola. Secretaría de Desarrollo Social. México. 7 p.

OKAFO, C. N.; V. J. UMOH; M. GALADIMA. 2003. Occurrence of pathogens on vegetables harvested from soils irrigated with contaminated streams. *Sci. Total Environ.* 311(1-3): 49-56.

OZE, CH.; D. K. BIRD; S. FENDORF. 2007. Genesis of hexavalent chromium from natural sources in soil and groundwater. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(16): 6544–6549.

PRIETO MÉNDEZ, J.; GONZÁLEZ RAMÍREZ, C. A.; ROMÁN GUTIÉRREZ, A. D.; PRIETO GARCÍA, F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1): 29-44.

RELLER, M. E.; NELSON, J.M.; MØLBAK, K.; ACKMAN, D. M.; SCHOONMAKER-BOPP, D. J.; ROOT, T.P.; MINTZ, E.D. 2006. A Large, Multiple-Restaurant Outbreak of Infection with *Shigella flexneri* Serotype 2a Traced to Tomatoes. *Clin. Infect. Dis.* 42(2): 163-169.

ROMERO, F. M.; M. A. ARMIENTA; M. E. GUTIÉRREZ; G. VILLASEÑOR. 2008. Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 24(2): 43-54.

RTCA. 2009. Criterios Microbiológicos par la Inocuidad de Alimentos. Reglamento Técnico Centroamericano. RTCA 67.04.50:08. 36 p.

- SOBRINO F., A.; C. CÁCERES M.; R. ROSAS C. 2007. Evaluación del riesgo por consumir moluscos contaminados con cadmio, cromo y plomo. *Hidrobiología* 17(1): 49-58.
- USDA. 1991. United States. Standards for Grades of Fresh Tomatoes. USDA, Agr. Mktg. Serv., Washington, DC. 13 p.
- VIVANCO E., R. A.; F. GAVI R.; J.J. PEÑA C.; J. DE J. MARTÍNEZ H. 2001. Flujos de nitrógeno en el suelo cultivado con forraje y regado con agua residual urbana. *Terra Latinoamericana* 19(4): 301-308.
- WELLS J. M.; BUTTERFIELD, J. E. 1999. Incidence of *Salmonella* on Fresh Fruits and Vegetables Affected by Fungal Rots or Physical Injury. *Plant Disease* 83(8): 722-726.

DISCUSIÓN GENERAL

Efecto en la calidad postcosecha

Ángulo de tono o *hue* del fruto. En el almacenamiento a 4 °C en todos los muestreos, y a 10 °C en los tres primeros muestreos, los frutos producidos con solución nutritiva preparada con agua de pozo tuvieron un color menos rojo que en los frutos producidos con solución nutritiva preparada con agua residual; este comportamiento pudo haberse debido a un daño por frío, ya que este desorden se presenta a temperaturas de almacenamiento de 13 °C y menores (Lurie y Klein, 1991; Wang, 1994). En el caso del mayor desarrollo del color rojo de los frutos producidos con agua residual, pudo haberse debido a la presencia de una alta conductividad eléctrica (CE) en la solución nutritiva (4.83 a 5.41 dS·m⁻¹), la cual fue menor en la solución nutritiva de los frutos producidos con agua de pozo (3.38 a 3.39 dS·m⁻¹). Para el agua residual, la mayor conductividad eléctrica es producto de la cantidad de bicarbonatos disueltos, ya que el análisis mostró una concentración de 6.87 meq·litro⁻¹, que cambia con la presencia de días lluviosos o soleados; mientras que el agua de pozo tuvo una concentración menor (2.0 meq·litro⁻¹) la cual es más constante. Se ha reportado que una alta conductividad eléctrica en el agua de riego (mayor a 4 dS·m⁻¹) aunque reduce el tamaño, afecta el peso del fruto y la producción; aumenta el contenido de pigmentos (Mizrahi *et al.*, 1986), se incrementa el contenido de β-caroteno y licopeno (Stamatakis *et al.*, 2003; De Pascale *et al.*, 2003; Fanasca *et al.*, 2007). El licopeno puede incrementar entre 34 a 85 %, aunque el biomecanismo específico de esta deposición en el fruto no es claro, evidencias sugieren que el incremento de antioxidantes es una respuesta fisiológica primaria de la planta al estrés salino (Kubota *et al.*, 2006). En el almacenamiento a 20

°C, no hubo diferencias entre los frutos producidos con agua residual y frutos producidos con agua de pozo, posiblemente porque a esta temperatura, en general, existe un mayor desarrollo de color y no se percibe una gran diferencia. Chiesa *et al.* (1998), mencionan que existe un mayor desarrollo del color en tomates almacenados a 20 °C que a 10°C, o temperaturas menores ya que este proceso se reduce. Toor y Savage (2006), encontraron que después de 10 días de almacenamiento a 15-25 °C, el contenido de licopeno en tomate rojo fue mayor (7.5 mg·100 g) que a 7 °C (3.2 mg·100 g).

Pérdida de peso del fruto (%). En cada condición de almacenamiento (20, 10 y 4 °C), los frutos producidos con agua residual y los frutos producidos con agua de pozo presentaron el mismo porcentaje de pérdida de peso, en todos los muestreos. Sólo hubo diferencia entre frutos con distinta temperatura de almacenamiento, con una mayor pérdida de peso del fruto en el almacenamiento no refrigerados (20 °C), seguido de los frutos almacenados a 10 °C y al final los frutos almacenados a 4 °C. Los resultados obtenidos son similares a los reportados por De Castro *et al.* (2006), quienes indican que el porcentaje de pérdida de peso fue mayor en frutos de tomate almacenados a 24 °C (4.16 %) en comparación con los almacenados a 13 (1.14 %) y 7 °C (1.56 %), debido principalmente a que a menor temperatura se presenta menor déficit de presión de vapor, entre la del aire de los espacios intercelulares del fruto y la del aire del entorno, lo que reduce la transpiración y la pérdida de peso del fruto. Javanmardi y Kubota (2006) también reportan en tomate, que una baja temperatura de almacenamiento de 5 °C comparada con 12 °C, inhibió la pérdida de peso durante 16 días.

Firmeza del fruto. La distancia de penetración en pulpa (firmeza) del fruto, fue similar entre los frutos producidos con agua de pozo y los frutos producidos con agua residual, en todos los muestreos. Sólo hubo diferencias entre frutos almacenados a diferentes temperaturas; hubo una mayor distancia de penetración en pulpa (menor firmeza) en los frutos no refrigerados (20 °C), seguido de los almacenados a 10 °C y al final los almacenados a 4 °C. En términos generales, la calidad de los frutos depende de una buena firmeza, la cual indica que existe una buena madurez, fresca y que éstos estén libres de magulladuras o daño interno (Edan *et al.*, 1997). González *et al.* (2004), mencionan que la firmeza del fruto así como la firmeza de la pulpa, van disminuyendo desde el estado de verde-maduro al rojo maduro, esta disminución en la firmeza de los tejidos es una consecuencia de la maduración del fruto. Durante el desarrollo de la maduración, se incrementa la actividad de la enzima poligalacturonasa sobre las pectinas y paredes celulares, ocasionando cambios en los tejidos que provocan el ablandamiento del fruto (González *et al.*, 2004). La firmeza del fruto también se ve afectada por la transpiración, la cual ocasiona que éste pierda agua y al no tener una fuente de suministro (planta madre) pierde turgencia y firmeza (Arias *et al.*, 2000; Villarreal *et al.*, 2002).

Sólidos solubles totales (SST) del fruto (°Brix). En general, en las tres temperaturas de almacenamiento y en todos los muestreos, la concentración de SST fue mayor para los frutos producidos con agua residual que en los frutos producidos con agua de pozo. Los sólidos solubles totales están compuestos por azúcares solubles en forma de fructosa en un 25 % y de glucosa en 22 %, y los ácidos orgánicos en forma de cítrico y málico (13 %); estas concentraciones van a determinar el sabor y aroma del fruto de tomate (Davies y Hobson, 1981; Urrestarazu, 2004). Los SST son un parámetro de

calidad del fruto que varía con la maduración (Noodén, 1988), el cultivar, nutrición de la planta, conductividad eléctrica de la solución nutritiva, estrés hídrico (Mitchell *et al.*, 1991; Nichols *et al.*, 1995; Urrestarazu, 2004), y el daño por frío durante el almacenamiento (a temperaturas entre 13 y 10 °C o menores), como resultado de un desorden fisiológico por lo que se induce una maduración anormal, la pérdida de sabor y el aroma (Wang, 1994; Morris, 1982; Couey, 1982). Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Stamatakis *et al.* (2003) y Segura *et al.* (2009), quienes mencionan que el agua para riego con alta conductividad eléctrica (valores mayores a 2.5 dS·m⁻¹) desde 3.0 (Magán *et al.*, 2008) hasta 10 dS·m⁻¹, incrementan la cantidad de SST del fruto (Yurtseven *et al.*, 2005), el contenido de vitamina C y los ácidos orgánicos (Krauss *et al.*, 2006).

Acidez titulable del fruto (AT). En los frutos almacenados a 20 y 10 °C, tanto los frutos producidos con agua de pozo como los frutos producidos con agua residual, presentaron valores de acidez titulable (AT = porcentaje de ácido cítrico) similares en cada muestreo. Para el almacenamiento a 4 °C, los FAP (T4) presentaron estadísticamente una mayor AT que los FAR (T5), pero únicamente hasta 20 días de almacenamiento (dda). En los frutos almacenados a 4 y 10 °C durante los 10, 20 y 30 dda, se observaron mayores valores de AT particularmente en los FAP; una mayor acidez titulable en el fruto bajo estas condiciones de almacenamiento, es una manifestación de daño por frío (Wang, 1982). Dicho comportamiento es similar a lo reportado por Thorne y Efiuvwevwere (1988), quienes mencionan que la acidez titulable se incrementa con el tiempo de almacenamiento a temperaturas de daño por frío (de 13 °C y menores), y se reducen a temperaturas más cálidas (19 °C). Esto hace suponer que por alguna razón el riego con agua residual repercutió positivamente mitigando la

manifestación de este daño por frío, al presentar menor acidez titulable en los frutos producidos con agua residual.

pH del fruto. Tanto en el almacenamiento no refrigerado a 20 °C como en el almacenamiento a 10 y 4 °C, los frutos producidos con agua residual como los frutos producidos con agua de pozo presentaron valores de pH del fruto similares, en todos los muestreos. Así mismo, no hubo diferencias entre temperaturas de almacenamiento, excepto para los frutos almacenados a 4 °C por 20 dda, los cuales tuvieron un pH mayor a los frutos almacenados a 20 y 10 °C. En general, el pH del fruto fue incrementado con el tiempo de almacenamiento; estos resultados concuerdan con González *et al.* (2004), quienes mencionan que el pH del fruto de tomate es un parámetro que se incrementa con la maduración del fruto y con el tiempo de almacenamiento. Otras investigaciones, usando agua residual en la producción de tomate, reportan que este tipo de agua no afectó el pH del fruto (Traka-Mavrona *et al.*, 1998; Al-Lahhamo *et al.*, 2003), lo cual coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio.

Efecto en el rendimiento

Diámetro del fruto. Las plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo y cultivadas en arena de tezontle produjeron frutos con un mayor diámetro polar y ecuatorial, que las plantas regadas con solución nutritiva preparada con agua residual y cultivadas en arena de tezontle y suelo agrícola. El tomate es una especie glicófita, medianamente sensible a las sales y que presenta un umbral respecto al contenido total de sales, cuantificadas en el extracto de saturación del suelo y expresadas como conductividad eléctrica de 2.5 dS m⁻¹, y que por cada unidad de salinidad (CE) que se

incrementa se reduce el rendimiento en un 9.9 % (Chinnusamy *et al.*, 2005). Se ha reportado que una alta conductividad eléctrica en el agua de riego (mayor a 4 dS·m⁻¹), aunque aumenta el contenido de sólidos solubles totales, carotenoides y licopeno, reduce el tamaño, peso del fruto y la producción (Mizrahi *et al.*, 1986; Goykovic y Saavedra, 2007).

Número de frutos. Las plantas cultivadas en suelo agrícola e irrigadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo y agua residual; así como las plantas regadas con solución nutritiva preparada con agua residual y sembradas en arena de tezontle, tuvieron un mayor número de frutos que las plantas regadas con agua de pozo y sembradas en arena de tezontle. Este mayor número de frutos es un efecto de la cantidad de boro encontrada en los análisis, para agua residual se reportó una concentración de 1.02 mg L⁻¹ y en agua de pozo una concentración de 0.73 mg L⁻¹. En el análisis de suelo hubo un mayor contenido de boro en suelo regado con agua residual con una concentración de 8.34 mg kg⁻¹ y en suelo regado con agua de pozo una concentración de 3.94 mg kg⁻¹. En soluciones nutritivas hidropónicas una concentración óptima de boro es de 1.0 mg L⁻¹, y un máximo de 5 mg L⁻¹ (Douglas, 1976 citado por Morales *et al.*, 2008), por lo que el agua residual y las dos muestras de suelo están por arriba del óptimo del contenido de boro. Brown *et al.* (2002) mencionan que el boro forma parte de la pared celular, complejos estables en la membrana plasmática, estimula la germinación del polen y la elongación del tubo polínico lo cual favorece a la polinización y amarre de frutos. La diferencia de CE de las soluciones nutritivas no afectaron el número de frutos, lo cual es similar a lo reportado por Eltez *et al.* (2002) quienes encontraron que para tomate cultivar Gökçe F1, irrigado con

soluciones completas con CE de 2.0 (testigo), 3.0, 4.0 y 5.0 dS m⁻¹, el número de frutos cosechados no se redujo por efecto de la salinidad.

Peso promedio del fruto y racimo, y producción por planta. Las plantas cultivadas en arena de tezontle y regadas con solución nutritiva preparada con agua de pozo tuvieron un mayor peso promedio de fruto y racimo, y una mayor producción por planta, comparado con las plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua residual, y sembradas en arena de tezontle y suelo. El peso promedio del fruto en las condiciones normales de hidroponía (testigo) aunque fue el más alto (114.66 g) estuvo por abajo del peso promedio que se ha reportado para la variedad 7705 que es de 120–140 g (Wehner, 2002). Los resultados obtenidos indican que las plantas irrigadas con agua de pozo produjeron frutos de mayor peso lo cual se esperaba, mientras que el tratamiento con agua residual produjo frutos de menor peso; este comportamiento es debido a las condiciones de CE que son mayores para los tratamientos regados con agua residual. Krauss *et al.* (2006) reportan resultados similares en tomate Durinta F1 regado con soluciones nutritivas con tres diferentes CE de 3.0 (testigo), 6.5 y 10 dS m⁻¹, donde a mayor CE el peso del fruto fue menor (70.2, 57 y 42.5 g respectivamente), el rendimiento por planta (2.2, 2.1 y 1.7 kg⁻¹ respectivamente); y de igual manera, el crecimiento total de las plantas también fue afectado (4.56, 4.13 y 3.69 m).

Rendimiento por m⁻², cama⁻¹, 1000 m⁻² y ha⁻¹. Las plantas irrigadas con agua residual produjeron frutos de menor peso promedio que afectaron el rendimiento por m⁻², cama⁻¹, 1000 m⁻² y ha⁻¹. Este comportamiento en la reducción del rendimiento es un efecto de una mayor CE en las soluciones preparadas con agua residual como consecuencia de un menor control en la neutralización de los bicarbonatos. Esto se debe a que cuando existen días soleados la concentración se incrementa y cuando existen días nublados o

lluviosos se reduce; en comparación con las soluciones preparadas con agua de pozo donde la concentración de bicarbonato es más estable. Este efecto de la CE (o salinidad) también se presentó en el suelo de cultivo, ya que los resultados de los análisis reportan una CE en el extracto de saturación de suelo de 4.07 dS m^{-1} en el suelo regado con agua de pozo, y de 11.63 dS m^{-1} en el suelo regado con agua residual. De acuerdo con el laboratorio de salinidad de la USDA, un suelo salino se define como un suelo que tiene una CE en el extracto de saturación del suelo de 4 dS m^{-1} ($4 \text{ dS m}^{-1} \approx 40 \text{ mM NaCl}$) o más (Chinnusamy *et al.*, 2005). Los resultados encontrados coinciden con lo reportado por Tüzel *et al.* (2003), quienes encontraron que en plantas de tomate irrigadas con solución nutritiva con una CE de 2.0 dS m^{-1} (testigo) tuvieron un rendimiento mayor de 13.6 kg m^{-2} (ciclo de otoño), y de 14.3 kg m^{-2} (ciclo de primavera), comparadas con las plantas irrigadas con solución nutritiva a una CE de 6.0 dS m^{-1} , las cuales tuvieron una reducción de rendimiento de 37 y 28 % en ambos ciclos. Aunque hubo un efecto negativo en el rendimiento en las plantas irrigadas con solución nutritiva preparada con agua residual, los rendimientos son aceptables ($78.949 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ en sustrato y $88.587 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ en suelo), y podrían incrementarse con un raleo de frutos e incrementando el número de racimos por planta entre ocho a 12.

Presencia de contaminantes

Contaminación por metales. En los frutos sin lavar y frutos lavados no hubo presencia de arsénico, cadmio, cromo hexavalente y mercurio; sin embargo, los análisis indican que el cromo total se encontró en los frutos sin lavar ($860 \mu\text{g}\cdot 100 \text{ g de fruto}$), en los frutos lavados ($20 \mu\text{g}\cdot 100 \text{ g de fruto}$), y en el agua de los frutos lavados ($0.011 \text{ mg}\cdot\text{litro}^{-1}$).

¹); Hernández (2004) indica que una ingestión adecuada de Cr en la dieta es de 35 $\mu\text{g}\cdot\text{día}^{-1}$ para hombres y de 25 $\mu\text{g}\cdot\text{día}^{-1}$ para mujeres.

El plomo se encontró en los frutos sin lavar ($0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), pero no en los frutos lavados ni en el agua de los frutos lavados, esto indica que solo hubo una contaminación externa. En el reglamento de la Comisión de las Comunidades Europeas (CCE) y del CODEX alimentario se establece que el contenido máximo de Pb en hortalizas y frutas es de $0.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ·peso fresco (CODEX, 1995; Kyprianou, 2006).

Hubo presencia de Zinc en los frutos sin lavar ($0.30\text{ mg}\cdot 100\text{ g de fruto}$), en los frutos lavados ($0.1\text{ mg}\cdot 100\text{ g de fruto}$) y en el agua de los frutos lavados ($0.053\text{ mg}\cdot\text{litro}^{-1}$); de acuerdo con Nirmal *et al.* (2007) el consumo de Zn en la dieta diaria es de $15\text{ mg}\cdot\text{día}^{-1}$ para hombres y $12\text{ mg}\cdot\text{día}^{-1}$ para mujeres. Los resultados indican que para 100 g de fruto consumido este elemento está por debajo de permitido.

Los análisis mostraron aluminio en los frutos sin lavar ($5.393\text{ mg}\cdot 100\text{ g de fruto}$), en los frutos lavados ($0.067\text{ mg}\cdot 100\text{ g de fruto}$) y en el agua de los frutos lavados ($0.270\text{ mg}\cdot\text{litro}^{-1}$), esto indica que la mayor parte del Al se encuentra de manera externa en los frutos; el comité de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) considera un umbral de seguridad de consumo de Al de $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ peso corporal·semana⁻¹ (Camean *et al.*, 2009).

El bario se encontró en los frutos sin lavar ($0.037\text{ mg}\cdot 100\text{ g de fruto}$), en frutos lavados ($0.027\text{ mg}\cdot 100\text{ g de fruto}$), y en el agua de los frutos lavados ($0.052\text{ mg}\cdot\text{litro}^{-1}$); la EPA mencionan que la dosis oral de referencia (RfD) del bario es de $0.2\text{ mg}\cdot\text{ka}^{-1}\cdot\text{día}^{-1}$ (ATSDR, 2006).

El boro se encontró en los frutos sin lavar ($0.103\text{ mg}\cdot 100\text{ g de fruto}$), en frutos lavados ($0.063\text{ mg}\cdot 100\text{ g de fruto}$), y en el agua de los frutos lavados ($0.007\text{ mg}\cdot\text{litro}^{-1}$); en el año

2002, el Consejo de Alimentación y Nutrición de EE. UU., estableció un nivel máximo de ingestión tolerable para el boro de $3 \text{ mg} \cdot \text{día}^{-1}$ para niños de 1 a 3 años, $6 \text{ mg} \cdot \text{día}^{-1}$ para niños de 4 a 8 años, $11 \text{ mg} \cdot \text{día}^{-1}$ para niños de 9 a 13 años, $17 \text{ mg} \cdot \text{día}^{-1}$ entre 14 y 18 años de edad y $20 \text{ mg} \cdot \text{día}^{-1}$ para adultos (Hernández, 2004).

El cobre se encontró en los frutos sin lavar ($0.723 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}$ de fruto), en frutos lavados ($0.266 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}$ de fruto), y en el agua de los frutos lavados ($0.637 \text{ mg} \cdot \text{litro}^{-1}$); Nirmal *et al.* (2007) mencionan que los niveles máximos de ingestión tolerable de Cu son de 1.0 a $5.0 \text{ mg} \cdot \text{día}^{-1}$ para niños desde uno hasta 13 años de edad, y $10 \text{ mg} \cdot \text{día}^{-1}$ para adultos.

Los análisis mostraron que el fierro se encontró en los frutos sin lavar ($1.09 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}$ de fruto), en frutos lavados ($1.13 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}$ de fruto), y en el agua de los frutos lavados ($0.270 \text{ mg} \cdot \text{litro}^{-1}$); Nirmal *et al.* (2007) menciona que el límite aceptable para el consumo humano de fierro es de 8 a $11 \text{ mg} \cdot \text{día}^{-1}$ para niños como para adultos.

El manganeso se encontró en los frutos sin lavar ($0.106 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}$ de fruto), en frutos lavados ($0.053 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}$ de fruto), y en el agua de los frutos lavados ($0.009 \text{ mg} \cdot \text{litro}^{-1}$); Nirmal *et al.* (2007) mencionan que el nivel máximo de manganeso de ingestión tolerable es de 2.0 a $6.0 \text{ mg} \cdot \text{día}^{-1}$ para niños y $11.0 \text{ mg} \cdot \text{día}^{-1}$ para adultos.

De acuerdo al consumo *per capita* diario de tomate para México reportados por Alviter y Granados (2005) de 36.16 g ($13.2 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$); por Hernández y Martínez (2003) de 45.21 g ($16.5 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) y por Cortéz *et al.* (2004) de 50 g ($18.25 \text{ kg}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$). Las concentraciones de metales encontradas en los frutos lavados estuvieron dentro de los rangos aceptables para estos elementos.

Contaminantes biológicos. Los análisis en frutos sin lavar y frutos lavados mostraron presencia de *Salmonella* spp. y *Shigella* spp., sin embargo *E. coli* se encontró en una

concentración menor a 3.0 UFC·g. La superficie de frutas y hortalizas puede contaminarse por la presencia de microorganismos patogénicos debido al contacto con el suelo, agua (para riego o en empaque), abono, líquidos residuales, aire (acarreo de partículas), animales y durante la cosecha y el empaque (FDA, 2002). Los criterios microbiológicos para *Salmonella* y *Shigella* spp., debe ser de ausencia en un total de cinco muestras de 25 g; para *E. coli* en alimentos debe ser menor a 10 UFC·g (RTCA, 2009); mientras que en ensaladas mixtas de vegetales debe ser menor a 10^2 UFC (Francis *et al.*, 1999). Los resultados obtenidos en este trabajo se consideran satisfactorios para estos parámetros.

LITERATURA CONSULTADA

- AL-LAHHAM, O.; EL ASSI, N. M.; FAYYAD, M. 2003. Impact of treated wastewater irrigation on quality attributes and contamination of tomato fruit. *Agricultural Water Management*. 61(1): 51-62.
- ARIAS, R.; LEE, T. C.; SPECCA, D.; JANES, H. 2000. Quality comparison of hydroponic tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) ripened on and off vine. *Journal of Science* 65(3): 545-548.
- ATSDR. 2006. Barium Health Concern. Health Consultation. Texas EPA Facility ID: TXD987987179. Texas Department of State Health Services Under a Cooperative Agreement with the Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 15 p.
- BROWN, P.H., N. BELLALLOUI, M. A. WIMMER, E. S. BASSIL, J. RUIZ, H. HU, H. PFEFFER, F. DANIEL AND V. RÖMHELD. 2002. Boron in Plant Biology. *Plant Biology* 4: 211-229.
- CAMEÁN F., A. M.; R. FARRÉ R.; M. FERRERO P. 2009. Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) en relación al posible riesgo del aluminio dietético. *Revista del Comité Científico* 10: 73-89.
- CHIESA, A.; SACKMANN VARELA, M.; FRASCHINA, A. 1998. Acidity and pigment changes in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) fruit ripening. *Acta Hort.* 464:487-487.
- CHINNUSAMY, V., A. JAGENDORF AND J.-K. ZHU. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science* 45: 437-448.

- CODEX. 1995. Norma general del CODEX para los Contaminantes y las Toxinas Presentes en los Alimentos y Piensos (CODEX stan 193-1995). 48 p.
- COUEY, H. M. 1982. Chilling injury of crops of tropical and subtropical origin. HortScience 17:162-165.
- DAVIES, J. N.; HOBSON, G. E. 1981. The constituents of tomato fruit, the influence of environment, nutrition and genotype. CRC. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 15: 205-280.
- DE CASTRO, L. R.; CORTEZ, L. A. B.; VIGNEAULT, C. 2006. Effect of sorting, refrigeration and packaging on tomato shelf life. Journal of Food, Agriculture & Environment 4 (1): 70-74.
- DE PASCALE, S.; MAGGIO, A.; ANGELINO, G.; GRAZIANI, G. 2003. Effect of salt stress on water relations and antioxidant activity in tomato. Acta Horticulturae 613: 39-46.
- EDAN, Y.; PASTERNAK, H.; SHMULEVICH, I.; RACHMANI, D.; GUEDALIA, D.; GRINBERG, S.; FALLIK, E. 1997. Color and firmness classification of fresh market tomatoes. Journal of Food Science 32(4): 793-796.
- ELTEZ, R. Z., Y. TÜZEL, A. GÜL, I. H. TÜZEL AND H. DUYAR. 2002. Effects of different EC levels of nutrient solution on greenhouse tomato growing. Acta Hort. 573:443-448.
- FANASCA, S.; MARTINO, A.; HEUVELINK, E.; STANGHELLINI, C. 2007. Effect of electrical conductivity, fruit pruning, and truss position on quality in greenhouse tomato fruit. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 82(3): 488-494.

- FDA.2002. Mejorando la Seguridad y Calidad de Frutas y Hortalizas Frescas: Manual de Formación para Instructores. Joint Institute for Food Safety and Applied Nutrition. U. S. Food and Drug Administration (FDA). Maryland, USA. 350 p.
- FRANCIS, G. A.; C. THOMAS; D. O'BEIRNE. 1999. The microbiological safety of minimal processed vegetables. *International Journal of Food Science and Technology* 34:1-22.
- GONZÁLEZ CÉSPEDES, A.; SALAS SANJUÁN, M. del C.; URRESTARAZU GAVILÁN, M. 2004. Producción y calidad en el cultivo de tomate cherry. pp. 703-747. *In*: Tratado de Cultivos sin Suelo. URRESTARAZU GAVILÁN, M. (ed.). Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- GOYKOVIC CORTÉS, V. Y G. SAAVEDRA DEL REAL. 2007. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo. *IDESIA* 25(3): 47-58.
- HERNÁNDEZ T., M. 2004. Recomendaciones nutricionales para el ser humano: actualización. *Rev. Cubana Invest. Biomed.* 23(4): 266-292.
- JAVANMARDI, J.; KUBOTA, CH. 2006. Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest storage. *Postharvest biology and technology* 41(2): 151-155.
- KRAUSS, S.; SCHNITZLER, W. H.; GRASSMANN, J.; WOITKE, M. 2007. Fruit quality characteristics of tomatoes at different EC values in a simplified recirculating soilless system. *Acta Hort.* 747: 457-463.
- KUBOTA, C.; THOMSON, C. A.; WU, M.; JAVANMARDI, J. 2006. Controlled environments for production of value-added food crops with high

- phytochemical concentrations: Lycopene in tomato as an example. HortScience 41(3): 522-525.
- LURIE, S.; KLEIN, J. D. 1991. Acquisition of low-temperature tolerance in tomatoes by exposure to high-temperature stress. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 116: 1007-1012.
- MAGÁN, J. J.; GALLARDO, M.; THOMPSON, R. B.; LORENZO, P. 2008. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions. Agricultural Water Management 95(9): 1041-1055.
- MITCHELL, J. P.; SHENNAN, C.; GRATTAN, S. R.; MAY, D. M. 1991. Tomato fruit yield and quality under water deficit and salinity. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 116: 215-221.
- MIZRAHI, Y.; ARAD, S.; MIZRAHI, Y.; ZOHAR, R. 1986. Salinity as a possible means of improving fruit quality in slow-ripening tomato hybrids. Acta Hort. 190: 223-224.
- MORRIS, L. 1982. Chilling injury of horticultural crops: an overview. Hortscience 17: 161-162.
- MORALES P., J. T., I. MIRANDA V., I. GIL V., A. BASTIDA T., A. RAMÍREZ A., J. HERNÁNDEZ O., D. S. REYES R., G. FLORES E. Y E. R. NAVARRO L. 2008. Introducción a la Hidropónica. Serie de Publicaciones AGRIBOT, Depto. de Preparatoria Agrícola. UACH. Chapingo Edo. de México, México. 160 p.
- NICHOLS, M. A.; FADALIA, E. F.; FISHER, K. J.; MORGAN, L. M. 1995. The effect of osmotic stress on the yield and quality of tomatoes. Acta Horticulturae 379: 105-111.

- NIRMAL K., J. I.; H. SONI; R. N. KUMAR. 2007. Characterization of heavy metals in vegetables using inductive coupled plasma analyzer (ICPA). J. Appl. Sci. Environ. Manage. 11(3): 75 - 79
- NOODÉN, L. D. 1988. The phenomena of senescence and aging. pp. 1-50. *In*: NOODÉN, L. D.; LEOPOLD, A. C. (eds.). Senescence and Aging in Plants. Academic Press, San Diego, California. USA.
- RTCA. 2009. Criterios Microbiológicos par la Inocuidad de Alimentos. Reglamento Técnico Centroamericano. RTCA 67.04.50:08. 36 p.
- SEGURA, M. L.; CONTRERAS, J. I.; SALINAS, R.; LAO, M. T. 2009. Influence of salinity and fertilization level on greenhouse tomato yield and quality. Soil Science and Plant Analysis 40(1-6): 485-497.
- STAMATAKIS, A., PAPADANTONAKIS, N., SAVVAS, D., LYDAKIS-SIMANTIRIS, N.; KEFALAS, P. 2003. Effects of silicon and salinity on fruit yield and quality of tomato grown hydroponically. Acta Hort. 609: 141-147.
- THORNE, S. N.; EFIUVWEVWERE, B. J. O. 1988. Changes in organic acids in chilled tomato fruit (*Lycopersicon esculentum* Mill). Journal of the Science of Food and Agriculture 44(4): 309-319.
- TOOR R., K.; SAVAGE G., P. 2006. Changes in major antioxidant components of tomatoes during post-harvest storage. Food Chemistry 99(4): 724-727.
- TRAKA-MAVRONA, E. K.; MALOUPA, E.; PAPADOPOULOS, F.; PAPADOPOULOS, A. 1998. Response of greenhouse tomatoes to wastewater fertigation in soilless cultivation. Acta Hort. 458:411-416.
- TÜZEL, Y., I. H. TÜZEL AND F. ÜÇER. 2003. Effects of salinity on tomato growing in substrate culture. Acta Hort. (ISHS) 609:329-335.

- URRESTARAZU GAVILÁN, M. 2004. Tratado de Cultivos sin Suelo. Edit. Mundi-Prensa. 3ª edición. Madrid, España. 914 p.
- VILLARREAL ROMERO, M.; GARCÍA ESTRADA, R. S.; OSUNA ENCISO, T.; ARMENTA BOJORQUEZ, A. D. 2002. Efecto de dosis y fuente de nitrógeno en rendimiento y calidad postcosecha de tomate en fertirriego. Terra 20(3): 311-320.
- WANG, C. Y. 1982. Physiological and biochemical responses of plants to chilling stress. HortScience 17(2): 173-186.
- WANG, C. Y. 1994. Chilling injury of tropical horticultural commodities. HortScience 29: 986-988.
- WEHNER, T. C. 2002. Vegetable cultivar descriptions for North America list 26. HortScience 37(1). 15-78.
- YURTSEVEN, E; KESMEZ, G. D.; ÜNLÜKARA, A. 2005. The effects of water salinity and potassium levels on yield, fruit quality and water consumption of a native central Anatolian tomato species (*Lycopersicon esculentum*). Agricultural Water Management 78(1-2): 128-135.

CONCLUSION GENERAL

El uso de agua residual en la producción de tomate rojo hidropónico produjo un efecto favorable en el color, contenido de sólidos solubles y acidez titulable del fruto (hubo reducción del efecto negativo del almacenamiento a bajas temperaturas). Los frutos producidos con agua residual registraron un color más rojo (valores menores de *hue*) en el almacenamiento a 4 y 10 °C; así mismo, tuvieron un mayor contenido de sólidos solubles totales que los frutos producidos con agua de pozo. La acidez titulable fue menor en los frutos producidos con agua residual, particularmente en los refrigerados a 4 y 10 °C durante 10, 20 y 30 dda, que en los frutos producidos con agua de pozo. El tipo de agua de riego (pozo o residual), no afectó el porcentaje de pérdida de peso, la firmeza (distancia de penetración en la pulpa) y el pH del fruto.

El agua residual redujo el tamaño del fruto y lo cual afectó los componentes del rendimiento, sin embargo, incrementó el número de frutos. El agua residual en cultivo hidropónico de tomate (despuntado a seis racimos) produjo un rendimiento de 78.949 ton·ha⁻¹ en sustrato y 88.587 ton·ha⁻¹ en suelo, el cual puede incrementarse al doble (157.898 ton·ha⁻¹ en sustrato y 177.174 ton·ha⁻¹ en suelo), con un raleo de frutos y un incremento a 12 racimos por planta.

No hubo presencia de arsénico, cadmio, cromo hexavalente, ni mercurio en las muestras de frutos sin lavar y frutos lavados; en el agua de los frutos lavados sólo se encontró mercurio (0.0007 mg·kg⁻¹) posiblemente contaminación externa. De acuerdo al consumo *per capita* diario de tomate, la presencia de algunos metales (Cr total, Pb, Zn, Al, Ba, B, Cu, Fe y Mn presentes en 100 g de muestra de fruto) estuvieron en un nivel inferior a las cantidades consideradas como riesgosas para la salud. Las cantidades más elevadas de los metales encontrados (Cr total, Pb, Zn, Al, Ba, B, Cu, Fe y Mn) se

presentaron en los frutos sin lavar y en el agua de los frutos lavados, por lo que se asume que es éstos se encuentran en la parte externa del fruto, o en la cicatriz del pedúnculo del mismo.

No se detectó la presencia de *Shigella* spp. y *Salmonella* spp., en las muestras de frutos de tomate sin lavar, en los frutos lavados, ni en el agua de los frutos lavados; *E. coli* se presentó en los frutos sin lavar y en los frutos lavados, en cantidades menores 3 UFC·g; en ambos casos las cantidades fueron inferiores a la dosis que pudieran ocasionar una infección (50-100 UFC·g). En el agua de los frutos lavados hubo una concentración menor a 1.1 UFC·100 mL.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el uso de soluciones nutritivas preparadas con agua residual y riego por goteo (dirigido a la base del tallo de la planta) en la producción de tomate hidropónico bajo invernadero: a) favorece algunos parámetros de calidad (color, sólidos solubles totales y menor acidez del fruto); b) no es una fuente directa de contaminación por algunos metales y microorganismos en el fruto (al no entrar en contacto el agua residual con la superficie del fruto); y c) es una buena alternativa de producción y aprovechamiento de las aguas residuales para la zona del Valle del Tula.