



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN  
Y SERVICIO EN FITOTECNIA**

**POSGRADO EN HORTICULTURA**

**CALIDAD POSTCOSECHA DE TOMATE (*Solanum  
lycopersicon* L.) PRODUCIDO CON AGUA RESIDUAL Y  
DE POZO EN HIDROPONIA Y SUELO**

**TESIS**

QUE COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN HORTICULTURA**

PRESENTA:

**NATALITH CLEMENTE LEZAMA**

Director:

**DR. RAÚL NIETO ANGEL**

junio, 2010

Chapingo, Estado de México.



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA  
CENEP  
CENEP DE SERVICIOS ESCOLARES  
CENEP DE EXÁMENES PROFESIONALES



Instituto de Horticultura

**CALIDAD POSTCOSECHA DE TOMATE (*Solanum lycopersicon* L.) PRODUCIDO CON AGUA RESIDUAL Y DE POZO EN HIDROPONIA Y SUELO**

Tesis realizada por Natalith Clemente Lezama bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA**

DIRECTOR:



---

Dr. RAÚL NIETO ANGEL

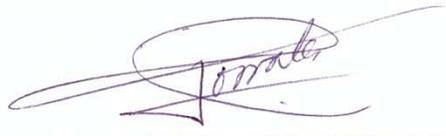
ASESOR:



---

Dra. MARÍA DEL ROSARIO GARCÍA MATEOS

ASESOR:



---

Dr. JOSÉ JOEL ENRIQUE CORRALES GARCÍA

Chapingo, Estado de México, Junio de 2010.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, por darme la oportunidad de formarme como profesionista.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado durante mi formación.

Al Dr. Raúl Nieto Ángel, por ser un ejemplo vivo de compromiso genuino, por el apoyo incondicional en la realización y culminación de este camino en mi vida.

A la Dra. María del Rosario García Mateos por su asesoría, apoyo y escucha durante la elaboración del trabajo de investigación y de mi formación en la maestría.

Al Dr. José Joel Enrique Corrales García por la dedicación, tiempo y apoyo brindados para culminar mis estudios de maestría y también durante mi proceso de formación.

Al Sr. Ángel y Herón por haberme dado las facilidades y apoyado en su invernadero durante el experimento en campo.

A los técnicos Ángela, Adrián y Cecilio por su apoyo durante el experimento de laboratorio y sus valiosas aportaciones.

A mi esposo e hija por su apoyo y paciencia.

A mis compañeros de la maestría y amigos del postgrado en horticultura, así como a todos aquellos que no cito pero participaron en esta parte de la formación de vida y compartieron momentos agradables y alegres.

## DEDICATORIA

Se la dedico a la Divinidad que rige mi vida porque ha sabido ponerme las personas y acontecimientos necesarios en mi camino, y por primera vez me dedico este esfuerzo y por todo doy gracias.

A dos grandes amores en mi vida: mi hija Lucia Yebdie y a Omar, mi esposo.

A mi mamá, a mi hermano Barcy.

“Camina con esa cinta amarrada alrededor de tu cabeza, que simboliza que eres un **guerrero**, acepta los desafíos de tu camino y **disfruta** de tus resultados”

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

Natalith Clemente Lezama es originaria de la población de Tamazulápam del Progreso, Oaxaca. Ahí nació el 24 de noviembre de 1983, sus estudios de educación básica los tomó en la misma población en la Escuela Primaria “Gregorio Torres Quintero” y la Secundaria Técnica No. 71.

A los 14 años emigró a Chapingo, Estado de México para cursar la Preparatoria Agrícola y los estudios superiores en la Universidad Autónoma Chapingo. Formó parte de la generación 1998-2005. Egresó de la Ingeniería en Restauración Forestal.

Posteriormente, durante el año 2006 desempeñó actividades como parte de un proyecto interinstitucional con el proyecto “Manejo Integrado de la Parte Alta del Río Grande, Oaxaca, México”. También desarrolló actividades como evaluadora del impacto ambiental de los incendios forestales, así como facilitadora y gestora del Programa Especial para la Seguridad Alimentaria en la Mixteca baja de Oaxaca.

En el año 2008 ingresó al posgrado en Horticultura, en el departamento de enseñanza e investigación en Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo. Finalmente culmina la investigación en 2010 para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura.

**CALIDAD POSTCOSECHA DE TOMATE (*Solanum lycopersicon* L.)  
PRODUCIDO CON AGUA RESIDUAL Y DE POZO EN HIDROPONIA Y  
SUELO**

Natalith Clemente Lezama  
Maestría en Ciencias en Horticultura  
Universidad Autónoma Chapingo  
(Bajo la dirección de Raúl Nieto Ángel)

**RESUMEN**

El estudio sobre el efecto del agua residual y de pozo en la calidad postcosecha de tomate, se realizó en suelo y en tezontle rojo como sustrato inerte. Los frutos fueron cosechados siguiendo criterios comerciales y almacenados durante 30 días, bajo las siguientes condiciones: 20 °C con 56 % de humedad relativa (HR) y 10 °C con 84 % HR. Cada cinco días se evaluaron los parámetros de calidad más importantes; se analizaron los efectos de los factores en estudio y las interacciones significativas. El uso de aguas residuales para la producción de tomate indujo una mayor pérdida de peso del fruto, incrementó el pH, disminuyó la acidez titulable (AT) y estimuló una mayor abundancia de licopeno en los estados de madurez verde maduro, pintón y rosa. A 20 °C se indujo una mayor pérdida de peso

de los frutos de tomate así como también se disminuyó la firmeza, la AT y el contenido de sólidos solubles totales (SST). El suelo utilizado como medio de crecimiento de las plantas favoreció que los frutos tuvieran un *hue* significativamente menor, pero afectó de manera negativa la firmeza, contenido de SST y la AT; la abundancia de licopeno, fue significativa sólo en el estado de madurez verde quebrante. La interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato, fue significativa para las variables: pérdida de peso, *hue*, firmeza y pH del fruto. La interacción triple, de los factores tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento, resultó significativa sólo para la pérdida de peso del fruto.

**Palabras clave:** *Solanum lycopersicon* L., porcentaje de pérdida de peso, ángulo de tono (*hue*), sólidos solubles totales, acidez titulable, pH del fruto, licopeno.

**POSTHARVEST QUALITY OF TOMATO FRUIT (*Solanum lycopersicon* L.)  
PRODUCED WITH WASTEWATER AND WELL WATER IN HYDROPONICS  
AND SOIL**

Natalith Clemente Lezama  
Maestría en Ciencias en Horticultura  
Universidad Autónoma Chapingo  
(Advisor Raúl Nieto Ángel)

**ABSTRACT**

This study on the effect of wastewater and well water on the postharvest quality of tomato fruit was carried out in soil and red volcanic rock used as an inert substrate. The fruits were harvested according to commercial criteria and stored for 30 days, under the following conditions: 20 °C with 56% relative humidity (RH) and 10 °C with 84% RH. Every five days the most important quality parameters were evaluated; the effects of the factors under study and the significant interactions were analyzed. The use of wastewater for tomato production induced a greater loss of fruit weight, increased pH, decreased titratable acidity (TA) and stimulated greater lycopene abundance in the mature green,

turning and pink maturity stages. At 20 °C greater weight loss of the tomato fruits was induced, as well as reduced firmness, TA and total soluble solids (TSS) content. The soil used as plant growth medium favored that the fruits had a significantly lower hue, but it negatively affected firmness, TSS content and TA; lycopene abundance was significant only in the breaker stage of maturity. The interaction of the irrigation water and substrate factors was significant for the following variables: weight loss, hue, firmness and pH of the fruit. The triple interaction of the irrigation water, crop substrate and storage temperature was significant only for fruit weight loss.

**Keywords:** *Solanum lycopersicon* L., weight loss percentage, *hue*, total soluble solids, titratable acidity, pH of the fruit, lycopene.

## ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
DATOS BIOGRÁFICOS.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE GENERAL.....	viii
LISTA DE CUADROS .....	xi
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1 Aguas residuales .....	4
2.1.1 Origen del agua residual en el Valle del Mezquital.....	5
2.1.2 Calidad química del agua residual .....	5
2.1.3 Problemática del uso del agua residual en la agricultura en el Valle del Mezquital.....	6
2.1.4 Características del suelo de zonas irrigadas con aguas residuales ..	7
2.1.5 Efecto del uso de aguas residuales en tomate y otros cultivos .....	9

2.2	Calidad de fruto de tomate.....	11
2.2.1	Color.....	11
2.2.2	Tamaño .....	12
2.2.3	Forma.....	13
2.2.4	Firmeza .....	13
2.2.5	pH.....	15
2.2.6	Acidez titulable .....	16
2.2.7	Sólidos solubles totales.....	16
2.2.8	Valor Nutritivo.....	17
2.2.9	Licopeno.....	17
2.2.9.1	Biosíntesis y estructura química .....	18
2.2.9.2	Presencia del licopeno en frutos de tomate.....	19
2.2.9.3	Importancia del licopeno en la salud humana.....	20
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
3.1	Ubicación del experimento y material vegetal.....	22
3.2	Factores y tratamientos .....	23
3.3	Fase 1: Efecto del tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de frutos de tomate. ....	25
3.3.1	Variables evaluadas.....	25
3.3.2	Análisis de datos .....	27
3.3.3	Modelo estadístico .....	27

3.4 Fase 2: Efecto del tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la abundancia de licopeno en los diferentes estados de madurez del fruto de tomate en planta. ....	28
3.4.1 Tratamientos y manejo de las muestras.....	28
3.4.2 Extracción de licopeno .....	29
3.4.3 Identificación por cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) .....	30
3.4.4 Cuantificación de licopeno .....	31
3.4.5 Modelo estadístico .....	31
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1 Fase 1: Efecto del tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de frutos de tomate. ....	33
4.1.1 Pérdida de peso del fruto .....	33
4.1.2 Ángulo de tono o <i>hue</i> .....	35
4.1.3 Firmeza .....	39
4.1.4 Sólidos solubles totales (SST) .....	42
4.1.5 pH del fruto.....	43
4.1.6 Acidez titulable (AT) .....	46
4.2 Fase 2: Efecto del tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la abundancia de licopeno en los diferentes estados de madurez del fruto de tomate en planta. ....	48
V. CONCLUSIONES .....	51
VI. LITERATURA CITADA.....	53

## LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Cambios de color durante la maduración de tomate fresco para mercado.....	12
Cuadro 2. Firmeza de frutos de tomate basado en pruebas subjetivas y objetivas.....	14
Cuadro 3. Análisis nutrimental del agua residual y agua potable utilizada en el experimento. ....	22
Cuadro 4. Análisis del suelo de las parcelas correspondientes a cada tipo de condición del agua utilizada en el experimento.....	23
Cuadro 5. Factores y dominio experimental. ....	23
Cuadro 6. Diseño factorial completo 2 x 2 x 2 y plan de experimentación de la Fase 1: Efecto del tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de frutos de tomate.....	24
Cuadro 7. Diseño factorial completo 2x2 y plan de experimentación de la Fase 2: Efecto del tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la abundancia de licopeno en los diferentes estados de madurez del fruto en planta. ....	24
Cuadro 8. Intervalos considerados para clasificar el estado de madurez de frutos de tomate tipo saladete de acuerdo con el ángulo <i>hue</i> .....	29
Cuadro 9. Efecto de la interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la pérdida de peso (%) de frutos de tomate almacenados durante 30 días a dos temperaturas. ....	35
Cuadro 10. Efecto de la interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo en el ángulo de tono (°) de frutos de tomate almacenados durante 30 días.....	38
Cuadro 11. Efecto de la interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo en la firmeza (N-f) de frutos de tomate almacenados durante 30 días.....	41

Cuadro 12. Efecto de la interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo en el pH de frutos de tomate almacenados durante 30 días.....	45
Cuadro 13. Efecto de los factores tipo de agua y tipo de sustrato en la abundancia de licopeno (%) de frutos de tomate en los seis estados de madurez .....	50

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Estructura del licopeno en los vegetales .....	19
Figura 2. Efecto de los factores tipo de agua de riego y temperatura de almacenamiento en la pérdida de peso (%) de frutos de tomate cultivados en suelo y en sustrato inerte, almacenados durante 30 días.....	34
Figura 3. Interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la pérdida de peso (%) de frutos de tomate almacenados durante 30 días a dos temperaturas.. .....	34
Figura 4. Efecto de los factores tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento en el ángulo de tono (°) de frutos de tomate de plantas irrigadas con agua residual y agua de pozo, almacenados durante 30 días.....	36
Figura 5. Interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre el ángulo de tono (°) de frutos de tomate almacenados durante 30 días.....	37
Figura 6. Efecto de los factores tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento en la firmeza del fruto (N-f) de frutos de tomate irrigados con agua residual y agua de pozo, almacenados durante 30 días.....	40
Figura 7. Interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la firmeza del fruto (N-f) de frutos de tomate almacenados durante 30 días.....	40
Figura 8. Efecto de los factores tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento en el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) de frutos de tomate irrigados con agua residual y agua de pozo, almacenados durante 30 días.....	43
Figura 9. Efecto de los factores tipo de sustrato y temperatura de almacenamiento en la firmeza del fruto (N-f) de frutos de tomate almacenados durante 30 días.....	44

- Figura 10. Interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre el pH del fruto (N-f) de tomates almacenados durante 30 días.. ..... 45
- Figura 11. Efecto de los factores tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento en la acidez titulable (% de ácido cítrico) de frutos de tomate almacenados durante 30 días..... 47
- Figura 12. Cromatograma de HPLC del fruto de tomate liofilizado. Columna C-18. Detector UV-Vis (470 nm). Fase móvil acetonitrilo:metanol:2-propanol (44:54:2 v/v/v) velocidad de flujo  $0.05 \mu\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ . 1: licopeno, 2:  $\beta$ -caroteno..... 48

## I. INTRODUCCIÓN

El uso de las aguas residuales en la agricultura no es una práctica reciente, por el contrario, por lo menos en México tiene alrededor de 100 años que se lleva a cabo (Garza, 2000). El agua residual se ha utilizado en la producción de alimentos como una alternativa del abatimiento de los mantos acuíferos, a la reducción de escurrimientos superficiales en las presas derivadoras y como una forma de aprovechamiento de este tipo de agua, entre otros factores (Cuenca-Adame *et al.*, 2001).

Es bien sabido que la producción de hortalizas a campo abierto e irrigadas con agua residual, representan un riesgo para la salud humana, ya que el uso de este tipo de agua causa problemas sanitarios de contaminación principalmente con coliformes fecales y totales, acumulación de metales potencialmente tóxicos en el tejido de las plantas y contaminación por residuos de plaguicidas (Rosas *et al.*, 1984; Hernández, 1988; Carrillo *et al.*, 1992; Siebe, 1994; Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 1995; Siebe, 1998; Anónimo, 2000; Friedel *et al.*, 2000; Ortega-Larrocea *et al.*, 2000; Vázquez-Alarcón *et al.*, 2001; Stevens *et al.*, 2003; Jiménez *et al.*, 2005; Vega *et al.*, 2005; Prieto *et al.*, 2009). Todos estos riesgos e impactos han sido evaluados considerando que los cultivos tienen un contacto directo con el agua residual.

Una gran cantidad de vegetales cultivados en el Valle del Mezquital son consumidos por habitantes de la misma región, de la ciudad de México, y otras ciudades del país, representando esto un riesgo para la salud pública sobre todo porque no se conoce el grado de contaminación. Por ello, para el uso de aguas residuales en la producción de hortalizas han surgido nuevas alternativas de aprovechamiento como un intento para reducir la contaminación en zonas

irrigadas con agua residual, referidas a la producción en sistemas hidropónicos (Traka-Mavrona *et al.*, 1998; Anónimo, 2000; Anónimo, 2002b).

El cultivo de tomate en hidroponía ha sido estudiado con gran amplitud, sin embargo, el efecto de las aguas residuales sin tratar (como en el Valle del Mezquital) sobre la calidad del fruto no existe documentación, bajo este sistema de producción.

Si aceptamos el hecho de que el agua residual es nutrimentalmente más rica que el agua de pozo (aparte e independiente de ser todo lo nociva a la salud humana que ya se ha investigado) y que hasta puede favorecer el desarrollo vegetal y aumentar el rendimiento (en concordancia con lo que los productores y comercializadores de la región del Valle del Mezquital mencionan), los frutos de tomate de plantas irrigadas con agua residual pueden llegar a ser de mayor calidad que los frutos provenientes de plantas irrigadas con agua de pozo, así también considerar que la calidad de fruto de tomate puede modificarse por el efecto de factores como tipo de suelo o sustrato de crecimiento o la temperatura de conservación. Sin embargo, al respecto, existe poca información (Traka-Mavrona *et al.*, 1998).

En este estudio se trata de ampliar el conocimiento acerca del efecto del agua residual sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de frutos de tomate cultivados en sistema hidropónico, para ello se plantean los siguientes objetivos:

## **1.1 Objetivos**

### **General**

Evaluar el efecto del uso de agua residual sin tratamiento y agua de pozo en la solución nutritiva hidropónica, sobre la calidad de frutos de tomate, producidos

en dos tipos de sustrato (inerte y suelo) y almacenados a 10 °C y 20 °C durante 30 días, mediante la medición de algunos parámetros de calidad postcosecha.

### **Particulares**

Conocer el efecto del riego con agua residual sin tratamiento y de pozo sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de frutos de tomate, como son: firmeza del fruto, color, pérdida de peso, pH del fruto, sólidos solubles totales y acidez titulable, almacenados durante 30 días a dos temperaturas.

Evaluar el efecto del riego con agua residual sin tratamiento y de pozo en la abundancia de licopeno de frutos de tomate en los seis estados de madurez en planta (*in vivo*), producidos sobre sustrato inerte y suelo.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Aguas residuales

El agua residual es el agua utilizada por una comunidad determinada, que una vez desechada es transportada a través de tuberías o alcantarillado; es de composición compleja de minerales y materia orgánica. Las sustancias orgánicas presentes son carbohidratos, ligninas, grasas, jabones, detergentes, proteínas y productos de su descomposición, muchos de estos compuestos son sintéticos provenientes de procesos industriales. Los compuestos que contienen amonio y amoníaco son producto de la descomposición de materia orgánica (Pescod y Alka, 1988).

Las aguas residuales acumulan una variedad de sustancias inorgánicas como resultado de los diferentes usos domésticos e industriales; esto influye directamente en el número potencial de elementos tóxicos como el arsénico, cadmio, cromo, mercurio, cobre, etc., con la posibilidad de que cada uno esté en estados químicos diferentes modificando la solubilidad, reactividad y toxicidad (Pescod y Alka, 1988).

Las aguas residuales también contienen macro y microorganismos, y son un excelente medio para su diseminación. Es conocido que el excremento humano es el principal vehículo para la trasmisión y dispersión de un amplio número de enfermedades contagiosas y las aguas residuales son un excelente vector de patógenos que afectan la salud humana (Pescod y Alka, 1988).

### **2.1.1 Origen del agua residual en el Valle del Mezquital**

El Valle del Mezquital pertenece a la Región Hidrológica Núm. 26, Parcial, Alto Pánuco, Cuenca del Río Tula; en enero de 1955 quedó dentro del Distrito de Riego 03-Tula. Desde el punto de vista administrativo, tanto la Cuenca del Valle de México como la del Río Tula, quedaron integradas al Consejo de Cuenca del Valle de México. El colector más importante es el Río Tula, que en sus inicios se conoce como Río Tepeji, entre las presas Taxhimay y Requena, tramo en que recibe los aportes de los Ríos Oro, Los Sabinos y San Jerónimo (Anónimo, 2002a).

Existen reportes de riegos localizados desde 1896 a partir del Río Salado en Tlaxcoapan, Tlathuelilpan y Mixquiahuala (Jiménez *et al.*, 2005), pero el agua residual comenzó a ser aprovechada en forma oficial en 1912 como riego en la agricultura (De la Cruz, 1965).

Conforme fue aumentando el volumen generado de aguas residuales de la Ciudad de México, en el Valle del Mezquital se incrementó la superficie de riego de 14,000 ha en 1926 a 28,000 ha en 1950, 42,460 ha en 1965, hasta tener la cifra total más aproximada que contempla 85,000 ha (Jiménez *et al.*, 2005). Actualmente, el Valle del Mezquital recibe aproximadamente  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  de aguas residuales no tratadas (parcialmente mezcladas con el escurrimiento natural del Río Tula) que se utilizan para riego en la producción agrícola (Anónimo, 2002a).

### **2.1.2 Calidad química del agua residual**

El agua residual se usa por los agricultores, no sólo por la necesidad del líquido sino por que incrementa la productividad, pues contiene materia orgánica y minerales esenciales para las plantas; sin embargo, también genera enfermedades por helmintos (lombrices) en agricultores y consumidores de productos agrícolas regados con agua residual o insuficientemente tratada (Álvarez *et al.*, 2002).

Jiménez y Chávez (2004), realizaron un estudio en el que evaluaron tres sitios representativos de los acuíferos del Valle de Tula, con el objetivo de evaluar la evolución de la calidad del agua residual a través de su uso en la irrigación de cultivos. Evaluaron 153 parámetros, observándose claramente que durante la transportación e infiltración la calidad del agua residual se modifica; algunos de los beneficios que se detectaron fueron que microorganismos como *Salmonella*, *E. histolytica*, *Shigella* y huevos de helmintos no se detectan en ninguno de los tres sitios; así también hay remoción de la materia orgánica (reflejada como la disminución de la demanda bioquímica de oxígeno de un 98 % en los tres sitios de evaluación), metales pesados como el aluminio, arsénico, mercurio y plomo presentaron remociones entre 36 y 98 % según el sitio de evaluación; sin embargo, se observó un incremento en la salinidad del agua, la cual se muestra por la concentración de calcio, magnesio, bicarbonatos, sulfatos, nitratos, nitritos, dureza, sólidos totales disueltos, conductividad y alcalinidad.

### **2.1.3 Problemática del uso del agua residual en la agricultura en el Valle del Mezquital**

El Valle del Mezquital destaca por el hecho de ser el área más grande del mundo regada con aguas residuales sin tratar (Mara y Cairncros, 1989) y, muy probablemente, una de las zonas con mayor recarga incidental (superior a 25 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) (Jiménez *et al.*, 2005).

Con el uso de aguas residuales, el Valle del Mezquital se ha convertido de una zona árida en una zona de riego altamente productiva, ya que las precipitaciones son escasas, con humedad relativa baja, vientos muy fuertes, clima cálido y suelos pobres, características que han perdido importancia al existir el agua residual para el riego de los cultivos agrícolas (Anónimo, 1988).

Por la naturaleza de las aguas residuales, se pueden expresar algunos temores acerca de los riesgos asociados con el reuso del efluente. Dos aspectos deben

tomarse en cuenta para el reuso de aguas residuales en la agricultura: 1) los posibles riesgos en la salud, y 2) los daños potenciales ambientales. Las consideraciones para la salud se centran en los posibles organismos patógenos que pudiera tener en el efluente y el incremento de materiales tóxicos en el suelo, así como consecuencias en los tejidos de plantas y animales, los cuales tendrán reacciones por la ingesta (a través del alimento) para el humano. Los riesgos ambientales involucran los efectos que tienen las sustancias disueltas contenidas en el agua residual, las cuales tienen consecuencias deletéreas sobre el suelo, que podría inhibir el crecimiento y desarrollo de las plantas (Pescod y Alka, 1988).

Además de lo mencionado, existe una modificación de la calidad del agua por autodepuración por el conjunto de procesos por los que pasa el agua en los ríos y las corrientes. También, la calidad se modifica por el paso del agua a través del suelo por la absorción (en plantas y suelo), la oxidación, la precipitación y la degradación biológica (Jiménez *et al.*, 2005).

#### **2.1.4 Características del suelo de zonas irrigadas con aguas residuales**

Los metales pesados están presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de actividades antropogénicas; sin embargo, en lugares donde se han venido utilizando aguas residuales para el riego agrícola, se reporta una tendencia creciente en las concentraciones de metales en los suelos, por efecto del tiempo (años) de uso de esta agua, por ejemplo, el níquel y el plomo han mostrado una mayor tasa anual de acumulación (Vázquez-Alarcón *et al.*, 2001; Prieto *et al.*, 2009).

El riego de cultivos agrícolas con agua residual aporta al suelo una cantidad considerable de compuestos. En primer lugar, contribuye a aumentar el contenido de fósforo disponible en la capa arable de los suelos de los niveles bajos a medios (de 2 a 9 g de P·m<sup>-2</sup>) que se encuentran aun en los suelos de

temporal de la región, a intervalos medios a altos (14 a 25 g de P·m<sup>-2</sup>) en 80 años de riego (Siebe, 1998). Algo similar ocurre con el nitrógeno total, pero de manera menos pronunciada, ya que de un valor de 0.2 kg de N·m<sup>-2</sup> que se encuentra en suelos de temporal, los suelos bajo riego con aguas residuales ahora contienen 0.8 kg de N·m<sup>-2</sup>. La razón por la cual ha aumentado el nitrógeno en comparación con el fósforo se debe a que el segundo es muy poco móvil y tiende a acumularse en el suelo, mientras que el nitrógeno es mucho más soluble, por lo que una parte se lixivia, es decir, es arrastrado por el agua a estratos más profundos o incluso se volatiliza a la atmósfera (Jiménez *et al.*, 2005).

Al igual que el fósforo y el nitrógeno, el suelo recibe materia orgánica proveniente del agua residual. En suelos regados por más de 65 años con esta agua, el contenido promedio de materia orgánica ha aumentado de 2.0 % a 4.6 %, lo que también beneficia la productividad del suelo (Jiménez *et al.*, 2005).

Otro efecto negativo en los suelos, es el aumento del ión sodio en los sitios de intercambio iónico en los suelos, y con ello la disminución de la acumulación del ión calcio. El ión sodio puede causar efectos tóxicos para las plantas y desplaza a otros iones, como el calcio, que son necesarios para la nutrición. Este problema es más grave en los suelos que presentan problemas de drenaje interno (como los vertisoles) y el nivel freático se encuentra a menos de dos metros de profundidad; estas características se encuentran en las partes más bajas del Valle del Mezquital (San Salvador, Tlahuelilpan, Bojayito Chico, San José Bojay) (Hernández, 1988).

En cuanto al aporte de metales al suelo del Valle del Mezquital, a pesar de que las concentraciones en el agua residual proveniente de la ciudad de México, son bajas y no rebasan los límites establecidos en la normatividad mexicana, el riego adiciona anualmente pequeñas cantidades, entre 0.15 a 0.28 g·m<sup>-2</sup> de Pb, <0.009 a 0.011 g·m<sup>-2</sup> de Cd, 0.19 a 0.40 g·m<sup>-2</sup> de Cu y 0.49 a 1.13 g·m<sup>-2</sup> de Zn (Siebe, 1994; Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 1995).

Por otra parte, el riego con agua residual no sólo modifica el contenido de metales en el suelo, sino que también cambia la actividad microbiana en cantidad y en calidad (Friedel *et al.*, 2000; Ortega-Larrocea *et al.*, 2000). Al inicio, el aporte de nutrientes y materia orgánica favorece el crecimiento de microorganismos pero con el tiempo (más de 65 años) se observa que la actividad microbiana disminuye por los efectos tóxicos del sodio (Jiménez *et al.*, 2005).

### **2.1.5 Efecto del uso de aguas residuales en tomate y otros cultivos**

Todas las plantas absorben minerales del suelo, pero en distinto grado dependiendo de la especie vegetal y de las características y contenido de éstos en el suelo (Prieto *et al.*, 2009). Las plantas pueden adoptar distintas estrategias de acumulación o exclusión frente a la presencia de metales pesados en su entorno (Baker, 1981). Unas basan su resistencia a los metales pesados con la estrategia de una eficiente exclusión del metal, restringiendo su transporte a la parte aérea. Otras acumulan el metal en la parte aérea en una forma no tóxica para la planta. La exclusión es más característica de especies sensibles a los metales, y la acumulación es más común de especies que aparecen siempre en suelos contaminados (Prieto *et al.*, 2009).

El riego con agua residual aporta al suelo del Valle del Mezquital materia orgánica, nitrógeno ( $195 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) y fósforo ( $81 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) (Jiménez *et al.*, 2005); sin embargo, puesto que el agua residual, proveniente de la ciudad de México, lleva también otros minerales, como sodio y metales pesados, la calidad de los cultivos cambia por la acumulación de los mismos. Tal es el caso del sodio, cuyo contenido en la alfalfa ha aumentado de  $1.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  de masa seca en sitios regados con agua de pozo a  $4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  de masa seca en parcelas regadas durante más de 80 años (Siebe, 1998). Otro ejemplo, es el de cadmio cuya concentración en alfalfa y maíz en sitios regados durante más de 65 años ha aumentado (de 0.02 a 1.8 y 0.002 a 0.04  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  seco, respectivamente)

aunque sin rebasar los valores umbrales de riesgo (Jiménez *et al.*, 2005). En relación a los valores de riesgo del consumo de cadmio para el humano, la Organización Mundial para la Salud ha propuesto límites de exposición a elementos potencialmente tóxicos con base en la concentración en tejidos directamente afectados. Se han definido términos como "ingestión semanal provisional tolerable", que para Cd es de 400 a 500 mg suponiendo que la concentración crítica en la corteza renal es de  $200 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  (Vázquez-Alarcón *et al.*, 2005).

De acuerdo con lo anterior, se puede hacer la inferencia de que el riego de cultivos agrícolas con agua residual tiene un efecto sobre la fertilidad del suelo, así como en la acumulación de metales potencialmente tóxicos para el humano; así también, la inocuidad de los productos (Rosas *et al.*, 1984). Las investigaciones revisadas se basan en el riego rodado el cual tiene contacto directo con la hortaliza o cultivo en cuestión.

El cultivo de tomate en hidroponía ha sido estudiado con mayor profundidad que en otras especies hortícolas extenso interés, sin embargo, el efecto de las aguas residuales sobre la calidad del fruto tiene poca documentación. Se ha reportado que el lodo resultante de una estación depuradora de aguas residuales acompañado por la inoculación con cepas de hongo micorrízico a las semillas de tomate aumentan la producción de la masa seca de la parte aérea a los 30 días de su germinación, por contribución del lodo (Reynaldo *et al.*, 2003).

Complementario a lo anterior, se tiene que Traka-Mavrona *et al.* (1998), encontraron que al utilizar agua residual tratada sin adicionar nutrimentos, se incrementa la calidad de frutos de tomate considerando como indicador el porcentaje de sólidos solubles, pero se ve incrementada la incidencia de la pudrición apical de los frutos. El pH del jugo del fruto y la firmeza no fueron afectados, sin embargo, el número de frutos comerciales disminuyó en 18 %, en comparación con el tratamiento donde la solución de agua estuvo enriquecida con los nutrimentos ordinarios.

## **2.2 Calidad de fruto de tomate**

En el ámbito hortofrutícola el concepto de calidad, en general, es muy importante, amplio, complejo y subjetivo. Desde un punto de vista práctico o comercial podemos entender a la calidad como “Un conjunto de propiedades y características de un producto, bien o servicio, que le confiere la aptitud para satisfacer necesidades declaradas de los usuarios” (Corrales, 2005).

La calidad de los productos hortofrutícolas consideran, entre otros atributos, necesidades implícitas (salud, valor nutritivo, inocuidad y la información básica al consumidor) y explícitas (relacionadas a la satisfacción: a qué huele, a qué sabe, entre otros) dentro del contexto de satisfacer necesidades de alimentos. Y por otro lado en la comodidad, facilidad y economía de tiempo que se tiene al consumir determinado producto (Corrales, 2005).

La calidad del tomate fresco es un aspecto importante en la comercialización, característica que se conjuga con la cantidad y el servicio. Para el consumidor, la calidad del tomate viene determinada por los atributos como su apariencia externa, el sabor y características nutritivas (González *et al.*, 2004); en cambio, para la industria agroalimentaria la calidad del fruto en tomate, puede considerar características externas como la forma, color y tamaño; también otros caracteres relativos a la calidad interna como acidez, contenido en azúcares y materia seca (Nuez, 1995).

### **2.2.1 Color**

Representa una medida de calidad total y en muchas ocasiones es la más importante y/o única a considerar (Nuez, 1995). El color de la epidermis es un buen indicador del estado de madurez del tomate y de la mayoría de productos hortícolas. Existen cartas de colores para dar objetividad a los valores de este atributo que, ligado al calibre, suelen constituir índices de madurez y de calidad específicos de los importadores, cadenas comerciales, y/o de los exportadores.

Así en Estados Unidos de América (EUA) se emplea la carta del California Tomato Board desde 1975, que establece seis categorías referidas exclusivamente al color de la epidermis (Artés y Artés, 2004). En el Cuadro 1 se describen algunas características sobre los estados de madurez de tomate que se pueden encontrar en los mercados, tomando como referencia el color del fruto.

Cuadro 1. Cambios de color durante la maduración de tomate fresco para mercado.

Clase	Número	Hue (°)	Descripción
Verde maduro (Mature Green)	1	115.0 a 109.2	Fruto bien desarrollado, completamente verde; 2 a 5 días antes de completar maduración.
Verde Quebrante (Breaker)	2	109.1 a 93.3	Primer color externo rosa o amarillo
Pintón (Turning)	3	93.2 a 78.2	Entre 10 y 30 % de la superficie con color definido: verde, amarillo-pardo, rosa o rojo.
Rosa (Pink)	4	78.1 a 65.0	Entre 30 y 60 % de la superficie color rosa o rojo.
Rojo claro (Light red)	5	64.9 a 59.3	Más de 60 % color rojo-rosado o rojo
Rojo (Red)	6	59.2 a 37.1	Más de 90 % color rojo

Fuente: Cantwell, 2006; López y Gómez, 2004; USDA, 1991.

El color en el tomate es debido a los carotenos. El licopeno es el principal carotenoide del tomate, comprende 83 % de los pigmentos totales presentes, el resto como son: fitoeno, luteína,  $\beta$ -caroteno, neurosporeno, fitoflueno constituyen de 3 a 7 % del total de carotenoides contenidos en el fruto de tomate (Thakur *et al.*, 1996).

## 2.2.2 Tamaño

El tamaño es un criterio importante de calidad que se puede determinar fácilmente ya sea mediante la medición del diámetro de la circunferencia, la

longitud, el grosor, el peso o el volumen. Existen distintos estándares, dependiendo del destino del producto (Wills *et al.*, 1999).

En el caso de los frutos de tomate, el tamaño y la calidad del mismo están genéticamente condicionados por la variedad, fisiológicamente por la actividad fotosintética de la planta, el número de semillas, posición del fruto en el racimo, posición del racimo en la planta y ambientalmente por la repercusión sobre el crecimiento de los frutos de las variables de manejo con intervención directa sobre la arquitectura del cultivo y distribución espacial de las plantas o sobre otras variables como manejo de la fertilización (Fernández *et al.*, 2004).

### **2.2.3 Forma**

La forma de los frutos es un criterio que con frecuencia permite distinguir entre diversos cultivares de una misma especie. El consumidor exige con frecuencia un producto provisto de una determinada forma y rechaza los ejemplares que no lo poseen (Wills *et al.*, 1999).

Los cultivares de tomate difieren mucho en la forma del fruto, pueden ser ovalados, esféricos, alargados, tipo pera, etc., los defectos en la forma se asocian con una pobre polinización y el desarrollo irregular de algunos lóculos, que pueden afectar la apariencia, firmeza, susceptibilidad a la pudrición, disminuir el contenido de sólidos solubles, etc. (Kader, 1986).

### **2.2.4 Firmeza**

La firmeza de frutos de tomate es un parámetro que mide la resistencia de penetración de los tejidos del fruto. Este es un factor importante ya que la firmeza generalmente está relacionada con la sanidad del fruto, la concentración de azúcares, el pH, el sabor y el aroma del fruto, sobre todo al alcanzar la coloración de consumo. Este carácter se puede evaluar por métodos

objetivos, aplicando procedimientos destructivos que miden la resistencia que ofrecen a la penetración de la pulpa, corte o compresión, pero se prefieren técnicas no destructivas que evalúan la firmeza de los frutos a la compresión (Cuadro 2) (Kader *et al.*, 1978; Riquelme, 1995).

Cuadro 2. Firmeza de frutos de tomate basado en pruebas subjetivas y objetivas.

Clase	Descripción basada sobre la presión con los dedos de la mano	Newtons-fuerza
Muy firme	Frutos que toleran presión alta	>25
Firme	Frutos que toleran una presión regular	15-25
Moderadamente firme	Frutos que toleran una presión regular con menor esfuerzo	15-18
Moderadamente suave	--	12-15
Suave	Frutos que toleran una presión ligera	8-12
Muy suave	Frutos que toleran una presión muy ligera	<8

Mediciones realizadas con un analizador computarizado de textura, por compresión del fruto en el ecuador con una probeta cilíndrica de 25 mm de diámetro, con distancia de 5 mm. 1 Newton fuerza= 9.81 kg-fuerza.

Fuente: Cantwell *et al.*, 2006.

La firmeza de los frutos de tomate es uno de los componentes importantes para el procesamiento y empaqueo de frutos frescos. Es afectada de manera importante por diversos factores ambientales como la nutrición y exceso de nitratos, la interacción entre la cantidad de agua y el contenido de calcio en el fruto (Taylor *et al.*, 2002).

La reducción de la firmeza en los frutos de tomate es una consecuencia de la actividad de la enzima poligalacturonasa sobre las pectinas y paredes celulares, ocasionando cambios en los tejidos que provocan el ablandamiento del fruto. Esta enzima aparece progresivamente en el proceso de maduración mientras que en los frutos verdes no existe (Riquelme, 1995; González *et al.*, 2004). La firmeza del fruto de tomate 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).

Por otro lado, cuando se considera la nutrición como la responsable de la firmeza, se tiene que las plantas de tomate que reciben fertilización con nitrato de calcio, tienden a tener frutos más firmes que las fertilizadas con sulfato de calcio (Taylor *et al.*, 2002). Otros investigadores, han concluido que la salinidad provoca la disminución significativa de la firmeza del fruto de tomate; por ejemplo, el exceso de nitrato de amonio altera las atribuciones físicas del fruto fresco por el estrés inducido por el sodio y por las altas concentraciones de nitratos y amonio (Flores *et al.*, 2003).

### **2.2.5 pH**

El concepto pH se refiere a la medida de la concentración de iones  $H^+$  en solución acuosa, y por tanto el carácter básico o ácido: se expresa en concentración de iones  $H^+$  afirmando que el pH es 7 (neutro), 6 (ácido) u 8 (básico) (Ansorena, 1994).

En los frutos de tomate, el pH del fruto es una característica sensorial relacionada con los cambios que sufren las frutas durante la maduración y la senescencia. Es considerado como un índice de cosecha para ciertas especies. Prácticamente todos los alimentos contienen cierto pH. Para un buen sabor en los frutos de tomate, se consideran necesarios valores de pH inferiores a 4.4 y contenido de azúcares superiores a 4.0 y 4.5 °Brix (Nisen *et al.*, 1990).

Existe una correlación lineal y negativa entre el pH y el contenido de ácidos en el fruto de tomate, ésta puede observarse al analizar los ácidos constituyentes de varios tipos de tomate y tejidos del fruto (Rezende *et al.*, 2000). Esto significa que cuando los ácidos orgánicos decrecen hasta un 25 %, el valor de pH aumenta, lo que pone de manifiesto esta correlación inversa con la acidez

titulable. Por otra parte, el incremento en la salinidad y el amonio disminuye el pH en el jugo de tomate (Flores *et al.*, 2003).

### **2.2.6 Acidez titulable**

Ordinariamente, durante la maduración, los ácidos orgánicos son respirados o convertidos en azúcares. Los ácidos pueden ser considerados como una reserva energética más del fruto de tomate siendo por consiguiente de esperar que su contenido decline en el periodo de actividad metabólica máxima durante el curso de la maduración (Wills *et al.*, 1999). La acidez de algunos productos hortofrutícolas puede alterarse como resultado de su exposición a altos niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera de almacenamiento (Smith y Raven, 1979).

El ácido predominante en el fruto maduro de tomate es el ácido cítrico, seguido del málico, los cuales principalmente se encuentran en la cavidad locular y en baja proporción en el mesocarpio externo (Nuez, 1995). La máxima acidez de los frutos de tomate coincide con la aparición del color rosado, posteriormente desciende en forma constante (Winsor *et al.*, 1962). La salinidad incrementa el contenido de ácido cítrico en tomate, al disminuir la cantidad de agua (Flores *et al.*, 2003).

### **2.2.7 Sólidos solubles totales**

El contenido de sólidos solubles de frutos de tomate es un parámetro que presenta gran variación en función del cultivar, nutrición de la planta, conductividad eléctrica de la disolución nutritiva, estrés hídrico, factores ambientales (alta densidad de luz, fotoperiodos largos y tiempo seco en cosecha) y genéticos (fruto pequeño, hábito determinado), etc. (Nuez, 1995; Pérez-Alfocea *et al.*, 1997; González *et al.*, 2004).

En diversas variedades de fruto de tomate el contenido de sólidos solubles se sitúa entre 4.5 y 5.5 °Brix (Nuez, 1995).

Es bien conocido que cuando la disolución nutritiva es de elevada salinidad, aunque el rendimiento productivo del cultivo de tomate es menor, la calidad aumenta. Esto viene definido entre otros factores porque el contenido en sólidos solubles del tomate aumenta cuando se utiliza salinidades altas (Pérez-Alfocea *et al.*, 1997; Cuartero y Fernández-Muñoz, 1999; González *et al.*, 2004).

### **2.2.8 Valor Nutritivo**

El valor nutritivo es quizá la consideración menos importante que determina la elección del consumidor. El principal compuesto de valor nutricional es la vitamina C, y las frutas y vegetales son la única fuente de vitamina C en la dieta de mucha gente. Sin embargo, poca gente decidiría comprar una especie de fruta particular solo porque contiene más vitamina C que otra (Kays, 1997).

### **2.2.9 Licopeno**

Estudios poblacionales muestran que los tomates contribuyen a una dieta sana aportando multitud de vitaminas necesarias para el organismo humano, pudiéndose consumir durante todo el año gracias al cultivo en invernaderos; su valor nutritivo es mayor cuando es cultivado a campo abierto (Namesny, 2004).

El perfil nutricional del tomate se basa en una combinación equilibrada de antioxidantes (vitamina C, carotenoides y flavonoides), minerales (altos niveles de potasio y zinc), un alto contenido en ácido fólico y un bajo nivel de grasas (Namesny, 2004).

En particular, los carotenoides son pigmentos naturales sintetizados por plantas y microorganismos responsables, en parte, del color de los mismos (Clinton,

1998). La importancia de los carotenoides en la nutrición humana y salud se ha concentrado principalmente en aquellos que sintetizan mayormente vitamina A, como son  $\alpha$  y  $\beta$ -caroteno. En la actualidad, otros carotenoides están teniendo un interés nutricional como sustancias fitoquímicas. Entre estos carotenoides con un efecto benéfico para la salud en función de sus propiedades biológicas se encuentra el licopeno, cuya actividad está implicada con importantes efectos en la salud y nutrición humana (Nguyen y Schwarz, 1999).

#### **2.2.9.1 Biosíntesis y estructura química**

La estructura química de los carotenoides es un factor determinante de sus propiedades físicas, reactividad química y de sus funciones biológicas. La estructura química de estos compuestos contribuye a la actividad química de los mismos sobre los agentes oxidantes o radicales libres, efecto relevante en la actividad *in vivo* que pueden desarrollar los carotenoides en aquellos individuos que consumen grandes cantidades en la dieta (Britton, 1995).

La fórmula molecular del licopeno, fue determinada por primera vez por Willstatter y Escher en 1910, los cuales presentaron el licopeno como un isómero de los carotenos. Estudios realizados posteriormente describieron la estructura química general del mismo, como un compuesto hidrocarbonado alifático, soluble en grasas y en lípidos (Figura 1). La biosíntesis de este compuesto tiene lugar en el interior de los plastidios. Puede presentarse como isómero *cis* e isómero *trans* aunque, salvo pocas excepciones, su forma natural en las plantas es la configuración *trans*, que a su vez constituye la forma química más estable a los tratamientos térmicos (Wilberg y Rodríguez-Amaya, 1995).

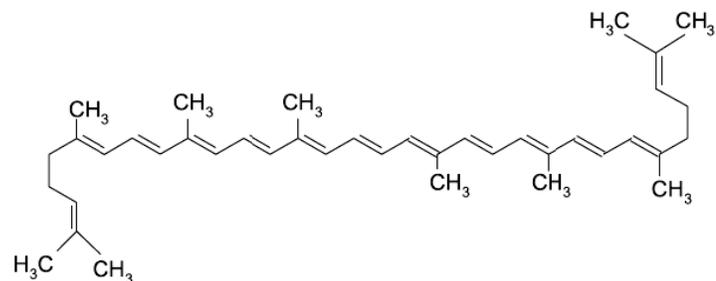


Figura 1. Estructura del licopeno en los vegetales (Periago *et al.*, 2001).

### 2.2.9.2 Presencia del licopeno en frutos de tomate

De los más de cincuenta carotenoides presentes en los alimentos y consumidos en la dieta a partir de una gran variedad de frutas y verduras, el licopeno se encuentra en un grupo reducido de los mismos, destacando el tomate (*Solanum lycopersicon* L.) y los productos elaborados con tomates (salsas, purés, jugos, sopas concentradas, etc.) como la principal fuente de licopeno de la dieta. Además del licopeno, el tomate y sus derivados presentan una amplia variedad de carotenoides, destacando el licopeno con una proporción variable entre 60-64 %, seguido del fitoeno (10-12 %), neurosporeno (7-9 %),  $\gamma$ -caroteno (10-11 %), fitoflueno (4-5 %),  $\beta$ -caroteno (1-2 %) y  $\delta$ -caroteno (1-2 %), mientras que la luteína se encuentra en cantidades inferiores al 1% (Periago *et al.*, 2001).

En relación al contenido de licopeno en el tomate fresco, en la literatura científica aparece una gran variabilidad de los datos. Clinton (1998) muestra una concentración que oscila entre 0.88 y 4.20 mg en 100 g, expresados en peso fresco. Valores más altos son descritos en la revisión realizada por Nguyen y Schwartz (1999), quienes encontraron un contenido de licopeno en las variedades comunes de tomate que oscila entre 3.1 y 7.7 mg·100 g<sup>-1</sup> expresados en peso fresco. Otros autores dan valores de 3.92 mg·100 g<sup>-1</sup> de tomate fresco (Khachik *et al.*, 1992), y 6.46 y 10.70 mg·100 g<sup>-1</sup> de pulpa de tomate, para los cultivares 92-7136 y CC-164, respectivamente (Sharma y Le Maguer, 1996).

En general, el contenido de licopeno en el tomate varía significativamente de acuerdo con las distintas variedades de tomate, grado de madurez y condiciones estacionales; sin embargo, los resultados obtenidos en tomate fresco y sus productos derivados, no hacen referencia al grado de madurez, variedad y tipo comercial del tomate, por lo que, en muy pocos casos, de la literatura se recogen valores en los que se especifiquen estos datos (Periago *et al.*, 2001).

### **2.2.9.3 Importancia del licopeno en la salud humana**

Muchas de las enfermedades que padece el hombre, como son el cáncer y las enfermedades cardíacas, se asocian a los procesos de oxidación celular mediados por los radicales libres. Las evidencias epidemiológicas ponen de manifiesto la importancia de los carotenoides y principalmente del licopeno, así como el consumo de tomate y productos a base de tomate, en la prevención de determinados tipos de cánceres como el de estómago, esófago, colon, próstata, pulmón, páncreas, mamas, piel, vesícula y cervix (Comstock *et al.*, 1997; Nishino, 1997; Sharoni *et al.*, 1997; Narisawa *et al.*, 1998; Nishino, 1998; Okajima *et al.*, 1998; Rao y Agarwal, 1998; Gann *et al.*, 1999; Giovannucci, 1999; Grant, 1999; Rao *et al.*, 1999).

Este efecto se basa en la principal propiedad biológica del licopeno, que es la de actuar como sustancia antioxidante al reaccionar con agentes oxidantes, reduciendo la reacción de oxidación tanto *in vitro* como *in vivo*, al eliminar estos agentes de los sistemas biológicos o al detener la reacción de formación de radicales libres (Britton, 1995; Handelman, 1996).

En cuanto a los estudios realizados *in vivo* se ha confirmado que el licopeno y la luteína, tienen capacidad antioxidante *in vivo*, al detectarse en el plasma humano la presencia de sus metabolitos. Como resultado de la reacción de oxidación *in vivo* de la luteína se han detectado cuatro metabolitos distintos, mientras que en el caso del licopeno, el 5,6-dihidroxi-5,6-dihidrolipopeno puede

constituir el principal metabolito de la reacción de oxidación, aunque el mecanismo de oxidación no haya sido todavía establecido mediante estudios *in vivo* con humanos (Khachik *et al.*, 1995).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Ubicación del experimento y material vegetal

Los frutos de tomate utilizados se produjeron en sistema hidropónico, en el Municipio 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, durante los meses de junio a diciembre de 2008. La variedad de tomate utilizada fue 'Sun 7705' de crecimiento indeterminado.

Para conocer las características del suelo donde se trasplantaron las plantas de tomate, así como las características del agua con la cual se irrigaron, se colectaron muestras de agua y suelo. Éstas muestras fueron enviadas al Laboratorio Central Universitario de la Universidad Autónoma Chapingo; los resultados de los análisis, realizados a las muestras de suelo y agua, se muestran en los Cuadros 3 y 4.

Cuadro 3. Análisis nutrimental del agua residual y agua potable utilizada en el experimento.

Tipo de agua	pH	CE (dS·m <sup>-1</sup> )	Na	K	Ca	Mg	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	
			(meq·L <sup>-1</sup> )							
Residual	6.82	1.45	4.28	0.89	6.22	2.05	ND	6.87	6.72	
De pozo	7.06	1.77	4.22	0.98	6.25	3.54	ND	8.96	5.00	
		SO <sub>4</sub> (meq·L <sup>-1</sup> )	B	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P	Fe	Cu	Zn	Mn
			(mg·L <sup>-1</sup> )							
Residual	1.23	1.02	15.10	2.78	0.38	0.13	0.01	0.05	0.11	
De pozo	3.23	0.73	0.19	0.10	0.42	0.05	0.01	0.03	ND	

ND: No detectable por el método empleado.

Cuadro 4. Análisis del suelo de las parcelas correspondientes a cada tipo de condición del agua utilizada en el experimento.

Salinidad											
Suelo	pH	CE (dS·m <sup>-1</sup> )	Ca	Mg	Na	K	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	B
			(meq·L <sup>-1</sup> )								
A	8.24	4.07	17.6	9.28	8.83	1.27	1.09	2.33	19.30	15.4	2.11
B	7.41	11.63	45.5	24.1	31.2	4.25	1.45	3.94	22.50	46.4	4.00

Fertilidad									
Suelo	pH	MO (%)	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu
			(mg·Kg <sup>-1</sup> )						
A	8.24	1.02	16.7	62.2	904	3244	1851	2.71	1.22
B	7.41	4.03	20.0	98.0	1370	3623	1263	10.95	2.72

	Zn	Mn	B	Dap	Textura
	(mg·Kg <sup>-1</sup> )			(g·cm <sup>-3</sup> )	
A	37.97	1.59	3.94	1.26	Franco
B	6.44	2.35	8.34	1.24	Franco arenoso

A: suelo del experimento donde se irrigó con agua de pozo, B: suelo del experimento donde se irrigó con agua residual.

### 3.2 Factores y tratamientos

Los factores considerados en esta investigación fueron: a) tipo de agua de riego y b) tipo de sustrato del cultivo, y (en el caso del almacenamiento en postcosecha) c) temperatura de almacenamiento (Cuadro 5).

Cuadro 5. Factores y dominio experimental para la evaluación del efecto del tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de frutos de tomate.

	Factores	Nivel (-)	Nivel (+)
X <sub>1</sub>	Tipo de agua de riego	Agua de pozo	Agua residual
X <sub>2</sub>	Tipo de sustrato del cultivo	Inerte	Suelo
X <sub>3</sub>	Temperatura de almacenamiento	10 °C	20 °C

Para lograr el cumplimiento de los objetivos de esta investigación, se dividió en dos fases: 1) Efecto del tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y

temperatura de almacenamiento sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de frutos de tomate, y 2) Efecto del tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la abundancia de licopeno en los diferentes estados de madurez del fruto en planta. El manejo de los frutos, métodos de trabajo y análisis de datos, para cada fase, se describe a continuación.

La matriz de experimentos de la fase 1 de esta investigación se muestra en el Cuadro 6, como resultado de la combinación de los factores tipo de agua de riego, tipo de sustrato y temperatura de almacenamiento en postcosecha. La matriz de experimentos de la fase 2 se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 6. Diseño factorial completo 2 x 2 x 2 y plan de experimentación de la Fase 1: Efecto del tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de frutos de tomate.

Matriz de experimentos				Plan de experimentación		
Trat	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Tipo de agua de riego	Tipo de sustrato del cultivo	Temperatura de almacenamiento
1	-	-	-	Pozo	Inerte	10 °C
2	-	-	+	Pozo	Inerte	20 °C
3	-	+	-	Pozo	Suelo	10 °C
4	-	+	+	Pozo	Suelo	20 °C
5	+	-	-	Residual	Inerte	10 °C
6	+	-	+	Residual	Inerte	20 °C
7	+	+	-	Residual	Suelo	10 °C
8	+	+	+	Residual	Suelo	20 °C

Trat: Tratamiento

Cuadro 7. Diseño factorial completo 2x2 y plan de experimentación de la Fase 2: Efecto del tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la abundancia de licopeno en los diferentes estados de madurez del fruto en planta.

Matriz de experimentos			Plan de experimentación	
Trat	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Tipo de agua de riego	Tipo de sustrato del cultivo
1	-	-	Pozo	Inerte
2	-	+	Pozo	Suelo
3	+	-	Residual	Inerte
4	+	+	Residual	Suelo

Trat: Tratamiento

### **3.3 Fase 1: Efecto del tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de frutos de tomate.**

Se colectaron 64 frutos de tomate de cada tratamiento indicado en el Cuadro 6, los frutos de tomate fueron cosechados en el estado de madurez pintón (grado 3), de acuerdo con la clasificación por color de la USDA (1991), y seleccionados de acuerdo al tipo característico de la variedad: forma, peso y calidad.

Para trasladar los frutos de tomate al laboratorio de postcosecha del Departamento de Agroindustrias de la Universidad Autónoma Chapingo, fueron guardados dentro de una bolsa hermética (Ziploc®) y colocados dentro de una hielera enfriada con hielos, el tiempo de transporte fue de aproximadamente dos horas.

En el laboratorio, los frutos fueron lavados con agua corriente y limpiados con un paño estéril para evitar la presencia de patógenos indeseados, posteriormente, se empacaron en cajas de cartón enceradas de 49x29x28 (24 frutos por caja) para su almacenamiento en cámara de refrigeración a  $10\pm 2.0$  °C y H. R. de  $84\pm 5.0$  %; y a temperatura ambiente aproximadamente a  $20\pm 2.0$  °C y humedad relativa de  $56\pm 5.0$  %.

La primera medición de los parámetros de calidad postcosecha (descritos en la sección 3.3.1), se realizó inmediatamente después del empacado correspondiente de los demás frutos de tomate para su almacenamiento.

#### **3.3.1 Variables evaluadas**

La medición de las variables de calidad se realizó a los días 1, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 de almacenamiento (dda).

**Pérdida de peso**, los frutos fueron pesados con una balanza granataria digital Ohaus Modelo AV2102; antes de meterlos al almacenamiento y posteriormente

cada 5 días se calculó la disminución del peso fresco inicial de los frutos y se expresó como porcentaje, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Pérdida de peso (\%)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

**Color**, 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.

**Firmeza**, se determinó indirectamente con un analizador de textura (Stable Micro Systems, UK, modelo TA-XT2i), con una probeta cilíndrica de 12 mm de diámetro. La rutina que se empleó correspondió a una medida de fuerza en compresión, con una distancia de penetración de 5 mm, velocidad de pre-ensayo de  $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  y velocidad de ensayo de  $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Se midió en dos puntos diferentes de la zona ecuatorial del fruto de tomate y fue expresado como el promedio de ambas lecturas en Newtons-fuerza (N-f). En el punto de medición, el pericarpio fue removido con navaja.

**Sólidos solubles totales**, fueron medidos con un refractómetro manual marca Hand Refractometer ATAGO N1 °Brix 0~32 %, empleando para ello tres gotas de jugo del fruto, expresados en °Brix o porcentaje de sólidos solubles totales.

**pH del fruto**, para medir esta variable se preparó una muestra homogeneizada, para ello se pesaron  $20 \pm 0.01$  g de tomate finamente picado, se licuaron con 50 ml de agua destilada, después se filtró utilizando tela organza. El filtrado se aforó a 100 ml, y se midió el pH en un potenciómetro digital HANNA (pH METER HI 98230).

**Acidez titulable**, a partir del líquido aforado a 100 ml obtenido para medir pH, se tomó una alícuota de 10 ml y se agregaron tres gotas de fenolftaleína como indicador, se tituló con hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N (AOAC, 1990). Los

resultados se expresaron como porcentaje de ácido cítrico, el cual fue calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Acidez titulable (\% de ácido cítrico)} = \frac{T * N * Z * V * 100}{P * M}$$

En donde: T, representa el gasto de NaOH durante la titulación, en mililitros; N, la normalidad de la solución de NaOH; Z, el peso miliequivalente del ácido cítrico (0.064 g); V, el volumen total de la mezcla (100 ml); P, el peso de la muestra ( $20 \pm 0.01$  g); y M, la alícuota de la muestra (10 ml).

### 3.3.2 Análisis de datos

El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial 2x2x2, la unidad experimental consistió en un fruto de tomate, los frutos colectados se distribuyeron para el almacenamiento a las dos temperaturas. Se realizaron 4 repeticiones para cada variable en cada fecha de muestreo.

### 3.3.3 Modelo estadístico

Se aplicó el siguiente modelo estadístico correspondiente a un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 2 x 2.

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

i = niveles del factor A: agua de pozo y agua residual

j = niveles del factor B: sustrato inerte (turba volcánica roja) y suelo

k = niveles del factor C: 20 y 10 °C.

$Y_{ijk_r}$  = es el valor de la variable respuesta correspondiente al nivel  $i$  de A, al nivel  $j$  de B, al nivel  $k$  de C en la repetición  $r$ .

$\mu$  = media general

$A_i$  = efecto del nivel  $i$  del factor A (tipo de agua de riego)

$B_j$  = efecto del nivel  $j$  del factor B (tipo de sustrato del cultivo)

$C_k$  = efecto del nivel  $k$  del factor C (temperatura de almacenamiento)

$AB_{ij}$ ,  $AC_{ik}$ ,  $BC_{jk}$  y  $ABC_{ijk}$  constituyen las interacciones de los tres factores

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza, con el procedimiento PROC GLM de SAS (2004). Cuando se detectó significancia estadística se aplicó adicionalmente la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

### **3.4 Fase 2: Efecto del tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la abundancia de licopeno en los diferentes estados de madurez del fruto de tomate en planta.**

#### **3.4.1 Tratamientos y manejo de las muestras**

Los tratamientos que se consideraron se muestran en el Cuadro 7. De las plantas de tomate bajo cada tratamiento, se colectaron tres frutos de tomate por cada estado de madurez.

La elección de los frutos de tomate se hizo considerando el ángulo de tono o *hue*, que estuviera dentro de los intervalos correspondiente al estado de madurez que se indican en el Cuadro 8. El *hue* se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:  $hue = \arctan(b^*/a^*)$ , cuando  $a^*$  era positiva, y cuando  $a^*$  fue negativa, se usó  $hue = 180 - \arctan(b^*/a^*)$  (López y Gómez, 2004). Para obtener los valores de  $a^*$  y  $b^*$  se utilizó un colorímetro MiniScan XE Plus (HunterLab, serie 5348).

Cuadro 8. Intervalos considerados para clasificar el estado de madurez de frutos de tomate tipo saladete de acuerdo con el ángulo *hue*.

Estado de madurez	<i>Hue</i> (°)
Verde maduro	113.3 a 109.2
Verde quebrante	109.1 a 93.3
Pintón	93.2 a 78.2
Rosa	78.1 a 65.0
Rojo Claro	64.9 a 59.3
Rojo	<59.2

Basado en López y Gómez (2004) y Cantwell *et al.* (2006)

Una vez que los frutos de tomate fueron identificados en el estado de madurez correspondiente, se procedió a retirarlos de la planta de tomate e inmediatamente después fueron congelados en nitrógeno líquido para detener la actividad enzimática que pudiera afectar la concentración y estructura del licopeno. Posterior a su congelación, los frutos de tomate fueron guardados en una hielera enfriada con hielos para su traslado al laboratorio donde se seguiría con el proceso de almacenamiento previo a la extracción del licopeno, el tiempo de transporte fue de aproximadamente dos horas.

Una vez que se llegó al laboratorio, los frutos de tomate congelados se conservaron en un congelador a -20 °C, para su posterior liofilización. Este proceso se realizó en un liofilizador marca LABCONCO modelo LYPH LOCK 4.5. Después los frutos de tomate liofilizados fueron molidos para homogeneizar la muestra y tener un tamaño de partícula menor. Por último, los frutos molidos se guardaron en un sobre de papel, se etiquetaron y fueron conservados en una campana de desecación forrada con papel aluminio para aislar la luz y disminuir la oxidación de los pigmentos hasta el momento de la extracción del licopeno.

### 3.4.2 Extracción de licopeno

En un matraz de fondo plano de 50 ml, forrado con papel aluminio, se pesaron 0.5 g del fruto de tomate molido, se reconstituyó con  $9.0 \pm 1.5$  ml de agua destilada, se agitó durante tres minutos. Posteriormente se adicionaron 5 ml de

acetona, 5 ml de etanol y 10 ml de hexano, se agitó la mezcla durante 15 minutos, luego se adicionaron 3 ml de agua destilada para separar la fase orgánica (hexano), nuevamente se agitó la mezcla durante 5 min (Fish *et al.*, 2002). Con ayuda de una micropipeta, se colectó el hexano. Se repitió la extracción a la mezcla sobrante, para tener mayor eficiencia de extracción. Por último, el hexano obtenido en la primer extracción se mezcló con el que se colectó de la segunda extracción.

La mezcla de hexano, que contiene el pigmento de interés, se concentró en un rotaevaporador a 40 °C, una vez evaporado el hexano se traspasó el residual a un matraz de aforo de 1 ml, se aforó con hexano grado HPLC y se depositó, previa filtración con acrodisco de 0.5 µm de diámetro de poro, en un frasco vial ámbar para su medición en el cromatógrafo de líquidos de alta resolución. Todos los procedimientos se realizaron rápidamente y bajo luz reducida para evitar cambios estructurales del licopeno.

### **3.4.3 Identificación por cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC)**

El extracto filtrado se analizó en un cromatógrafo de líquidos de alta resolución (Perkin Elmer Series 200) con las siguientes condiciones: absorción isocrática, columna marca Thermo<sup>®</sup> fase reversa C<sub>18</sub> de 250 mm de largo por 4.6 mm de diámetro interno, tamaño de partícula de 5 µm (ODS), fase móvil acetonitrilo:metanol:2-propanol (44:54:2 v/v/v), volumen de inyección de 20 µl, velocidad de flujo de 0.5 µl/min. Detector UV-Vis: longitud de onda a 470 nm. La fase móvil se filtró con una membrana Millipore de 45 µm resistente a disolventes, antes de su aplicación en el cromatógrafo.

El licopeno de las muestras de los frutos de tomate, fue identificado por comparación del tiempo de retención del estándar de licopeno

(CHROMADEx™) con 95 % de pureza; así también para el β-caroteno (SIGMA-ALDRICH®).

### 3.4.4 Cuantificación de licopeno

Se obtuvo el porcentaje de abundancia de licopeno para cada repetición de cada muestra de tomate, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Abundancia de licopeno (\%)} = \frac{\text{Área bajo la curva de licopeno} * 100}{\text{Sumatoria de las áreas bajo la curva de todos los compuestos separados}}$$

### 3.4.5 Modelo estadístico

Se aplicó el siguiente modelo estadístico correspondiente a un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 2.

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

i = niveles del factor A: agua de pozo y agua residual

j = niveles del factor B: sustrato inerte (turba volcánica roja) y suelo

$Y_{ijk}$  = es el valor de la variable respuesta correspondiente al nivel i de A, al nivel j de B, en la repetición r.

$\mu$  = media general

$A_i$  = efecto del nivel i del factor A (tipo de agua de riego)

$B_j$  = efecto del nivel j del factor B (tipo de sustrato del cultivo)

$AB_{ij}$ , constituye la interacción de los dos factores

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza, con el procedimiento PROC GLM de SAS (2004). Cuando se detectó significancia estadística se aplicó adicionalmente la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Fase 1: Efecto del tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento sobre algunos parámetros de calidad postcosecha de frutos de tomate.

#### 4.1.1 Pérdida de peso del fruto

Hubo efecto significativo del factor tipo de agua de riego para esta variable: el agua residual promovió que los frutos de tomate presentaran una pérdida de peso significativamente mayor que los frutos de plantas irrigadas con agua de pozo (Figura 2).

El factor temperatura de almacenamiento también afectó significativamente la pérdida de peso de los frutos de tomate: a 20 °C se presentó una pérdida de peso significativamente mayor que a 10 °C (Figura 2). Esto puede deberse principalmente a que a mayor temperatura existe un alto déficit de presión de vapor en el ambiente, que a temperaturas menores como por ejemplo a 10 °C es más bajo, haciendo que se aumente la transpiración, y por lo tanto la pérdida de peso del fruto de tomate (Wills *et al.*, 1999).

El factor tipo de sustrato no tuvo efecto significativo para esta variable.

La interacción del factor tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo resultó ser antagónica. El cultivo de plantas en sustrato inerte, el irrigar con agua residual incrementó la pérdida de peso de los frutos (efecto no deseable); sin embargo, bajo cultivo en suelo el efecto adverso del riego con agua residual fue mitigado (Figura 3).

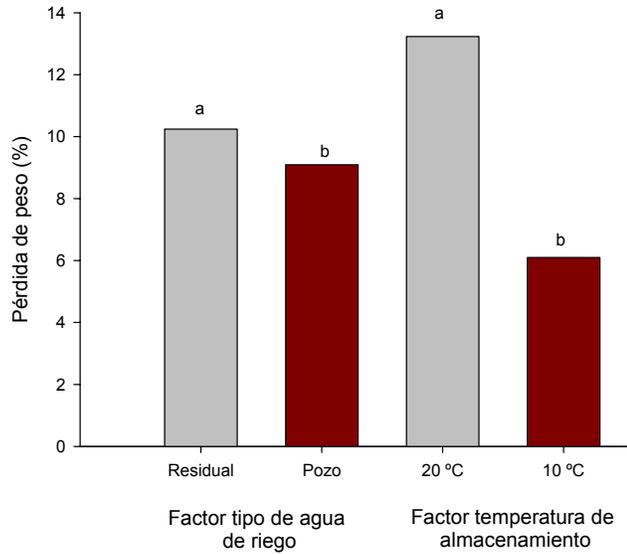


Figura 2. Efecto de los factores tipo de agua de riego y temperatura de almacenamiento en la pérdida de peso (%) de frutos de tomate cultivados en suelo y en sustrato inerte, almacenados durante 30 días. N=112. Medias con la misma letra por factor son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha=0.05$ ).

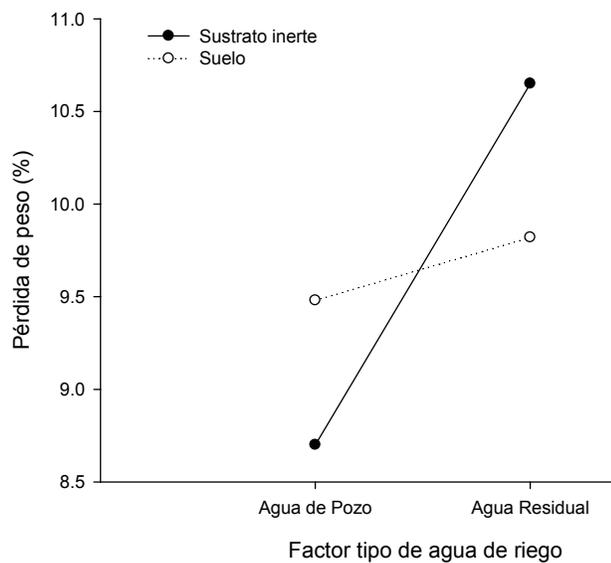


Figura 3. Interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la pérdida de peso (%) de frutos de tomate almacenados durante 30 días a dos temperaturas. N=56.

Con relación al comportamiento de la pérdida de peso (%) de frutos de tomate durante el experimento (Cuadro 9), se puede observar que los frutos de tomate obtenidos de plantas irrigadas con aguas residuales y cultivadas en sustrato inerte, pierden más peso con respecto al efecto de las otras tres interacciones, a partir del día 15 de almacenamiento.

Cuadro 9. Efecto de la interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la pérdida de peso (%) de frutos de tomate almacenados durante 30 días a dos temperaturas.

		Tiempo de almacenamiento (días)					
		5	10	15	20	25	30
Interacción Tipo de agua*Tipo de sustrato							
Agua de Pozo	Sustrato inerte	2.91aF	5.76abE	9.64bD	11.63cC	14.49cB	17.37cA <sup>z</sup>
	Suelo	3.19aF	6.42abE	8.76bD	12.73bC	15.71bB	18.69bA
Agua Residual	Sustrato inerte	3.80aF	7.29aE	10.89aD	14.25aC	17.54aB	20.80aA
	Suelo	3.27aF	6.49abE	9.99aD	13.18abC	16.36bB	19.47bA

<sup>z</sup> Letras minúsculas iguales, en sentido de columna, son estadísticamente iguales; letras mayúsculas iguales, en sentido de la fila, son estadísticamente iguales según la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

#### 4.1.2 Ángulo de tono o *hue*

Uno de los parámetros que explican los cambios en color durante el almacenamiento de los productos hortofrutícolas, entre ellos el tomate, es el ángulo de tono o *hue*. Durante el almacenamiento de frutos de tomate producidos bajo los distintos tratamientos, se encontró efecto significativamente diferente ( $P \leq 0.05$ ), sobre esta variable de los factores tipo de sustrato y temperatura de almacenamiento, el factor tipo de agua no afectó a esta variable.

Las plantas cultivadas en suelo produjeron tomates que mostraron un *hue* significativamente menor (tomates más rojos) que las plantas cultivadas en sustrato inerte (Figura 4).

Los tomates almacenados a 20 °C presentaron un *hue* significativamente menor (más rojos) que los almacenados a 10 °C (Figura 4). La síntesis de licopeno durante el crecimiento es inhibida a temperaturas menores de 12 °C, aquellos frutos de tomate que se cosechan en estados de madurez total, muestran un aumento en el contenido de licopeno en la maduración postcosecha (Passam *et al.*, 2007). Si se relaciona el hecho de que el licopeno es el pigmento responsable del color rojo en los frutos de tomate, esto concuerda con el desarrollo de color rojo obtenido de los frutos de tomate almacenados a 10 °C.

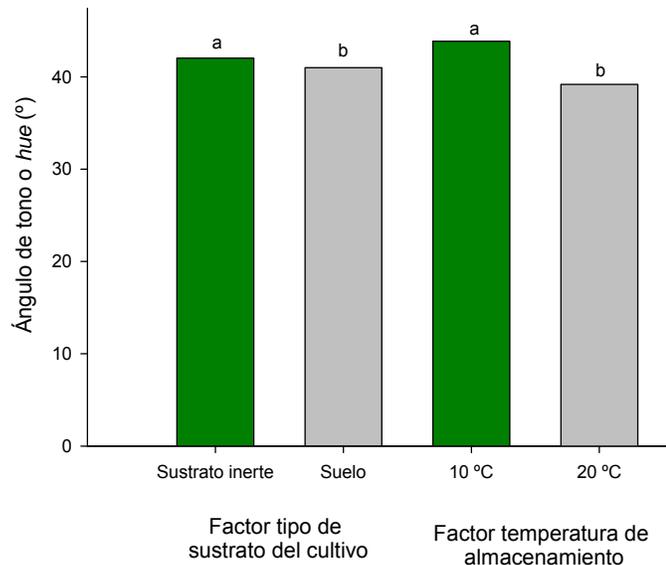


Figura 4. Efecto de los factores tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento en el ángulo de tono (°) de frutos de tomate de plantas irrigadas con agua residual y agua de pozo, almacenados durante 30 días. N=112. Medias con la misma letra por factor son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha=0.05$ ).

La interacción del factor tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo (Figura 5) resultó ser antagónica. Esto quiere decir que cuando las plantas de tomate se cultivan en sustrato inerte cambiar de agua de pozo a agua residual afectó negativamente la calidad del tomate al inhibir el desarrollo del color rojo (*hue* se quedó alto); en contraste cuando las plantas se cultivan en suelo, el

cambio de agua de pozo a agua residual favoreció el desarrollo del color rojo (reducción de *hue*).

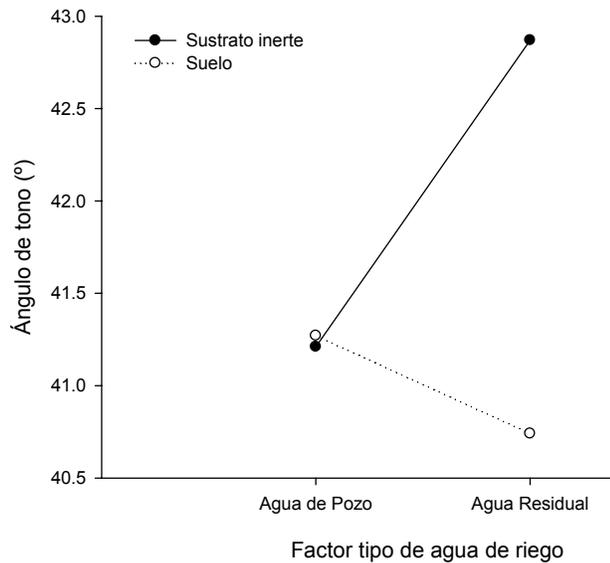


Figura 5. Interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre el ángulo de tono (°) de frutos de tomate almacenados durante 30 días. N=56.

En el Cuadro 10, se puede observar el comportamiento de la interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo, a lo largo del almacenamiento de los frutos de tomate. Se encontraron diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) en el *hue* de los frutos de tomate sólo en el día cinco, en los niveles agua residual y cultivo en sustrato inerte de los factores mencionados. Esto indica que el color rojo de esos tomates se no se desarrolló tan rápido o bien fue inhibido. Las plantas de tomate que se cultivaron en suelo muestran que al 5 dda, ya han alcanzado un valor de *hue* por debajo de los  $54^\circ$ , que de acuerdo con Cantwell *et al.* (2006), es un color rojo.

Cuadro 10. Efecto de la interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo en el ángulo de tono (°) de frutos de tomate almacenados durante 30 días.

		Tiempo de almacenamiento (días)						
		1	5	10	15	20	25	30
Interacción Tipo de agua*Tipo de sustrato								
Agua de Pozo	Suelo	92.39aA	51.47bB	33.36aC	29.47aD	27.65aD	27.27aD	27.25aD
	Sustrato inerte	88.62bA	54.22bB	34.16aC	29.70aC	28.15aCD	26.89aCD	26.72aD
Agua Residual	Suelo	89.77abA	50.66bcB	33.14aC	29.56aC	27.76aCD	26.48aD	27.78aD
	Sustrato inerte	91.67abA	62.53aB	34.87aC	29.57aC	28.04aCD	26.82aCD	26.55aD

<sup>z</sup> Letras minúsculas iguales, en sentido de columna, son estadísticamente iguales; letras mayúsculas iguales, en sentido de la fila, son estadísticamente iguales según la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). Día 1 es el valor de referencia para el inicio del experimento.

### 4.1.3 Firmeza

El factor tipo de suelo del cultivo afectó significativamente la firmeza del fruto: los tomates cultivados en sustrato inerte fueron significativamente más firmes que los tomates cultivados en suelo (Figura 6). La disminución de la firmeza puede deberse al efecto negativo, provocado por el ión sodio en los sitios de intercambio iónico en los suelos, y con ello la acumulación de la saturación del ión calcio, elemento indispensable en la sementación de la pared celular; el ión sodio puede causar efectos tóxicos para las plantas y desplaza a otros iones, como el calcio, que son necesarios para la nutrición (Hernández, 1988; Taylor *et al.*, 2002).

El factor temperatura de almacenamiento también afectó la firmeza: los tomates almacenados a 10 °C fueron significativamente más firmes que los almacenados a 20 °C (Figura 6). Esto puede deberse a que cuando los frutos se almacenaron a 20 °C se favoreció la pérdida de agua, induciendo daños en los tejidos, y cuando esto ocurre tiene lugar una desnaturalización de las proteínas, lo que ocasiona una pérdida de la permeabilidad selectiva de membranas; por lo que ésta no puede mantener la presión osmótica en vacuolas y protoplastos, y el agua y las sustancias disueltas salen de la célula, dejando marchito el tejido restante (Potter y Hotchkiss, 1995).

Se identificó una interacción estadísticamente significativa entre los factores tipo de agua y tipo de sustrato (Figura 7), donde cambiar de sustrato inerte a suelo causó frutos menos firmes, pero esto resultó mucho más notorio cuando el riego se hizo con agua de pozo que cuando fue con agua residual.

El comportamiento de la firmeza de los frutos de tomate, a lo largo del experimento se muestra en el Cuadro 11, donde se puede observar que los frutos de tomate obtenidos de la producción irrigada con agua de pozo y cultivados en suelo presentan un valor de 9.39 N-f al 5 dda, el cual de acuerdo con Cantwell *et al.* (2006), se encuentra en la categoría de frutos suaves.

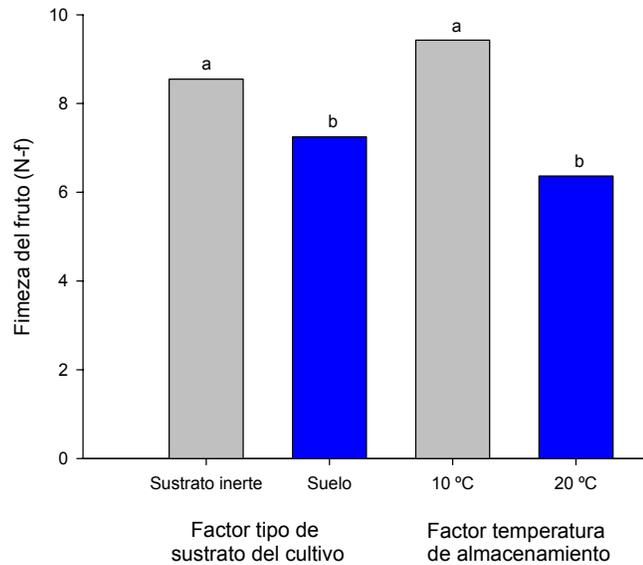


Figura 6. Efecto de los factores tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento en la firmeza del fruto (N-f) de frutos de tomate irrigados con agua residual y agua de pozo, almacenados durante 30 días. N=112. Medias con la misma letra por factor son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha=0.05$ ).

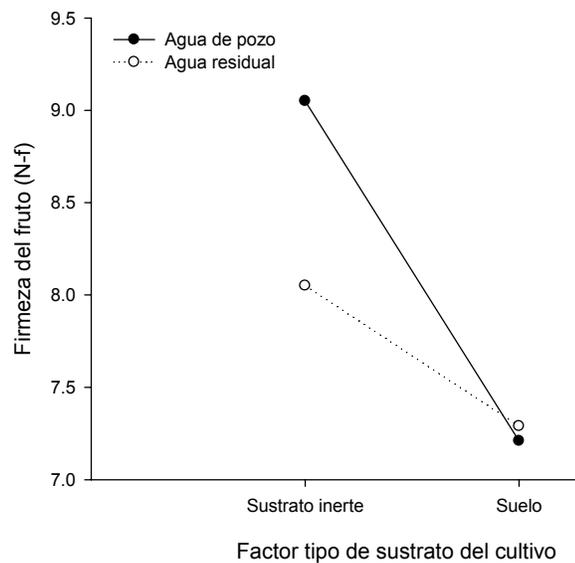


Figura 7. Interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la firmeza del fruto (N-f) de frutos de tomate almacenados durante 30 días. N=56.

Cuadro 11. Efecto de la interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo en la firmeza (N-f) de frutos de tomate almacenados durante 30 días.

		Tiempo de almacenamiento (días)						
		1	5	10	15	20	25	30
Interacción Tipo de agua*Tipo de sustrato								
Agua de Pozo	Suelo	18.15bA	9.39bB	6.68aC	6.18bC	3.92aD	3.05bD	3.08aD
	Sustrato inerte	21.92aA	12.04aB	8.16aC	8.53aC	5.05aD	4.21abD	3.44aD
Agua Residual	Suelo	15.89cA	11.38aB	6.49aC	5.85bCD	4.25aDE	3.36bE	3.79aE
	Sustrato inerte	15.57cA	12.30aB	7.82aC	6.94abC	4.56aD	5.21aD	3.96aD

<sup>z</sup> Letras minúsculas iguales, en sentido de columna, son estadísticamente iguales; letras mayúsculas iguales, en sentido de la fila, son estadísticamente iguales según la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). Día 1 es el valor de referencia para el inicio del experimento.

También se constató que los frutos de tomate de plantas cultivadas sobre suelo en general son menos firmes que las cultivadas en sustrato inerte (Cuadro 12). Los análisis de suelo y agua (Cuadros 3 y 4) muestran la tendencia hacia la salinidad, fundamentalmente por bicarbonatos, cloruros, calcio y sodio en el caso del agua, y el pH del suelo, lo cual puede estar afectando este parámetro. En un estudio realizado por Mizrahi (1982), quien evaluó el efecto de la salinidad en la vida de anaquel de frutos de tomate, encontró que a concentraciones de  $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  de NaCl en el agua, la vida de anaquel es de 12 días, mientras que el control (sin adición de NaCl) fue de 17 días, es decir, que irrigar con soluciones salinas, se reduce la vida de anaquel de los frutos de tomate, considerando a la firmeza como el parámetro de referencia. Aunado a esto, el pH básico del suelo también está contribuyendo a aumentar el efecto en la disminución de la vida de anaquel.

#### **4.1.4 Sólidos solubles totales (SST)**

El factor tipo de suelo afectó significativamente el contenido de SST: los tomates cultivados en sustrato inerte tuvieron significativamente más contenido de SST que los cultivados en suelo (Figura 8). De acuerdo con Flores *et al.* (2003) y Heeb *et al.* (2005), la inclusión de una parte de nitrógeno en forma de nitrato y de amonio puede mejorar la calidad de frutos de tomate al aumentar el contenido de azúcares y ácidos orgánicos en comparación con la nutrición exclusivamente con nitrato. Se puede inferir que el suelo utilizado en esta investigación, pudo causar que el nitrógeno disponible para la planta fueran nitratos, pues en el Cuadro 4 se observa que en las dos parcelas, existe un abastecimiento alto de nitrógeno y azufre (aunque no se tienen datos del tipo de ión), indicado por el contenido alto de materia orgánica.

El factor temperatura de almacenamiento también afectó el contenido de SST: los tomates almacenados a  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  tuvieron significativamente mayor contenido

de SST que los almacenados a 10 °C (Figura 8). El factor tipo de agua no tuvo efecto sobre esta variable.

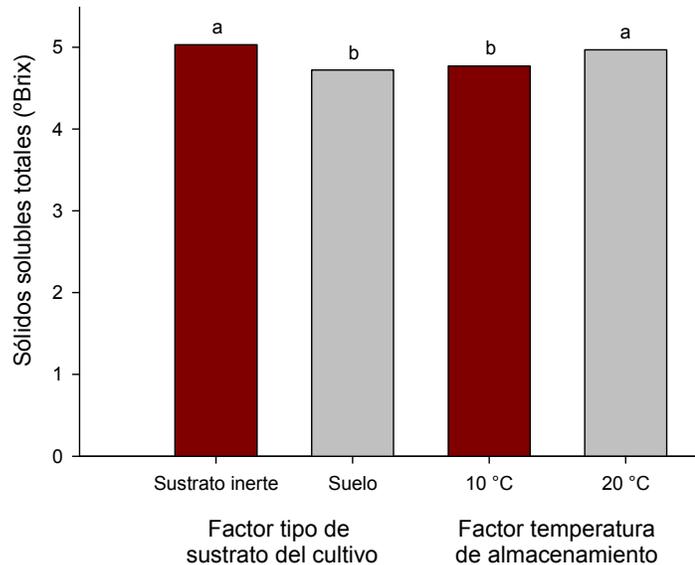


Figura 8. Efecto de los factores tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento en el contenido de sólidos solubles totales (°Brix) de frutos de tomate irrigados con agua residual y agua de pozo, almacenados durante 30 días. N=112. Medias con la misma letra por factor son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha=0.05$ ).

#### 4.1.5 pH del fruto

Se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas ( $P \leq 0.05$ ) del efecto de los factores tipo de agua de riego y temperatura de almacenamiento (Figura 9). Los frutos de tomate irrigados con agua residual tuvieron significativamente mayor pH que los frutos de tomate irrigados con agua de pozo. Los frutos de tomate almacenados a 20 °C tuvieron mayor pH que los frutos almacenados a 10 °C.

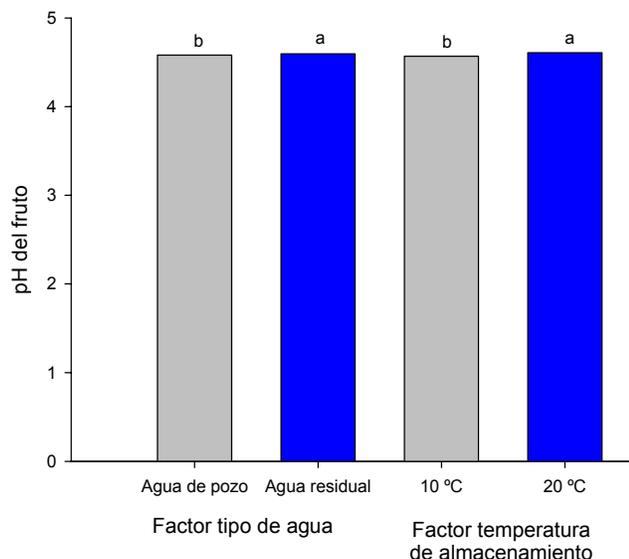


Figura 9. Efecto de los factores tipo de sustrato y temperatura de almacenamiento en la firmeza del fruto (N-f) de frutos de tomate almacenados durante 30 días. N=112. Medias con la misma letra por factor son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha=0.05$ ).

La interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato (Figura 9), nos puede indicar que cuando las plantas de tomate se cultivan en sustrato inerte, el tipo de agua de riego hace disminuir los valores de pH del fruto de tomate, al pasar de riego con agua de pozo a riego con agua residual; un efecto contrario ocurre cuando se cultivan las plantas de tomate en suelo, pues el tipo de agua de riego hace aumentar los valores de pH del fruto al pasar de riego con agua de pozo a riego con agua residual, lo cual es bueno.

El comportamiento del pH del fruto a lo largo del experimento (Cuadro 12), nos indica que el uso de agua de pozo en el riego de plantas de tomate cultivadas en sustrato inerte o en suelo no causa una variación entre las fechas de evaluación, pero en el caso del uso de agua residual tiene efecto significativo en cada fecha de evaluación para los dos tipos de sustrato. En un estudio realizado por Traka-Mavrona *et al.* (1998), encontraron que el uso de aguas residuales con tratamiento biológico sin añadir nutrientes, no modifica el pH

del jugo, esto es contrario a lo obtenido en la presente investigación pues sí se modificó esta variable por efecto del tipo de agua.

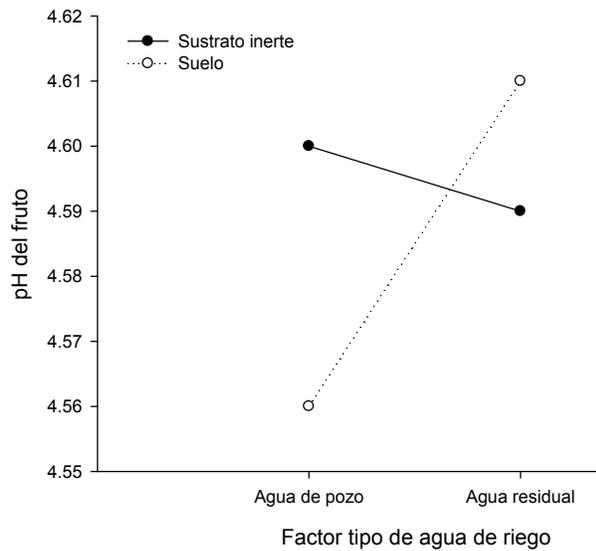


Figura 10. Interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre el pH del fruto (N-f) de tomates almacenados durante 30 días. N=56.

Cuadro 12. Efecto de la interacción de los factores tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo en el pH de frutos de tomate almacenados durante 30 días.

		Tiempo de almacenamiento (días)						
		1	5	10	15	20	25	30
Interacción Tipo de agua*Tipo de sustrato								
Agua de Pozo	Suelo	4.55abB	4.54bB	4.52bB	4.50bB	4.54aB	4.54bB	4.75bA
	S. inerte	4.56abB	4.57aB	4.59aB	4.55aB	4.58aB	4.59abB	4.75bA
Agua Residual	Suelo	4.56aCD	4.60abBC	4.63aB	4.50abE	4.54aDE	4.60aBC	4.81aA
	S. inerte	4.51bC	4.59abB	4.63aB	4.53abD	4.55aBC	4.55abBC	4.75bA

<sup>z</sup> Letras minúsculas iguales, en sentido de columna, son estadísticamente iguales; letras mayúsculas iguales, en sentido de la fila, son estadísticamente iguales según la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

#### 4.1.6 Acidez titulable (AT)

Se tuvieron diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) de los tres factores evaluados.

Los tomates irrigados con agua residual fueron significativamente menos ácidos que los irrigados con agua de pozo (Figura 11). Se ha reportado que el suministro adecuado de potasio en la solución nutritiva en la producción hidropónica de tomate, aumenta la AT del fruto. Bugarin-Montoya *et al.* (2002), encontraron que existe un incremento directo de la AT con la adición de cantidades crecientes de potasio, así para 3, 6 y 9 meq L<sup>-1</sup> de potasio, obtuvieron 0.199, 0.300 y 0.323 % de ácido cítrico. Los dos últimos porcentajes, son ligeramente altos a los encontrados en la presente investigación, aunque el suministro de potasio por parte del agua residual y de pozo fue de 0.89 y 0.98 meq·L<sup>-1</sup>, la aportación del suelo fue de 4.25 meq·L<sup>-1</sup> y de 1.27 meq·L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Tomates hidropónicos fueron significativamente menos ácidos que los tomates cultivados en suelo (Figura 11). De acuerdo con Grierson y Kader (1986), altas concentraciones de azúcares junto con relativamente alto contenido de ácidos son requeridos para el mejor sabor; bajos azúcares y alto contenido de ácidos produce un tomate ácido, altos azúcares y bajos ácidos produce un sabor suave y cuando los dos son bajos resulta en frutos sin sabor. Con estos criterios, y en concordancia con los resultados obtenidos se puede decir que los tomates irrigados con agua residual sobre suelo son los que tendrían el mejor sabor.

La temperatura de almacenamiento a 10° C, causó que los frutos de tomate fueran significativamente más ácidos que los almacenados a 20 °C (Figura 11).

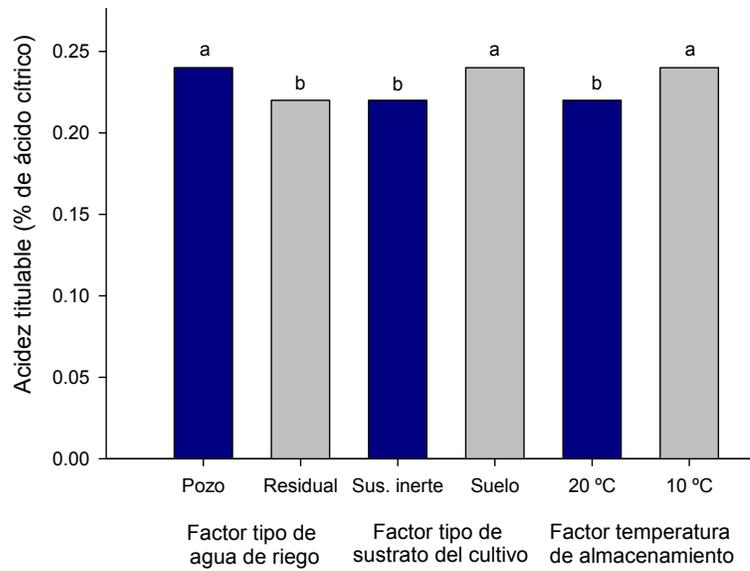


Figura 11. Efecto de los factores tipo de agua de riego, tipo de sustrato del cultivo y temperatura de almacenamiento en la acidez titulable (% de ácido cítrico) de frutos de tomate almacenados durante 30 días. N=112. Medias con la misma letra por factor son estadísticamente iguales (Tukey  $\alpha=0.05$ ).

#### 4.2 Fase 2: Efecto del tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo sobre la abundancia de licopeno en los diferentes estados de madurez del fruto de tomate en planta.

Las características del perfil cromatográfico del extracto de un fruto de tomate en estado de madurez rosa, se muestra en la Figura 12. El tiempo de retención promedio en que se expresó la máxima absorbancia del licopeno fue 19.54 min, y en el caso del  $\beta$ -caroteno fue 33.76 min.

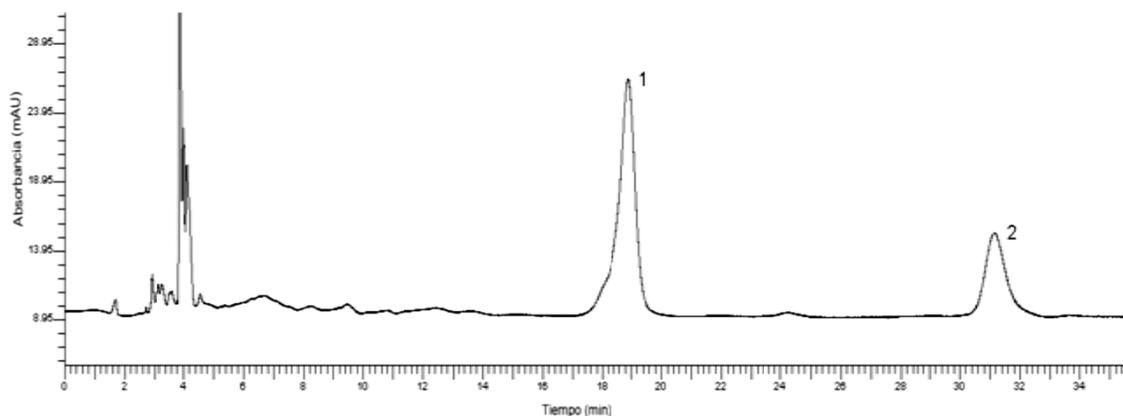


Figura 12. Cromatograma de HPLC del fruto de tomate liofilizado. Columna C-18 de fase reversa. Detector UV-Vis (470 nm). Fase móvil acetonitrilo:metanol:2-propanol (44:54:2 v/v/v) velocidad de flujo 0.05  $\mu\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ . 1: licopeno, 2:  $\beta$ -caroteno.

Por otro lado, en cuanto al efecto del factor tipo de agua sobre la abundancia de licopeno, se obtuvo que en los estados de madurez verde maduro, pintón, rosa y rojo existieron diferencias significativas (Cuadro 13). El agua residual produjo mayor abundancia de licopeno en los estados de madurez: verde maduro, pintón y rosa, pero en el estado de madurez rojo la mayor abundancia de licopeno fue para los frutos de tomate irrigados con agua de pozo. De acuerdo con Kubota *et al.* (2006), el cultivar de tomate y la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva son factores que afectan la concentración de licopeno en

el fruto, ya que encontraron un aumento en el contenido total de licopeno cuando usaron alta CE ( $4.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) que cuando usaron baja CE ( $2.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) independientemente del cultivar. Esto es congruente con lo que se encontró en la presente investigación, ya que el agua residual aunque no mostró mayor CE que el agua de pozo, sí tiene mayor contenido de sales como el amonio y el nitrato, lo que pudiera estar ayudando a que sea éste el factor determinante en la mayor abundancia de licopeno en los frutos de tomate.

El efecto del factor tipo de sustrato sobre la abundancia de licopeno sólo fue significativamente diferente en el estado de madurez verde quebrante (Cuadro 13). Esto puede estar relacionado a la salinidad del suelo y otros elementos, sin embargo, pareciera no tener un efecto marcado en todas las etapas de madurez. Aunque no es un factor a despreciar, ya que debemos considerar que el suelo suministra los nutrimentos de manera diferente que un sustrato inerte (como el tezontle rojo), ya que esto depende de factores como: la cantidad de los diversos elementos esenciales presentes, sus formas y combinaciones, el proceso por el cual éstos elementos se convierten en utilizables por las plantas y la solución del suelo y su pH (Resh, 1992).

No existió efecto por interacción de factores en ningún estado de madurez de los frutos de tomate evaluados.

Cuadro 13. Efecto de los factores tipo de agua y tipo de sustrato en la abundancia de licopeno (%) de frutos de tomate en los seis estados de madurez.

Factor	Niveles	Verde maduro	Verde quebrante	Pintón	Rosa	Rojo claro	Rojo
Tipo de agua	Pozo	0.64bE	8.27aD	17.39bC	27.13bB	10.64aC	36.12aA
	Residual	1.35aC	7.97aC	22.70aB	32.35aA	15.52aB	27.75bAB
	DMS	0.44	2.78	4.02	5.09	1.43	4.97
Tipo de sustrato	Inerte	0.90aD	4.40bD	19.86aB	30.19aA	13.40aC	31.72aA
	Suelo	1.08aE	11.84aD	20.23aB	29.29aA	12.77aC	32.11aA
	DMS	0.44	2.78	4.02	5.09	1.43	4.97

<sup>z</sup> Letras minúsculas iguales, en sentido de columna para cada factor, son estadísticamente iguales; letras mayúsculas iguales, en sentido de la fila, son estadísticamente iguales según la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ). DMS= diferencia mínima significativa.

## V. CONCLUSIONES

El uso de aguas residuales para la producción de tomate promovió mayor pérdida peso, incrementó el pH y disminuyó la acidez titulable de los frutos. Así como también, produjo mayor abundancia de licopeno en los estados de madurez verde maduro, pintón y rosa, pero en el estado de madurez rojo la mayor abundancia de licopeno fue para los frutos de tomate irrigados con agua de pozo.

La temperatura de almacenamiento postcosecha de frutos de tomate hidropónico modificó todas las variables de calidad evaluadas. A 20 °C se pierde mayor peso de los frutos de tomate. El desarrollo del color rojo de los frutos de tomate, medido como *hue* fue mayor a 10 °C (valor no deseado). La firmeza de los frutos de tomate almacenados a 20 °C es menor que a 10 °C. El contenido de SST de frutos de tomate almacenados a 20° fue mayor que los almacenados a 10 °C. El pH de frutos de tomate almacenados a 20 °C fue ligeramente mayor que los frutos de tomate almacenados a 10 °C. La AT fue mayor en los frutos de tomate almacenados a 10 °C que los almacenados a 20 °C.

El suelo como medio de crecimiento contribuyó en la producción de frutos de tomate que tuvieron un *hue* significativamente menor (tomates más rojos), pero afectó de manera negativa la firmeza y el contenido de sólidos solubles totales. La acidez titulable fue mayor que de los frutos obtenidos del cultivo de plantas de tomate en sustrato inerte. En cuanto a la abundancia de licopeno, el efecto de este nivel del factor tipo de sustrato del cultivo, solo mostró significancia en el estado de madurez verde quebrante.

La interacción del factor tipo de agua de riego y tipo de sustrato del cultivo resultó ser antagónica. Para la variable pérdida de peso, plantas en sustrato inerte, el irrigar con agua residual incrementó esta variable, este efecto se mitigó cuando el cultivo fue en suelo. En el caso del *hue*, cuando las plantas se cultivan en suelo, el cambio de agua de pozo a agua residual favoreció el desarrollo del color rojo (reducción de *hue*). Para la variable firmeza esta interacción indicó que cambiar de sustrato inerte a suelo causó frutos menos firmes, pero esto resultó mucho más notorio cuando el riego se hizo con agua de pozo que cuando fue con agua residual. En cuanto al pH del fruto, cuando las plantas de tomate se cultivan en suelo, el tipo de agua de riego hace aumentar los valores de pH del fruto al pasar de riego con agua de pozo a riego con agua residual.

## VI. LITERATURA CITADA

- ÁLVAREZ B., D.; CONTRERAS R., S. M.; POGGI V., H. M. 2002. Sistemas de tratamiento de aguas residuales por aplicación al suelo. Avance y perspectiva 21: 333-340.
- ANÓNIMO. 1988. Documentos y materiales de estudio. Foro 1: Problemática ambiental del Valle del Mezquital. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Comunidad científica Hidalguense. Fundación Friedrich Ebert Stiffing.
- ANÓNIMO. 2000. Informe final para la reconversión productiva del distrito de riego de 088 "Chiconautla". Comisión Nacional del Agua. Gerencia Regional de Aguas del Valle de México, México, 296 p.
- ANÓNIMO. 2002a. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo. Comisión Nacional del Agua. México, D. F. 21 p.
- ANÓNIMO. 2002b. 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.
- ANSORENA M., J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. Ed. Mundi-Prensa. España. pp. 73-93.
- AOAC. 1990. Official Methods of Analysis of the AOAC, 15th edition. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D. C. 1015 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 Food Science 65(3):545-548.
- ARTÉS C., F.; ARTÉS H., F. 2004. Tratamientos Posrecolección del Tomate Fresco. In: Tomates: Producción y Cultivo. A. Namesny (ed.). Ediciones de horticultura, S. L. Barcelona, España. pp. 109-120.
- BAKER, A. J. M. 1981. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. Journal Plant Nutrition 3: 643-654.
- BRITTON, G. 1995. Structure and properties of carotenoids in relation to function. FASEB J. 9: 1551-1558.

- BUGARÍN-MONTOYA, R.; GALVIS-SPINOLA, A.; SÁNCHEZ-GARCÍA, P.; GARCÍA-PAREDES, D. 2002. Demanda de Potasio del tomate tipo saladette. *Terra* 20:391-399.
- CANTWELL, M.; STODDARD, S.; LESTRANGE, M.; MICKLER, J.; MULLEN, R.; NIE, X.; GUTIERREZ, E.; ERMEN, H.; ARGUETA, G. 2006. Report to the California tomato commission. Tomato Variety Trials: Postharvest Evaluations for 2005. UCCE Fresh Market Statewide Report 2005. Postharvest. 14 p.
- CARRILLO G., R.; CAJUSTRE, L. J.; HERNÁNDEZ H., L. 1992. Acumulación de metales pesados en un suelo regado con aguas residuales. *Terra* 10:166-173.
- CLINTON, S. K. 1998. Lycopene: chemistry, biology and implications for human health and disease. *Nutrition Rev.* 56: 35-51.
- COMSTOCK, G. W.; ALBERG, A. J.; HUANG, H. Y.; WU, K.; BURKE, A. E.; HOFFMAN, S. C.; NORKUS, E. P.; GROSS, M.; CUTLER, R. G.; MORRIS, J. S.; SPATE, V. L.; HELZLSOUER, K. J. 1997. The risk of developing lung cancer associated with antioxidants in blood: ascorbic acid, carotenoids,  $\alpha$ -tocopherol, selenium, and total peroxy radical absorbing capacity. *Cancer Epidem. Biomarkers Prevent.* 6: 907-916.
- CORRALES G., J. 2005. Calidad: concepto amplio, indicadores e importancia de su acreditación en la mundialización del comercio de productos hortofrutícolas. V Congreso Internacional. Red de Investigación Socioeconómica sobre Hortalizas, Frutas y Flores. Artículo en extenso. 17 p.
- CUARTERO, J.; FERNÁNDEZ-MUÑOZ, R. 1999. Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae* 78: 83-125.
- 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.
- DE LA CRUZ C., S. 1965. Rehabilitación Integral del Distrito de Riego 03, Tula, Hgo. Tesis Profesional. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, Méx. 163 p.
- FERNÁNDEZ R., E. J.; CAMACHO, F.; RICARDEZ S., M. 2004. El Cultivo Del Tomate. *In: Tomates: Producción y Cultivo.* A. Namesny (ed.). Ediciones de horticultura, S. L. Barcelona, España. pp. 22-45.
- FISH, W. W.; PERKINS-VEAZIE, P.; COLLINS, J. K. 2002. A Quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents. *Journal of Food Composition and Analysis* 15: 309-317.
- FLORES, P.; NAVARRO, J. M.; CARVAJAL, M.; CERDÁ, A.; MARTÍNEZ, V. 2003. Tomato yield and quality as affected by nitrogen source and salinity. *Agronomie* 23: 249-256.

- FRIEDEL, J.; LANGER, T.; SIEBE, CH.; STAHR, K. 2000. Effects of long-term wastewater irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and activities in Central Mexico. *Biology and Fertility of Soils* 31: 414-421.
- GANN, P. H.; MA, J.; GIOVANNUCCI, E.; WILLET, W.; SACKS, F. M.; HENNEKENS, C. H.; STAMPFER, M. J. 1999. Lower prostate cancer risk in men with elevated plasma lycopene levels: results of a prospective analysis. *Cancer Res.* 59: 1225-1230.
- GARZA A., V. 2000. Reuso agrícola de las aguas residuales de Cd. Juárez, (Chihuahua, México). En el Valle de Juárez y su impacto en la salud pública. *Revista FASPYN* 1(3). Consultado en línea: [http://www.uanl.mx/publicaciones/respyn/i/3/ensayos/aguas\\_residuales.html](http://www.uanl.mx/publicaciones/respyn/i/3/ensayos/aguas_residuales.html) (20 de julio de 2010).
- GIOVANNUCCI, E. 1999. Tomatoes, tomatobased products, lycopene, and cancer: review of epidemiologic literature. *J. Nat. Cancer Res.* 91: 317-331.
- GONZÁLEZ C., A.; SALAS S., M. C.; URRESTARAZU G, M. 2004. Producción y Calidad en el Cultivo de Tomate Cherry. *In: Tratado de cultivo sin suelo. Urrestarazu G., M. (coord.) 3ª. Edición. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 703-748.*
- GRANT, W. B. 1999. An ecologic study of dietary links to prostate cancer. *Alter Medicine Rev.* 4: 162-169.
- GRIERSON, D.; KADER, A. A. 1986. Fruit ripening and quality. *In: Atherton, J.G., Rudich, J. (Eds.). The Tomato Crop. A Scientific Base for Improvement. Chapman & Hall. London. pp. 241-280.*
- GUTIÉRREZ-RUIZ, M. E.; SOMMER, I.; SIEBE, CH. 1995. Effects of land application of waste water from México City on soil fertility and heavy metal accumulation: a bibliographical review. *Environmental Review* 3(3-4): 318-330.
- HANDELMAN, G. J. 1996. Carotenoids As Scavengers Of Active Oxygen Species. *In: Cadenas, E. y Packer, L. (eds.). Handbook of antioxidants. New York: Marcel Dekker, Inc. pp. 259-314.*
- HEEB, A.; LUNDEGARDH, B.; ERICSSON, T.; SAVAGE, G. P. 2005. Nitrogen form affects yield and taste of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85: 1405-1414.
- HERNÁNDEZ H., L. 1988. Evaluación de las características de los suelos del Distrito de Riego 03, Tula, por el uso de agua residual en el riego agrícola. Tesis profesional. Instituto Politécnico Nacional. 112 p.
- JIMÉNEZ C., B.; SIEBE G., C.; CIFUENTES G., E. 2005. El Reúso Intencional y No Intencional del Agua en el Valle de Tula. *In: El agua en México vista desde la academia. B. Jiménez y L. Marín (eds.). Ed. Digital Academia Mexicana de Ciencias. México, D. F. pp. 33-55.*

- 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.
- KADER, A. A. 1986. Effects of postharvest handling procedures on tomato quality. *Acta Horticulturae* 190: 209-217.
- KADER, A. A.; MORRIS, L. L.; CHEN, P. 1978. Evaluation of two objective methods and a subjective rating scale for measuring tomato fruit firmness. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 103:70-73.
- KAYS, J. S. 1997. *Postharvest physiology of perishable plant products*. Exon Press. Athens, Georgia. 531 p.
- KHACHIK, F.; BEECHER, G. R.; SMITH, J. C. 1995. Lutein, lycopene and their oxidative metabolites in chemoprevention of cancer. *J. Cell. Biochem.* 22: 236-246.
- KHACHIK, F.; GOLI, M. B.; BEECHER, R.; HOLDEN, J.; LUSBY, W. R.; TENORIO, M. D.; BARRERA, M. R. 1992. Effect of food preparation on qualitative and quantitative distribution of major carotenoid constituents of tomatoes and several green vegetables. *J. Agric. Food Chem.* 40: 390-398.
- KUBOTA, C.; THOMSON, C. A.; WU, M.; JAVANMARDI, J. Controlled environments for production of value-added food crops with high phytochemical concentrations: Lycopene in tomato as an example. *HortScience* 41(3): 522-525.
- LÓPEZ C, A. F.; GÓMEZ, P. A. 2004. Comparison of color indexes for tomato ripening. *Horticultura Brasileira* 22(3): 534-537.
- MARA, D.; CAIRNCROSS, S. 1989. *Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture*. World Health Organization. Geneva. 185 p.
- McGUIRE, R. G. 1992. Reporting of objective color measurements. *HortScience* 27(12): 1254-1255.
- MIZRAHI, Y. 1982. Effect of salinity on tomato fruit ripening. *Plant Physiol.* 69:966-970.
- NAMESNY, A. 2004. *Tomates: producción y comercio*. Ediciones de Horticultura. Barcelona. 253 p.
- NARISAWA, T.; FUKAURA, Y.; HASEBE, M.; NOMURA, S.; OSHIMA, S.; SAKAMOTO, H.; INAKUMA, T.; ISHIGURO, Y.; TAKAYASU, J.; NISHINO, H. 1998. Prevention of N-methyl-N-nitrosourea-induced colon carcinogenesis in F344 rats by lycopene and tomato juice rich in lycopene. *Jap. J. Cancer Res.* 89: 1003-1008.
- NGUYEN, M.; SCHWART, S. 1999. Lycopene: chemical and biological properties. *Food Technology* 58(2): 38-44.

- NISEN, A.; GRAFIADELLIS, M.; JIMÉNEZ, R.; LA MALFA, G.; MARTÍNEZ, G. P. S.; MONTEIRO, A.; VERLODT, H.; VILLELE, O.; ZABELTITZ, C. H.; DENIS, I. U.; BAUDOIN, W. O. 1990. Protected cultivation in the Mediterranean climate. FAO. Plant production and protection paper núm. 90. Rome, Italy.
- NISHINO, H. 1997. Cancer prevention by natural carotenoids. *J. Cell. Biochem.* 27: 86-91.
- NISHINO, H. 1998. Cancer prevention by carotenoids. *Mutation Research* 402: 159-163.
- NUEZ, F. 1995. El cultivo del tomate. Ed. Mundi Prensa. Madrid, España. 793 p.
- OKAJIMA, E.; TSUTSUMI, M.; OZONO, S.; AKAI, H.; DENDA, A.; NISHINO, H.; OSHIMA, S.; SAKAMOTO, H.; KONISHI, Y. 1998. Inhibitory effect of tomato juice on rat urinary bladder carcinogenesis after N-butyl-N-(4-hydroxybutyl)nitrosamine initiation. *Jap. J. Cancer Res.* 89: 22-26.
- ORTEGA-LARROCEA, M. P.; SIEBE, C.; BÉCARD, G.; WEBSTER, R.; MÉNDEZ, I. 2000. Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the Mezquital Valley of Mexico. *Applied Soil Ecology* 16(2):149-157.
- PASSAM, H. C.; KARAPANOS, I. C.; BEBELI, P. J.; SAVVAS, D. 2007. A review of recent research on tomato nutrition, breeding and post-harvest technology with reference to fruit quality. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology* 1: 1-21.
- PÉREZ-ALFOCEA, F.; BALIBREA, E.; BOLARÍN, M. C.; CUARTERO, J. 1997. Efecto de la salinidad sobre el rendimiento y la calidad del fruto en *Lycopersicon esculentum*, *L. pimpinellifolium* y en sus híbridos interespecíficos. *Acta Horti.* 2: 243-248.
- PERIAGO, M. J.; MARTÍNEZ-VALVERDE, I.; ROS, G.; MARTÍNEZ, C.; LÓPEZ, G. 2001. Propiedades químicas, biológicas y valor nutritivo del licopeno. *An. Vet. (Murcia)* 17: 51-66.
- PESCOD, M. B.; ALKA, U. 1988. Guidelines For Wastewater Reuse In Agriculture. *In: Treatment and use of sewage effluent for irrigation.* Pescod, M. B. and A. Arar (eds.). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Anchor Bendon Ltd., Tiptree, Essex. Great Britain. pp. 21-73.
- POTTER, N.; HOTCHKISS, J. 1995. Ciencia de los alimentos. Ed. ACRIBIA. España. 667 p.
- PRIETO M., J.; GONZÁLEZ R., C. A.; ROMÁN G., A. D.; PRIETO G., F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10: 29-44.

- RAO, A. V.; AGARWAL, S. 1998. Bioavailability and in vivo antioxidant properties of lycopene from tomato products and their possible role in the prevention of cancer. *Nutr. Cancer* 31: 199-203.
- RAO, A. V.; FLESHNER, N.; AGARWAL, S. 1999. Serum and tissue lycopene and biomarkers of oxidation in prostate cancer patients: a case-control study. *Nutr. Cancer* 33: 159-164.
- RESH, H. M. 1992. Cultivos hidropónicos. 3ª Edición. Mundi-Prensa. España. p. 27.
- REYNALDO, I.; LLONÍN, D.; UTRIA, E. 2003. Effects of sewage sludge and mychorrization on tomato seedling growth. *Cultivos tropicales* 24 (3): 83-87.
- REZENDE F., P. C.; ARRUDA S., R.; LUIZ F., F. 2000. Fruit size, mineral composition and quality of trickle-irrigated tomatoes as affected by potassium rates. *Pesq. Agropec. Bras.* 35: 21-25.
- RIQUELME, F. 1995. Poscosecha. *In: El Cultivo del tomate*. Nuez, F. (ed.) Edit. Mundi Prensa. Madrid, España. 793 p.
- ROSAS, I.; BÁEZ, A.; COUTIÑO, M. 1984. Bacteriological quality of crops irrigated with wastewater in the Xochimilco plots, Mexico City, Mexico. *Applied and Environmental Microbiology* 47(5): 1074-1079.
- SAS. 2004. SAS/STAT User's Guide. (Release 9.1) SAS Publishing, Cary (NC). 1-7: 5180.
- SHARMA, S. K.; LE MAGUER, M. 1996. Lycopene in tomatoes and tomato pulp fractions. *Ital. J. Food Sci.* 2: 107-113.
- SHARONI, Y.; GIRON, E.; RISE, M.; LEVY, J. 1997. Effects of lycopene enriched tomato oleoresin on 7,12-dimethyl benz(a)anthracene-induced rat mammary tumors. *Cancer Detect. Prevent.* 21: 118-123.
- SIEBE, Ch. 1994. Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 10: 15-21.
- SIEBE, Ch. 1998. Nutrien inputs to soils and their uptake by alfalfa through long-term irrigation with untreated sewage effluent in Mexico. *Soil Use and Management* 14(2): 119-122.
- SMITH, F. A.; RAVEN, J. A. 1979. Intracellular pH and its regulation. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 30: 289-311.
- 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.
- STEVENS, D. P.; MCLAUGHLIN, M. J.; HEINRICH, T. 2003. Determining toxicity of lead and zinc run off in soils: salinity effects on metal

- partitioning and on phytotoxicity. *Environmental Toxicology and Chemistry* 22: 3017-3024.
- TAYLOR, M. D.; LOCASCIO, S. J.; ALLIGOOD, M. R. 2002. Incidence of blossom-end rot and fruit firmness of tomato affected by irrigation quantity and calcium source. *Proc. Fla. State Hort. Soc.* 115: 211-214.
- THAKUR, B. R.; SINGH, R. K.; NELSON, P. E. 1996. Quality attributes of processed tomato products. *Food Reviews International* 12: 275-401.
- TRAKA-MAVRONA, EK.; MALOUPA, E.; PAPADOPOULOS, F.; PAPADOPOULOS, A. 1998. Response of greenhouse tomatoes to wastewater fertigation in soilless cultivation. *Acta Hort. (ISHS)* 458: 411-416.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 1991. United States Standards for Grades of Fresh Tomatoes. Agricultural Marketing Service. Fruit and Vegetable Division. Fresh Products Branch. United States Department of Agriculture (USDA). U. S. A. 14 p.
- VÁZQUEZ-ALARCÓN, A.; CAJUSTRE, L. J.; CARRILLO-GONZÁLEZ, R.; ZAMUDIO-GONZÁLEZ, B.; ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, E.; CASTELLANOS-RAMOS, J. Z. 2005. Límites permisibles de acumulación de cadmio, níquel y plomo en suelos del valle del Mezquital, Hidalgo. *Terra* 23(4): 447-455.
- VÁZQUEZ-ALARCÓN, A.; JUSTIN-CAJUSTRE, L.; SIEBE-GRABACH, C.; ALCÁNTAR-GONZÁLEZ, G.; DE LA ISLA DE BAUER, M. de L. 2001. Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia* 35:267-274.
- VEGA, M.; JIMÉNEZ, M.; SALGADO, R.; PINEDA, G. 2005. Determinación de bacterias de origen fecal en hortalizas cultivadas en Xochimilco de octubre de 2003 a marzo de 2004. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria* 4: 21-25.
- VILLARREAL R., M.; GARCÍA E., R. S.; OSUNA E., T.; ARMENTA B., A. D. 2002. Efecto de dosis y fuente de nitrógeno en rendimiento y calidad postcosecha de tomate en fertirriego. *Terra* 20: 311-320.
- WILBERG, V. C.; RODRÍGUEZ-AMAYA, D. B. 1995. HPLC quantitation of major carotenoids of fresh and processed guayava, mango and papaya. *Lebensm.-Wiss.u.-Technol.* 28: 474-480.
- WILLIS, R. H. H.; LEE, T. H.; McGLASSON, W. B.; HALL, E. G.; GRAHAM, D. 1999. Introducción a la fisiología y manipulación de frutas, hortalizas y plantas ornamentales. 2ª Edit. Acribia. Zaragoza, España. 240 p.
- WINSOR, G. W.; DAVIES, J. N.; MASSEY, D. M. 1962. Composition of tomato fruit. III. Juices from whole fruit and locules at different stages of ripeness. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 13(2):108-115.