

Relaciones hídricas y fulvato de hierro en
tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.)

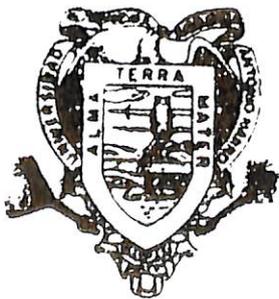
JAI ME MEN DI ET A ESPINO LA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN RIEGO Y DRENAJE



BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONATO
BANCO DE TESIS
U.A.A.A.N.



Universidad Autónoma Agraria

"Antonio Narro"

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coah.

NOVIEMBRE DE 2001

13517

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

**Relaciones hídricas y fulvato de hierro en
tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.)**

**TESIS
POR
Jaime Mendieta Espinola**

**Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría
y aprobada como requisito parcial para optar al grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN RIEGO Y DRENAJE**

COMITÉ PARTICULAR

Asesor principal:



M.C. Lindolfo Rojas Peña

Asesor:



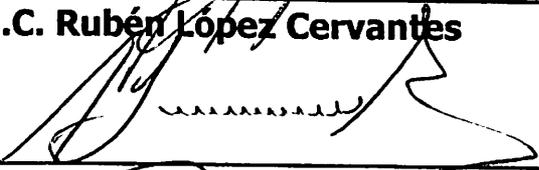
Ph. D. Alfonso Reyes López

Asesor:

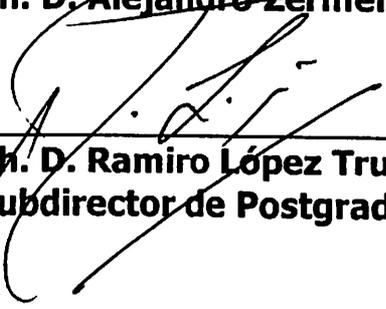


M.C. Rubén López Cervantes

Asesor:



Ph. D. Alejandro Zermeno González



**Ph. D. Ramiro López Trujillo
Subdirector de Postgrado**


BIBLIOTECA
ECIDIO L. REBONATO
BANCO DE TESIS
U.A.A.N.

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México. Noviembre de 2001.

COMPENDIO

Relaciones hídricas y fulvato de hierro en
tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.)

POR

JAIME MENDIETA ESPINOLA

MAESTRÍA

RIEGO Y DRENAJE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. NOVIEMBRE DE 2001.

M.C. Lindolfo Rojas Peña. –Asesor-

Palabras claves: *Lycopersicon esculentum* Mill., tomate, hierro, quelatos, fulvato de hierro, clorosis férrica, suelo calcáreo, relaciones hídricas.

Con el fin de evaluar el estado interno del agua en la planta respecto a la nutrición férrica y analizar sus efectos fisiológicos desde el punto de vista de la relación, agua, suelo y planta, se realizó un estudio en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) durante la etapa de producción bajo invernadero en donde se

evaluaron tres diferentes fuentes de hierro: sequestrene 138 y 330 y un fulvato de hierro experimental.

En general aquellos tratamientos suplidos bajo una nutrición a base de fulvato de hierro resultaron en un estado hídrico más favorable en relación a los suplidos con los quelatos comerciales. Fisiológicamente el estado interno del agua en la planta fue reflejado favorablemente en un potencial hídrico más negativo, un contenido relativo de agua adecuado, una transpiración más alta con la consiguiente menor resistencia a la difusión del vapor de agua y una temperatura inferior a la del aire.

La dosis de 2 cc de fulvato de hierro produjo una mejor respuesta en cuanto a la altura de planta y diámetro de cobertura, el testigo presentó un diámetro de tallo más grueso, la mayor cantidad de materia seca de raíz se obtuvo con la dosis de 3.5 cc de fulvato de hierro y de follaje también con la anterior, además de la dosis de 5 cc de fulvato de hierro. Con 2 cc de fulvato de hierro y 3.5 cc de fulvato de hierro más 2 cc de ácidos húmicos produjeron los rendimientos superiores. Las dosis de 2 cc de fulvato de hierro y 3.5 cc de fulvato de hierro más 2 cc de ácidos húmicos produjeron el mayor número de frutos por planta y la masa media de fruto superior se obtuvo con la aplicación de 2 cc de fulvato de hierro.

ABSTRACT

Water relations and iron chelate on
tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)

By

JAIME MENDIETA ESPINOLA

MASTER IN SCIENCE

IRRIGATION AND DRAINAGE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. NOVEMBER 2001.

M.C. Lindolfo Rojas Peña. –Advisor–

Key words: *Lycopersicon esculentum* Mill., tomato, iron, chelate, iron chelate, ferric chlorosis, calcareous soil, water relations.

This study was carried out to evaluate the internal state of the water in the plant regarding to the objective to ferric nutrition and to analyze their physiologic effects from the point of view of the relationship, water-soil-plant. This research was carried out in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) during

the production stage under greenhouse conditions three different iron sources were evaluated: sequestrene 138 and 330 and a chelate of experimental iron.

Those treatments in general replaced under a nutrition with the help of iron chelate were in a more favorable state water in relation to those replaced with the commercial chelates. Physiologically the internal state of the water in the plant was reflected favorably in a more negative water potential, an adapted relative content of water, a higher perspiration with the rising smaller resistance to the diffusion of the vapor of water and lower temperature than that of the air.

The dose of 2 cc of iron chelate produced a better answer for plant height and covering diameter, the control presented a diameter of thicker stem, the dose of 3.5 cc of iron chelate produced the biggest amount in dry matter both of root and foliage, the same happened with 5 cc of iron chelate. The highest yields were obtained with 2 cc of iron chelate and 3.5 cc of iron chelate plus 2 cc of humics acids. The highest number of fruit per plant was obtained with the application of 2 cc of iron chelate and 3.5 cc of iron chelate plus 2 cc of humic acids. The highest average weight of the biggest fruit was obtained with the application of 2 cc of iron chelate.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	página
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos.....	4
Hipótesis.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
El hierro.....	5
Sustancias húmicas.....	12
Sustancias húmicas y su efecto en plantas.....	16
Los ácidos fúlvicos en relación al hierro.....	19
Relación agua, suelo, planta, atmósfera.....	21
Potencial hídrico.....	23
Contenido relativo de agua.....	27
Transpiración.....	28
Resistencia a la difusión de vapor de agua.....	30
Temperatura.....	31

Uso eficiente del agua.....	33
Sustancias húmicas y relaciones hídricas.....	34
Ácidos fúlvicos y relaciones hídricas.....	35
MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
Aspectos metodológicos.....	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	47
Variables fisiológicas.....	47
Potencial hídrico.....	47
Contenido relativo de agua.....	50
Transpiración.....	51
Resistencia estomática.....	53
Temperatura de la hoja.....	54
Uso eficiente del agua.....	56
Relación entre la transpiración, potencial hídrico (Ψ_h) y diferencial de temperaturas ($T_A - T_H$).....	58
Análisis foliar.....	58
Variables agronómicas.....	61
Variables fenológicas.....	61
Rendimiento.....	65
CONCLUSIONES	68
RESUMEN.....	70
LITERATURA CITADA.....	73
APÉNDICE.....	80

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		página
4.1	Características físico químicas del suelo empleado en el experimento.....	38
4.2	Calidad del agua de riego empleada durante el experimento	39
4.3	Descripción de los productos químicos y su concentración usados para el control de las plagas y enfermedades durante el experimento.....	41
4.4	Relación de tratamientos bajo estudio.....	42
5.1	Pruebas de rango múltiple de las variables de respuesta fisiológicas.....	49
5.2	Pruebas de rango múltiple aplicadas a las variables de respuesta agronómicas.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	página
5.1	Potencial hídrico determinado al amanecer (7:00 A.M.) en hojas del tomate nutrido con diferentes fuentes de hierro, 79 días después del trasplante..... 48
5.2	CRA a lo largo del periodo de medición en tomate suplidos con diferentes fuentes de hierro..... 51
5.3	Transpiración a lo largo del día de las plantas de tomate bajo una nutrición con diferentes fuentes de hierro..... 52
5.4	Resistencia estomatal a la difusión de vapor de agua a la atmósfera..... 54
5.5	Temperatura del aire y hoja obtenido a través del día para cada uno de los tratamientos en orden progresivo..... 55
5.6	Uso eficiente del agua por el cultivo de tomate..... 57
5.7	Interacción de las variables de respuesta: transpiración (Tr), potencial hídrico (Ψ_h) y el diferencial de temperaturas entre aire y hoja($TA-TH$)..... 59

5.8	Contenido de calcio y hierro en las hojas de tomate durante la etapa de producción (79 días después del trasplante).....	60
5.9	Variables fenotípicas: altura de planta, diámetro de cobertura y tallo.....	61
5.10	Variables fenotípicas: masa seca de follaje y raíz.....	63
5.11	rendimiento, número y masa media de frutos obtenido.....	65

INTRODUCCIÓN

La producción de tomate a nivel mundial es de 89 millones de toneladas. China es considerada el primer productor al aportar el 18 por ciento, seguido por los Estados Unidos con el 12, mientras México ocupa el onceavo lugar, con el 2 por ciento del total.

En México los principales estados productores de tomate son: Sinaloa, Baja California Norte, San Luis Potosí, Jalisco, Nayarit y Sonora, en conjunto las tres primeras entidades cubren más del 75 por ciento de la producción anual. El ciclo otoño - invierno es el de mayor producción al aportar el 57 por ciento de la producción agrícola nacional, mientras que el restante 43 por ciento se obtiene del ciclo primavera – verano.

Por la superficie ocupada, producción obtenida, valor de la misma, captación de divisas, generación de empleos, consumo per cápita, y tecnología de producción, el tomate, en nuestro país, es considerada la especie hortícola más importante (Contreras y Sánchez, 1997).

Un factor que limita la producción de tomate en suelos calcáreos es la deficiencia de hierro caracterizada por la falta de clorofila (clorosis), y el cual es un problema en las regiones productoras de esta hortaliza, dado que por su origen, estos suelos poseen pH alcalino lo que provoca la fijación de elementos metálicos principalmente hierro (Hernández-Apaolaza, 1995; Salisbury y Ross, 1994).

Una forma de corregir la clorosis férrica es a través del uso de quelatos empleados ya desde 1951 para resolver estrés por nutrientes en los cultivos (Lucena *et al*, 1988), desde entonces diferentes quelatos han sido usados como fertilizantes de hierro, no obstante, algunas veces el incremento en las utilidades son menores que el costo agregado utilizando quelatos sintéticos (Shorrocks, 1984), además, dada su limitada demanda son difíciles de conseguir en el mercado sin considerar que son producidos en E.U.A. Dado que existen también otros quelatos de hierro que son más económicos pero menos eficientes, es necesario verificar la formulación del producto comercial puesto que este factor puede afectar su efectividad (Wallace *et al*, 1976).

Otra forma más reciente de corregir la clorosis férrica es a través del uso de sustancias húmicas debido al atributo principal que poseen, principalmente la fracción fúlvica, que consiste en la capacidad de formar complejos con los metales catiónicos tales como el hierro y movilizarlos de las partículas sólidas

en el suelo a la superficie de la raíz (Schnitzer y Khan, 1972), lo que afecta muchos procesos físicos, químicos y biológicos importantes, asimismo afectan la disponibilidad y el movimiento de muchos nutrientes en las plantas (Lindsay, 1979).

El hierro es un elemento metálico que se hace asimilable por las plantas en condiciones adversas, si el suministro de este elemento se hace en presencia de sustancias húmicas (De Kock, 1955b), sin embargo, más allá de los beneficios nutricionales de las sustancias húmicas, los ácidos fúlvicos afectan el vigor y crecimiento de la vida celular estimulando varios procesos fisiológicos y bioquímicos relacionados al metabolismo de la célula.

Un estrés es cualquier factor que limite el crecimiento de las plantas (Grime, 1977), lo cual implica que la aclimatación de las plantas a los estrés involucra respuestas fisiológicas, estructurales, y modificaciones morfológicas a corto y a largo plazo, estos cambios ayudan a minimizar el estrés en la planta y maximizar el uso de los recursos internos y externos (Mooney *et al.*, 1991).

En la relación agua, suelo, planta, atmósfera, el crecimiento de las plantas es controlado directamente por el déficit hídrico en las mismas y sólo indirectamente por déficit hídrico del suelo y el estrés atmosférico (Ritchie,

1974). El potencial hídrico es de las medidas más útiles del estado hídrico en la planta (Art, 1985).

Dado los limitados estudios realizados en la relación agua, suelo, planta, atmósfera respecto a la nutrición a base de ácidos fúlvicos y más específicamente con fulvatos de hierro se realizó el presente estudio para valorar y explicar los procesos internos que ocurren en la planta bajo un suministro de hierro con diferentes fuentes.

Objetivo

Comparar el efecto de un fulvato de hierro experimental y de quelatos de hierro comerciales sobre las relaciones hídricas en el cultivo del tomate.

Hipótesis

El fulvato de hierro tiene efectos similares a los quelatos de hierro comerciales en la relación agua, suelo, planta, atmósfera.

REVISIÓN DE LITERATURA

El Hierro (Fe)

El hierro es, después del oxígeno, el sílice, y el aluminio, el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre. La mayoría del hierro está en forma de silicatos de ferro-magnesio, la degradación de estos minerales en el suelo es normalmente acompañado por una combinación de hidrólisis y oxidación debido a la reacción con el agua y el aire. La mayoría del hierro liberado por degradación se precipita como óxido e hidróxido y sólo una pequeña parte está incorporada en minerales silicatados secundarios o complejados por la materia orgánica del suelo (Schwertmann y Taylor, 1977).

La deficiencia de hierro (Fe) en plantas causa clorosis en los tejidos de la hoja debido a la inadecuada síntesis de la clorofila (Chen y Barak, 1982), lo que causa una disminución en el tamaño de los cloroplastos con la consecuente reducción de la fotosíntesis (Treshow, 1970), de hecho en una planta saludable el 60 por ciento del hierro de la hoja se concentra en los cloroplastos (Whatley *et al.*, 1951).

Actualmente no se conoce bien la causa por la cual la deficiencia en hierro dé por resultado una inhibición rápida de la formación de clorofila, pero parece ser que dos o tres enzimas que catalizan ciertas reacciones de la síntesis de clorofila requieren de Fe^{+2} (Salisbury y Ross, 1994).

La clorosis férrica de los cultivos y árboles frutales en suelos calcáreos es un viejo problema y fue ya descrito precisamente en los inicios del siglo pasado -1907- por Molz (Konrad, 1994).

La clorosis normalmente ocurre en plantas que crecen en suelos de carácter alcalino. Estos suelos son normalmente calcáreos, y la clorosis encontrada se ha clasificado como "clorosis inducida por cal" para distinguirla de la clorosis debida a otros factores como la falta de hierro o concentraciones tóxicas de metales pesados. Se ha aceptado la inmovilización o falta de hierro en los tejidos de las hojas como el factor más grande causante de la clorosis, pero poco es conocido del complejo proceso de formación de la clorofila y el papel del hierro en la biosíntesis de la clorofila (De Kock, 1955a).

El factor principal asociado con la clorosis de hierro bajo condiciones calcáreas parece ser el efecto del ion bicarbonato (HCO_3) en la absorción de Fe y/o translocación en la planta. El resultado es la inactivación o inmovilización del Fe en los tejidos de la planta.

Los niveles de bicarbonato en el suelo son incrementados por altos niveles de CO_2 en el suelo. El CO_2 del suelo es un producto normal de la respiración por los microorganismos del suelo y de las raíces de las plantas. Sin embargo, los suelos que son anegados o que se airean pobremente tienden a tener un incremento en los niveles de CO_2 . Por consiguiente, los suelos calcáreos con pH alto son especialmente susceptibles a la deficiencia de hierro cuando son anegados o pobremente aireados.

Por cada incremento de una unidad en el pH del suelo la concentración de Fe^{3+} soluble se reduce 1000 veces y la de Fe^{2+} se reduce 100 veces (Castellanos *et al.*, 2000).

Las plantas deficientes en hierro se caracterizan por desarrollar una clorosis intervenal pronunciada, similar a la causada por la deficiencia de magnesio, pero que se presenta primero en las hojas más jóvenes. La clorosis intervenal en ocasiones es seguida por clorosis de las venas, por lo que la hoja entera adquiere color amarillo. En casos severos, las hojas jóvenes incluso se ponen blancas, con lesiones necróticas (Salisbury y Ross, 1994). En las plantas de tomate cloróticas los frutos se vuelven verde plateados y tienden a ser anaranjados en lugar de rojos cuando maduros (Hewitt, 1945).

Las hojas deficientes en hierro relativas a aquellas con suficiencia son caracterizadas por baja clorofila, baja absorción de oxígeno, más potasio, menos calcio, más citrato, frecuentemente menos malato, más ácidos totales, más aminoácidos, menos peroxidasa y catalasa y menos proteínas en los cloroplastos (Wallace *et al.*, 1977).

El papel fisiológico del hierro es muy amplio, sin embargo, sus principales funciones se relacionan o conciernen a la respiración, la síntesis de la clorofila y la fotosíntesis, la formación de proteínas, la fijación del nitrógeno atmosférico y la reducción de los nitratos, en la mayor parte de sus funciones el hierro interviene para catalizar las reacciones de oxidorreducción gracias al cambio de valencia que le permite de forma reversible pasar del estado bivalente al estado trivalente por la pérdida de un electrón, como consecuencia el hierro se encuentra en algunas enzimas muy importantes en reacciones de oxidorreducción (Loué, 1988), es además un activador de muchas otras enzimas (Castellanos *et al.*, 2000),

Los análisis de plantas es una de las herramientas más aceptadas para diagnosticar desórdenes de deficiencias. Las plantas deficientes, si son analizadas en la etapa correcta, normalmente contienen más baja cantidad del elemento deficiente que el correspondiente a las evaluadas saludablemente. El hierro, tal vez, es el único elemento esencial que frecuentemente evade esta

simple definición de deficiencia, puesto que no es raro el caso cuando el contenido total de hierro en las plantas cloróticas sea más alto que en las plantas verdes (De Kock *et al*, 1960).

La corrección en suelo y aspersiones foliares con hierro a largo plazo no son económicamente viables para corregir clorosis férrica, además existen grandes diferencias en susceptibilidad a la deficiencia de hierro entre las especies de plantas, principalmente debido a las diferencias cualitativas y cuantitativas en la adquisición de hierro (Award *et al.*, 1994). Los rangos óptimos de hierro en el tomate por etapa vegetativa son: floración 130-150, formación de frutos 120-140 y en producción de 100-120 ppm (Burgeño, 1994).

El hierro en la planta esta presente en forma de diferentes complejos, los cuales varían en sus constantes de estabilidad. Cuando la deficiencia ocurre, según el modelo del quelato, los compuestos de hierro de baja estabilidad pueden descomponerse y son posiblemente transformados en compuestos de alta estabilidad. Independientemente del tamaño de la molécula de los compuestos de hierro, la mayoría del Fe^{+3} complejado es más estable que aquellos de Fe^{+2} . Por lo tanto, cuando existe una deficiencia de hierro, quizá hay carencia de la forma de hierro Fe^{+2} (Katia y Sharma, 1980).

Existe un acuerdo general en la ocurrencia de por lo menos dos distintos mecanismos de respuesta de la raíz (estrategias) a deficiencias de hierro en plantas mayores (Award *et al.*, 1994).

La presencia en las raíces de las plantas dicotiledóneas de un paso obligatorio en la reducción del Fe^{+3} a Fe^{+2} previa absorción fue primero demostrada por Brown y co-investigadores en 1972 (Chaney *et al.*, 1972), desde entonces, un incremento en la capacidad para reducir el Fe ha sido considerada como una parte integral de la denominada estrategia I (Award *et al.*, 1994), la cual envuelve un número de mecanismos resultantes en un perfeccionamiento en la adquisición del Fe y es encontrada en dicotiledóneas deficientes de Fe y en monocotiledóneas no Poaceae. Esta estrategia envuelve, además del incremento en la capacidad para reducir Fe, cambios morfológicos como el desarrollo de vellos de raíces y transferencia de células y el incremento en la velocidad de excreción de diversas clases de químicos tales como protones, compuestos fenólicos, y riboflavina (Marschner y Römheld, 1994).

La relación entre todas las diferentes respuestas en la estrategia I, sin embargo, no son claras. El incremento en la capacidad para reducir Fe es considerada ser debida a la existencia de una enzima reductasa en la membrana plasmática de las plantas deficientes (Bienfait, 1988).

En la estrategia II, las gramíneas excretan fitosideróforos, aminoácidos no proteínicos, que solubiliza los iones Fe^{+3} formando un complejo Fe^{+3} - fitosideróforos. La liberación de fitosideróforos se correlaciona positivamente con la resistencia a la clorosis férrica. Los fitosideróforos también acarrear otros cationes como el Zn^{2+} , Mn^{2+} y Cu^{2+} (Marschner y Römheld, 1994).

La acumulación de Fe en las raíces puede ser explicado por el proceso microbiano en el suelo que producen ácido mugeneico o sideróforos (del griego que significa "portadores de hierro") que movilizan Fe insoluble del suelo (Neilands y Leong, 1986) y lo transportan a las raíces de la planta (Crowley *et al.*, 1991). El quelador es descompuesto por los microorganismos en la superficie de la raíz, por lo tanto el hierro liberado probablemente es fuertemente adsorbido en los sitios de adsorción de la pared celular o precipitados como $\text{Fe}^{+3} (\text{OH})_3$ (Crowley y Gries, 1993). Es asumido que la mayoría de este hierro está en los apoplastos de la raíz (Longnecker y Welch, 1990).

La interacción de nutrientes es ilustrada por deficiencias de potasio, fósforo, o calcio que pueden inducir deficiencias de hierro. Altos contenidos de fósforo acentúan grandemente los síntomas de deficiencia de hierro y de potasio. A la inversa, los síntomas de deficiencia de potasio son más severas en plantas deficientes en hierro que en aquéllas suplidas adecuadamente con

hierro. A niveles normales de fósforo la severidad de deficiencia férrica está principalmente determinada por el suministro de potasio (Treshow, 1970).

Sustancias Húmicas (SH)

Los suelos y sedimentos contienen una gran variedad de materiales orgánicos que pueden agruparse en sustancias húmicas y no húmicas. Las sustancias no húmicas incluye aquellos cuyas características físicas y químicas todavía son reconocibles, como hidratos de carbono, proteínas, péptidos, aminoácidos, grasas, ceras, y ácidos orgánicos de bajo peso molecular. La mayoría de estos compuestos son atacados relativamente rápido por los microorganismos y tienen normalmente sólo un corto lapso de vida en los suelos y los sedimentos (Schnitzer y Khan, 1978).

Las sustancias húmicas se definen como restos orgánicos ácidos de difícil degradación con elevado contenido en grupos carboxilos, fenólicos y quinónicos, de cierta aromaticidad y con la incorporación de N heterocíclico. Esta definición se realiza por similitud con las sustancias húmicas del suelo, a las que pretenden sustituir. Equívocamente se les suele denominar ácidos húmicos, pero el uso de este término se debe reservar únicamente para la fracción más insoluble de las sustancias húmicas (Cadahia, 1998).

El término sustancias húmicas totales también es sinónimo con materia orgánica del suelo y humus, siempre y cuando las pérdidas que ocurran durante el procedimiento de extracción y separación sean un mínimo. Las sustancias húmicas son la suma de los ácidos húmico, ácidos fúlvicos y las huminas (Schnitzer, 2000).

Las sustancias húmicas no exhiben ninguna característica física y química específica más amplia (como un punto de la fusión claro, un índice refractivo exacto, una composición elemental, un espectro IR definido, etc.) asociada normalmente con los compuestos orgánicos bien definidos. Las sustancias húmicas son de color oscuro, ácidas, predominantemente aromáticas, hidrófilas, químicamente complejas, tal como los materiales polielectrólitos que van de un rango en peso molecular de unos centenares a varios miles (Schnitzer y Khan, 1978; Schnitzer, 1991; Schnitzer, 2000).

Las sustancias húmicas son divididas en tres fracciones imperfectas basadas en su solubilidad en medios ácidos y básicos: huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. Es importante comprender que cada una de estas tres fracciones, a pesar del nombre que denota singularidad, no están constituidos de un único compuesto. Cada fragmento es una mezcla heterogénea de sustancias orgánicas que tienen una amplia gama de pesos moleculares y cargas negativas.

Los ácidos húmicos es la fracción húmica que no es soluble en agua bajo condiciones ácidas ($\text{pH} < 2$) pero es soluble a valores de pH más altos y son insolubles en dilución ácida. Los ácidos húmicos son el mayor componente extractable de las sustancias húmicas del suelo y son de color marrón oscuro al negro. Los ácidos fúlvicos es esa fracción húmica que es soluble en agua bajo todas las condiciones del pH, permanecen en solución después de remover los ácidos húmicos por acidificación, son de color amarillo ligero a amarillo-marrón. Las huminas es esa fracción húmica que no puede extraerse del suelo o sedimentarse por dilución básica o ácida, es insoluble en agua, son color negro.

Los ácidos húmicos y fúlvicos son macromoléculas aromáticas complejas, muy estables, con estructura polimérica en forma de círculos, cadenas y racimos (Schnitzer, 1978; Ghosh y Schnitzer, 1980; Stevenson, 1982; Schnitzer y Schulten, 1995), y ciclos aromáticos condensados (eworobe-at-cc.Umanitoba.CA, 1996), con aminoácidos, amino-azúcares, péptidos y compuestos alifáticos (Stevenson, 1982; Schnitzer, 2000).

Existen evidencias de que todos los compuestos húmicos son excelentes queladores naturales e intercambiadores catiónicos. Estas propiedades funcionales de los ácidos fúlvicos son sumamente importantes en la nutrición y la vida eléctrica de todas las células vivientes.

Los compuestos orgánicos del suelo que tienen poder quelatante son muy numerosos: sustancias bioquímicas procedentes de organismos vivos (ácidos orgánicos, polifenoles, aminoácidos, proteínas, polisacáridos) así como complejos polímeros (ácidos húmicos y fúlvicos). Estos cuerpos (quelatos), pueden provenir de excreciones radiculares, de la materia orgánica (ácidos húmicos y fúlvicos), o de microorganismos. Los complejos insolubles entre los metales y la materia orgánica del suelo corresponden sobre todo a combinaciones con los ácidos húmicos (Schnitzer y Khan, 1978).

Un quelato (del griego *quelo* –pinzas de cangrejo-) es un compuesto químico en el que una molécula orgánica rodea y enlaza por varios puntos a un ion metálico, de manera que le protege de cualquier acción desde el exterior, evitando su hidrólisis y precipitación (Cadahia, 1998).

La búsqueda del quelato de hierro de mayor estabilidad, de mayor constante de formación, ha sido el objetivo prioritario de numerosas investigaciones, si bien no siempre el quelato más estable es el más idóneo para un cultivo, (Lucena *et al.*, 1987b y 1988a).

El éxito de los quelatos depende de la estabilidad relativa de los complejos que podrían formarse con los ligandos y otros iones metálicos en solución (Lindsay, 1979), así como en la competencia de los OH^- , con los

agentes quelantes, por metales. En suelos calcáreos el Ca^{2+} como ion mayor, sería el principal competidor para los ligandos (Lucena *et al.*, 1987b).

Sustancias Húmicas y su Efecto en las Plantas

Entre los principales efectos de las sustancias húmicas en el crecimiento de los vegetales se mencionan que actúan como suministradores y reguladores de nutrientes de las plantas similarmente a los iones sintéticos intercambiables (Schnitzer y Khan, 1978), estimulan la germinación de semillas, el crecimiento de hipocotilos y de epicotilos, mayor biomasa radical y producción de raíces, la formación de raíces adventicias y la síntesis de proteínas (Schnitzer y Papst, 1967).

Las sustancias húmicas y una adecuada nutrición vegetal, muestran resultados positivos sobre la biomasa de la planta, generalmente es mas apreciable la estimulación del crecimiento de la raíz que la estimulación del crecimiento del tallo. La típica respuesta muestra incrementos en el crecimiento a medida que se incrementa la concentración de sustancias húmicas en la solución nutritiva, seguida por la disminución del crecimiento a concentraciones muy altas. Normalmente el crecimiento del tallo muestra el mismo

comportamiento en respuesta a las sustancias húmicas, sin embargo, la magnitud de la respuesta del crecimiento es menor.

Las aplicaciones foliares mejoran el crecimiento de la raíz y la elongación de la estructura, además las sustancias húmicas pueden formar complejos con los cationes metálicos, lo que mejora la absorción. Una pequeña fracción de bajo peso molecular de éstas puede ser tomada por las plantas, estos componentes al parecer incrementan la permeabilidad de la membrana celular y tiene efecto similar al de las hormonas (Chen y Aviad, 1990).

Las sustancias húmicas:

- Ayudan a los tejidos de las plantas que requieren oxígeno libre para la respiración aeróbica, y así proporciona energía metabólica a todas las plantas superiores.
- Combinados con luz solar y fotosíntesis proporciona energía metabólica.
- Cuando es usado como una solución diluida y asperjada foliarmente, las plantas experimentan una absorción notable de oxígeno, incrementando así el crecimiento de la planta.
- No sólo ayudan a la respiración de las planta, sino también aumenta la producción y productividad de los microorganismos.

- Asiste la respiración de la planta; por ejemplo, la combinación de varias raíces de las plantas almacenan en los tejidos sustancias húmicas y fúlvicas que sirven como aceptores de hidrógeno.
- Produce energía que involucra la fotosíntesis, fortaleciendo este proceso el cual incluye la manufactura bioquímica de los materiales orgánicos complejos, especialmente los carbohidratos de dióxido de carbono, agua, minerales traza, y sales inorgánicas, junto con energía solar para la producción de la clorofila.
- Incrementa el contenido de clorofila en las hojas de las plantas cuando a la planta se le proporciona nutrientes vía raíz o foliar.
- Acentúa la reproducción celular de la planta estimulando la producción de ácidos nucleicos para la actividad del ADN y del ARN.
- Influencia directamente el desarrollo de enzimas y la síntesis neta de enzimas.
- Contienen auxinas; los auxinas están envueltas en la quelación del hierro para la planta, mejorando el crecimiento, vigor, y fortaleciendo la nutrición de la planta, especialmente el desarrollo del sistema radical de la planta.

Los Ácidos Fúlvicos en Relación al Hierro

El Fe^{3+} es mucho menos soluble que el Fe^{2+} , por lo tanto cuando un suelo está bien aireado, el Fe^{2+} no quelado se oxida a Fe^{3+} , que a su vez se precipita e hidroliza (Salisbury y Ross, 1994), de las dos formas de hierro sin quelar, el Fe^{2+} se absorbe con mucha mayor facilidad por las raíces, por lo que la oxidación tiende a eliminar la forma disponible de Fe^{2+} (Lindsay, 1979).

La principal fuente de Fe para las plantas en la mayoría de los suelos son los óxidos de Fe^{+3} , aún cuando estos óxidos metálicos son los más abundantes del suelo, su solubilidad es baja (Lindsay, 1984).

El hierro se hace asimilable por las plantas en condiciones adversas, si el suministro de este elemento se hace en presencia de sustancias húmicas (De Kock, 1955b), debido a que la absorción del hierro por las plantas depende considerablemente en la presencia de agentes complejadores y reductores (Mench *et al*, 1988).

El atributo principal que es asignado a las sustancias húmicas, y principalmente a la fracción fúlvica, es que pueden formar complejos con los metales catiónicos tales como el hierro y movilizarlos de las partículas sólidas en el suelo a la superficie de la raíz (Schnitzer y Khan, 1972).

En un experimento con fulvato de hierro realizado por González (1999), se obtuvo efecto sobre la corrección de la deficiencia de hierro en el cultivo del tomate, donde el fulvato de hierro a 1 cc L^{-1} no "corrigió" esta deficiencia, las dosis de 2 cc L^{-1} del fulvato de hierro y secuestrene 330 a 1 gr L^{-1} "solo" en parte y las dosis 3, 4 y 5 cc L^{-1} del fulvato de hierro, corrigieron adecuadamente la deficiencia. Además la dosis 5 cc L^{-1} produjo el mayor crecimiento de planta, al romper el hábito de crecimiento determinado, pero el rendimiento fue menor. La mejor calidad del fruto, se obtuvo con 3 y 4 cc L^{-1} de fulvato de hierro, al igual que la mayor cantidad (en ppm) de N, P y Fe, mientras que la mayor cantidad de potasio (K) la obtuvo el testigo y también éste fue el de mayor rendimiento de los tratamientos.

En otro experimento con fulvato de hierro y ácidos húmicos en tomate se concluye que el fulvato de hierro (FF), al aplicarse solo, presenta un comportamiento similar a los quelatos comerciales en el control de la clorosis férrica, sin embargo, las combinaciones de 1.5 gr de ácido húmico más 3.5 cc L^{-1} de FF aplicado vía suelo o la aplicación vía foliar de 5 cc L^{-1} de FF, incrementan significativamente la producción de fruta con calidad de exportación en suelos calcáreos y arena sílica respectivamente y superan a los quelatos comerciales (Cuevas, 2001).

Serna (2001), obtuvo que para la producción de plántulas de melón producidas en hidroponía, el uso de la solución nutritiva Hoagland's al 75 por ciento con la adición de ácido fúlvico en dosis de 2 ó 4 cc L⁻¹, ahorra fertilizantes.

Más allá de los beneficios nutricionales de las sustancias húmicas, los ácidos fúlvicos afectan el vigor y crecimiento de la vida celular al estimular varios procesos fisiológicos y bioquímicos relacionados al metabolismo de la célula.

Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera

Para conducir un estudio completo de las relaciones hídricas de un genotipo particular, es esencial investigar las relaciones entre el potencial hídrico del medio de la raíz, potencial hídrico de la planta, crecimiento de la planta, tasa de transpiración, actividad estomatal y supervivencia de la planta (Jarvis, 1963), sin embargo, la aproximación más común para estudiar el agua en la planta ha sido controlar o estimar el estado hídrico de la planta a través de la medida de varios factores ambientales relacionados con el suelo o a la atmósfera (Art, 1985).

El movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera es debido a diferencias en el contenido de energía libre del agua (capacidad para hacer trabajo) en diferentes partes del sistema. El contenido de energía libre del agua en una planta bien regada disminuye progresivamente por los pasos del suelo a través del xilema y de la hoja a la atmósfera libre. Como resultado, el agua fluye del suelo a través de la planta al aire en respuesta a este gradiente en energía libre (Fitter, 1981).

En la relación agua-suelo-planta-atmósfera el crecimiento de las plantas es controlado directamente por el déficit hídrico de las mismas y sólo indirectamente por déficit hídrico del suelo y el estrés atmosférico. La pérdida de agua a través de las hojas de la planta depende principalmente de las condiciones atmosféricas. La absorción del agua por las raíces depende principalmente de las condiciones hídricas del suelo. La resistencia al flujo del agua en el suelo varía con el contenido de agua, la resistencia del flujo de agua estomatal a el aire varía con las condiciones atmosféricas, y la resistencia para fluir de las raíces y otros órganos de la planta dependen de los rasgos fisiológicos y anatómicos. Normalmente no es posible predecir el estado hídrico de la planta exclusivamente a partir del estado hídrico del suelo o de las condiciones atmosféricas (Ritchie, 1974).

El estado hídrico de la planta es la cuantificación de su condición hídrica relativa a su requerimiento. Frecuentemente un déficit hídrico reduce inmediatamente el potencial para el crecimiento (por expansión) pero no siempre reduce el rendimiento y por lo tanto no puede ser un estrés. La interpretación completa de estado hídrico requiere de la consideración de sus efectos en el rendimiento (Art, 1985).

Potencial Hídrico (Ψ_h)

Probablemente las medidas más útiles del estado hídrico de la planta son el potencial hídrico y su contenido, así mismo el menos importante su movimiento, debido a la dificultad para observar y estima mejor sólo indirectamente el estado hídrico de los tejidos (Art, 1985). Normalmente varían simultáneamente, pero pueden actuar en forma individual o en combinación para determinar el estado hídrico de los tejidos prevaecientes (Boyer,1969), la caracterización completa del estado hídrico de la planta requiere la determinación total de los tres aspectos (Art, 1985).

El potencial hídrico describe la actividad fisicoquímica del agua o la disponibilidad a los procesos relativos del agua para la planta a algún estado de referencia estándar y es considerada probablemente la mejor medida del

estado hídrico de la planta (Boyer,1969). Es una medida del trabajo o intercambio de energía requerido para mover el agua entre el sistema observado y el de referencia (Kramer *et al.*, 1966).

El potencial hídrico se define en términos de su potencial químico (μ) relativo a uno de una referencia estándar (agua pura libre a una específica temperatura y presión) designándole un valor de cero al potencial hídrico (100 por ciento disponible) (Art, 1985).

El agua forma una columna líquida continua a lo largo de las plantas dentro de las que se transmiten cambios en potencial hídrico de una parte a otra. Sin embargo, la resistencia de los tejidos al flujo del agua resulta en gradientes de estado hídrico que ocurren dentro de las plantas, especialmente durante los periodo de alta transpiración (Warren, 1967).

No hay ninguna prueba donde que indique que el potencial hídrico total tenga algún efecto directo en los procesos fisiológicos (Turner, 1981). La relación entre el crecimiento de las plantas y el estado hídrico del suelo no sólo dependen de la fisiología de la planta sino de las condiciones ambientales que afectan la tasa de absorción y pérdida del agua de la planta (Jarvis, 1963).

El potencial hídrico total para las células en equilibrio con sus ambientes es el mismo a lo largo del sistema, por ejemplo, en la pared, citoplasma, organelos, y vacuola, sin embargo, los componentes del potencial hídrico total pueden ser muy distintos para las diferentes partes de una célula esto es, en la vacuola surge principalmente de las fuerzas osmóticas y de turgencia, considerando que en la pared celular surge grandemente de las fuerzas mátricas y sólo ligeramente de las fuerzas osmóticas (Fitter, 1981).

El potencial hídrico total de cualquier sistema, es la suma integrada de varios efectos o componentes incluyendo solutos o el potencial osmótico, potencial gravitacional, y potencial por presión (Krizek, 1985). Los más importantes son el potencial osmótico y el de turgencia, estos componentes determinan grandemente las relaciones hídricas de los tejidos (Rose, 1966).

Dentro de los métodos de medición directa del potencial hídrico en los tejidos de las plantas están las técnicas de presión. Los efectos de la presión sobre el potencial hídrico son termodinámicamente equivalentes a aquellos de solutos y otros componentes del potencial hídrico y por lo tanto pueden usarse para cuantificarlo (Art, 1985).

El método más común de presión utilizado para cuantificar el potencial hídrico es la cámara de presión o bomba de presión (Scholander *et al.*, 1965a),

ésta cuantifica el potencial mátrico del agua en el apoplasto de la célula o pared celular (Passioura, 1980), y sería equivalente al potencial hídrico total de las células de la hoja, siempre y cuando la presión osmótica del agua apoplastica sea cercana a cero y el agua en la hoja este en equilibrio. La primera asunción es válida puesto que la presión osmótica del agua apoplastica es usualmente menor que 0.05 Mpa; sin embargo, en halófitas y hojas con membranas celulares dañadas la presión osmótica apoplastica puede ser mucho mayor (Boyer, 1967).

El método consiste en aumentar la presión alrededor de un retoño frondoso hasta que aparece la savia del xilema en el extremo cortado del retoño que se extiende fuera de la cámara y se expone a la presión atmosférica (Scholander *et al.*, 1965b). La cantidad de presión necesaria para forzar el agua fuera de las células de la hoja en el xilema es una función del potencial hídrico de las células de la hoja (Boyer, 1967).

La técnica de la cámara de presión continua siendo el mejor método para medir el potencial hídrico de la planta en estudios de campo, esto es debido a la rapidez, confiabilidad y la carencia de cualquier cuidado sobre el control de la temperatura (Turner, 1986).

Contenido Relativo de Agua (CRA)

El contenido relativo de agua, llamado turgidez o déficit hídrico, es probablemente la expresión más ampliamente aceptada del contenido hídrico de los tejidos de la planta (Catsky, 1965).

La simplicidad de medir el contenido relativo de agua condujo a su temprana adopción, pero los cambios diurnos y estacionales en el peso de la materia seca hacen insatisfactorias las comparaciones del contenido hídrico a diferentes tiempos del día o durante la temporada. El uso del contenido relativo de agua en el cual el contenido de agua es expresado en base al contenido total de rehidratación, supera muchos de esos problemas y fue ampliamente utilizado, particularmente en los años 50's y 60's (Barrs, 1968).

El contenido relativo de agua, esto es el contenido de agua expresado como un porcentaje del contenido de agua a turgidez total, es casi 100 por ciento antes de que la transpiración inicia y disminuye gradualmente en respuesta al retraso entre la transpiración y la absorción (Ritchie, 1974).

La estrategia de muestreo como la localización, tamaño, y número de muestras, es determinado por la presencia e importancia de estos gradientes, lógicamente, las medidas deben hacerse en el sitio de la función bajo

consideración (por ejemplo, expansión de tejidos: tejidos fotosintetizadores) (Art, 1985).

Las comparaciones entre plantas o tratamientos requieren ser hechos al mismo tiempo del muestreo exactamente en la misma forma y en el mismo día (Kozlowski y Clausen, 1965), por el mismo personal, preferentemente antes de la salida del sol cuando las plantas normalmente están en su más estable estado hídrico y de masa seca (Brun, 1965). El contenido relativo de agua de las hojas es influenciado principalmente por el déficit de presión de vapor de la atmósfera (Prasad, 1967).

Transpiración

La transpiración, es el factor dominante de las relaciones hídricas de la planta debido a que la evaporación produce el gradiente de energía que provoca el movimiento del agua adentro y a través de las plantas (Kramer, 1974).

En general la temperatura del aire, el déficit de presión de vapor y la radiación solar han sido relacionados a la tasa de transpiración (O'Toole y

Tomar, 1982). A su vez, los cambios en la tasa de transpiración pueden causar cambios en la temperatura y el potencial hídrico de la hoja (Farquhar, 1982).

El principal camino para el intercambio gaseoso entre las plantas y el medio ambiente es por la vía de los estomas de las hojas, consecuentemente, las variaciones en la apertura estomatal pueden afectar la tasa de transpiración notablemente y por lo tanto, el balance de energía individual de las plantas y toda la comunidad. Esas variaciones también pueden afectar la fotosíntesis neta por su efecto sobre el intercambio del bióxido de carbono (CO_2) (Morrow y Statyer, 1971).

La mayoría de los factores que afectan la fotosíntesis y las relaciones hídricas en las hojas influyen el movimiento estomatal, y puesto que la apertura estomatal depende principalmente de la absorción de agua por las células guarda es entendible que un estrés severo inhiba su apertura (Zelitch, 1969).

La resistencia a la difusión de vapor de agua a través de los estomas es inversamente proporcional al diámetro de la abertura de éstos que, a su vez, es dependiente en una compleja manera de varios factores ambientales (Fitter, 1981).

La resistencia de los estomas está determinado por la interacción de un complejo arreglo de factores entre los que figuran: radiación solar, nivel de dióxido de carbono, estrés hídrico, temperatura, humedad, viento, sustancias de crecimiento, ritmos endógenos -y no es sorprendente que algunos autores consideren a los estomas ser "los órganos censores miniaturas" (Mansfield y Davies, 1981).

Resistencia a la Difusión de Vapor de Agua

El mecanismo mediante el cual la resistencia a el flujo de agua a través de las plantas cambia bajo condiciones de campo es básico para el entendimiento del crecimiento del cultivo y el abatimiento del agua del suelo (Rose *et al.*, 1976).

En la mayoría de las especies, la velocidad de transpiración de los estomas es controlada por la resistencia a la difusión a través de los estomas y de la capa límite, los otros componentes son de resistencia despreciable (Meidner y Mansfield, 1968).

La resistencia a la difusión de vapor de agua de una planta transpirando, es la suma de la resistencia de la capa límite y la resistencia estomatal; en la

mayoría de las condiciones, está última es el componente dominante de la resistencia a la difusión y por lo tanto, la apertura estomatal controla la tasa de transpiración. Sin embargo, cuando la velocidad del viento disminuye, el espesor de la capa límite se incrementa y la resistencia de la capa límite llega a ser una gran fracción de la resistencia a la difusión de vapor de agua. A muy baja velocidad de viento o en su ausencia (lo que es poco común), la resistencia de la capa límite puede controlar la tasa de transpiración sobre un rango de la apertura estomatal (Fitter y Hay, 1981).

En porometría del flujo de masa, una diferencia de presiones es aplicada a través de la hoja y la viscosidad de flujo resultante de aire es tomado como una medida relativa de la apertura estomatal. Sin embargo, el intercambio de vapor entre la hoja y la atmósfera en la cual ocurre la transpiración y la fotosíntesis es comúnmente asumida la difusividad en carácter (Jarvis *et al.*, 1963).

Temperatura

La temperatura, es el principal factor ambiental que dicta si una especie puede estar creciendo en un ambiente natural de una región dada, el tiempo

del año durante el cual la especie puede estar creciendo y la duración aprovechable de crecimiento en la temporada (Namked *et al.*, 1974).

Para un mejor entendimiento de los procesos de transferencia de calor y vapor a la superficie de planta, las mediciones de la temperatura de la hoja pueden proveer datos cuantitativos sobre el estado hídrico de la planta (Tanner, 1963).

La diferencia entre la temperatura del aire y el follaje de las plantas son un buen indicador del estado hídrico de las plantas (Ehrler, 1973). De hecho las hojas de plantas estresadas han sido encontradas mas calientes que aquellas de plantas no estresadas, esta diferencia fluctúan entre +2 a +8 °C (Ehrler *et al.*, 1978).

El rol específico de la temperatura en los tres mayores procesos de disipación de energía: radiación, flujo de calor sensible y flujo de calor latente. Para los primeros dos debe de existir un diferencial de temperatura entre la superficie evaporante y el aire circundante para que exista ganancia o pérdida de calor sensible, la temperatura absoluta determina la cantidad de energía a disipar por radiación. El gradiente de presión de vapor puede ser afectado por la pérdida de agua de la superficie evaporante, por la longitud del camino de difusión tal como es determinado por la rugosidad de la superficie y el viento

(Horton *et al.*, 1970) y por la temperatura de la superficie evaporante en relación al aire circundante (Statyer, 1967).

Las mediciones realizadas a largo plazo de la temperatura de las hojas proveen un indicador indirecto del comportamiento estomatal (Ehrler, 1973). En un cultivo de algodón la temperatura de la hoja se incremento linealmente conforme se incremento la insolación y decreció linealmente conforme aumento el contenido relativo de agua de la hoja. Con respecto a la diferencia de temperaturas entre el aire y la hoja, está se incremento linealmente conforme se incremento la insolación y esta diferencia varía de acuerdo al grado de estrés hídrico (Jackson *et al.*, 1981). En un experimento en trigo la temperatura del follaje se incremento y el potencial hídrico decreció (Ehrler *et al.*, 1978).

Uso Eficiente del Agua (UEA)

En el sentido fisiológico el uso eficiente del agua ha sido comúnmente utilizado como la relación entre el peso de agua del cultivo perdido a la atmósfera y el rendimiento del cultivo o la producción total de materia seca (Stanhill, 1986) y esta aumenta cuando disminuye su disponibilidad en el suelo (Ehleringer y Cooper, 1988).

El uso eficiente del agua varia entre 200 y 500 unidades de agua para producir una de materia seca para cultivos de alto rendimiento (Slatyer, 1964), sin embargo, durante las últimas dos décadas de cultivo bajo riego han promediado 2 kg de materia fresca por m³ de agua aplicada (Stanhill, 1986).

Sustancias Húmicas y Relaciones Hídricas

Principales propiedades de las sustancias húmicas en relación al agua, suelo, planta:

- Bajo condiciones de sequía, los ácidos húmicos y fúlvicos ayudan al balance de agua y a la transpiración de la planta, al transporte de agua y nutrientes de los tejidos de la célula.
- Los ácidos húmicos y fúlvicos ayudan al equilibrio de agua bajo condiciones de sequía aumentando la respiración de la planta, y así ayudar a que la planta "respire" mejor mientras este bajo estrés.
- Los ácidos húmicos y fúlvicos tienen un efecto muy positivo en la capacidad de retener agua del suelo. Estas sustancias húmicas también permiten el suministro reducido de agua por su película muy delgada para ser liberada más fácilmente durante condiciones de sequía, y de hecho estar disponible a las raíces de las plantas.

Ácidos Fúlvicos y Relaciones Hídricas

Propiedades de los ácidos fúlvicos en relación al agua, suelo, planta:

- Los ácidos fúlvicos ayudan al agua en la penetración e infiltración a las células de la planta así como a la absorción de nutrientes y almacenamiento de agua dentro de las células de la planta durante tiempos secos.
- Los ácidos fúlvicos pueden ayudar a las plantas durante la sequía acumulando azúcares solubles previniendo el marchitamiento osmoregulando.
- Los ácidos fúlvicos también ayudan en el desarrollo de mejores estructuras radicales, más fuertes, y más grandes mejorando la absorción de agua y nutrientes.
- Los electrólitos de los ácidos fúlvicos en solución conducen corriente proporcionando energía para la vida.
- El Agua disuelve, transporta y amplifica de los ácidos fúlvicos su acción eléctrica por todas partes de la planta.
- El fenómeno de balance de los ácidos fúlvicos producen una reducción en la cantidad de agua requerida.
- Los ácidos fúlvicos activan los sistemas enzimáticos dentro de las plantas, al influir más frecuentemente en la respiración de la planta.

- Las plantas absorben más oxígeno en presencia de ácidos fúlvicos.

Más allá de los beneficios nutricionales de las sustancias húmicas, los ácidos fúlvicos afectan el vigor y crecimiento de la vida celular al estimular varios procesos fisiológicos y bioquímicos relacionados al metabolismo de la célula.

MATERIALES Y MÉTODOS

Aspectos metodológicos

La presente investigación se desarrollo durante los meses de enero a julio del 2001 bajo condiciones de invernadero tipo peruano ubicado en el área experimental del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) con latitud norte 25° 22' y longitud oeste 101° 00' a una altura media sobre el nivel del mar de 1743 metros.

El suelo empleado se colectó del área experimental agrícola denominada "El Bajío" localizada al oeste de la UAAAN, el cual presento las características físico químicas descritas en el Cuadro 4.1, así mismo en el Cuadro 4.2 se presentan las características químicas del agua empleada para el riego. Las sustancias utilizadas: Fulvato de Fe (experimental), ácido húmico (comercial), Sequestrene 138 (Ácido Etilen-Diamino Di-orto-Hidroxi-fenil-acético) y Sequestrene 330 (Ácido Dietilen-Triamino-Penta-acético).

El suelo fue colocado en macetas de 20 litros con 19 kilos de suelo cada una, no se desinfectó por ser un suelo en el cual no se había establecido algún

cultivo susceptible y/o transmisor de plagas y/o enfermedades a la planta de tomate.

Cuadro 4.1 Características físico químicas del suelo empleado en el experimento.

pH (Saturación)	7.8	Medianamente alcalino
Materia Orgánica(%)	2.09	Medianamente rico
Nitrógeno Total %	0.10	Medianamente pobre
Potasio Inter. (Kg/Ha)	Mas de 900	Extremadamente rico
Fósforo Aprov. (Kg/Ha)	28.3	Medianamente pobre
Carbonatos totales (%)	29.42	Medio
Hierro* (%)	3.08	Bajo
% Arcilla	18	
% Limo	31.6	
% Arena	50.4	
Textura		Migajon
C.E. (dS/m)	1.17	Suelo no salino
Na ⁺ (meq/lto)	0.8	
K ⁺ (meq/lto)	0	
Ca ⁺ (meq/lto)	5.1	
Mg ⁺⁺ (meq/lto)	9.1	
Cl ⁻ (meq/lto)	3.5	
SO ₄ ⁼ (meq/lto)	9.76	
CO ₃ ⁼ (meq/lto)	1.3	
HCO ₃ ⁼ (meq/lto)	3.0	

Fuente: Laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Riego y Drenaje (UAAAN). * Patronato para la Investigación Agrícola del Estado de Coahuila.

El material genético empleado fue tomate de la variedad "Río Grande" de hábito de crecimiento determinado, ciclo intermedio de 120 días después del trasplante y fruto tipo saladette.

Cuadro 4.2 Calidad del agua de riego empleada durante el experimento.

pH	7.42	
CE (25 °C)	0.343	ds m ⁻¹
RAS	0.641	
Carbonatos	0.200	meq L ⁻¹
HCO ₃ ⁻	1.200	meq L ⁻¹
Ca ²⁺	0.22	meq L ⁻¹
Mg ²⁺	2.90	meq L ⁻¹
Cl ⁻	0.84	meq L ⁻¹
SO ₄ ⁼	2.90	meq L ⁻¹
Na ⁺	0.80	meq L ⁻¹
K ⁺	---	meq L ⁻¹

Fuente: Laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Riego y Drenaje (UAAAN).

Las plántulas fueron producidas en charolas germinadoras flotantes de 160 cavidades con raizal a razón de 2 gr por cada 15 L⁻¹ de agua sin solución nutritiva bajo invernadero, como sustrato se utilizó turba de musgo, el

trasplante se hizo en el mismo invernadero previa saturación del suelo con la adición de 2 litros de agua por unidad experimental. Se colocó una plántula en cada una de las 126 macetas (unidades experimentales) a una separación entre ellos de 0.3 m y entre líneas de 0.78 m correspondiendo una densidad de población de 42'624 plantas ha⁻¹.

Para controlar el suministro de nutrientes se utilizó la solución Hoagland's (Hoagland y Arnon, 1938) vía suelo semanalmente (0.5 L durante 12 semanas y 1 L durante 7 más) prescindiendo de la adición de hierro en su formulación agregando, en su lugar, cada uno de los tratamientos a evaluar.

Con la finalidad de mantener un óptimo nivel de humedad del suelo se aplicaron dos diferentes láminas de agua durante el desarrollo del cultivo, la primera desde el trasplante hasta el amarre de fruto (80 días) de 1.43 mm día⁻¹ (0.36 L UE⁻¹) por unidad experimental. La segunda fue desde esta última fecha hasta el final del ciclo (40 días) fue de 3.24 mm día⁻¹ (0.82 L UE⁻¹).

Se realizó el tutoreo de las plantas atándolas del tallo con hilo rafia de la base del tallo y enredándole con el mismo hasta asegurar que estuviera bien sujeta y holgada evitando apretarle para finalmente atar este hilo a un alambre principal que corría paralelamente a cada una de las líneas proporcionándoles soporte.

principal que corría paralelamente a cada una de las líneas proporcionándoles soporte.

Las plagas que se presentaron con mayor incidencia a través del ciclo del cultivo fueron la mosquita blanca y el falso medidor. En cuanto a enfermedades sólo se tuvo problemas con el tizón temprano. Todas fueron controladas de acuerdo a lo descrito en el Cuadro 4.3.

Cuadro 4.3. Descripción de los productos químicos y su concentración empleados para el control de las plagas y enfermedades durante el experimento.

Plaga o enfermedad	Producto aplicado	Concentración L ⁻¹
Mosquita blanca	Lorsban	1.0-1.5 cm ³ L ⁻¹
	Confidor	1.0-1.5 cm ³ L ⁻¹
Tizón temprano	Ridomil	1.0-1.5 cm ³ L ⁻¹
	Fulvato de cobre	2.0 gr L ⁻¹
Evitar entrada de patógenos en poda	Captan	1.0 gr L ⁻¹
	Fulvato de cobre	2.0 gr L ⁻¹
Falso medidor	Lorsban	1.0-1.5 cm ³ L ⁻¹
	Sevin	1.0 gr L ⁻¹
	Thiodan	1.0-1.5 cm ³ L ⁻¹

La aplicación de los diferentes tratamientos empleados en la presente investigación están descritos en el Cuadro 4.4. La frecuencia de su aplicación fue realizada semana a semana, a razón de medio litro de solución por unidad experimental desde el trasplante hasta el amarre de fruto para posteriormente suministrarle un litro de la misma hasta el final del ciclo fenológico.

Cuadro 4.4 Relación de tratamientos y sustancias bajo estudio.

Tratamiento	Ácidos húmicos	Ácidos fúlvicos	Quelatos
	cm ³ L ⁻¹	cm ³ L ⁻¹	gr L ⁻¹
1	0	0	0
2	0	2.0	0
3	0	3.5	0
4	0	5.0	0
5	2.0	2.0	0
6	2.0	3.5	0
7	2.0	5.0	0
8	0	0	1*
9	0	0	0.6**

*secuestrene 138, **secuestrene 330.

La distribución de los tratamientos se realizó bajo un diseño experimental completamente al azar con 10 repeticiones por tratamiento y la comparación de

medias con la prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) ($p \leq 0.05$), esto por estar trabajando bajo condiciones de invernadero y tratarse, a su vez, de una investigación sin prácticamente antecedentes bibliográficos. Se evaluaron 10 plantas centrales de 14 de cada tratamiento para eliminar así el efecto orilla.

La distribución de los tratamientos se realizó bajo un diseño experimental completamente al azar con 10 repeticiones por tratamiento y la comparación de medias con la prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS) ($p \leq 0.05$), esto por estar trabajando bajo condiciones de invernadero y tratarse, a su vez, de una investigación sin prácticamente antecedentes bibliográficos. Se evaluaron las 10 plantas centrales de 14 de cada tratamiento para eliminar así el efecto orilla.

Las variables de respuesta medidas fueron una única vez durante la etapa de llenado de fruto, 79 días después del trasplante.

La transpiración, resistencia estomática y, temperatura de la hoja y aire fueron medidos desde el alba (7:00 A.M.) hasta el atardecer (7:00 P.M.), con una frecuencia entre series de lecturas de dos horas y tres repeticiones, previo riego a saturación por la tarde del día anterior con el objetivo de tratar de uniformizar la tensión de humedad del suelo y como consecuencia el estado hídrico en la planta. El instrumento de medición denominado porómetro fue el

modelo LI-600 manufacturado por Li-Cor, INC. Las determinaciones de hicieron en las hojas de edad intermedia consideradas así la tercera o cuarta hoja a partir del meristemo apical con tres repeticiones por tratamiento, hojas que siempre fueron las mismas muestreadas previa etiquetación para su control.

El método empleado en la determinación del contenido relativo de agua (CRA) fue el de los discos de hoja con cuatro repeticiones, los cuales fueron obtenidos, de la misma forma que el anterior, en hojas de edad intermedia y a al mismo intervalo de tiempo (2 horas) por medio de un sacabocados de 6.5 mm de diámetro conservándolos en cajas petri dentro de una hielera. A los discos se les determino su masa en fresco y posteriormente se hidrataron con agua destilada hasta alcanzar una masa constante (4 horas) la cual sería la masa turgente previa eliminación del exceso de agua para finalmente obtenerles su peso en seco luego de ser secados en una estufa de laboratorio por un tiempo de 24 horas a 80 °C.

El potencial hídrico (Ψ_h) fue determinado en la cámara de Scholander marca Soil moisture serie 3000. El muestreo fue realizado al inicio del alba (7:00 A.M.) en folíolos de edad intermedia, se determinó solamente una vez por la mañana realizándose tres repeticiones. Básicamente el procedimiento consistió en cortar los folíolos conservándolos en hielo hasta la determinación del potencial hídrico. Posteriormente cada muestras fue introducida en la

cámara de Scholander y gradualmente se le fue aplicando gas nitrógeno presurizando la cámara hasta un punto que el pecíolo exudase savia, siendo esa presión, el valor de potencial hídrico considerado.

El uso eficiente del agua (UEA) fue obtenido relacionando el volumen de agua consumido por unidad experimental y la producción de fruta fresca obtenida.

Los análisis foliares de Fe y Ca fueron realizados en el Patronato para la Investigación Agrícola del Estado de Coahuila. Los análisis de fertilidad y calidad de agua en el Laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Riego y Drenaje (UAAAN).

Se cuantificó también la magnitud de respuesta de las variables fenológicas como la altura de planta, diámetro de cobertura, diámetro de raíz y la masa de raíz y aérea de la planta seca. Las dos primeras mediciones se hicieron mediante un flexómetro y la tercera con un vernier. Para obtener la masa seca de raíz y aérea de la planta se utilizó una estufa de secado a 80 °C durante un tiempo de 72 horas, en la que se introdujeron las muestras previa separación de las partes en bolsas de papel.

Con respecto a la producción de fruta fue evaluada su masa por fruto, número de frutos por planta y la masa media de cada uno de los tratamientos. No se cuantificaron variables de respuesta relativos a la calidad de la fruta como frutos de exportación, coloración no uniforme, mal cierre, daños de plagas y enfermedades, por no tener como objetivo principal la evaluación de la producción con fines de mercadeo.

RESULTADOS Y DISCUSION

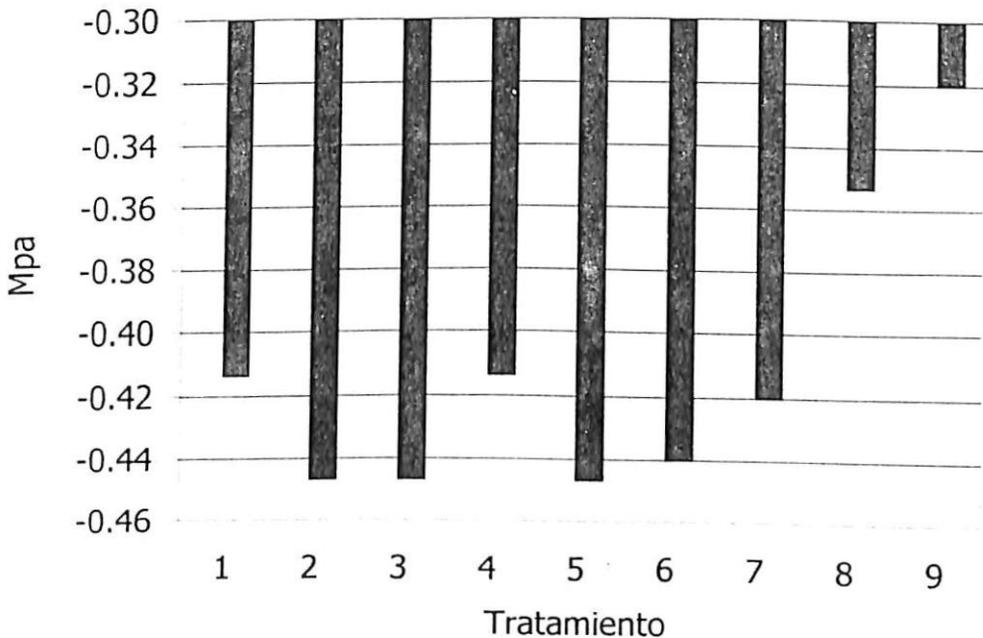
Variables fisiológicas

Potencial hídrico (Ψ_h)

La Figura 5.1 muestra el comportamiento del potencial hídrico a los 79 días después del trasplante, así mismo en el Cuadro 5.1 se muestran los análisis estadísticos de las variables de respuesta fisiológicas. En dicho Cuadro los tratamientos 5, 2, 3 y 6 a las dosis de 2 cc de fulvato de hierro (FF) + 2 cc de ácidos húmicos (AH), 2 cc de FF, 3.5 cc de FF y 3.5 cc de FF + 2 cc de AH, respectivamente resultaron superiores pero no diferentes estadísticamente del resto de los tratamientos (excepto del 9), con una superior capacidad para generar potenciales hídricos más negativos que los generados en las plantas suplidas con quelatos comerciales (secuestrene 138 y 330), los cuales obtuvieron potenciales hídricos menos negativos en un 22 y 29 por ciento respectivamente y en un 9 por ciento el testigo.

Esta situación se debió quizá a los electrolitos de los ácidos fúlvicos asociados a la elevada constante di-eléctrica del agua la cual favorecería la acumulación de azúcares solubles en suspensión, electrolitos que posiblemente generan Ψ_h más negativos de lo que normalmente se lograría sin la aplicación de ácidos fúlvicos. Es evidente que un Ψ_h más negativo como el generado por el fulvato de hierro no significa necesariamente que la planta este bajo un estrés de cualquier tipo, si no que está trabajando a un nivel más eficiente, este mismo fenómeno (electrolítico) inclusive, influye en la osmoregulación bajo condiciones de sequía.

Figura 5.1 Potencial hídrico determinado al amanecer (7:00 A.M.) en hojas del tomate nutrido con diferentes fuentes de hierro, 79 días después del trasplante.



Cuadro 5.1 Prueba de rango múltiple de las variables de respuesta fisiológicas.

T	Ψ_h^{**} (Mpa)	CRA (%)**	Transp (μg $\text{cm}^{-2} \text{seg}^{-1}$)**	Γ^{**} (cm seg^{-1})	TH ($^{\circ}\text{C}$)**	TA-TH [†] ($^{\circ}\text{C}$)**	UEA (L kg^{-1})
1	-0.41 AB	56.96 A	14.45 A	1.60 B	30.35 A	1.30 AB	184.1
2	-0.45 A	59.64 A	14.00 A	1.57 B	30.20 A	1.40 AB	166.4
3	-0.45 A	55.73 A	15.09 A	1.49 B	30.00 A	1.41 A	170.5
4	-0.41 AB	54.65 A	13.14 AB	1.71 AB	30.55 A	1.08 B	157.1
5	-0.45 A	58.09 A	15.84 A	1.53 B	30.52 A	1.27 AB	186.8
6	-0.44 A	54.86 A	13.12 AB	2.32 A	30.08 A	1.11 AB	156.6
7	-0.42 AB	55.98 A	13.48 AB	1.50 B	31.15 A	1.20 AB	216.1
8	-0.35 AB	54.92 A	12.85 AB	1.83 AB	31.20 A	1.22 AB	173.8
9	-0.32 B	58.40 A	8.10 B	2.10 AB	31.18 A	1.13 AB	229.2
CV	15.47	10.43	37.87	33.63	18.18	22.81	

** $P < 0.05$; † Letras distintas son diferentes estadísticamente según DMS ($p \leq 0.05$). CV Es el coeficiente de variación. + Transformados exponencial y con raíz cuadrada.

Un potencial hídrico más negativo implica una absorción más eficiente y rápida del agua por las raíces lo que beneficiaría fisiológicamente a corto plazo a las plantas al minimizar los daños causados por los déficit hídricos momentáneos generados por el retraso de la absorción de agua respecto al agua transpirada en periodos de alta demanda, y a largo plazo le ayudaría a disminuir el daño debido al estrés hídrico por la carencia de agua, además de

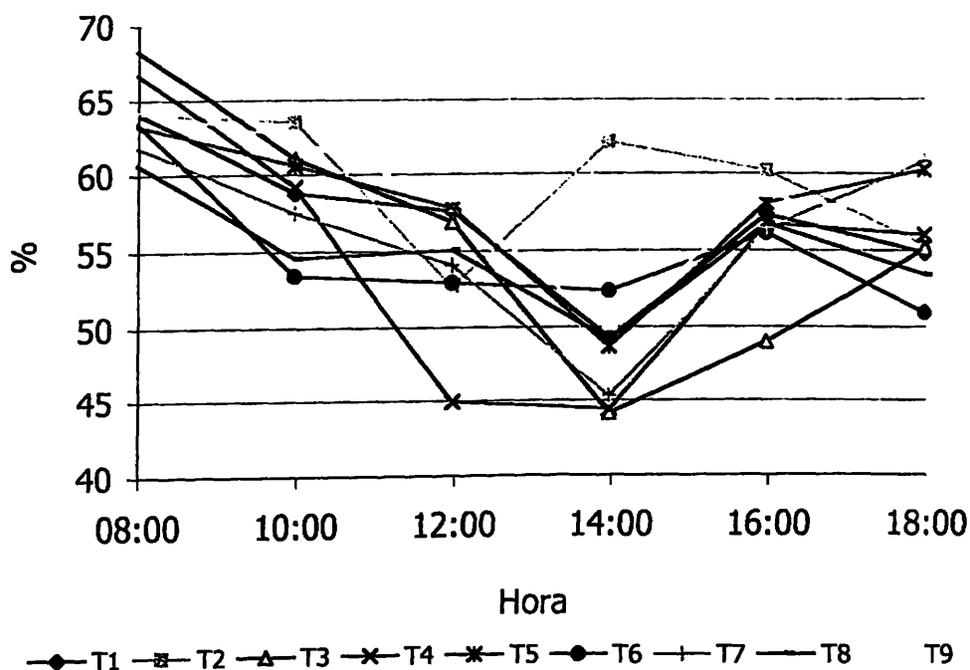
ofrecerle la oportunidad de osmorregular en caso de sequía, debido a la acumulación de azúcares.

Contenido relativo de agua (CRA)

El comportamiento del CRA a través del día (Figura 5.2) fue variable, sin embargo, a pesar de que estadísticamente no hay diferencia entre tratamientos (Cuadro 5.1), si se observa una respuesta menos variable en algunos, tales como el 2, 8 y 6 a las dosis de 2 cc de FF, Sequestrene 138 y 3.5 cc de FF + 2 cc de AH respectivamente. Así como una alta variabilidad entre algunos tales como el 3 y 4 a las dosis de 3.5 cc de FF y 5 cc de FF respectivamente, no quedando clara una separación entre grupos atribuible a algún factor en específico.

Los ácidos fúlvicos ayudan al agua a la penetración e infiltración a las células de la planta lo que produce una mejor absorción de nutrientes y al almacenamiento de agua, hecho que no fue reflejado claramente en un CRA más favorable para aquellos tratamientos a los que se le suministro fulvato de hierro.

Figura 5.2. CRA a lo largo del periodo de medición en tomate suplidos con diferentes fuentes de hierro.

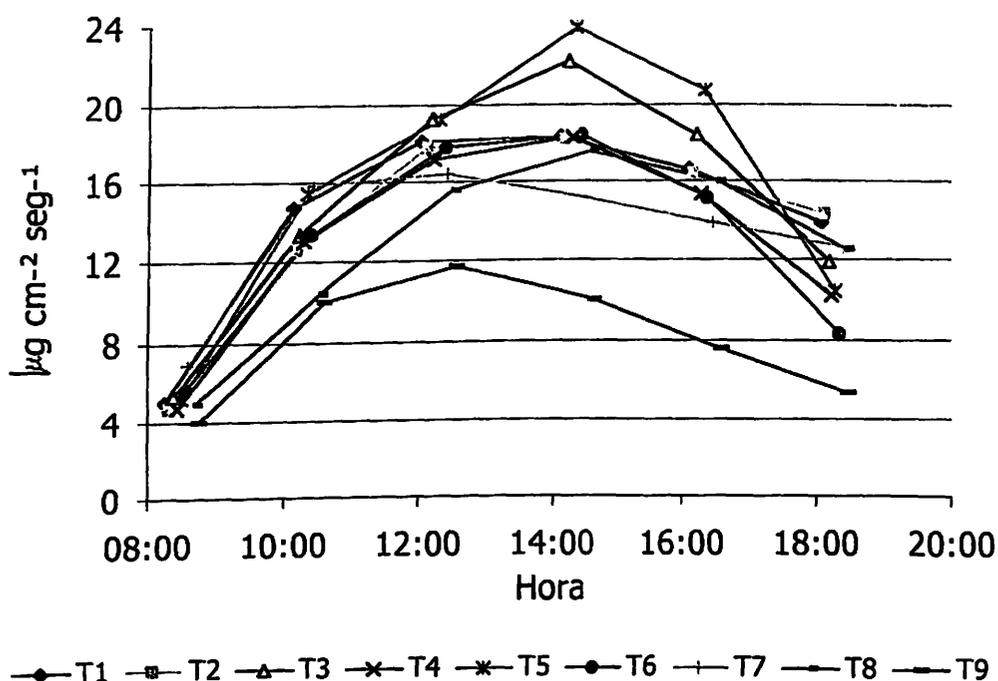


Transpiración

Esta variable de respuesta (Figura 5.3) obtuvo sus niveles superiores de vapor de agua transpirada con los tratamientos 5, 3, testigo y 2 a las dosis de 2 cc de FF + 2 cc de AH, 3.5 cc de FF, el testigo y 2 cc FF respectivamente (Cuadro 5.1), que aún cuando no son estadísticamente diferentes del resto de los tratamientos (excepto del 9), si difiere de ellos y básicamente en los tratamientos donde predominan las dosis bajas de FF es donde sucede la máxima transpiración. Con respecto a la mejor dosis, las plantas suplidas con

quelatos comerciales (secuestrene 138 y 330), consiguieron una inferior respuesta en un 19 y 49 por ciento respectivamente.

Figura 5.3 Transpiración a lo largo del día de las plantas de tomate bajo una nutrición con diferentes fuentes de hierro.



De acuerdo a Kramer (1966) la transpiración, es el factor dominante de las relaciones hídricas de la planta debido a que la evaporación produce el gradiente de energía que provoca el movimiento del agua adentro y a través de las plantas, Farquhar y Sharkey (1982) mencionan que cambios en la tasa de transpiración pueden causar cambios en la temperatura y el potencial hídrico de la hoja.

Por otro lado aquellas plantas suplidas con fulvato de hierro presentaron una superior transpiración, está puede ser explicada por los potenciales hídricos más negativos generados por las mismas plantas que le posibilitaron evaporar más agua de la superficie vegetal con la consiguiente mejor regulación de la temperatura interna de la planta. Sin embargo, como consecuencia de existir un gradiente de energía más favorable para la transpiración será posible evitar en cierta magnitud los déficit hídricos momentáneos causados por el retraso de la absorción respecto de la transpiración y quienes son los principales causantes de daños o incluso la muerte por desecación de acuerdo a Kramer (1966).

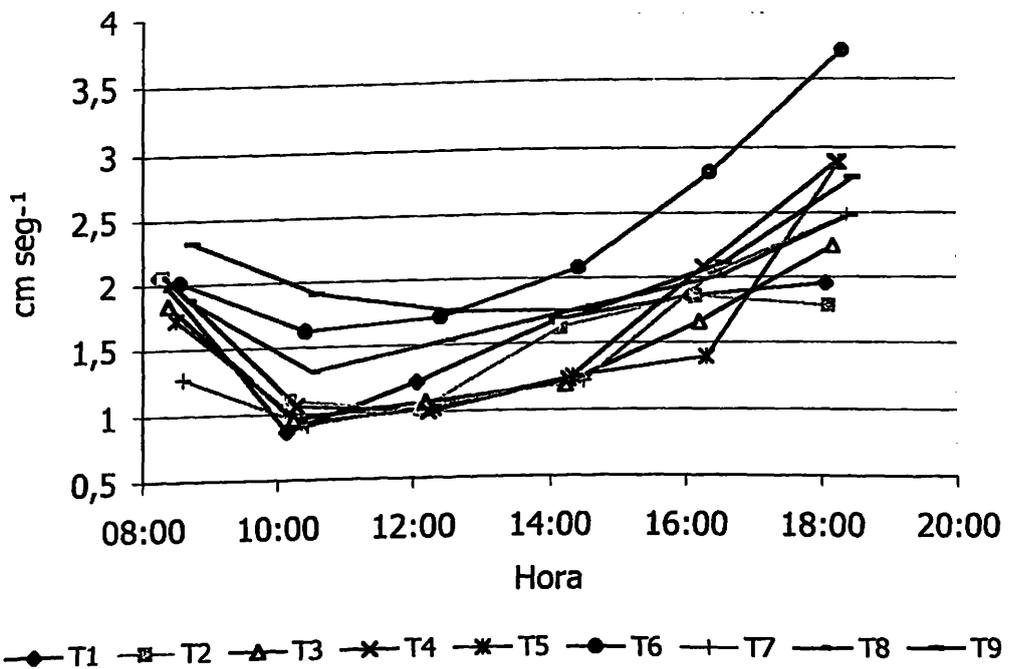
Resistencia estomatal

La resistencia a la difusión de vapor de agua fue más acentuada en aquellos tratamientos con baja transpiración (Figura 5.4), siendo la dosis de 3.5 cc de FF + 2 cc de AH la que mayor resistencia opuso aunque no estadísticamente (Cuadro 5.1). Los tratamientos a los que se les suministro hierro en forma de quelatos tuvieron una baja resistencia a la difusión de vapor de agua.

Esta variable de respuesta tuvo un comportamiento inverso al obtenido por la transpiración lo que resulta lógico por ser de esta naturaleza su relación.

Estos resultados vienen a reforzar lo obtenido tanto en el comportamiento del Ψ_h como la transpiración, en cuanto a que le proporcionan a la planta una mayor capacidad, por un lado a partir de los Ψ_p más negativos, suministrar mayores volúmenes de agua para las funciones de la planta y por otro en la regulación de la temperatura interna.

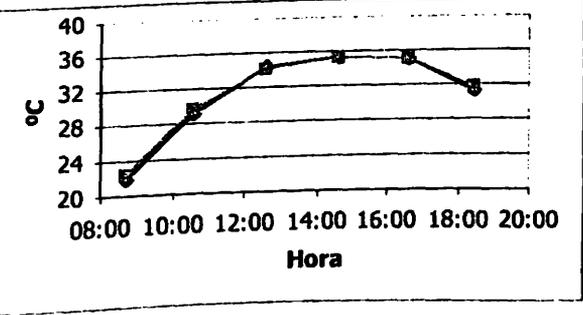
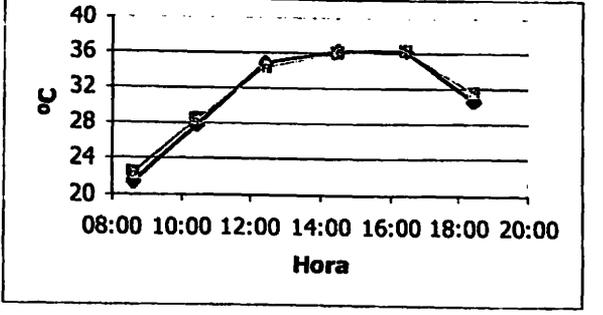
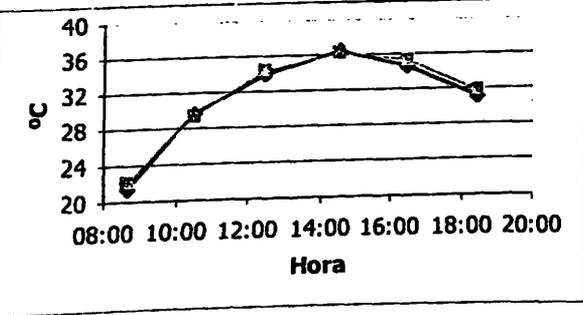
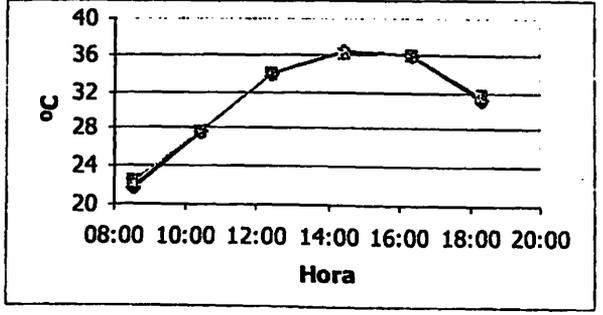
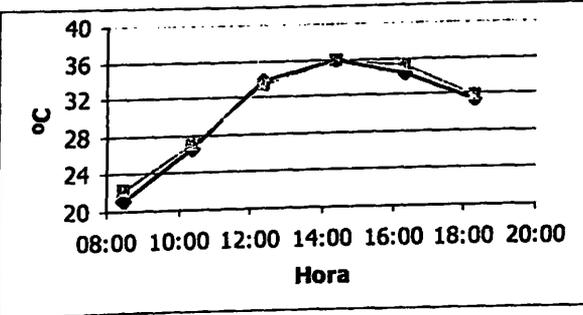
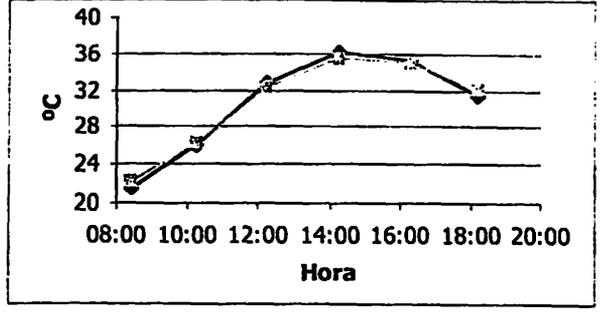
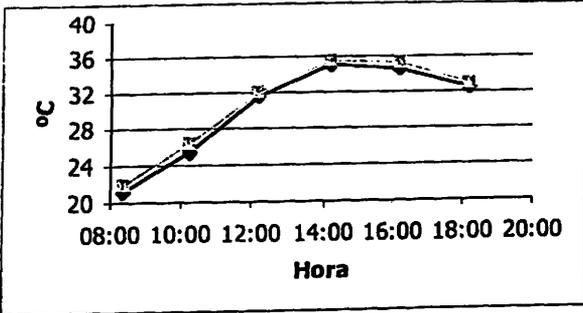
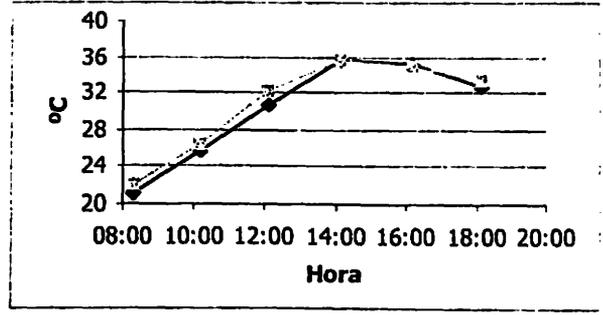
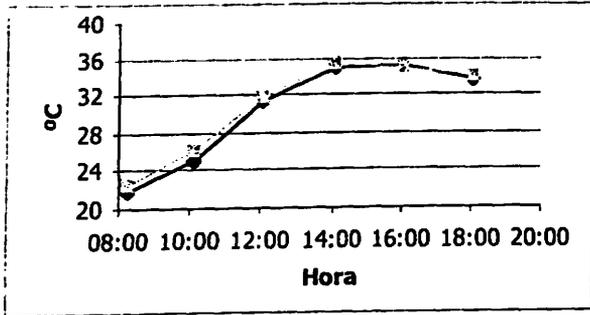
Figura 5.4 Resistencia estomatal a la difusión de vapor de agua a la atmósfera.



Temperatura de la hoja

En la prueba de rango múltiple no se detectó diferencia estadística (Cuadro 5.1) para esta variable de respuesta aún cuando si se aprecia que los tratamientos suplidos con los quelatos comerciales (secuestrene 138 y 330)

Figura 5.5. Temperatura del aire (cuadros claros) y hoja (rombos oscuros) obtenido a través del día para cada uno de los tratamientos en orden progresivo.



permanecieron con una más elevada temperatura que aquellos suplidos con FF (Figura 5.5). No obstante al correr la prueba de medias con los diferenciales de temperatura entre aire y hoja en este no se detectan diferencias estadísticas entre tratamientos, no obstante, la dosis 5 cc FF es quien presenta el menor calentamiento de planta.

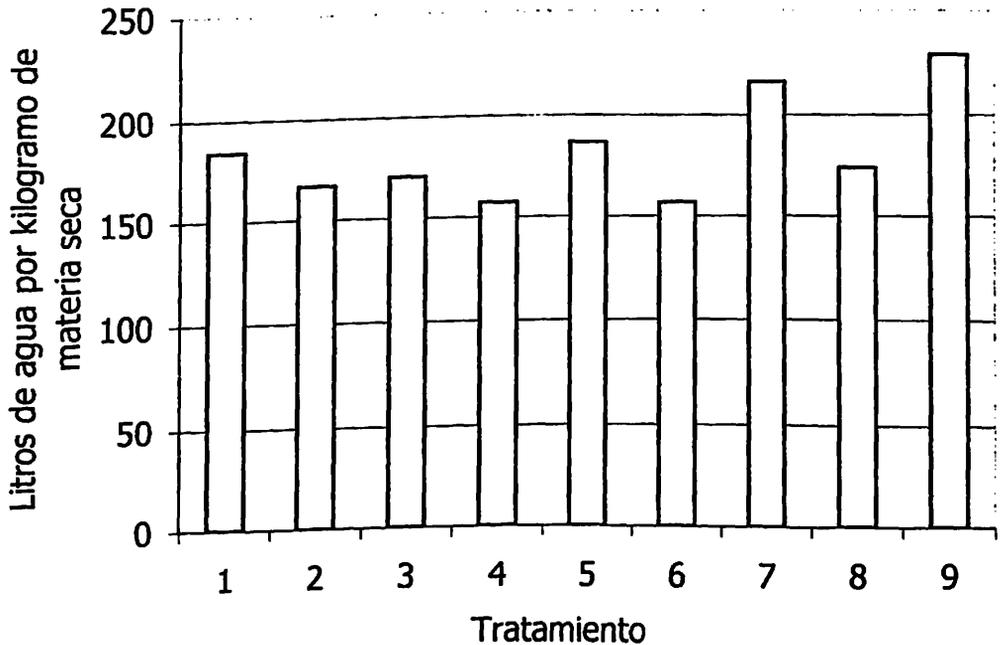
De acuerdo a Ehrler *et al.* (1978) las hojas de las plantas estresadas han sido encontradas más calientes que aquellas de plantas no estresadas y esta diferencia fluctúa entre 2 y 8 °C (valores absolutos) y dado que diferencias entre la temperatura del aire y del follaje de las plantas son un buen indicador del estado hídrico de las plantas, éstas no estuvieron bajo estrés hídrico.

Uso eficiente del agua (UEA)

La media superior del UEA (Figura 5.6) se observó con el empleo de sustancias húmicas (Cuadro 5.1) a las dosis de 2 cc de FF y 3.5 cc FF + 2 cc de AH (tratamientos 2 y 6) con 157 litros por kg de materia fresca producida, dosis que están en un 11 y 47 por ciento por debajo del consumo de las plantas a las que se les suministraron los quelatos comerciales (secuestrene 138 y 330) respectivamente.

En general el consumo de agua del experimento está dentro del consumo promedio reportado por Stanhill (1986) en el sentido de que los cultivos bajo riego han promediado 2 kg de materia fresca por m³ de agua aplicada en las últimas dos décadas. El fenómeno de balance de ácidos fúlvicos produce una reducción en la cantidad de agua requerida, en otras palabras, aumenta el UEA, lo cual para este experimento resultó cierto.

Figura 5.6. Uso eficiente del agua por el cultivo de tomate.



Relación entre la transpiración, potencial hídrico (Ψ_h) y diferencial de temperaturas (TA-TH)

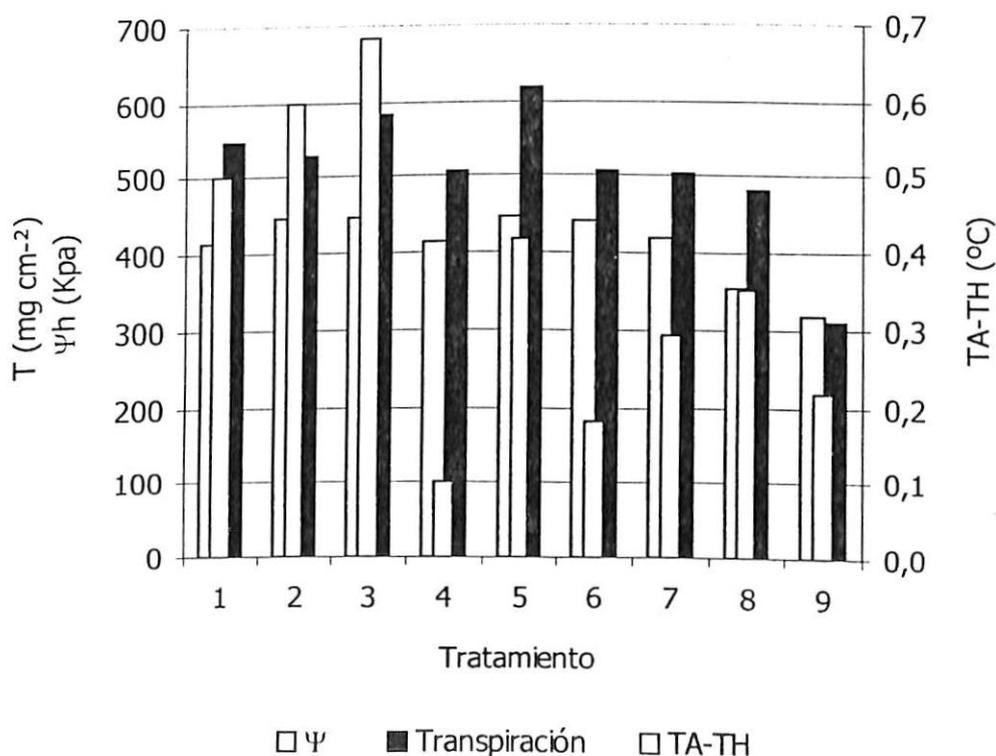
En la Figura 5.7 se muestra la transpiración durante el ciclo de mediciones resultado de integrar el área bajo la curva de cada uno de los tratamientos, también se presenta el Ψ_h en valores absolutos (Kpa) así como el diferencial de temperatura entre el aire y la hoja con la finalidad de apreciar la magnitud de la relación existente entre estas tres variables de respuesta en relación a que, sí existe un mayor potencial hídrico habrá una mayor transpiración con la consecuente mejor regulación de la temperatura de la hoja. Aún cuando para esta última variable de respuesta no esta clara una relación directa, si se cumple la afirmación para las dos primeras. Las variables de respuesta transpiración y potencial hídrico guardan una relación directa con el uso eficiente del agua (excepto para el tratamiento 9) por lo que agregando esté fenómeno, implicaría que a Ψ_h más negativos mayor transpiración, mayor control de la temperatura en la planta y mejor uso eficiente del agua.

Análisis foliar

El contenido de hierro resulto para todos los tratamientos, excepto los suplidos con quelatos (Figura 5.8), por debajo del nivel óptimo (100 a 120

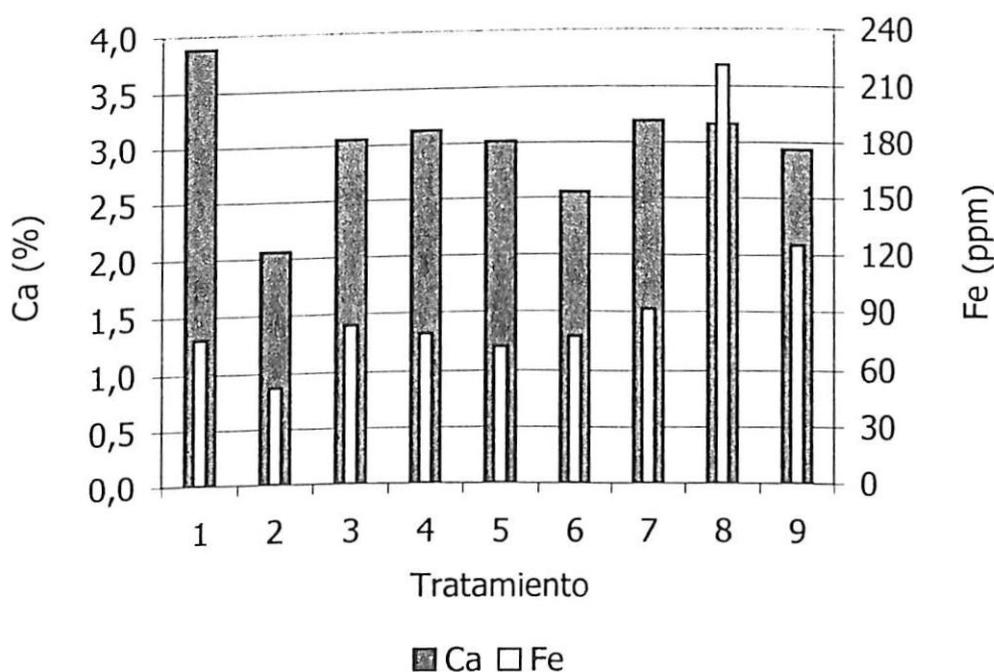
ppm) para la etapa de producción recomendado por Burgeño (1994), sin embargo, a través del ciclo del cultivo los tratamientos suplidos con FF mostraron un desarrollo normal mientras que el testigo presento clorosis visual, en cuanto a las suplidas con quelatos de hierro mostraron un desarrollo de apariencia un poco menos deficiente. No obstante estas concentraciones de hierro en las hojas pueden no reflejar el estado real de deficiencia o suficiencia de acuerdo a De Kock *et al* (1960) quien argumenta que el hierro es el único elemento esencial que frecuentemente evade la definición de deficiencia, puesto que no es raro el caso cuando el contenido total de hierro en las plantas cloróticas sea más alto que en las plantas verdes cuando son analizadas.

Figura 5.7 Interacción de las variables de respuesta: transpiración (T), potencial hídrico (Ψ h) y el diferencial de temperaturas entre aire y hoja (TA-TH).



El rango óptimo del calcio durante la etapa de producción según Burgeño (1994), es del 2 al 3 por ciento. En el análisis foliar, las plantas suplidas con FF y quelatos se mantuvieron en un rango de 2.06 a 3.19, sin embargo, algunos niveles situados en el umbral óptimo superior pueden ser los responsables que no se hayan alcanzado el óptimo de hierro en las plantas suplidas con FF lo que debe tener relación con la inmovilización del hierro dado que, de acuerdo a Lucena *et al.* (1987b), en suelos calcáreos el calcio como ion mayor, sería el principal competidor para los agentes quelantes. Por lo tanto la eficacia, sus reacciones en el medio y/o la habilidad de la planta para tomar el metal del FF puede ser la causa.

Figura 5.8 Contenido de calcio y hierro en las hojas de tomate durante la etapa de producción (79 días después del trasplante).

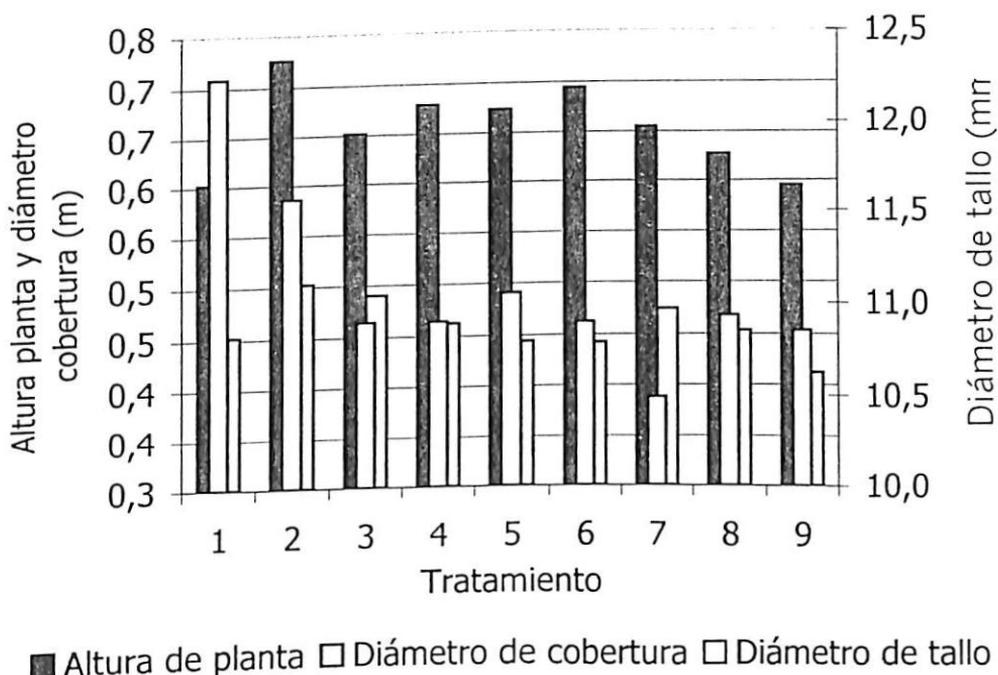


Variables agronómicas

Variables fenológicas

Las variables de respuesta agronómicas como son la altura de planta, diámetro de tallo, diámetro de cobertura y, masa en seco del follaje y raíz (Cuadro 5.2, Figura 5.9 y 5.10), resultaron diferencias significativas entre ellas.

Figura 5.9. Variables fenotípicas: altura de planta, diámetro de cobertura y tallo.



La respuesta de las plantas a la adición de sustancias húmicas en cuanto a la altura, parece ser que responde más a los ácidos fúlvicos dado que la mejor respuesta se obtuvo con el tratamiento 2 a la dosis de 2 cc de FF aún cuando éste no fue estadísticamente el de la media superior. En relación a la

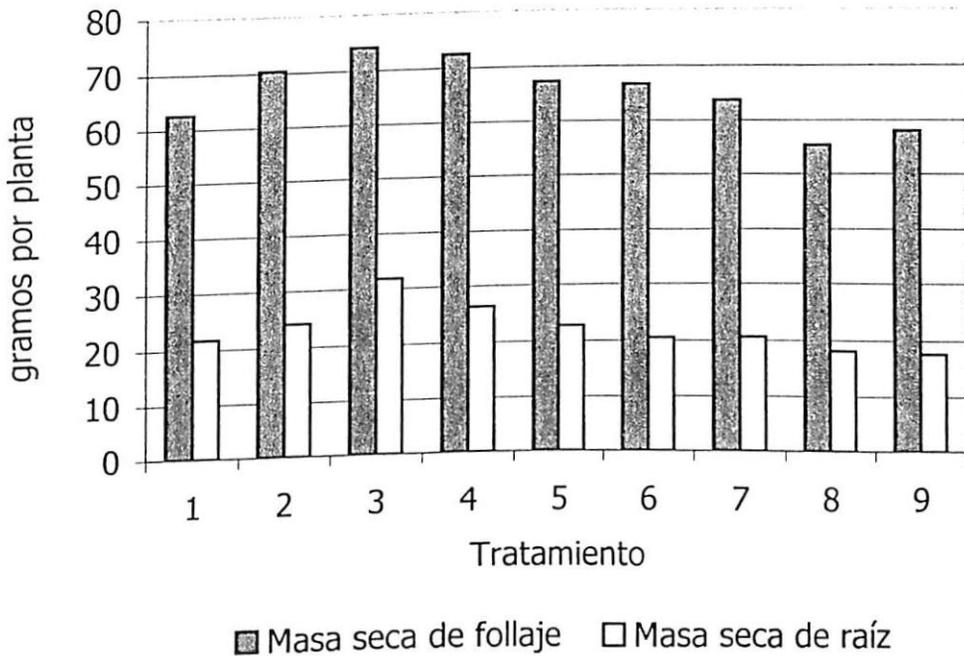
Cuadro 5.2. Pruebas de rango múltiple aplicadas a las variables de respuesta agronómicas.

T	Diámetro		Masa seca		Masa seca de		Rendimiento planta ⁻¹ (gr)**	Numero frutos planta ⁻¹ **	Masa media de fruto (gr)**
	de tallo (mm)**	de cobertura (cm)**	aérea de la planta (gr)	raíz de la planta (gr)	planta ⁻¹ (gr)**	planta ⁻¹ **			
1	60.2 DE	12.27 A	45.2 ABC	62.6 BCD	21.7 BCD	335.6 AB	9.9 BC	34.3 AB	
2	72.6 A	11.59 AB	50.2 A	70.3 AB	24.2 BC	417.0 A	11.8 BC	35.5 A	
3	65.1 BCDE	10.91 BC	49.0 AB	74.2 A	31.7 A	375.4 AB	12.5 B	30.9 ABC	
4	67.9 ABC	10.91 BC	46.2 ABC	72.5 A	26.4 AB	382.1 AB	12.3 B	31.4 ABC	
5	66.6 ABCD	10.93 BC	45.2 ABC	67.2 AB	22.7 BCD	328.2 ABC	10.6 BC	29.8 BC	
6	69.4 AB	10.90 BC	44.2 BC	66.6 AB	20.5 CD	393.7 A	15.3 A	26.4 C	
7	65.4 BCDE	10.49 C	47.4 AB	63.7 BC	20.7 CD	295.5 BC	9.8 BC	30.3 ABC	
8	62.7 CDE	10.93 BC	45.3 ABC	55.3 D	18.1 D	363.4 AB	11.5 BC	31.6 ABC	
9	59.5 E	10.85 BC	41.2 C	57.9 CD	17.7 D	239.4 C	9.1 C	26.2 C	
CV	11.45	9.71	13.89	14.16	28.14	29.83	26.69	20.37	

** : P<0.05; † Letras distintas son diferentes estadísticamente según DMS (p≤0.05). CV Es el coeficiente de variación.

variable diámetro de tallo, el testigo fue quien desarrollo una estructura de tallo más grande sobre el resto de los tratamientos. Con respecto al diámetro de cobertura, el tratamiento 2 a la dosis de 2 cc de FF obtuvo la media superior aunque no diferente del resto de los tratamientos. En relación a la biomasa en seco del follaje y raíz con la dosis de 3.5 cc de FF obtuvo la mayor masa misma que no es diferente estadísticamente de todo resto de tratamientos.

Figura 5.10 Variables fenotípicas: masa seca de follaje y raíz.



Analizando a los quelatos comerciales en lo que respecta a las variables fenotípicas, estos siempre presentaron los valores generalmente más bajos con respecto al fulvato de hierro, a saber (en porcentaje): altura de planta 13 y 18,

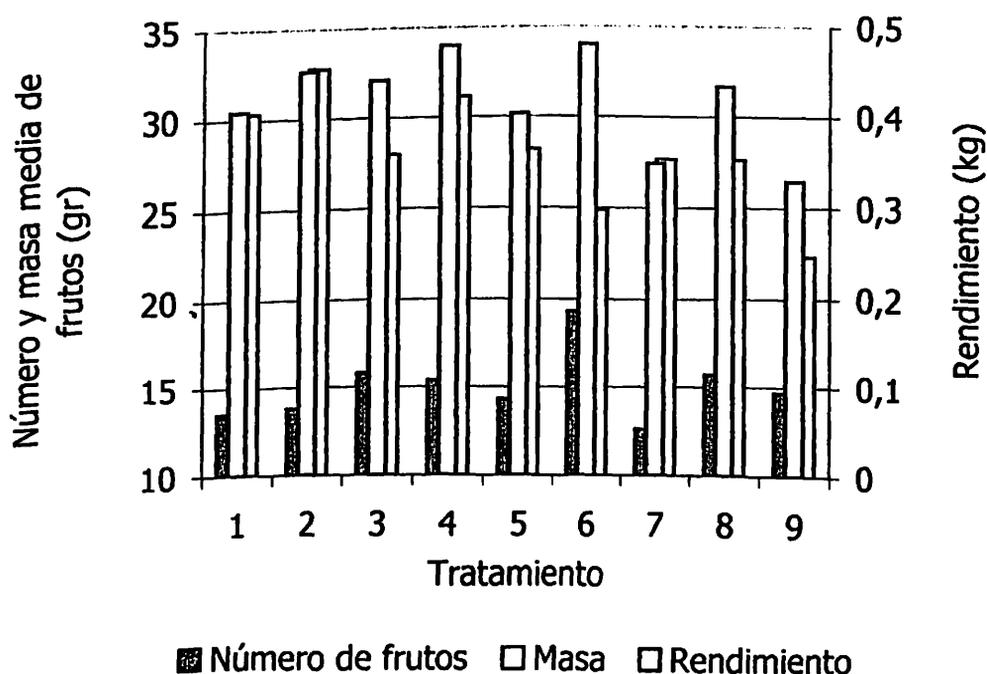
diámetro de tallo 6 y 7, diámetro de cobertura 10 y 18, masa de follaje 22 y 25, y masa de raíz 43 y 44 por ciento, secuestrene 138 y 330 respectivamente.

El diámetro de cobertura y altura de planta fue mayor en los tratamientos suministrados con las dosis superiores de FF y esto puede ser explicado en parte a que las sustancias húmicas contienen auxinas que están envueltas en la quelación del hierro para la planta, al mejorar el crecimiento, el vigor y fortaleciendo la nutrición de la planta, especialmente el desarrollo radical. Este argumento explica en parte la razón por la cual se obtuvo una respuesta superior en la masa de follaje y raíz con la dosis anteriormente descrita. El mayor crecimiento de la raíz concuerda con lo investigado por Chen y Aviad (1990) quienes aseveran que las SH estimulan el crecimiento de raíz a bajas concentraciones teniendo un óptimo y después decrecer a grandes concentraciones, siendo este el comportamiento cuando se aplicaron los FF de forma individual y no correspondiendo esto cuando fueron aplicados a la vez. Estos autores señalan que las SH actúan de igual forma sobre el tallo, sin embargo, no hubo coincidencia puesto que se obtuvo una respuesta diferente.

Rendimiento

En relación a los componentes del rendimiento como número de frutos, su masa media y el mismo rendimiento (Figura 5.11), se realizaron 8 cortes los cuales bajo un análisis estadístico de rango múltiple (Cuadro 5.2) y con los tratamientos 2 y 6 a las dosis de 2 cc de FF y 3.5 cc de FF + 2 cc AH respectivamente, se obtuvieron las medias superiores en cuanto al rendimiento, aún cuando estadísticamente no fueron las mejores. En otro trabajo previo de similares características la segunda dosis resulto la mejor (Cuevas, 2001). En esta investigación, la mejor dosis es superior en un 13, 43 y 20 por ciento en relación a la obtenida con los quelatos de hierro comerciales (sequestrene 138 y 330) y al testigo respectivamente.

Figura 5.11 Rendimiento, número y masa media de frutos obtenido.



En cuanto al número de frutos la segunda dosis fue superior estadísticamente al resto de los tratamientos superando en 25 y 41 por ciento a los quelatos sequestrene 138 y 330 respectivamente y en un 9 por ciento al testigo. Respecto a la masa media por fruto la dosis de 2 cc de FF fue la mejor en 11 y 26 por ciento que los mismos quelatos y en un 3 por ciento al testigo.

En general, la producción de tomate en suelos calcáreos responde más a la adición de fulvatos de hierro como fuente de hierro que a los quelatos comerciales, como fue señalado por De Kock en 1955 que el hierro se hace asimilable por las plantas en condiciones adversas, si el suministro de este elemento se realiza en presencia de sustancias húmicas, y de acuerdo con Schnitzer y Khan (1972), lo anterior es debido al atributo principal que es asignado a las sustancia húmicas y, principalmente a la fracción fúlvica: la capacidad de formar complejos con metales catiónicos como el hierro y movilizarlos de las partículas sólidas del suelo a la superficie de la raíz. Lindsay (1979) demostró que los quelatos metálicos son importantes debido a que incrementan la solubilidad de los iones metálicos y afectan muchos procesos físicos, químicos y biológicos importantes, así mismo afectan la disponibilidad y movimiento de muchos nutrientes de las plantas.

En este experimento, la deficiencia de hierro tuvo efecto sobre el estado hídrico de la planta, principalmente en el testigo y las plantas suplidas con

quelatos, lo cual es explicado en parte por Chen y Barak (1982) quienes mencionan que la deficiencia de hierro (Fe) en plantas causa clorosis en los tejidos de la hoja debido a la inadecuada síntesis de la clorofila, Treshow (1970) añade que este fenómeno causa una disminución en el tamaño de los cloroplastos con la inminente reducción de la fotosíntesis; consecuentemente esto afectó a las variables agronómicas.

CONCLUSIONES

- En la planta, al suministro de una fuente de hierro mezclado con ácidos fúlvicos se generan potenciales hídricos más negativos que mantienen un equilibrio hídrico más favorable que con los quelatos de hierro comerciales lo cual hace funcionar fisiológicamente a las plantas de manera más eficiente a corto plazo, a minimizar el daño causado por los déficit hídricos momentáneos generados por el retraso de la absorción de agua por las raíces respecto al agua transpirada en periodos de alta demanda hídrica y, a largo plazo, a disminuir el daño debido al estrés hídrico debido al déficit de humedad del suelo y el estrés atmosférico.

- Los fulvatos de hierro a la dosis de 2 cc y 3.5 cc + 2 cc de ácidos húmicos, hacen producir la mayor cantidad de fruta al superara a los quelatos comerciales.

RESUMEN

Esta investigación se realizó con el fin de evaluar el estado interno del agua en el cultivo del tomate respecto a la nutrición férrica y analizar sus efectos fisiológicos desde el punto de vista de la relación, agua, suelo y planta, así como los componentes del rendimiento. La investigación se desarrolló bajo invernadero tipo peruano la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (latitud norte 25° 22', longitud oeste 101° 00' y 1743 metros sobre el nivel del mar). El genotipo utilizado fue la variedad Río Grande de hábito determinado, las sustancias empleadas: Fulvato de hierro experimental (FF), ácido húmico comercial (AH), Sequestrene 138 y 330. Las plántulas producidas en charolas flotantes germinadoras de 160 cavidades en turba de musgo como sustrato, trasplantadas en cubetas de plástico de 20 litros con 19 kilos de suelo de origen calcáreo con un contenido de M.O. de 2.09%, pH (saturación) de 7.8 y carbonatos totales de 29.42%. La fertilización fue a través de la solución nutritiva Hoagland's sin hierro variando sólo los productos a evaluar. Las aplicaciones fueron vía suelo cada semana. Cada tratamiento estuvo conformado de catorce plantas, evaluándose solo las diez plantas centrales, bajo un Diseño Completamente al Azar y la prueba de medias por DMS. Las

variables fisiológicas evaluadas fueron: potencial hídrico (Ψ_h), contenido relativo de agua (CRA), transpiración (Tr), resistencia estomatal (Γ), temperatura de la hoja (TH), uso eficiente del agua (UEA), concentración de hierro total foliar (Fe) y calcio (Ca). Las variables agronómicas: altura de planta, diámetro de tallo y cobertura, producción de materia seca, y la producción de fruta, masa y número por planta.

Fisiológicamente aquellos tratamientos suplidos bajo una nutrición a base de FF resultaron en un estado hídrico más favorable respecto a los suplidos con los quelatos comerciales, esto es, el estado interno del agua en la planta fue reflejado en un Ψ_h más negativo, un CRA adecuado, una Tr más alta con la consiguiente menor Γ y una TH inferior a la del aire. La dosis de 2 cc de FF produjo una mejor respuesta en cuanto a la altura de planta y diámetro de cobertura, el testigo presentó un diámetro de tallo más grueso, la mayor cantidad de materia seca de raíz se obtuvo con la dosis de 3.5 cc de FF y de follaje también con la anterior, además de la dosis de 5 cc de FF. Con 2 cc de FF y 3.5 cc de FF más 2 cc de AH produjeron los rendimientos superiores. Las dosis de 2 cc de FF y 3.5 cc de FF más 2 cc de AH produjeron el mayor número de frutos por planta y la masa media de fruto superior se obtuvo con la aplicación de 2 cc de FF.

Se concluye que: 1) Existe una condición hídrica más favorable para la planta bajo el suministro de una fuente de hierro con ácido fúlvico aplicado sólo que en combinación con los ácidos húmicos muy por arriba que con los quelatos comerciales. 2) El fulvato de hierro está implicado en la generación de potenciales hídricos más negativos que hacen mantener un equilibrio hídrico más favorable; y 3) Los fulvatos de hierro a la dosis de 2 cc y 3.5 cc + 2 cc de ácidos húmicos, hacen producir la mayor cantidad de fruta al superar a los quelatos comerciales.

LITERATURA CITADA

- Art, S. L. 1985. Techniques for measuring plant water. Hort Science. 20:1021-1028.
- Awad, F., V. Römheld and H. Marschner. 1994. Effect of root exudates on mobilization in the rizósfera and uptake of iron by wheat plants. Plant and Soil. 165:213-218.
- Barrs, H.D 1968. Determination of water deficits in plant tissues, pp. 367. In: T.T. Kozlowski (ed.). Water deficits and plant growth. Academic Press, N.Y.
- Bienfait, H.F. 1988. Mechanisms in Fe-efficiency reactions of higher plants. J. Plant Nutr. 11:605-629.
- Boyer, J.S. 1967. Leaf water potentials measured with a pressure chamber. Plant Physiol. 42:133-137.
- Boyer, J.S. 1969. Measurement of the water status of plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 351-364.
- Brun, W.A. 1965. Rapid changes in transpiration in banana leaves. Plant Physiol. 40:797-801.
- Burgeño, L.C. 1994. La fertigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Culiacán, Sinaloa, México.
- Cadahia, L.C. 1998. Fertirrigación. Ed. Mundi-Prensa. Barcelona, España. pp. 117.
- Castellanos, J.Z., J.X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. Memorias del curso sobre interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP.

- Catsky, J. 1965. Leaf-disk method for determining water saturation deficit, pp. 353-360. In: F.E. Eckardt (ed.). Methodology of plant ecophysiology. Arid Zone Res. 25. UNESCO, Paris.
- Chaney, R.L., J.C. Brown and L.O. Tiffin. 1972. Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybean. *Plant Physiol.* 50:208-213.
- Chen, Y. and T. Aviad. 1990. Effects of humics substances on plant growth. Contribution from seagran center for soil and water sciences, faculty of agriculture. In: "Humic substances in soil crops sciences: selected readings". Eds MacCarthy, R.L.; Clapp, P., Malcom and P.R., Bloom. Wisconsin, U.S.A. pp. 161-186.
- Chen, Y. and P. Barak. 1982. Iron nutrition of plants in calcareous soils. *Advances in agronomy.* 41:217-240.
- Contreras, M. y C.F. Sánchez. Efecto de algunos reguladores del crecimiento sobre rendimiento de tomate manejado en altas densidades. *Revista Chapingo serie horticultura.* Vol. III Núm.1-1997.
- Crowley, D.E. and D. Gries. 1993. Modeling of iron competition in the plant rhizosphere. 7th International Symposium on Iron Nutrition and Interactions in Plants, Zaragoza, Spain.
- Crowley, D.E., Y.C. Wang, C.P.P. Reid and P.J. Szaniszlo. 1991. Mechanisms of iron acquisition from siderophores by organisms and plants. *In* Iron Nutrition and Interactions in Plants. Ed. Y. Chen and Y. Hadar. pp. 213-217. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Cuevas, P.A. 2001. Control de la clorosis férrica en tomate por fulvato de fierro. Tesis de Maestría. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- De Kock, P.C. 1955a. Influence of humic acids on plant growth. *Science.* 121:473.
- De Kock, P.C. 1955b. Iron nutrition of plants at high pH. *Soil Science.* 79:167-175.
- De Kock, P.C., A. Hall and M. McDonald. 1960. A relation between the ratios of phosphorus to iron and potassium to calcium in mustard leaves. *Plant and Soil* 12:128-142.
- Ehleringer, J.R. and T.A. Cooper. 1988. Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants. *Oecologia.* 76:562-566.

- Ehrler, W.L. 1973. Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. *Agron. J.* 65:404-409.
- Ehrler, W.L., S.B. Idso, R.D. Jackson and R.J. Reginato. 1978. Diurnal changes in plants water potential and canopy temperatures as affected by drought. *Agron. J.* 70:998-1004.
- Farquhar, G.D. and T.D. Sharkey. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 33:317-345.
- Fitter, A.H. and R.K.M. Hay. 1981. *Environmental physiology of plants.* Academic Press, New York.
- Ghosh, K., and M. Schnitzer. 1980. Macromolecular structures of humic substances. *Soil Sci.* Vol. 129, Nº 5 pp. 266-276.
- González, R.E. 1999. Evaluación del superquelato de fierro (Fe) en el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo condiciones de hidroponía. Tesis de Licenciatura. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Grime, J.P. 1977. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *Am. Nat.* 111:1169-1194.
- Hernández-Apaolaza, L.A. Gárate and J.J. Lucena. 1995. Efficacy of commercial Fe(III)-EDDHMA chelates to supply iron to sunflower and corn seedlings. *Journal of Plant Nutrition.* 18(6):1209-1223.
- Hewitt, E.J. 1945 Experiments in mineral nutrition. *Prog. Rep. 2, Long Ashton Res. Sta. Ann. Rep. (1944),* 50-60. pp. 177.
- Hoagland, D.R. and D.I. Arnon. 1938. *The Water-Culture Method for Growing Plants without Soil.* To circulate number 347 of the University of California Agricultural Experiment Station.
- Horton, M.L., L.N. Namked and J.T. Ritchie. 1970. Role of plant canopies in evapotranspiration. *Proc. Great plains Agric. Council. Evapotranspiration Seminar. Publ. No. 50, Kansas State Univ.,* pp. 301-338.
- Jackson, R.D., S.B. Idso. and R.J. Pinter, Jr. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17:1133-1138.
- Jarvis, P.G. 1963. Comparative studies in plant water relations. *Act Universitatis Upsaliensis. Abst. Uppsala Diss. Sci.* 27.

- Jarvis, P.G., C.W. Rose and J.E. Begg. 1963. An experimental and theoretical comparison of viscous and diffusive resistances to gas flow through amphi-stomatous leaves. *Agric. Meteorol.* 4:103-117.
- Katia, J.C. and B.D. Sharma. 1980. A new technique of plant analysis to resolve iron chlorosis. 55:105-119.
- Konrad, M. 1994. Iron availability in plant tissues-iron chlorosis on calcareous soils. *Plant and Soil.* 165:275-283.
- Kozlowki, T.T. and J.J. Clausen. 1965. changes in moisture contents and dry weights of buds and leaves of forest trees. *Bot. Gaz.* 126:20-27.
- Kramer, P.J. 1974. *Water relations of plants*, Academic Press, N.Y. pp. 482.
- Kramer, P.J., E.B. Knipling and L.N. Miller. 1966. Terminology of cell water relations. *Science* 153:889-891.
- Krizek, D.T. 1985. Methods of inducing water stress in plants. *Hort Sciences.* 20:1028-1038.
- Lindsay, W.L. 1979. *Chemical equilibria in soils*. John Wiley & Sons, New York. U.S.A.
- Longnecker, N. and R.M. Welch. 1990. Accumulation of apoplastic iron in plant roots. *Plant Physiol.* 92:17-22.
- Loué, A. 1988. Los microelementos en la agricultura. Ed. Mundi-Prensa, Barcelona, España. pp. 21-23.
- Lucena, J.J., A. Gárate and O. Carpena. 1987a. Effects of carbon dioxide on the stability of iron-chelates. *J. Plant Nutr.* 10:553-565.
- Lucena, J.J., A. Gárate and O. Carpena. 1987b. Iron-chelates evaluation in calcareous soil. *Plant and Soil.* 103:134-138.
- Lucena, J.J., A. Gárate and O. Carpena. 1988. *Lolium multiflorum* uptake of iron supplied as different synthetic chelates. *Plant and Soil.* 112:23-28.
- Mansfield, T.A. and W.J. Davies. 1981. Responses of stomata: the primary mechanisms of drought in mesophytes. *AM BIOL TEA* 42(9):541-544.
- Marschner, H., and V. Römheld. 1994. Strategies of plants for adquisition of iron. *Plant Soil* 165:261-274.

- Meidner, H., and T.A. Mansfield. 1968. The physiology of stomata. McGraw-Hill, London.
- Mench, M., J.L. Morel, A. Guckert and B. Guillet. 1988. Metal binding with root exudates of low molecular weight. *J. Soil Sci.* 39:521-527.
- Mooney, H.A., W.E. Winner and E.J. Pell. 1991. Response of plants to multiple stresses. Academic Press, INC. E.U.A. pp. 422.
- Morrow, P.A. and R.O. Slatyer. 1971. Leaf resistance measurements with diffusion porometers: Precautions in calibration and use. *Agric. Meteorol.* 8:223-233.
- Namken, L.N., C.L. Wiegand and W.O. Willis. 1974. Soil- and air-temperatures as limitations to more efficient water use. *Agric. Meteorol.* 14:169-181.
- Neilands, J.B. and S.A. Leong. 1986. Siderophores in relation to plant growth and disease. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 37:187-208.
- O'Toole, J.C. and V.S. Tomar. 1982. Transpiration, leaf temperature and water potential of rice and barnyard grass in flooded fields. *Agric. Meteorol.* 26:285-296.
- Passioura, J.B. 1980. The transport of water from soil to shoot in wheat seedlings. *J. Exp. Bot.* 31:333-345.
- Prasad, N. 1967. *Influence of microclimate on diurnal water relations in western wheatgrass leaves*. Thesis, Department of Botany, North Dakota State University, Fargo, N.D. pp. 149.
- Rose, C.W., G.F. Byrne and G.K. Hansen. 1976. Water transport from soil through plant to atmosphere: a lumped parameter model. *Agric. Meteorol.* 16:171-184.
- Ritchie, J.T. 1974. Atmospheric and soil water influences on the plant water balance. *Agric. Meteorol.* 14:183-198.
- Rose, C.W. 1966. *Agricultural physics*. Pergamon, N.Y.
- Rose, C.W., G.F. Byrne and G.K. Hansen. 1976. Water transport from soil through plant to atmosphere: a lumped parameter model. *Agric. Meteorol.* 16:171-184.
- Tanner, C.B. 1963. Plant temperatures. *Agron. J.* 55:210-211.

- Treshow M. 1970. Environmental and plant response. McGraw-Hill book company. pp. 422.
- Turner, N.C. 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant to water and high temperature stress. Wiley, New York.
- Turner N.C. 1986. Crop water deficit: a decade of progress. *Advances in Agronomy*. 39:1-52.
- Turner, N.C. 1986. Crop water deficit: a decade of progress. *Advances in Agronomy*. 39:1-52.
- Salisbury, F.B. y C.W. Ross. 1994. Fisiología de hortalizas. Grupo editorial Iberoamérica S.A. de C.V. Cuarta edición. México. pp. 758.
- Schwertmann, U. and, R.M. Taylor. 1977. In "Minerals in soil environments" (J.B. Dixon, S.B. Weed, J.A., Kittrick, M.H. Milford, and J.L. White, eds.), pp. 145-180. *Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, Wisconsin.
- Schnitzer, M. 1978. Humic Substances: Chemistry and Reactions: in *Soil Organic Matter* (Ed.) Schnitzer and Khan. Soil Organic Matter. Elsevier, Amsterdam.
- Schnitzer, M. 1991. Soil Organic Matter- The Next 75 Years. *Soil Science*. Vol. 151. N°1. pp. 41-58.
- Schnitzer, M. 2000. *Advances in Agronomy*. Academic Press. pp. 5.
- Schnitzer, M. and S.U. Khan. 1972. Humic substances in the environment. Marcel-Decker, Inc., New York, NY.
- Schnitzer, M. and S.U. Khan. 1978. *Soil organic matter*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. pp. 319.
- Schnitzer, M. and S.I.M. Papst. 1967. Effects of a soil humic compound on root initiation. *Nature*. 213: 383-390.
- Scholander, P.F., H.T. Hammel, E.D. Bradstreet and Hemmingsen. 1965a. Sap pressure in plants. *Science* 149:920-922.
- Scholander, P.F., H.T. Hammel, E.D. Bradstreet and Hemmingsen. 1965b. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148:339-346.

- Serna, A.R.M. 2001. *Ácido fúlvico en solución nutritiva para mejorar la calidad de plántula y el rendimiento en melón*. Tesis de maestría. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Shorrocks, V.M. 1984. The science and technology of iron in plant nutrition: future outlook. *J. Plant Nutr.* 7:833-845.
- Slatyer, R.O. 1967. *Plant-water relationships*. Academic Press, London-New York, pp. 336.
- Slatyer, R.O. 1964. Efficiency of the use of the water for the vegetation of arid areas. *Ann. Arid Zone.* 3:1-12.
- Stanhill G. 1986. Water use efficiency. *Advances in Agronomy.* 39:53-85.
- Stevenson, F. 1982. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, and Reactions*. Wiley, New York, USA.
- Treshow, M. 1970. *Environmental and plant response*. McGraw-Hill book company.
- Turner N.C. 1981. *Techniques and experimental approaches for the measurement of plant to water and high temperature stress*. Wiley, New York.
- Wallace, A., E.F. Frolich and A. Elgazzar. 1977. Root excretions in iron-deficient tobacco plants and possible effects on iron nutrition. *Soil Organic Matter Studies*. International Atomic Energy Agency. Vol. I pp. 385-396.
- Wallace, A., R.T. Mueller and G.V. Alexander. 1976. Soil-pot tests with iron-deficiency susceptible soybeans and others plants to determine effectiveness of iron chelates in plant nutrition. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 7:1-16.
- Warren, W.J. 1967. The components of leaf water potential. I. Osmotic and matric potentials. *Austral. J. Biol. Sci.* 20:329-347.
- Whatley, F.R., L. Ordin, and, D.I. Arnon. 1951. Distribution of micronutrient metals in leaves and chloroplast fragments. *Plant Physiol.* 26:414-418.
- Zelitch, I. 1969. Stomatal control. *Ann. Rev. of Plant Physiol.* 20:329-350.

APÉNDICE

Páginas WEB consultadas

http://edis.ifas.ufl.edu/BODY_CH086.

http://www.agri.upm.edu.my/jst/resources/as/om_humicsubs.html.

<http://www.ar.wroc.pl/~weber/kwasy2.html>.

http://www.co.kern.ca.us/farm/NUNPU_B05.HTM.

<http://www.excelsior.com.mx/tomate.html>.

<http://www.unifieldsystems.com/humicacids.htm>.

Cuadro A1. Potencial hídrico (Mpa).

T	rep	Ψ_h	T	rep	Ψ_h	T	rep	Ψ_h
1	1	0.48	4	1	0.30	7	1	0.40
1	2	0.34	4	2	0.54	7	2	0.42
1	3	0.42	4	3	0.40	7	3	0.44
2	1	0.50	5	1	0.38	8	1	0.40
2	2	0.40	5	2	0.46	8	2	0.30
2	3	0.44	5	3	0.50	8	3	0.36
3	1	0.38	6	1	0.38	9	1	0.30
3	2	0.50	6	2	0.46	9	2	0.36
3	3	0.46	6	3	0.48	9	3	0.30

Cuadro A2. Contenido relativo de agua (%).

Hora	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
08:00	64.08	64.02	68.31	66.73	63.23	63.39	61.80	60.66	64.25
10:00	58.78	63.51	61.02	59.17	60.57	53.40	57.46	54.56	62.40
12:00	57.54	52.72	56.83	44.92	57.78	52.94	54.09	55.03	58.24
14:00	49.23	62.08	44.13	44.41	48.66	52.37	45.34	49.14	49.83
16:00	57.28	60.20	48.97	56.73	58.06	56.12	56.40	56.73	58.54
18:00	54.82	55.31	55.12	55.95	60.25	50.92	60.81	53.40	57.14

Cuadro A3. Variables de respuesta fisiológicas medidas mediante el porómetro.

Hora	Tratamiento 1				Hora	Tratamiento 2			
	T ($\mu\text{mol cm}^{-2} \text{seg}^{-2}$)	Γ (seg cm^{-2})	TH	TA		T ($\mu\text{mol cm}^{-2} \text{seg}^{-2}$)	Γ (seg cm^{-2})	TH	TA
08:15	5.072	2.057	21.8	22.6	08:19	4.735	2.057	21.2	22.1
10:09	14.723	0.867	25.1	26.1	10:12	12.580	1.093	25.7	26.5
12:04	18.119	1.217	31.4	31.7	12:08	17.747	1.013	30.7	32.2
14:07	18.305	1.673	35.1	35.4	14:11	18.250	1.620	35.7	35.6
16:06	16.596	1.853	35.1	35.1	16:10	16.407	1.853	35.1	35.1
18:05	13.857	1.950	33.6	34.2	18:08	14.290	1.773	32.8	33.4

...continuación cuadro A3...

Tratamiento 3					Tratamiento 4				
Hora	T ($\mu\text{mol cm}^{-2}$ seg^{-2})	Γ (seg cm^{-2})	T H	TA	Hora	T ($\mu\text{mol cm}^{-2}$ seg^{-2})	Γ (seg cm^{-2})	T H	TA
8:23	5.409	1.833	21.1	22.0	8:26	4.755	2.010	21.6	22.2
10:15	13.373	0.957	25.3	26.3	10:18	13.067	1.053	26.0	26.3
12:12	19.253	1.070	31.5	32.1	12:15	17.164	1.000	32.8	32.4
14:15	22.207	1.187	35.0	35.5	14:18	18.296	1.220	36.1	35.6
16:13	18.397	1.647	34.7	35.3	16:17	15.361	2.080	35.3	35.1
18:11	11.911	2.240	32.4	32.9	18:14	10.217	2.887	31.5	32.2

Tratamiento 5					Tratamiento 6				
Hora	T ($\mu\text{mol cm}^{-2}$ seg^{-2})	Γ (seg cm^{-2})	T H	TA	Hora	T ($\mu\text{mol cm}^{-2}$ seg^{-2})	Γ (seg cm^{-2})	T H	TA
8:30	5.247	1.717	21.1	22.3	8:34	5.689	2.010	21.7	22.4
10:22	15.483	0.933	26.5	26.9	10:26	13.378	1.617	27.6	27.6
12:20	19.217	1.020	33.9	33.5	12:25	17.822	1.706	33.8	33.9
14:22	23.947	1.243	35.9	35.9	14:27	18.391	2.073	36.3	36.1
16:20	20.733	1.387	34.4	35.2	16:23	15.190	2.813	35.9	36.1
18:17	10.394	2.890	31.3	31.7	18:20	8.265	3.713	31.2	31.7

Tratamiento 7					Tratamiento 8				
Hora	T ($\mu\text{mol cm}^{-2}$ seg^{-2})	Γ (seg cm^{-2})	T H	TA	Hora	T ($\mu\text{mol cm}^{-2}$ seg^{-2})	Γ (seg cm^{-2})	T H	TA
8:37	6.933	1.267	21.5	22.3	8:41	4.952	1.873	21.5	22.2
10:28	15.930	0.913	27.8	28.4	10:32	10.442	1.310	29.7	29.3
12:27	16.371	1.060	34.8	34.3	12:31	15.611	1.530	33.9	34.3
14:32	15.153	1.210	36.1	36.0	14:35	17.597	1.770	36.4	36.3
16:27	13.852	2.040	36.2	36.1	16:31	15.985	2.003	34.6	35.4
18:24	12.629	2.480	30.5	31.5	18:26	12.527	2.480	31.1	31.7

...continuación cuadro A3.

Tratamiento 9				
Hora	T ($\mu\text{mol cm}^{-2}$ seg^{-2})	Γ (seg cm^{-2})	T H	TA
8:45	3.981	2.320	21.8	22.5
10:36	10.003	1.903	29.2	29.7
12:35	11.633	1.750	34.4	34.2
14:38	9.962	1.740	35.3	35.4
16:35	7.621	2.110	35.1	35.1
18:29	5.420	2.770	31.3	31.7

Cuadro A4. Masa fresca y seca de tallo y raíz (gr).

R	Tratamiento 1				Tratamiento 2			
	Masa fresca		Masa seca		Masa fresca		Masa seca	
	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz
1	294,6	83,1	61,5	25,0	315,3	89,6	60,1	23,2
2	325,3	90,6	66,3	35,2	296,5	57,2	57,9	13,4
3	287,9	60,3	62,4	17,4	324,8	60,6	66,3	18,2
4	303,9	83,4	70,0	24,2	345,6	86,9	66,4	22,6
5	344,7	41,0	69,9	17,4	375,2	93,3	72,8	21,3
6	242,6	41,5	53,4	17,2	336,1	96,4	64,3	23,5
7	293,0	54,0	66,1	22,2	373,7	120,8	76,6	36,7
8	259,2	80,6	53,6	27,7	569,2	135,6	102,3	38,6
9	238,0	41,7	57,2	14,1	294,7	69,2	60,5	21,3
10	295,1	61,4	65,6	16,2	361,5	72,1	76,2	22,7

...continuación del cuadro A4...

R	Tratamiento 3				Tratamiento 4			
	Masa fresca		Masa seca		Masa fresca		Masa seca	
	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz
1	355,7	113,9	75,8	29,1	300,4	60,6	65,1	21,0
2	277,8	168,1	79,3	48,5	407,0	123,1	65,7	23,0
3	361,4	115,5	72,5	32,4	398,4	116,6	72,5	26,4
4	315,1	93,3	65,1	23,4	311,8	62,0	79,3	25,3
5	330,7	158,4	78,2	40,7	350,4	87,8	72,4	16,6
6	391,2	95,5	72,6	23,9	338,3	71,7	76,2	19,4
7	354,1	112,9	76,4	31,2	364,3	102,2	68,3	35,5
8	329,0	70,3	71,3	24,6	322,8	67,0	75,2	26,8
9	355,2	127,7	74,6	36,4	364,9	104,5	80,9	29,3
10	365,5	91,2	75,8	26,4	345,7	82,5	69,2	40,7

R	Tratamiento 5				Tratamiento 6			
	Masa fresca		Masa seca		Masa fresca		Masa seca	
	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz
1	371,7	85,2	67,1	21,4	400,6	87,8	75,3	23,1
2	348,7	71,4	63,9	17,4	333,1	72,6	62,7	18,6
3	412,5	128,9	78,5	30,1	331,2	72,8	64,2	19,2
4	431,7	91,5	79,4	24,5	311,2	69,9	63,7	18,7
5	359,2	92,0	69,3	23,6	272,9	54,8	56,3	15,5
6	302,9	74,7	60,4	18,3	376,2	58,7	69,5	15,4
7	324,9	101,6	63,5	24,3	317,1	67,5	61,6	20,0
8	327,1	71,8	65,8	18,0	336,8	102,2	71,4	23,4
9	280,2	70,1	57,4	18,9	362,4	77,0	71,9	19,5
10	337,9	122,3	66,7	30,7	352,7	121,5	69,7	31,2

...continuación del cuadro A4.

R	Tratamiento 7				Tratamiento 8			
	Masa fresca		Masa seca		Masa fresca		Masa seca	
	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz
1	392,4	116,7	80,0	30,1	318,1	99,6	56,2	24,2
2	446,9	89,6	82,1	26,1	314,8	75,6	54,9	17,1
3	260,0	53,9	46,4	12,4	279,1	47,1	52,6	14,4
4	268,2	86,6	70,9	29,6	348,0	80,1	61,9	21,5
5	411,3	68,1	78,1	21,5	284,7	59,2	53,0	7,6
6	366,6	54,9	59,7	23,7	198,7	34,8	36,2	17,4
7	272,5	65,1	55,7	19,1	360,7	74,4	65,4	19,7
8	201,4	43,3	35,4	11,1	316,6	76,4	61,2	19,6
9	328,7	48,2	61,3	11,9	279,0	83,3	54,2	23,0
10	303,3	71,8	67,6	21,0	312,3	57,2	57,1	16,8

R	Tratamiento 9			
	Masa fresca		Masa seca	
	Tallo	Raíz	Tallo	Raíz
1	329,7	91,8	66,0	19,9
2	337,6	89,0	66,7	21,4
3	351,7	60,6	66,7	15,1
4	345,4	82,1	64,6	19,5
5	382,3	128,8	72,5	28,0
6	298,3	75,7	57,4	14,4
7	275,0	65,6	51,4	15,6
8	176,4	30,4	31,1	9,3
9	255,2	66,5	51,1	17,1
10	263,7	52,1	51,8	16,4

Cuadro A5. Variables de respuesta agronómica: altura de planta, diámetro de cobertura y tallo.

UE	Tratamiento 1			Tratamiento 2			Tratamiento 3		
	Altura (cm)	Diám (cm)	Tallo (mm)	Altura (cm)	Diám (cm)	Tallo (mm)	Altura (cm)	Diám (cm)	Tallo (mm)
1	67	41	13.8	82	46	10.3	63	45	9.9
2	62	33	15.0	67	53	9.9	57	43	10.2
3	57	50	12.2	53	53	11.2	65	51	11.7
4	59	46	12.2	79	57	14.0	68	49	9.7
5	51	37	13.1	64	57	13.0	65	58	9.4
6	53	54	10.3	81	52	11.1	66	55	14.1
7	71	40	12.1	82	40	12.0	63	47	11.0
8	62	48	12.0	64	60	11.3	67	50	10.7
9	57	50	10.7	69	40	11.1	68	46	11.3
10	63	53	11.3	85	44	12.0	69	46	11.1

UE	Tratamiento 4			Tratamiento 5			Tratamiento 6		
	Altura (cm)	Diám (cm)	Tallo (mm)	Altura (cm)	Diám (cm)	Tallo (mm)	Altura (cm)	Diám (cm)	Tallo (mm)
1	70	55	10.3	66	44	10.7	64	53	10.3
2	66	46	11.1	74	43	11.7	70	38	9.3
3	70	40	12.0	56	43	10.8	63	49	12.0
4	54	32	11.3	67	35	10.3	79	42	11.5
5	65	55	10.3	64	50	11.3	68	57	11.0
6	64	45	9.4	71	46	11.1	61	36	10.7
7	72	45	10.8	58	53	11.8	73	50	10.7
8	62	40	9.7	82	41	10.2	79	38	10.0
9	89	50	12.0	64	44	11.1	67	38	11.3
10	67	54	12.2	71	45	11.6	70	41	12.2

...continuación cuadro A5.

UE	Tratamiento 7			Tratamiento 8			Tratamiento 9		
	Altura (cm)	Diám (cm)	Tallo (mm)	Altura (cm)	Diám (cm)	Tallo (mm)	Altura (cm)	Diám (cm)	Tallo (mm)
1	65	54	10.2	65	53	10.7	56	38	11.7
2	67	43	12.0	59	46	11.0	81	40	12.2
3	53	37	10.3	55	52	9.2	49	44	12.8
4	62	46	11.0	55	44	12.0	71	39	10.0
5	71	50	10.2	72	42	10.8	63	47	10.7
6	62	56	11.1	62	44	9.4	54	33	9.4
7	72	45	9.2	55	40	11.3	53	38	10.0
8	69	37	10.8	66	46	11.2	55	40	10.3
9	68	50	10.2	71	49	13.0	56	50	10.1
10	65	56	9.9	67	37	10.7	57	43	11.3

Cuadro A6. Rendimiento por tratamiento y unidad experimental.

UE	Tratamiento 1			Tratamiento 2		
	Rendimiento (gr UE ⁻¹)	Número de frutos UE ⁻¹	masa media	Rendimiento (gr UE ⁻¹)	Número de frutos UE ⁻¹	masa media
1	302.0	20	15.1	506.1	15	33.7
2	303.6	9	33.7	394.5	11	35.9
3	491.5	18	27.3	516.1	12	43.0
4	217.8	7	31.1	543.8	20	27.2
5	411.2	22	18.7	536.2	19	28.2
6	685.4	22	31.2	424.2	14	30.3
7	385.9	14	27.6	526.1	18	29.2
8	517.6	23	22.5	280.0	15	18.7
9	727.6	19	38.3	452.2	13	34.8
10	464.7	10	46.5	528.6	16	33.0

...continuación cuadro A6...

UE	Tratamiento 3			Tratamiento 4		
	Rendimiento (gr UE ⁻¹)	Número de frutos UE ⁻¹	masa media	Rendimiento (gr UE ⁻¹)	Número de frutos UE ⁻¹	masa media
1	633.8	21	30.2	731.1	24	30.5
2	314.1	26	12.1	377.9	13	29.1
3	534.2	21	25.4	499.8	19	26.3
4	478.7	12	39.9	645.4	17	38.0
5	539.9	21	25.7	476.2	18	26.5
6	361.6	14	25.8	585.3	20	29.3
7	486.5	14	34.8	514.3	16	32.1
8	648.8	23	28.2	571.0	17	33.6
9	340.9	14	24.4	608.4	21	29.0
10	395.2	20	19.8	395.9	12	33.0

UE	Tratamiento 5			Tratamiento 6		
	Rendimiento (gr UE ⁻¹)	Número de frutos UE ⁻¹	masa media	Rendimiento (gr UE ⁻¹)	Número de frutos UE ⁻¹	masa media
1	311.6	15	20.8	439.3	23	19.1
2	727.5	20	36.4	635.9	23	27.6
3	226.6	15	15.1	591.7	26	22.8
4	410.1	26	15.8	578.8	21	27.6
5	390.8	14	27.9	605.3	20	30.3
6	454.7	15	30.3	395.7	27	14.7
7	284.3	11	25.8	593.5	25	23.7
8	628.7	20	31.4	511.2	16	32.0
9	645.1	17	37.9	603.5	17	35.5
10	410.7	14	29.3	414.5	15	27.6

...continuación cuadro A6...

UE	Tratamiento 7			Tratamiento 8		
	Rendimiento (gr UE ⁻¹)	Número de frutos UE ⁻¹	masa media	Rendimiento (gr UE ⁻¹)	Número de frutos UE ⁻¹	masa media
1	308.0	8	38.5	481.4	20	24.1
2	581.6	17	34.2	349.1	17	20.5
3	468.5	18	26.0	543.8	20	27.2
4	372.5	20	18.6	293.6	15	19.6
5	404.3	25	16.2	607.7	18	33.8
6	359.1	12	29.9	704.1	21	33.5
7	493.6	17	29.0	228.8	15	15.3
8	432.9	15	28.9	347.3	13	26.7
9	269.8	13	20.8	574.8	25	23.0
10	192.1	11	17.5	573.8	17	33.8

Tratamiento 9			
UE	Rendimiento (gr UE ⁻¹)	Número de frutos UE ⁻¹	masa media
1	399.7	29	13.8
2	251.2	20	12.6
3	340.9	23	14.8
4	231.7	21	11.0
5	232.3	19	12.2
6	234.1	15	15.6
7	532.2	16	33.3
8	620.9	25	24.8
9	318.8	13	24.5
10	454.6	18	25.3

Cuadro A7. Contenido de hierro y calcio durante la etapa de producción.

T	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fe (ppm)	78	52	84	79	72	77	91	221	125
Ca (%)	3.88	2.06	3.05	3.12	3.01	2.55	3.19	3.16	2.93

Fuente: Patronato para la Investigación Agrícola del Estado de Coahuila.