

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**



**Estimación del Uso Consuntivo del Cultivo del Tomate  
(*Lycopersicon esculentum* Mill) Bajo Condiciones de Invernadero**

**Por:**

**ABIEL VELÁZQUEZ ROBLERO**

**TESIS**

**Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:  
Ingeniero Agrónomo en Irrigación**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.**

**Diciembre de 2004**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

**Estimación del Uso Consuntivo del Cultivo del Tomate (*Lycopersicon  
esculentum* Mill) Bajo Condiciones de Invernadero**

**TESIS**

**Realizado Por:**

**Abiel Velázquez Roblero**

**Que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito  
parcial para obtener el título de:**

**Ingeniero Agrónomo en Irrigación**

**Aprobada:**

---

**MC. Luis E. Ramírez Ramos**  
**Asesor Principal**

---

**Dr. Juan P. Munguía López**  
**Coasesor**

---

**MC. Lindolfo Rojas Peña**  
**Coasesor**

---

**Ing. Felipe Hernández Castillo**  
**Coasesor**

---

**MC. Luis E. Ramírez Ramos**  
**Coordinador de la División de Ingeniería**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.**

**Diciembre de 2004**

## DEDICATORIA

### A DIOS

*Por todas las bendiciones que me ha dado durante todos los días de mi vida, por darme la dicha y la felicidad de vivir y gozar de todas las maravillas de su obra, por darme fuerzas para salir adelante y superar mis contratiempos, por darme la fortuna de tener unos padres maravillosos y una gran familia.*

***A MIS ABUELOS: Luis (+), Regina (+), Santiago y Maximina (+).***

*Por sus bendiciones, amor y cariño que me tuvieron en todo momento, aunque algunos de ellos ya no los tengo físicamente, sus recuerdos y sus buenos consejos, no han quedado en el olvido. Para ellos con amor.*

***A MIS PADRES: Eliodoro y Francisca.***

*Por darme el mejor de los regalos (la vida) acompañado de amor, ternura y cariño en todo momento, además sus sabios consejos, valores y principios inculcados en mí, para andar el camino más indicado, por enseñarme que jamás es tarde para realizar los sueños anhelados, a ellos que no escatimaron esfuerzo alguno con tal de verme realizar mis sueños, pues siempre añoraron mi presencia en los días en que me mantuve lejos de casa, hoy sus esfuerzos están siendo recompensados. Para ellos con mi más grande amor, admiración y respeto.*

***A MIS HERMANOS DEL ALMA: Eduardo, René, Edgar, Diner, Gilma, Lilia, Carlos y Nelson.***

*Por que fueron parte importante en mi formación como profesional, en ellos nunca faltaron palabras y gestos de ánimo, motivación y esfuerzo con tal de verme lograr esta meta, apoyándome siempre en los momentos más críticos de mi vida. Para todos y cada uno de ellos con mucho amor y cariño.*

***A MIS SOBRINOS: Teresita, Blanqui, Mariela, Geiner, Nayeli, Kevin, María de los Angeles, Roselín, Francisco, Yéssica, Edgar, Guadalupe, Yulissa, Senia Carina, Dinnive Ivonne, Adriana, Luisa, Regina y Cristian Eliodoro.***

*Para todos ellos que son el fruto y la semilla de la familia con mucho cariño.*

***A MIS CUÑADAS Y CUÑADOS: Siria, Bernardita, Jovita, Amparo, Liliana, Isaú y Joel.***

*Que de una o de otra forma fueron parte importante en el logro de mis objetivos, por lo tanto quiero dedicarles con mucho cariño este humilde trabajo.*

***A MI NOVIA: LUZ MARÍA***

*Por el amor, cariño y comprensión que siempre recibí sin esperar nada a cambio, por estar siempre conmigo en los buenos y malos momentos, por darme ánimos para salir adelante le dedico este humilde trabajo pero significativo y esperando que algún día poder corresponderle como se merece, pero de algo que estoy seguro es que nunca voy a olvidarte, ya que tu siempre ocuparás un lugar muy especial en mi corazón.*

## **AGRADECIMIENTO.**

**A MI ALMA MATER**, por recibirme en su seno y cobijarme durante mi carrera, por darme la oportunidad de cultivar mis conocimientos y ser un sueño tan anhelado.

### **A mis asesores:**

**Dr. Juan P. Munguía L.**

**M.C. Luis E. Ramírez R.**

**M.C. Lindolfo Rojas P.**

**Ing. Felipe Hernández Castillo**

Quienes hicieron posible la realización de este trabajo y a quienes les voy a estar siempre agradecido.

**Al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA)**, por permitir la realización de este trabajo de investigación en el departamento de Agroplásticos bajo la asesoría del Dr. Juan P. Munguía L.

**Al Dr. Juan P. Munguía López**, por darme la oportunidad de realizar con él mi trabajo de tesis, por su paciencia en la revisión del mismo, por su confianza y amistad y por sus conocimientos transmitidos durante el trabajo de investigación.

### **A mis padres.**

Por todos sus esfuerzos realizados durante toda mi vida y por su apoyo económico durante mi proceso de formación, por el amor y cariño recibido "gracias", que Dios los bendiga por tener un buen corazón.

### **A mis hermanos.**

Con mucho respeto, por el gran apoyo tanto moral como económico, por los buenos consejos de hermanos deseándome siempre mucho éxito en todo momento y durante mi proceso de formación, encontrando siempre en ellos amor, cariño, comprensión, tolerancia y respeto, aun con los reveses de la vida, haciendo de nuestros momentos de verdadera armonía. Gracias queridos hermanos, son y serán siempre mi orgullo.

### **A mis cuñadas(os).**

Por el apoyo moral en todo momento, motivándome a seguir adelante durante mi proceso de formación.

### **A mi novia**

Si hay una persona que merece todos mis agradecimientos y mis respetos es Luz Ma. Nunca olvidaré lo que has hecho por que me has brindado tu amor y confianza incondicionalmente. Gracias y que Dios siempre esté contigo.

## INDICE DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	v
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>INDICE DE CUADROS</b> .....	ix
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Objetivos</b> .....	4
<b>1.2. Hipótesis</b> .....	4
<b>II. REVISION DE LITERATURA</b> .....	5
2.1. Generalidades del cultivo.....	5
2.1.1. Importancia del tomate.....	5
2.1.2. Descripción botánica.....	6
2.1.3. Clasificación Taxonómica.....	9
2.1.4. Fisiología del tomate.....	10
2.1.5. Agronomía del tomate.....	13
2.1.6. Elección del material vegetal.....	17
2.2. Evapotranspiración.....	18
2.2.1. Evapotranspiración potencial.....	19
2.2.2. Evapotranspiración máxima.....	19
2.2.3. Evapotranspiración real.....	19
2.3. Factores climáticos que influyen en el consumo de agua bajo invernadero.....	20
2.4. Necesidades hídricas.....	22
2.5. Eficiencia en el uso de agua.....	23
2.6. Riegos y fertilizaciones.....	24
2.7. Necesidades de lavado de sales.....	27
2.8. Calendario de riegos en sustratos.....	28
2.9. Programación de riegos en invernadero bajo riego localizado.....	31
2.10. Invernaderos.....	35
2.10.1. Tipos de invernaderos.....	35
2.11. Hidroponía.....	35
2.12. Los sustratos hortícolas.....	36
2.12.1. Clasificación de los sustratos.....	37
2.12.2. Propiedades físicas de los sustratos.....	37
2.12.3. Propiedades químicas de los sustratos.....	40
2.12.4. Otras propiedades.....	43
2.13. Métodos para estimar la evapotranspiración.....	44
2.13.1. Métodos directos.....	44
2.13.1.1. Lisímetros de pesada.....	44
2.13.1.2. Método de Time Domain Reflectometry (TDR).....	45
2.13.1.3. Método de la bandeja de drenaje.....	46
2.13.1.3.1. Medición del consumo de agua por las plantas.....	46
2.13.1.3.2. Método de la bandeja a la demanda.....	48
2.13.2. Métodos indirectos.....	49
2.13.2.1. Métodos climatológicos.....	49

1.13.2.1.1. Método del tanque evaporímetro tipo "A".....	49
1.13.2.1.2. Método de Penman-Monteith.....	55
1.13.2.1.2.1. Consideraciones adicionales.....	56
2.13.2.2. Métodos micrometeorológicos.....	57
2.13.2.2.1. Método de la relación de Bowen.....	58
2.14. Trabajos realizados sobre evapotranspiración en invernadero.....	61
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>65</b>
3.1. Descripción del sitio experimental.....	65
3.1.1. Localización.....	65
3.1.2. Clima.....	65
3.2. Material vegetativo.....	66
3.3. Establecimiento del experimento.....	66
3.3.1. Preparación del invernadero.....	67
3.4. Siembra.....	68
3.5. Transplante.....	68
3.6. Fertilización.....	69
3.7. Riego.....	69
3.8. Labores culturales.....	69
3.8.1. Entutorado para el manejo del cultivo a dos tallos y a un tallo.....	69
3.8.2. Poda de tallos o brotes.....	70
3.8.3. Poda de hojas.....	70
3.8.4. Poda de frutos.....	71
3.9. Control de plagas y enfermedades.....	71
3.10. Consideraciones estadísticas.....	72
3.11. Materiales utilizados.....	72
3.11.1. Método del tanque evaporímetro tipo "A".....	72
3.11.1.1. Descripción del tanque evaporímetro.....	72
3.11.2. Método de la bandeja de drenaje.....	73
3.11.2.1. Descripción del uso de la bandeja.....	73
3.12. Metodología en la toma de datos.....	74
3.12.1. Tanque evaporímetro.....	74
3.12.2. Bandeja de drenaje.....	75
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>98</b>
<b>VI. RESUMEN.....</b>	<b>100</b>
<b>VII. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>101</b>

## INDICE DE FIGURAS

		<b>Pág.</b>
Figura 3.1	Representación del invernadero.....	68
Figura 3.2	Tanque evaporímetro tipo “A” del CIQA.....	73
Figura 3.3	Los componentes de la bandeja de drenaje.....	74
Figura 4.1	Correlación de la $E_{p_{ca}}$ contra la $E_{p_{inv}}$ .....	77
Figura 4.2	Correlación de la $ET_{p_{ca}}$ contra la $ET_{p_{inv}}$ .....	78
Figura 4.3	Curva de $K_c$ obtenido por la metodología del TTA para el cultivo del tomate.....	79
Figura 4.4	Curva de $K_c$ obtenido por la metodología de la FAO para el cultivo del tomate.....	80
Figura 4.5	Curva de $K_{cr}$ para el manejo del cultivo del tomate a 2T y utilizando una $ET_{p_{ca}}$ .....	81
Figura 4.6	Curva de $K_{cr}$ para el manejo del cultivo del tomate a 1T y utilizando una $ET_{p_{ca}}$ .....	82
Figura 4.7	Curva de $K_{cr}$ para el manejo del cultivo del tomate a 2T y utilizando una $ET_{p_{inv}}$ .....	83
Figura 4.8	Curva de $K_{cr}$ para el manejo del cultivo del tomate a 1T y utilizando $ET_{p_{inv}}$ .....	84
Figura 4.9	Correlación de la $ET_{r_{ca}}$ del tanque evaporímetro contra la $ET_{r_{inv}}$ en el cultivo del tomate con $K_c$ obtenidos de la metodología del TTA.....	86
Figura 4.10	Correlación de la $ET_{r_{ca}}$ del tanque evaporímetro contra la $ET_{r_{inv}}$ en el cultivo del tomate con $K_c$ obtenidos de la metodología de la FAO.....	87
Figura 4.11	Correlación de la $ET_{r_{ca}}$ del método del tanque evaporímetro utilizando los $K_c$ obtenidos de la metodología del TTA contra la $ET_r$ del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.....	88
Figura 4.12	Correlación de la $ET_{r_{ca}}$ del método del tanque evaporímetro utilizando los $K_c$ obtenidos de la metodología del TTA contra la $ET_r$ del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.....	89
Figura 4.13	Correlación de la $ET_{r_{inv}}$ del método del tanque evaporímetro utilizando los $K_c$ obtenidos de la metodología del TTA contra la $ET_r$ del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.....	90
Figura 4.14	Correlación de la $ET_{r_{inv}}$ del método del tanque evaporímetro utilizando los $K_c$ obtenidos de la metodología del TTA contra la $ET_r$ del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.....	91
Figura 4.15	Correlación de la $ET_{r_{ca}}$ del método del tanque evaporímetro utilizando los $K_c$ obtenidos de la metodología de la FAO contra la $ET_r$ del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.....	92

Figura 4.16	Correlación de la $ET_{r_{ca}}$ del método del tanque evaporímetro utilizando los $K_c$ obtenidos de la metodología de la FAO contra la $ET_r$ del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.....	93
Figura 4.17	Correlación de la $ET_{r_{inv}}$ del método del tanque evaporímetro utilizando los $K_c$ obtenidos de la metodología de la FAO contra la $ET_r$ del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.....	94
Figura 4.18	Correlación de la $ET_{r_{inv}}$ del método del tanque evaporímetro utilizando los $K_c$ obtenidos de la metodología de la FAO contra la $ET_r$ del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.....	95
Figura 4.19	Consumo de agua del cultivo del tomate a 2T bajo condiciones de invernadero.....	95
Figura 4.20	Consumo de agua del cultivo del tomate a 1T bajo condiciones de invernadero.....	96
Figura 4.21	Rendimiento del cultivo del tomate a 2T bajo condiciones de invernadero.....	96
Figura 4.22	Rendimiento del cultivo del tomate a 1T bajo condiciones de invernadero.....	97

**ÍNDICE DE CUADROS**

	<b>Pág.</b>
Cuadro 2.1 Coeficientes de cultivo para los distintos estados fenológicos del cultivo del tomate bajo invernadero.....	52
Cuadro 2.2 Valores de temperatura base, óptima y umbral superior para cada cultivo.....	53
Cuadro 3.1 Fertilización para el cultivo del tomate.....	69

## VI. RESUMEN

Se realizó una investigación para estimar el uso consuntivo del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero y en semihidroponía, la investigación tuvo lugar en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) con coordenadas de 25° 27' lat. Nte., 25° 27' long. Oeste y a una altura de 1610 msnm, durante el ciclo de primavera-verano de 2004. El experimento consistió en comparar la ETr por medio del método del tanque evaporímetro tipo "A"; que para su determinación se usaron diferentes Kc determinados por la metodología del TTA y por la metodología de la FAO contra el método de la bandeja de drenaje, para el análisis de los resultados se hizo estas comparaciones se hicieron para el manejo del cultivo a dos tallos y a un tallo. Los resultados indicaron que cuando el cultivo se maneja a dos tallos los valores de Kcr aumentan con respecto a los valores de Kcr para el manejo del cultivo a un tallo.

## I. INTRODUCCIÓN

El concepto de agricultura ha sido tradicionalmente entendido como propio de actividades muy dependientes del medio físico natural. No debe, pues, extrañar que la prosperidad agrícola de una zona fuera concebida como algo consustancial con circunstancias favorables de suelo, clima y agua. La condición desfavorable de alguno de estos factores limitaría el potencial de diversas prácticas agrarias, hasta el punto de que estas lleguen a perder su interés económico. Es por eso que en las últimas décadas hemos visto que la superficie cubierta con invernaderos ha venido creciendo día con día debido a la posibilidad de controlar artificialmente el ambiente y proporcionar condiciones adecuadas para el óptimo desarrollo de los cultivos, normalmente de alto valor en el mercado, con su consecuente aumento en producción. Holanda es la referencia obligada en el desarrollo de la agricultura controlada en donde se han logrado producciones de tomate de hasta 60 Kg. m<sup>-2</sup> por año o 100 Kg. m<sup>-2</sup> por año de pepino, son una muestra de la capacidad real de la agricultura moderna.

La reconversión productiva de varias zonas de riego ha considerado la producción de hortalizas en invernaderos como una alternativa productiva ante la escasez e incertidumbre de los recursos hidráulicos. El invernadero genera un microclima diferente al del exterior al reducir la radiación solar, el déficit de presión de vapor, la evaporación y anular la velocidad del viento. La consecuencia es que la demanda evaporativa del invernadero se reduce. En algunos casos la reducción es de un 50 por ciento de la evapotranspiración en invernadero con respecto a la evapotranspiración exterior.

Con el crecimiento de la industria hortícola bajo condiciones protegidas se han ido perfeccionando los sistemas de producción y uno de los cambios que se ha venido dando es el paso gradual del cultivo en suelo al sistema de cultivo sin suelo o en sustratos. Los cultivos sin suelo se pueden clasificar en cultivos hidropónicos puros (en solución nutritiva con un sistema de oxigenación) y cultivos en sustrato (Urrestarazu, 2000).

El término sustrato en la agricultura se aplica a todo material sólido, que colocado en un contenedor o bolsa, en forma pura o mezclada, permite el desarrollo del sistema radical y el crecimiento del cultivo (Abad y Noguera, 1998). Las razones que pesan para este camino son: manejo más controlado de la nutrición del cultivo, al evitar las interacciones entre elementos en el suelo, se evita el contacto con patógenos del suelo, reduciendo el impacto de estos en la sanidad de la planta y se puede aprovechar cualquier tipo de terreno razonablemente plano, independientemente de la fertilidad del suelo o de otras limitantes como salinidad o presencia de fases líticas o pedregosas del mismo.

El cultivo de tomate en condiciones de sustratos y alta tecnología bajo invernadero es capaz de producir frutos de excelente calidad en más de 500 ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, producción que decrece a 300 ton ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> cuando se usa un nivel tecnológico medio. El tomate producido bajo condiciones de invernadero cumple con los estándares de calidad e inocuidad alimentaria que exigen los mercados internacionales. Con la entrada del tratado de libre comercio (TLC), Estados Unidos y Canadá, en la ventana comercial de invierno, ofrecen un mercado de consumo de 2.2 millones de toneladas de tomate fresco, para un consumo per cápita anual de 8.7 Kg en Estados Unidos.

Los requerimientos hídricos de los cultivos al interior de un invernadero distan mucho de los existentes a campo abierto y para la estimación de los mismos existe muy poca información en relación a los métodos más apropiados.

El manejo del riego en el invernadero es una de las actividades más importantes para conseguir altos rendimientos, pero sobre todo alta calidad del producto. Esta actividad adquiere una mayor relevancia debido a que el uso de sustratos es muy común en los invernaderos y la cantidad de agua que estos pueden almacenar es muy reducida. En tales condiciones se hace necesario suministrar láminas de riego muy pequeñas y muy frecuentes, aplicadas con mucha precisión. Por otro lado la dinámica de la evapotranspiración en el invernadero está sujeta a cambios de corto plazo en el clima, por ejemplo, un día

nublado hará que la demanda de evapotranspiración sea menor y si esto no se maneja adecuadamente, reduciendo el suministro de agua, sino que se sigue suministrando la misma cantidad, entonces la planta recibe agua en exceso. Si el evento de clima nublado dura varios días y no se modifica el programa de riegos, puede haber efectos negativos sobre la planta y la calidad del fruto.

El término de evapotranspiración se usa para indicar la cantidad de agua que consume el cultivo e incluye el agua que se evapora del suelo o del sustrato, más la que transpira el cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1990). En los invernaderos, la cantidad de agua que se evapora de la superficie del suelo o del sustrato es muy pequeña, prácticamente toda el agua que se pierde ocurre a través de la transpiración. La evapotranspiración se modifica debido al efecto de los elementos del clima, a las características de la planta, al tipo del suelo, y a las prácticas culturales, pero, el clima y la misma planta tienen mayor influencia sobre la evapotranspiración.

La evapotranspiración o necesidad de agua del cultivo se puede calcular a través de diferentes métodos directos e indirectos. Los métodos directos son los que proporcionan el consumo de agua instantáneo, es decir en forma directa (Baille et al., 1992; Salas y Urrestarazu, 2000). Los métodos indirectos son los que se basan en variables de clima (temperatura, radiación solar, humedad del aire, velocidad del viento, etc.) y variables de la misma planta para estimar el consumo de agua del cultivo. Ambos son usados en invernadero, pues tienen ventajas que deben de ser aprovechadas.

El estudio de los procesos de la evapotranspiración ayuda a modelar, predecir e incrementar los rendimientos de los cultivos. El cálculo de la evapotranspiración, resulta ser el primer paso para establecer las necesidades de riego de los cultivos.

Las estimaciones de la evapotranspiración son frecuentemente requeridas en aquellas áreas en donde no existen estudios previos, o en áreas grandemente

aisladas de aquellas en donde se dispone de inmediato. Los procedimientos usados a la fecha están generalmente basados en la correlación de las mediciones de la evapotranspiración (generalmente usando lisímetros) con uno o más factores climatológicos.

Para estimar la evapotranspiración que ocurre en el campo, el consumo de agua de algún cultivo de referencia es considerado sin que este tenga limitaciones de humedad. Este estimado aísla los factores climatológicos de todos los demás factores que afectan la evapotranspiración.

En nuestros días existe una considerable cantidad de métodos para estimar la evapotranspiración potencial usando datos climatológicos, siendo el más comúnmente usado el método de Penman-Monteith (1948). También es apropiado mencionar el método del tanque evaporímetro tipo "A" el cual ha sido también frecuentemente usados para estimar la evapotranspiración potencial.

La confiabilidad de los modelos de evapotranspiración es mejorada considerablemente al incorporar coeficientes regionales, asimismo; para evaluar la certidumbre y congruencia de un modelo es preciso compararlo con métodos más exactos y en relación con mediciones realizados en campo a fin de determinar el nivel de ajuste requerido. En atención a todo lo anterior se plantea para el siguiente trabajo lo siguiente:

### **1.1. Objetivos**

Determinar el método más exacto para estimar la evapotranspiración en el cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero en sustrato.

### **1.2. Hipótesis**

Todos los métodos tienen la misma capacidad para predecir la evapotranspiración con el mismo grado de precisión.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Generalidades del cultivo**

#### **2.1.1. Importancia del tomate**

El tomate es un fruto con alto valor comercial y con una enorme importancia mundial. La aceptación general del fruto en la alimentación es debido a su utilización en forma muy variada. Además, de sus excelentes cualidades organolépticas, alto valor nutricional y en contenido de licopeno y vitamina C. estos últimos considerados como antioxidantes han demostrado estar inversamente relacionados con el desarrollo de cierto tipo de cánceres. En algunos lugares como Europa, las proposiciones que motivan más el consumo de frutas frescas son por consejo médico, mejor sabor y que no sean tratadas industrialmente, aspectos que convergen en una mejor fuente de salud y placer de degustación. Respecto a lo anterior es importante mencionar que los frutos de tomate comparándolo con otros vegetales son menos perecederos y más resistentes a daños por transporte (Villareal, 1980).

Por otro lado el cultivo del tomate en México se encuentra dentro de las primeras cuatro hortalizas más importantes, debido a la superficie cultivada tanto

en campo abierto como en invernaderos y a las divisas que genera por concepto de las exportaciones principalmente a los estados unidos (SAGARPA, 2002).

En la actualidad se estima que la superficie de invernaderos, incluidas las casas sombras en México, son del orden de 1200 hectáreas (Urrutia, 2002). Siendo los principales estados productores de hortalizas en invernadero: Jalisco (262 ha), Sinaloa (249 ha), Baja California Sur (206 ha), Baja California Norte (125 ha), Colima (80 ha) y Sonora (44 ha).

Por otro lado el principal cultivo que se dedica a la producción en invernadero es el tomate en sus diferentes tipos, con el 73 por ciento de la superficie, seguido de pimiento y pepino con un 11 por ciento cada uno de ellos.

Cook (2003) menciona que el volumen de las importaciones de tomate en Estados Unidos se ubica en las 860, 000 ton, de las cuales un promedio de 600, 000 toneladas se importan de México y el resto de Canadá, Unión Europea, Marruecos e Israel. Es decir que si consideramos el consumo neto de tomate fresco en Estados Unidos asciende a 2.35 millones de toneladas, entonces de cada cuatro tomates que se consumen en fresco en ese país, uno procede de México. Con este antecedente podemos inferir que si desarrollamos adecuadamente esta industria en México, y aprovechamos la cercanía a este mercado, podemos desplazar una proporción aún mayor de esta hortaliza y compensar así por las pérdidas que hemos tenido en la balanza comercial de granos.

En cuanto a la demanda de tomate de invernadero en el mercado de Estados Unidos, esta ha tenido un crecimiento sin precedentes en los últimos años, pues la importación creció de 19,000 toneladas en 1994 a 180,000 toneladas en el año 2000, es decir un incremento de casi 10 veces en solo seis años. En cuanto al origen de este volumen de importación 101,000 toneladas proceden de Canadá, 44,000 toneladas proceden de México, 35,000 toneladas de la Unión Europea y el resto de países como Marruecos e Israel (Cook, 2003).

### **2.1.2. Descripción botánica**

El tomate, es una solanácea originaria de la región andina en Sudamérica (Perú, Chile, Ecuador, Colombia y Bolivia). Las plantas de tomate en invernadero requieren de mucho manejo, por ello es importante conocer su morfología. A continuación se describen brevemente los órganos de la planta (Marín, 2001).

## **Raíz**

El sistema radical del tomate consta de una raíz principal y gran cantidad de ramificaciones secundarias. En los primeros 20 cm de la capa del suelo se concentra el 70 por ciento de la biomasa radical. No obstante, bajo condiciones de cultivo sin suelo se le confina en contenedores de diferente volumen, geometría y disposición. Usualmente se utilizan un volumen de 5 a 10 litros por planta. Los sacos de cultivo de perlita y fibra de coco con un volumen de 30 litros son compartidos por 5 ó 6 plantas, lo mismo ocurre con las tablas de lana de roca. La fibra de coco, en general confiere a las plantas gran ramificación de raíces y vigor a la planta por lo que hay que tener cuidado en variedades vigorosas. Las raíces en cultivos en sustratos, prácticamente carecen de pelos absorbentes y las raíces tienden a ser más gruesas y gran parte de estas se concentran en torno a la salida del emisor y en la parte baja de los contenedores (Nuez, 1999).

## **Tallo**

La planta de tomate es herbácea, perenne y relativamente de vida corta, cultivada como anual, es ramificada de tallos sarmentosos pubescentes en toda su superficie, semileñosos sin dominancia apical, con crecimiento indeterminado o determinado por un racimo floral, predominado el primero. El tallo es el eje sobre el cual se desarrollan las hojas, flores y frutos, por ello es importante vigilar su vigor y sanidad; el diámetro puede ser de 2 a 4 cm y el porte puede ser de crecimiento determinado (tallos que al llegar a cierto número de ramilletes detienen su crecimiento) e indeterminado (tallos que no detienen su crecimiento) (Marín, 2001).

En las axilas de las hojas del tallo principal surgen los tallos secundarios que son eliminados mediante poda para una buena conformación de la planta. El

desbrote debe ser oportuno, cuando los brotes desarrollen unos 5 cm, de esta manera las cicatrices son pequeñas y con ello un menor riesgo de enfermedades. Por cuestiones hormonales en la planta, el brote inmediato inferior al racimo es más vigoroso, y por ello hay que vigilar que su desbrote sea oportuno (Muñoz, 2003).

## **Hojas**

Las hojas son sencillas, pecioladas de limbo muy hendido, parecen compuestas sin serlo, foliolos lobulados, ovales y acuminados, con bordes dentados, de color verde intenso en el haz y verde claro en el envés. Sobre el tallo las hojas surgen de modo alterno. Al igual que el tallo, también están recubiertas de pelos glandulares. Normalmente aparecen tres hojas por simpodio, es decir entre ramilletes. Las hojas son las responsables de la fotosíntesis por lo que deben tener una buena disposición para una mayor interceptación de la radiación. Por ello es importante que el emparrillado para entutorado, quede simétricamente establecido y además para que no interfiera con las labores de manejo del cultivo (Wien, 1997).

## **Flores**

Las flores aparecen en racimos, siendo sencillas en la parte baja y después más divididos y ramificados. Las flores son pequeñas, pedunculadas de color amarillo, formando corimbos axilares; el cáliz tiene 5 pétalos, corola soldada inferiormente, con 5 pétalos que conforman un tubo pequeño, los 5 estambres están soldados en estilo único que a veces sobresale de los estambres, el ovario contiene muchos óvulos (Nuez, 1999).

El número de flores depende del tipo de tomate. En tomate de grueso calibre el ramillete tiene de 4 a 6 flores; en tomate de calibre mediano aumenta de

10 a 12 flores por ramillete y en los tomates tipo cereza o “cherry” no es extraño que se desarrollen hasta 100 flores por racimo. Hoy en día, hay una tendencia a comercializar los frutos en ramilletes. Ejemplo de ello son las variedades Pitensa, Durinta y otras, donde la estructura del ramillete y la disposición de las flores son perfectas. En estos casos la poda de frutos juega un papel importante, dejando únicamente de 5 ó 6 frutos por ramillete (Marín, 2001).

## **Semillas**

La semilla del tomate es de forma lenticular con dimensiones aproximadas de 5x4x2 mm y está constituida por el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal. El embrión lo forman una yema apical, dos cotiledones, el hipocotilo y la radícula. La testa o cubierta seminal es de un tejido duro e impermeable. La germinación de las semillas ocurre de manera relativamente fácil (Escudero, 1999).

## **Frutos**

Los frutos de tomate son vayas carnosas con diferencias en forma (lisos, asurcado, aperado, etc.) e intensidad de coloración rojiza o amarillo en caso de ciertas variedades de tomate cherry, con cavidades o lóculos internos variables, en donde se desarrollan las semillas de forma reniforme y aplanadas (Sánchez, 2002).

### **2.1.3. Clasificación taxonómica**

Siguiendo a Altunziker (1979) nos dice que la taxonomía generalmente aceptada es como se describe a continuación.

Reino	Vegetal
División	<i>Tracheophyta</i>
Subdivisión	<i>Pteropsidae</i>
Clase	<i>Dicotyledoneas</i>
Orden	<i>Solanales (Personatae)</i>
Familia	<i>Solanaceae</i>
Sub-familia	<i>Solanoideae</i>
Tribu	<i>Solaneae</i>
Género	<i>Lycopersicon</i>
Especie	<i>esculentum</i> Mill
Nombre Común	Tomate o jitomate

Se divide en dos subgéneros:

Eulycopersicon (frutos rojos y amarillos)

1. - *L. esculentum*

2.- *L. pimpinellifolium*

Eriopersicon (frutos verdes)

1. - *L. peruvianum*

2. - *L. chilense*

3. - *L. glandulosum*

4. - *L. hirsutum*

#### **2.1.4. Fisiología del tomate**

Según Muñoz (2003) la productividad de los cultivos de tomate en cierto grado suelen estar limitada por luz, temperatura, nutrición y abastecimiento de agua. A gran escala, la importancia relativa de estos factores depende de la latitud y a nivel región o área depende de la fisiografía y condiciones ambientales

particulares del lugar. Así, los cultivos de invierno en invernaderos con calefacción, como los utilizados por los productores del norte de Europa y Norteamérica, la luz viene siendo el factor limitante. En cambio, en cultivos en invernaderos sin calefacción como en los que cultivan los productores del sur de Europa y Medio Oriente, la luz y la temperatura, ambos vienen siendo limitantes. Esto también ocurre en México, Sobre todo en la región del Altiplano Norte Centro, donde no es posible producir tomate de calidad durante el invierno, sin el apoyo de calefacción. La producción de cultivos en casa sombra (Net house) o Bioespacios (Bustamante,1997), con gran auge en el Noroeste del país (Sinaloa, Sonora y Baja California), cuyo principio fundamental a diferencia de los invernaderos, es el de reducir la temperatura y funcionar de barrera para los insectos, lo cual ha derivado a dicho concepto, que conjunta a prácticas agronómicas y la modificación microambiental, en zonas con alta irradianza y temperatura y baja humedad relativa para favorecer el crecimiento y desarrollo de las plantas (particularmente hortalizas de fruto).

En condiciones de campo y bioespacios, las temperaturas (demasiado altas y bajas); luz (días cortos y nublados, denso dosel); agua; nutrición o falta de protección de malezas, plagas y enfermedades, todas en conjunto o de manera particular pueden ser limitantes. No obstante, el manejo del agua y nutrición (fertirrigación) viene a ser uno de los impedimentos más importantes para alcanzar elevados rendimientos de tomate de calidad.

## **Luz**

La calidad de la luz y el fotoperiodo no son tan importantes para el crecimiento del tomate como la radiación integral diaria. Tratar de superar las limitaciones de luz a nivel comercial, económicamente rara vez se justifica. Por lo que generalmente es mejor maximizar la iluminación natural poniendo especial atención en el material y limpieza de la cubierta de los invernaderos, un diseño

cuidadoso y óptima orientación invernal del invernadero y del cultivo dentro de este (González, 1996).

## **Temperatura**

Muñoz (2003) menciona que el óptimo término para el desarrollo del tomate es de 23 a 25 °C y de 15 a 17 °C, durante el día y la noche respectivamente y una humedad relativa del 70 por ciento. Las temperaturas por debajo de 8 °C y por encima de 30 °C, alternan el desarrollo (deficiente fructificación por deficiencias en el desarrollo de los frutos) del tomate y a 0 °C se hiela. Altas temperaturas, por encima de los 30 °C y largos periodos, agobian las plantas y ocasionan desordenes fisiológicos en el fruto como pudrición apical o Blosson End Rot (BER) (Garzon, 1987; Muñoz, 2003).

## **Desarrollo vegetativo**

En un sentido estricto la fase vegetativa, es relativamente corta, ya que la transición floral ocurre en la mayoría de las variedades cuando la tercera hoja es expandida, aproximadamente tres semanas después de la expansión de las hojas de los cotiledones. Usualmente solo 6 ó 11 hojas son producidas por debajo de la primera inflorescencia. Si se han producido pocas hojas antes del inicio de la floración, el abastecimiento de fotoasimiladores puede ser insuficiente para soportar las flores y el desarrollo de los primeros frutos (Cárdenas, 1999).

En tomates de crecimiento indeterminado, el crecimiento vegetativo y desarrollo reproductivo se acompañan una a otra (concomitancia) durante la mayor parte de la vida de la planta. Una fuerte competencia entre el desarrollo de las hojas y el meristemo apical ambas influyen y condicionan la precocidad de la cosecha y el rendimiento total. Una alta disponibilidad de asimilados en condiciones altas de luminosidad, ambas estimulan la actividad del meristemo y el crecimiento foliar. Pero cuando las plantas están limitadas en fotoasimilados (bajo

altas temperaturas o baja luminosidad) el crecimiento de las hojas jóvenes es favorecido a expensas del desarrollo apical. Este efecto es contrarrestado con la continua remoción de hojas jóvenes o poda temprana de hojas. Mediante el manejo hay que alcanzar un equilibrio entre la fase vegetativa y reproductiva (Muñoz, 2003).

### **Fructificación**

La inflorescencia del tomate es un corimbo iniciado por el meristemo apical y consiste en un eje principal sosteniendo la flor lateral sin brácteas (sin hojas en el pedúnculo) (Kinet y Peet, 1997).

Si las condiciones ambientales por temperatura y humedad no son ideales, lo cual puede llegar a ocurrir en invierno. En tal caso, el cuaje de frutos se recurre al empleo de hormonas del grupo de las auxinas (4 CPA, ANA, MCPA). En caso de que no sea así, se emplean métodos auxiliares para remover los ramilletes florales mediante vibradores, turbinas de aire o con abejorros (*Bombus sp.*) de preferencia, los cuales han tenido buen rendimiento y evitan el uso de hormonas (Muñoz, 2003).

Desde la fecundación del ovario hasta la maduración del fruto transcurren de 7 a 9 semanas, depende de la variedad y de las condiciones ambientales. La división celular ocurre en las dos o tres primeras semanas, en las posteriores semanas se produce el máximo desarrollo causando el crecimiento celular. En este periodo es cuando puede ocurrir la deficiencia puntual de calcio, ocasionando la fisiopatía de podredumbre apical. También, es cuando se llega a producir el “russeting”, el cual es visible en las últimas semanas de maduración. En las últimas dos semanas el crecimiento es lento y se producen los cambios metabólicos de la maduración. Los frutos en este periodo ya han escapado al daño por BER, ahora se enfrentan a otros daños como rajado de frutos (Adams, 1993).

### **2.1.5. Agronomía del tomate**

#### **Transplante**

Hernández (1999) menciona que el transplante es el paso de la planta desde el semillero al asiento definitivo del cultivo. El riego por goteo estará colocado según el marco, la densidad y la orientación de la plantación. En el cultivo en suelo, previo al transplante se da un riego a capacidad de campo para desplazar las sales y bajar la conductividad eléctrica (CE), la cual debe ser menor que la CE del sustrato de transplante. Posteriormente se abren los hoyos y se depositan y se fijan las plantas, debe haber un buen contacto entre el suelo y el cepellón de la plántula. Posteriormente se da un riego de asiento para asegurar un buen contacto entre la humedad del suelo y el cepellón. Puede ayudar, la aplicación de un enraizante y algún fungicida contra hongos de raíz – cuello. Si la plantación es en verano, a la hora de regar debe ser cuando aún el agua en las líneas regantes no esté caliente, por lo que el riego es más propicio durante las primeras o últimas horas del día (Nuez, 1999).

#### **Entutorado**

En consecuencia con el crecimiento de los tallos, estos se van guiando con un hilo de rafia. La rafia debe ser especial para utilizarse en invernadero, esta se enrolla en gancho que existe para tal fin. La longitud de la rafia, varía dependiendo de la altura del emparrillado para tutoreo, de la longitud de entrenudos de la variedad. Los tomates Cherry desarrollan tallos ligeramente más delgados y mucho más largos (González, 1999). Para las condiciones de El Bajío, en Guanajuato, con una altura de emparrillado a 4.5 m, y 10 meses de cultivo de tomate bola (variedad Gironda) se requiere una longitud de 11 m (Muñoz, 2003).

Cuando las plantas desarrollan una altura de 10 a 20 cm se atan a la rafia. Es fundamental hacerlo con oportunidad, antes que las plantas se vuelquen. La rafia se sujeta al tallo, ya sea mediante un nudo o un clip (anillo) desarrollado expresamente para este fin. Al anudar la rafia al tallo, el ojal debe quedar holgado, para no estrangular el tallo. Conforme se va desarrollando el tallo, este se va liando con la rafia o bien mediante clips, todo depende del costo de los mismos, cuando se hace con estos, la tarea es más ágil y se reduce el tiempo invertido en esta labor. Si este es el caso, con 4 a 8 anillos por planta son suficientes, siempre y cuando se vayan desplazando los que van quedando por debajo de los ramilletes cosechados hacia la parte de crecimiento de la planta. Lo anterior, se define en función del costo que represente (Escudero, 1999).

Normalmente el tutoreo se hace cada ocho días, pero varía conforme va apareciendo un ramillete. Acortándose el tiempo en verano y alargándose en invierno. Cuando las plantas han alcanzado una altura de 2 a 2.5 m, se proceden a descolgar de manera progresiva y no de manera súbita. El descuelgue consiste en desenrollar la rafia 1 ó 2 vueltas. Esta operación tiene que ser oportuna, un retraso en el mismo aumenta el riesgo de daño en los brotes (Escudero, 1999; Muñoz, 2003).

### **Poda de tallos y hojas**

La poda es una práctica obligada en variedades de tomate de crecimiento indeterminado. Cuando se dejan los tallos por planta, puede ser desde el semillero, despuntando el tallo principal por encima de las hojas de los cotiledones, para que de las axilas de estas salgan los brotes que serán los tallos principales. De lo contrario, se deja el brote inmediato inferior del primer ramillete, estos brotes tienen un mayor vigor, por lo que se deben utilizar para generar un nuevo tallo en caso de que una planta vecina haya fallado, para este fin y otros se pueden manipular y sacar ventaja de ellos. No obstante, si no se podan

oportunamente el desbrote a destiempo se convierte en bajas en el rendimiento (Cárdenas, 1999).

En la poda de las hojas, se van eliminando todas aquellas inferiores senescentes por debajo del último racimo que va madurando o pintando color. El corte de la hoja debe ser limpio y al ras del tallo principal para evitar entrada de patógenos (*Botrytis*). Evitar la poda severa de hojas. Es importante supervisar la buena ejecución de estas tareas. La poda de hojas debe ser equilibrada, también esta practica es útil para evitar el rajado de frutos en ciertas variedades (Garzón, et al., 2003).

Escudero, (1993) con el deshojado se consigue una mayor ventilación y mejora el color de los frutos. Cuando las plantas han adquirido un exceso de vigor (hojas muy grandes y tallos muy gruesos) es recomendable entresacar las hojas. El deshojado se hace periódicamente no quitando más de dos o tres hojas en cada planta en una sola vez, para no estresar la planta en su balance hídrico y energético.

### **Poda de frutos**

El número de frutos por ramillete incide sobre el tamaño final de los mismos (Escudero, 1993). Las inflorescencias con gran número de flores es necesario despuntarlos, para que los frutos desarrollen buen tamaño y también para evitar que se desprenda el ramillete. La poda de frutos debe ser tan oportuna como sea posible, poco después de que los frutos han sido cuajados. Se eliminan todos aquellos mal formados, así como los que relativamente llevan un retraso significativo con respecto al resto. En las variedades para ramos solo se dejan de 5 a 6 frutos por ramo. En variedades como Gironda con el fin de estimar la cosecha para la exportación se recomienda dejar tres frutos por ramillete para obtener buenos calibres de fruta, con mejor precio en el mercado. Esto hace que

se disminuya ligeramente el rendimiento, pero se recupera con el pago de mejores precios por la fruta.

## **Polinización**

Para el cuajado de los frutos se utilizan varias técnicas: mecánico, mediante insectos o con fitorreguladores (Escudero, 1993; Muñoz, 2003).

La polinización a través de medios mecánicos es eficiente, siempre y cuando las condiciones de humedad relativa y temperatura sean favorables, cuando haya un mayor desprendimiento del polen de la flor. El movimiento de las inflorescencias puede ser con métodos variados, pero el que se ha impuesto es el movimiento de la planta con un chorro de aire con máquinas de mochila, o con golpes vibrantes al emparrillado del entutorado (González, 1996).

González (1996) y Muñoz (2003) mencionan que el uso de insectos básicamente concierne a la polinización con abejorros (*Bombus terrestres*), es el que por su rusticidad se ha impuesto. El abejorro visita las flores en busca de polen como fuente de proteína para alimentar las larvas de la colonia. Visita entre 6 y 10 flores por minuto, de manera que una colmena llega a polinizar entre 20 y 50 mil flores diariamente. La vida útil de la colmena va de 5 a 8 semanas, dependiendo de las condiciones ambientales, siendo el invierno el que más las castiga. La evolución de la colmena es de carácter exponencial por lo que se debe programar la incorporación de colmenas para sostener una población. Los abejorros dejan unas marcas de color naranja en las flores visitadas (Escudero, 1993).

### **2.1.6. Elección del Material Vegetal**

La producción final del cultivo tiene mucho que ver con la decisión que se haya tomado a la hora de elegir el material, aspecto que es de gran trascendencia. En primer lugar, la variedad tiene que ser del tipo de tomate que demande el mercado y buen comportamiento en vida de anaquel. Además, debe ser productiva tanto cuantitativa como cualitativamente las condiciones de clima, suelo, sistema de cultivo e infraestructura y medios de que se dispongan (Muñoz, 2003).

Cook (2003) menciona que en México, el 80 por ciento de la producción de tomate se destina al consumo interno y principalmente los tomates son del tipo Saladette. Mientras que para exportación, los tomates “bola” o tipo Beef (grandes y carnosos) son los que demanda el consumidor norteamericano. Independientemente del mercado de destino, los frutos de la variedad a plantar deben tener buena conservación, característica que influye en una mejor comercialización y venta posterior.

El mercado de destino como el precio de venta, influyen en la fecha de plantación y por ende en las condiciones ambientales en que se cultive la variedad (Cook, 2003). Si el tomate es para consumo nacional las plantaciones en invernadero se deben hacer a partir de mediados de febrero. Estas plantaciones escapan en gran parte a la calefacción requerida en enero y parte de febrero, son el consecuente ahorro de energía y por ende menor costo de producción. En cambio, si el tomate es para exportación, las plantaciones deben ser al inicio del verano. También, a la hora de elegir la variedad se deben tener en cuenta las condiciones ambientales, las cuales vienen determinadas por la fecha de transplante, la infraestructura instalada, características físico-químicas y patológicas del suelo, calidad del agua. Como regla, a la hora de elegir la variedad debe predominar el factor más limitante.

Existe una gran cantidad de variedades comerciales, por lo que es conveniente contar con un vademécum de variedades hortícolas (Marín, 2001). Dado que las condiciones ambientales de los invernaderos con diferente grado de

tecnificación son muy variables, por ello no es confiable extrapolar los resultados cuando las condiciones son muy contrastadas, por lo que es aconsejable un pequeño ensayo de dos o tres nuevos materiales con características prometedoras. En principio, para elegir la variedad el productor se debe apoyar en un técnico con experiencia, ajeno a las compañías de semilla.

Con gran interés hay que revisar la resistencia de la variedad a las fusariosis, enfermedades que se agudizan durante el invierno y fin del cultivo. No menos importante es ver su resistencia a virosis principalmente al tomato spotted wilt virus (TSWV), y al Tomato yellow leaf curling virus (TYLCV); que en español quieren decir virus del bronceado del tomate y virus del rizado amarillo del tomate respectivamente (Blancard, 2000; Garzón et al., 2003). También se buscan variedades con opciones de aprovechamiento (pintón o en rojo, sueltos o en ramillete). Así mismo, que sean tomates con larga vida en anaquel, sin que hayan perdido su buen sabor (Marín, 2001).

## **2.2. Evapotranspiración**

Dicho de otra manera la evapotranspiración es la pérdida de agua en forma de vapor de una superficie vegetal, debido a la evaporación del suelo y la transpiración de las hojas, en un estado dado por unidad de superficie y tiempo, varía en función de la demanda del clima, de la humedad del suelo, de la especie y desarrollo del cultivo. Para poder estimar la evapotranspiración, es necesario considerar los siguientes términos (Villalobos et al., 2003; Hatfield et al., 1996):

### **2.2.1. Evapotranspiración potencial**

La evaporación vegetal o consumo de agua por la planta puede ser evapotranspiración potencial (ETp) si se realiza bajo condiciones óptimas de

humedad, y es medida en un cultivo agrícola bajo y de cobertura completa (Doorenbos y Pruitt, 1990; Hargreaves y Samani, 1985).

La ETp es nombrada también como evapotranspiración de referencia (ETo). Es un concepto establecido para indicar la cantidad de agua que se transfiere a la atmósfera de un suelo permanentemente húmedo, cubierto por un cultivo de referencia (Hargreaves y Samani, 1982). Se ha utilizado como cultivo de referencia la alfalfa o un pasto bien regado, en pleno desarrollo y en buenas condiciones fitosanitarias. La ETo depende exclusivamente de las condiciones del medio ambiente: temperaturas máximas y mínimas, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, etc. (Allen, 2000; Allen et al., 1994)

### **2.2.2. Evapotranspiración máxima**

La evapotranspiración máxima (ETm) es la pérdida de agua de un cultivo sano, sin restricciones de humedad en el suelo y varía según la demanda del clima y el desarrollo del cultivo (Jensen et al., 1990).

### **2.2.3. Evapotranspiración real**

La evapotranspiración real (ETr), es la cantidad de agua que un cultivo a evapotranspirado realmente, en condiciones de campo; es decir, en las condiciones limitadas del cultivo comercial bajo riego, cuyo límite inferior corresponde a la ETr de un cultivo pluvial o de temporal y que recibe el nombre de necesidades hídricas (NH), que corresponden a ciertos valores reducidos de la ETp (Allen et al.; Elizondo y Contreras, 1996).

## **2.3. Factores climáticos que influyen en el consumo de agua bajo invernadero.**

Según Tarantino et al., (1982) del agua absorbida por la planta, la mayor parte se pierde en forma de vapor de agua y este fenómeno se le conoce como transpiración. Del resto, una pequeña parte es retenida para cubrir las necesidades de crecimiento de las partes jóvenes de la planta y llenar los frutos, otra parte más pequeña es utilizada en la fotosíntesis y otra empleada en la necesidad de contribuir como medio dispersante y transporte en la planta. Siendo la transpiración el fenómeno más importante de la pérdida de agua en las plantas, puede ser afectado este fenómeno por otros fenómenos que son (Hatfield et al., 1996; De Medeiros et al., 2001):

### **Humedad atmosférica**

Si aumenta la humedad atmosférica, disminuye la transpiración. La humedad atmosférica favorece una mayor apertura estomática, con lo que en cierto modo podría incrementar la transpiración. De estos efectos siempre predomina el primero, y en realidad disminuye la velocidad de transpiración, favoreciendo en cambio la entrada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para la fotosíntesis (Michael, 1983; Jones, 1990; Ruiz, 1993; Elizondo y Contreras).

### **Humedad en el entorno de las raíces**

A mayor humedad en el entorno radical más absorción de agua con lo que, al estar más turgente la célula oclusiva del estoma, este queda más abierto y por ende, más transpiración e intercambio gaseoso (De Medeiros et al., 2001).

### **Concentración de dióxido de carbono**

A mayor concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), menor abertura estomática y menor transpiración.

Villalobos et al. (2003) asegura que en invernaderos se ha logrado triplicar la cosecha elevando artificialmente el CO<sub>2</sub> hasta el 0.1 por ciento.

### **Luz**

Un aumento de la iluminación abre los estomas y aumenta la transpiración. El cierre de estomas en días cálidos es frecuente pues transpiraciones puntuales en le día producen una bajada transitoria del potencial hídrico y originan el cierre de los estomas (Villalobos et al., 2003).

### **Concentración de oxígeno**

En general una concentración alta de oxígeno favorece el cierre de estomas (Drake et al., 1970; Salisbury, 1994).

### **Temperatura**

Las temperaturas altas favorecen la transpiración aumentando la velocidad de salida de agua por el estoma. Como en la atmósfera al aumentar la temperatura hace que disminuya la humedad relativa y aumente el gradiente de difusión del vapor de agua entre la cámara subestomática y el exterior, es por ello que aumenta la transpiración. Así mismo, al aumentar la temperatura, aumenta también el coeficiente de difusión del vapor de agua, y por eso aumenta más la transpiración. Las temperaturas superiores a 30 y 40 °C favorecen el cierre de

estomas (con estas temperaturas se favorecen los procesos respiratorios con lo que el aumento del CO<sub>2</sub> produce el cierre del estoma). Las temperaturas elevadas provocan la insensibilidad del estoma al CO<sub>2</sub>, con lo cual permanece abierto y el efecto refrigerante de la transpiración evita las quemaduras que se producirían en las hojas (Villalobos et al., 2003).

### **Velocidad del viento**

A mayor velocidad, mayor es la transpiración. La transpiración es la verdaderamente importante y podría decirse que es un mal inevitable, debido a la necesidad que tienen las plantas de realizar el intercambio gaseoso CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en una atmósfera de bajo potencial hídrico. Así mismo juega un papel muy importante en la refrigeración de la hoja, y además, la transpiración sirve para concentrar los nutrientes que la planta toma por la raíz, como también es el factor esencial en la absorción del agua por el xilema al tiempo que es fundamental en la distribución de los nutrientes en la planta (Jones, 1990; Elizondo y Contreras, 1996; Medrano et al., 1998).

### **2.4. Necesidades hídricas**

La determinación de las necesidades hídricas de los cultivos, es decir, la cantidad de agua que los mismos usan para su desarrollo óptimo, sin limitaciones ni excesos, es igual que el de los elementos nutritivos, un aspecto básico para la planificación del riego, aunque lo es también para una buena comprensión del desarrollo vegetal y del cultivo agrícola (Domínguez, 1993).

Domínguez (1993) menciona que el gasto de agua, dependiente en gran parte de la radiación solar y de la temperatura, entre otros factores, resulta ser una determinación compleja.

En la fase de engrosamiento y maduración del fruto, el déficit hídrico provoca una reducción de su peso unitario, que afecta a la producción final obtenida; paralelamente a este efecto se produce un efecto contrario sobre el contenido de sólidos del fruto, que disminuye de forma significativa cuando aumenta la dosis de riego. El exceso de riego, más allá de los valores de la ETc, sobre todo en la fase de engrosamiento y maduración de los frutos, favorece un desarrollo vegetativo excesivo de las plantas, prolonga el periodo de cuajado de los frutos, y aumenta su peso unitario. Por otra parte, el exceso de riego en la fase final del cultivo aumenta la fragilidad del fruto a los golpes sufridos durante la recolección y el transporte y el porcentaje de frutos perdidos. (Baselga, 1993).

## **2.5. Eficiencia en el uso del agua**

Contijoch (1998) menciona que el funcionamiento de un cultivo depende de la medida en que los diversos factores limitantes afectan al mismo. El agua es uno de los más importantes factores limitantes del desarrollo vegetal, determina en gran medida el rendimiento económico de los cultivos. El nivel productivo, depende en primer lugar de la forma en que queden cubiertas las necesidades de agua de dichos cultivos en cada una de las fases de su desarrollo (etapas fonológicas de los cultivos). Se comprende por lo tanto, la importancia económica del suministro de agua mediante la aplicación a través de la práctica de riego. Cada día el agua es más escasa y los riesgos ya no siguen una pauta según las necesidades de riego. Por lo que en muchas zonas de riego, si requieren mantenerse, tendrán que adoptar técnicas de mejor aprovechamiento de los recursos disponibles. Cada vez se busca la mayor eficiencia de utilización del agua, y para conseguir este objetivo es absolutamente necesario conocer las necesidades hídricas de los cultivos, así como también las características del suelo o sustrato. Las técnicas modernas de determinación de las necesidades hídricas de los cultivos por un lado y la correcta aplicación y programación de los riegos, de acuerdo a las condiciones de suelo o sustrato, permiten aumentar la productividad del agua en un 40-50 por ciento o más (Domínguez, 1993).

La eficiencia de uso del agua (EUA), se define como la relación que existe entre el rendimiento o materia seca producida y la cantidad de agua consumida que proviene del riego (Febeiro et al., 2001). Castellanos et al. (2001) la determina como el kilogramo de rendimiento comestible producido por  $m^3$  de agua aplicado.

La óptima relación es donde se tiene la menor aplicación de agua por unidad producida. Usando esta óptima aplicación se minimizan las pérdidas de agua de riego, se minimizan los costos y se maximiza el potencial de riego en áreas de donde el agua es limitada. La eficiencia del uso de agua, por la planta es usada para atender la relación entre el uso del agua y su productividad (Burke et al., 1999).

Eficiencia de riego (ER), es la relación de volumen de agua que es tomada por el cultivo y el volumen aplicado (American Society of Civil Engineers, 1978). El riego por goteo tiene un potencial para incrementar la eficiencia de riego, porque se pueden aplicar cantidades pequeñas y frecuentes de agua.

Debido a varias causas los emisores de una instalación de riego por goteo arrojan caudales que no son exactamente iguales entre sí, lo que ocasiona que los cultivos reciban dosis de riego diferentes. El coeficiente de uniformidad (CU) nos permite medir la uniformidad del sistema de riego, y se define como el cociente entre el caudal medio descargado por los emisores de más bajo caudal y el caudal medio de todos los emisores. En los sistemas de riego por goteo es necesario contar con coeficientes de uniformidad superiores al 94 por ciento, al estar el volumen radical más concentrado en las zonas húmedas y trabajar con bajas tensiones de humedad del suelo. El coeficiente de uniformidad puede disminuir de forma considerable con el uso continuado de la instalación, por tanto, se deben evaluar todos los años las instalaciones de riego por goteo (CNA, 1997; Villalobos et al., 2003).

## 2.6. Riegos y fertilizaciones

Castaños (1993) establece que el riego por goteo consiste en la aplicación lenta y frecuente de agua a través de emisores o goteros, los cuales se localizan a lo largo de una línea de distribución. Los emisores disipan la presión que adquiere el agua al ser bombeada, mediante vértices, orificios y la longitud de la línea de distribución. (Papadopoulos, 1989) menciona que es como aquel sistema para conseguir mantener el agua en la zona radical en las condiciones de utilización más favorables para las plantas, en aquel que se aplica el agua gota a gota el cual es conducida por conductos cerrados hasta la misma planta por medio de dispositivos que se conoce como goteros o emisores.

Stegman et al. (1980) menciona que el riego es uno de los factores de producción que más influye sobre el resultado del cultivo del tomate, tanto en lo que se refiere a la cantidad de cosecha obtenida como a su calidad.

La idónea programación de los riegos es crucial para conseguir resultados satisfactorios en el cultivo intensivo de tomate. La programación de los riegos implica determinar la frecuencia de los riegos y la cantidad de agua a aplicar en cada uno de ellos (Castilla et al., 1990).

Las necesidades de agua vienen determinadas por los procesos de evaporación desde el suelo y de transpiración a través de la superficie foliar; el agua extraída desde el suelo por estos dos procesos, que en su conjunto reciben el nombre de evapotranspiración (ETc), es la que se debe restituir por medio del riego (Baselga, 1993).

Papadopoulos (1989) establece que la frecuencia mínima de los riegos dependerá de: el tamaño de las partículas del agregado, la superficie de las partículas del agregado, la naturaleza de la cosecha, el tamaño de la cosecha, los factores climáticos y la hora del día.

Agregados lisos de forma regular y relativamente de gran tamaño deberán regarse más frecuentemente que los porosos con forma irregular y finos, puesto que estos últimos tienen una mayor superficie. Los cultivos de porte elevado y con frutos necesitarán más frecuentemente los riegos que los más bajos y con mayor superficie foliar, al medio día, cuando la intensidad de la radiación y la temperatura es más elevada, deberá reducirse el periodo entre los ciclos de riego (Cadahía, 2000).

Una vez conocido el volumen de agua que necesita el cultivo y los momentos en que se debe aplicar cada riego, las técnicas de riego que se utilicen deben garantizar que el agua, en la cantidad prevista, llegue a todos los puntos de la parcela (Nuez, 1995).

Actualmente el riego por goteo se ha impuesto en los sistemas de producción de hortalizas bajo condiciones protegidas y el tomate no es la excepción (Muñoz, 2003). Bajo este sistema la cinta de goteo puede ser un buen comienzo. El 80 por ciento de la superficie cultivada bajo invernadero se realiza en suelo, por lo que la nutrición del cultivo debe ser gestionada entendiendo las interrelaciones suelo planta. En los cultivos en suelo, para determinar las necesidades de riego, un método eficaz ha sido a través de dos tensiómetros colocados uno a 10 cm y el otro a 30-50 cm, de esta manera se evalúa el movimiento del agua y se determina el balance hídrico. En los cultivos hidropónicos los métodos de riego son mas variados, precisos y rigurosos. Hoy en día no existe un consenso general sobre las dosis y el número de riegos en cultivos en sustratos confinados en contenedores (Salas y Urresatarazu, 2001). Mediante el manejo de fertirriego en cultivos sin suelo se pretende alcanzar los objetivos siguientes (Villalobos et al., 2003):

1. Ajustar el suministro de nutrientes a la demanda del cultivo.

2. Proporcionar un equilibrio nutrimental de acuerdo a la etapa de desarrollo del cultivo.
3. Favorecer la aireación en el entorno del sistema radical para que las plantas no sean estresadas por asfixia.
4. Regular la temperatura de acuerdo al óptimo fisiotérmico de cada especie.
5. Mantener un equilibrio, homogeneidad y uniformidad de los aspectos anteriores. La fertirrigación requiere de un seguimiento estricto de ello depende en gran parte el éxito y la rentabilidad del cultivo (Manjarrez, 1980).

Para alcanzar los objetivos anteriores es fundamental evaluar el sistema de riego antes de iniciar cada campaña de cultivo y darle el mantenimiento debido a los goteros, líneas regante, filtros depósitos de agua y del sistema eléctrico (Arnulfo y Bertha 2000). Los métodos de fertirriego también deben de estar enfocados a hacer un uso eficiente del agua, en este sentido hace falta mucha conciencia, cultura y compromiso.

Según Escudero (1993) los métodos de fertirriego tienen como finalidad optimizar el agua y los fertilizantes y la energía. Tienen que responder a la frecuencia (¿Cuándo regar?) y a que cantidad de agua aplicar (¿Qué Volumen?), esta viene impuesta por las características del sustrato, el volumen, geometría y disposición del contenedor.

El consumo medio de agua para un cultivo de tomate de manera orientativa es de 7,000 a 8,000 m<sup>3</sup> ha en suelo y de unos 10, 000 m<sup>3</sup> en sustratos para un ciclo de cultivo de 270 días. En general, en condiciones protegidas tanto la demanda hídrica como nutrimental se realiza a través del riego. No obstante, en los cultivos en suelo son factibles los aportes de materia orgánica y abonado de fondo, previo análisis de suelo y volumen esperado de producción (Villalobos et al., 2003).

## **2.7. Necesidades de lavado de sales**

El agua de buena calidad tiene el potencial para permitir la máxima producción si se siguen prácticas acertadas en su manejo. Un agua de mala calidad causará problemas relacionados con el suelo y con el cultivo, provocando la reducción de rendimiento, a menos que se adopten prácticas de cultivo especiales como el lavado de sales. Un alto contenido de sales disueltas en el suelo aumenta el potencial osmótico y exige a las raíces un esfuerzo adicional para absorber agua. Esta toma reducida de agua por parte de la planta puede dar como resultado un crecimiento reducido o lento, y la reducción de la producción. Una vez que la cantidad de sales acumuladas en el suelo sobrepasa un valor umbral, que depende del cultivo, la producción desciende linealmente con el aumento de sales en el suelo (Ayers y Westcot, 1987). La planta toma la mayor parte del agua de la parte más superficial del suelo, por tanto es de gran importancia evitar la acumulación excesiva de sales en esta zona. Para disolver y separar las sales se deberá aplicar una cantidad de agua adecuada que permita la infiltración a través de la totalidad del sistema radical. A esta cantidad de agua se le denomina fracción de lavado (FL), y se define como la fracción del agua que penetra en el suelo y sobrepasa el sistema de raíces. En sustratos la FL es de 30 por ciento (Ruiz, 1993).

## **2.8. Calendario de riegos en sustratos**

El calendario de riegos en sustratos consiste de volúmenes y frecuencias de riegos reducidos. El método de la bandeja de drenaje es sencillo y confiable, y puede implementarse para manejar el agua de riego en los sustratos (Ruiz, 1993; Villalobos, 2003).

El programa de riegos se puede elaborar a partir de los siguientes pasos (Villalobos, 2003):

- a) Definir el tipo de sustrato (perlita, fibra de coco, tezontle, lana de roca, y otros).
- b) Determinar el porcentaje de agua fácilmente disponible por volumen de sustrato. Este dato existe para cada tipo de sustrato y para cada granulometría.

Calcular el volumen del agua fácilmente disponible para una superficie de un  $m^2$  mediante la ecuación 2.1

$$V_{AFD} = N_{pm} * V_{sp} * AFD \quad (2.1)$$

Donde:

$V_{AFD}$  = Volumen de agua fácilmente disponible (litros  $m^{-2}$ )

$N_{pm}$  = Número de plantas por metro cuadrado de superficie

$V_{sp}$  = Volumen de sustrato por planta (litros/planta)

$AFD$  = Porcentaje de agua fácilmente disponible en el sustrato (decimal)

- c) Cálculo de volumen de riego de reposición. En la práctica no se permite que se consuma todo el volumen de agua fácilmente disponible, se permite aproximadamente el abatimiento del 15 por ciento. Entonces, el volumen máximo de un riego de reposición será igual a:

$$V_{rr} = 0.15V_{AFD} \quad (2.2)$$

Donde:

$V_{rr}$  = Volumen máximo de un riego de reposición (litros  $m^{-2}$ )

$V_{AFD}$  = Volumen de agua fácilmente disponible (litros  $m^{-2}$ )

- d) Obtener el valor de consumo de agua (CA) en litros  $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ . La capacidad de agua que consumen las plantas se puede determinar a través de la bandeja de drenaje usando la ecuación 2.1.

Cuando no se puede conocer el valor de CA mediante la opción anterior, de manera orientativa el tomate, el melón, el frijol ejotero, el pimiento y otras hortalizas tienen demandas medias máximas de 4 hasta 8 litros/ $m^2$ /día, cuya variación se debe a la época del año y del estado de desarrollo del cultivo (Fernández y Cuadrado,1999).

- e) Se calcula el número posible de riegos durante un día a través de la ecuación 2.3.

$$NR = CA/Vrr \quad (2.3)$$

Donde:

NR = Número de riegos durante un día

CA = consumo de agua de las plantas (litros  $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

Vrr = Volumen del riego de reposición (litros  $m^{-2}$ )

- f) Se calcula en intervalo de riegos:

$$IR = (DD / NR) * 60 \quad (2.4)$$

Donde:

IR = Intervalo de riegos (minutos)

DD = Duración de periodo de riegos en el día, h.

NR = Números de riegos por día

g) Entonces, la programación de los riegos se hará con el volumen de riego ( $V_{rr}$ ) y el intervalo de los riegos (IR).

h) Durante todo un día en cada 20 días se medirá el volumen de drenaje en intervalos de cada 2 horas.

Al final del día se cuantificará el volumen de drenaje y se graficará la dinámica del drenaje. En los periodos en que el drenaje fue bajo hay que reducir ligeramente el intervalo entre riegos. En los periodos en que el drenaje fue alto, hay que espaciar ligeramente el intervalo de riegos. Si el volumen de drenaje es superior al 30 por ciento del volumen de riego, entonces, hay que reducir el riego en igual magnitud al porcentaje en que superó el 30 por ciento permisible de drenaje. Si el volumen de drenaje es inferior al 30 por ciento del volumen de riego, entonces, hay que incrementar el volumen de riego en igual magnitud al porcentaje faltante para conseguir el 30 por ciento de drenaje permisible. El porcentaje de drenaje se puede reducir en el invierno e incrementar en el verano.

i) Se repetirán los incisos e, f, g, h, i, hasta que se consiga el 25 ó el 30 por ciento de volumen de riego como drenaje.

## **2.9. Programación de los riegos en invernadero bajo riego localizado.**

En la práctica del riego, además de tratar de cubrir la necesidad hídrica de la planta, hay que asegurarse de que las raíces estén bien oxigenadas, esto depende de varios factores (Escudero, 1993; Villalobos, 2003):

- Características físicas del sustrato. El sustrato ideal debe tener un 30 por ciento de su volumen lleno de aire.
- Volumen de sustrato por planta. Los volúmenes de sustrato que se emplean suelen ser reducidos por razones de economía, y no almacenan las necesidades de agua para el cultivo durante un día.
- Drenajes. Hay otros factores que también tienen influencia en la oxigenación de las raíces. A mayor temperatura, menor concentración de CO<sub>2</sub> en el aire, la solubilidad del oxígeno en agua disminuye y las necesidades de oxigenación de las raíces son mayores por ser mayor el metabolismo. Es preciso realizar varios riegos a lo largo del día. El número de riegos que se deba dar dependerá de varios factores: de las características físicas del sustrato y volumen del sustrato por planta, de la planta y estado de desarrollo y de la climatología. A un mayor número de riegos, suele corresponderle un menor coeficiente de uniformidad de riego. Si el riego está mal diseñado tenemos que tomar en cuenta la uniformidad del riego durante el tiempo del mismo, llenado de tuberías al inicio del riego y la descarga de tuberías al finalizar el riego (Escudero, 1993).

### **Ciclo de riego**

Es la cantidad de agua que se aporta en un riego. Cada sistema de riego tendrá un ciclo mínimo que no debe ser alterado. Aforamos el volumen de agua durante el riego y el volumen de descargas después del riego, el coeficiente de uniformidad debe ser el 90 por ciento.

## **Frecuencia de riego**

Por frecuencia de riego se entiende el número de riegos que se dan por unidad de tiempo. En los cultivos sin suelo la frecuencia es de varios riegos por día. Una vez que se ha determinado la dotación mínima por cada riego, se van variando las frecuencias de riego de acuerdo con las necesidades del cultivo a lo largo de un día de insolación normal; las necesidades de agua de la planta son variables, y se acumulan en las horas centrales del medio día solar. Para los sistemas de cultivo sin suelo que se utilizan, con baja capacidad de almacenamiento de agua, si se mantiene a lo largo del día una frecuencia de riego constante, las plantas van a tener deficiencia de agua en las horas del medio día, y en los riegos de la mañana y la tarde se va a perder mucha agua. Por la noche no es necesario regar. Solo dar algún riego de lavado de sales. La frecuencia de riegos está en función de la fase del cultivo y la climatología del momento.

## **Drenaje**

El agua de riego contiene iones que en determinadas concentraciones pueden interferir la estabilidad de las soluciones nutritivas o incluso resultar tóxicos para los cultivos.

El volumen del drenaje es el tanto por ciento de volumen de agua sobrante con respecto al total de agua aportada en cada riego, el porcentaje de drenaje obtenido es el mismo para todos los riegos. Al dato drenaje ha de hacerse un seguimiento diario. Al agua de drenaje se le mide también la conductividad y el pH. La conductividad eléctrica a 25 °C se expresa en mmho/cm.

Cuanto más concentrada es la solución nutritiva, menos diferencia de presión osmótica existe entre la solución nutritiva y la planta y por lo tanto la absorción de agua y sales minerales es menor.

Otro efecto desfavorable de las altas conductividades es la posibilidad de que se produzcan precipitados de sales de baja solubilidad.

El pH tiene una influencia muy marcada sobre la estabilidad de las soluciones nutritivas y sobre la disponibilidad de determinados iones por la planta. Las bajadas bruscas en el valor del pH de las soluciones nutritivas pueden poner en juego la supervivencia de un cultivo.

### **Control del riego**

El agua de riego que se recoge diariamente de los goteros para calcular el porcentaje de agua drenada, se le debe medir también la CE y el pH. Variaciones de +/- 0.5 unidades en la CE o el pH aconsejan realizar comparaciones sobre: posibles cambios en la composición del agua de riego, variaciones en el contenido de bicarbonatos, funcionamiento deficiente de los sistemas de inyección, errores en la preparación de las soluciones madres y cambios en las riquezas.

La CE y el pH en el sustrato o en el agua de drenaje admiten variaciones porcentajes mayores. La CE del agua de drenaje tiende a aumentar al subir la temperatura. Aumentado el porcentaje de drenaje, se logra contrarrestar este aumento de la CE. En un sustrato de drenaje deficiente esta solución puede resultar peligrosa por la posible falta de oxígeno para las raíces. En este caso se puede recurrir a preparar una solución nutritiva con menor conductividad.

Se puede asegurar que cuando los aniones se absorben en cantidades superiores a los cationes hay tendencia a la subida del pH en la solución nutritiva del sustrato y una tendencia a la acidificación si la proporción es la inversa.

## **Programación de riego**

Se entiende por programación del riego la enunciación, para un cultivo y lugar concreto, del ciclo y frecuencia de riego. El método se basa en definir, en primer lugar, una unidad básica de cultivo (U. B.) y que puede ser el metro lineal, el metro cuadrado, el saco de cultivo y la tabla de cultivo.

Se ha de cuantificar la cantidad de agua útil (AU), dada en litros. Se fija un nivel de agotamiento de agua útil y, se establece un porcentaje de agua de drenaje que estará en función de la calidad del agua de riego y de la especie cultivada. Con estos datos queda determinada el volumen o ciclo de riego.

La instalación de riego por sus características, arrojará un caudal unitario por unidad básica de cultivo y que vendrá dado en litros por hora.

Por métodos tradicionales tales como los del tanque evaporímetro, el de la radiación o por la experiencia en cultivo tradicional, puede entonces calcularse el número de riegos que se han de aportar cada día.

## **Aguas salinas**

Agua de conductividades de 2.5 mS/cm, no crean problemas en los cultivos Hortícolas. A partir de esta concentración salina los aumentos de la CE del agua de riego obligan a incrementos lineales de los porcentajes de drenaje para poder mantener los rendimientos de los cultivos. Los aumentos en la conductividad eléctrica del agua de riego hacen decrecer los rendimientos.

### **2.10. Invernaderos**

Alpi (1991) comenta que la implantación generalizada de los invernaderos ha impulsado el desarrollo de nuevos cultivares especialmente adaptados al cultivo protegido, entre los cuales se encuentran variedades de tomate recomendadas para el cultivo al aire libre, otras para cultivos protegidos y, en algunos casos, para uso mixto. (Nuez, 1995) menciona que un aspecto relevante de esta mejora dirigida a una mayor adaptación ha sido realizada frente a las condiciones ambientales adversas tales como baja luminosidad y frío o calor en sus efectos negativos sobre el cuajado. En este sentido se han impuesto los híbridos  $F_1$  por su aptitud para cuajar en condiciones difíciles. Bajo invernadero a menudo la temperatura y luminosidad están por debajo del óptimo.

### **2.10.1. Tipos de invernaderos**

Existen diferentes tipos de invernaderos, según los elementos que se consideren para su clasificación. Según Muñoz et al. (1998) y Muñoz (2003) los invernaderos se pueden clasificar desde diferentes puntos de vista: materiales de estructura, del recubrimiento, forma, etc. Atendiendo a su forma los invernaderos se clasifican en: Plano (plano con pendiente), Capilla (Capilla simétrica, Capilla asimétrica, Multicapilla y Diente de sierra) y Curvo (Túnel y Multitúnel; Multitúnel simétrico, Multitúnel asimétrico y Multitúnel apuntado).

### **2.11. Hidroponia**

Sánchez y Escalante (1989) definen a la hidroponia como un sistema de producción en el que las raíces de las plantas se irrigan con una mezcla de elementos nutritivos esenciales disueltos en el agua y en el que, en vez de suelo, se utiliza como sustrato u material generalmente inerte y estéril, o simplemente la misma solución nutritiva, con el objeto de proporcionar las condiciones físicas, químicas y sanitarias más adecuadas para el desarrollo vegetal.

Jensen (1996), menciona que la hidroponía es una tecnología para producir plantas en soluciones nutritivas de agua y fertilizantes, donde las raíces se desarrollan en agua o en un sustrato inerte en vez de suelo. Los sistemas hidropónicos se categorizan en sistemas hidropónicos líquidos y con agregados. En los sistemas líquidos las raíces están directamente expuestas a la solución nutritiva, sin ningún otro medio de crecimiento y la solución es reutilizada o reciclada. En los sistemas con agregados, un medio sólido inerte da apoyo a las plantas. Entre los comunes destacan la arena, la grava, la vermiculita, la turba de musgo o cualquier otro material típico de la región que permite reducir los costos. En ambos sistemas, la solución se suministra directamente a las raíces.

El tomate es la hortaliza que con más frecuencia se cita en la bibliografía referente a los cultivos hidropónicos realizados en todo el mundo; en la mayoría de los casos se señalan más altos rendimientos en promedio (100 a 400 toneladas por hectárea por año) y más calidad cuando se les compara con los sistemas convencionales de cultivo en suelo (20 a 30 toneladas por hectárea por cosecha y con mucho más riego). Esto constituye un atractivo comercial para agricultores con poca extensión de terreno, con poco agua o con serias limitantes del suelo (Sholto, 1976; Sánchez y Escalante, 1989; Resh, 2001).

## **2.12. Los sustratos hortícolas**

Abad (1993) define al sustrato como aquel material sólido distinto del suelo, natural o de síntesis, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radical, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta. Este material puede o no intervenir en el complejo proceso de la nutrición vegetal.

### **2.12.1. Clasificación de los sustratos**

Canovas (1993) mencionan que entre los diferentes criterios de clasificación de los sustratos, merece ser destacado el que se basa en las propiedades de los materiales:

#### **Químicamente inertes**

Estos materiales actúan única y exclusivamente como soporte de la planta, no interviniendo en el proceso de adsorción y fijación de los nutrientes. Estos han de suministrarse mediante la solución fertilizante, que debe ajustarse al máximo con objeto de no crear disfunciones en la planta. El cultivo en este tipo de sustratos es en la práctica un verdadero cultivo hidropónico, exigiendo una avanzada tecnología de las instalaciones y una elevada especialización del personal. Es decir que no intervienen en la nutrición vegetal. Para el manejo de estos materiales se necesita una avanzada tecnología y elevada especialización (Canovas, 1993).

#### **Químicamente activos**

Este tipo de materiales además de actuar como soporte para las plantas, actúa como depósito de reserva de los nutrientes aportados mediante la fertilización, almacenándolos o cediéndolos según las exigencias del vegetal (Urrestarazu, 1997).

### **2.12.2. Propiedades físicas de los sustratos**

Las propiedades físicas de los sustratos de cultivo son de primerísima importancia. Una vez que el sustrato esté en el contenedor, y la planta esté creciendo en él; no es posible modificar las características físicas básicas de dicho sustrato. Esto contrasta con el status químico de los sustratos, que puede ser modificado mediante técnicas de cultivo apropiadas, realizadas por el propio agricultor (Cadahía, 2000).

### **Espacio poroso total**

Abad et al. (1993) mencionan que el espacio poroso total deseable en un sustrato para obtener buenos resultados de crecimiento y desarrollo del tomate, debe ser de alrededor del 85 por ciento del volumen total.

El total de poros existentes en un sustrato se divide entre: 1) poros capilares, de tamaño pequeño ( $< 30 \mu$ ), que son los que requieren el agua, y 2) poros no capilares o macroporos, de mayor tamaño ( $> 30 \mu$ ), que son los que se vacían después de que el sustrato ha drenado, permitiendo así la aireación (Bunt, 1991).

### **Agua fácilmente disponible**

Es la diferencia entre el volumen de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua y dejado drenar a 10 cm de tensión matricial, y el volumen de agua presente en dicho sustrato a una succión de 50 cm de columna de agua, el valor óptimo para el agua fácilmente disponible oscila entre el 20 por ciento y el 30 por ciento del volumen (Abad et al., 1993).

### **Agua de reserva**

Raviv et al. (1986) indican que el agua de reserva es la cantidad de agua (por ciento en volumen) que libera un sustrato al pasar de 50 a 100 cm de columna de agua. El nivel óptimo se sitúa entre el 4 por ciento y el 10 por ciento en volumen. No se recomienda para plantas ornamentales cultivadas en sustrato, que la tensión del agua supere los 100 cm de columna de agua durante el cultivo. En el caso de las plantas hortícolas, se pueden alcanzar tensiones de hasta 300 cm. Sin afectar el modo significativo al crecimiento vegetativo.

### **Capacidad de aireación**

Abad et al. (1993) y Cadahía (2000) la definen como la proporción del volumen del sustrato de cultivo que contiene aire después de que dicho sustrato ha sido saturado con agua y dejado drenar, usualmente a 10 cm de tensión. La capacidad de aireación deseable en un sustrato para obtener buenos resultados de crecimiento y desarrollo en plantas de tomate oscila entre 30 por ciento y 40 por ciento del volumen total.

### **Distribución del tamaño de las partículas o granulometría**

Muchos sustratos están constituidos por una mezcla de partículas con tamaños diferentes. Las propiedades físicas de estos sustratos varían en función de la distribución del tamaño de sus partículas, siendo por tanto de importancia fundamental la caracterización granulométrica de los materiales. Los materiales de textura gruesa, con tamaño de partícula superior a 0.9 mm, con poros grandes, superiores a 100  $\mu$ m, retienen cantidades reducidas de agua y están bien aireados. Los materiales finos, con partículas inferiores a 0.25 mm y tamaño de poros inferior a 30  $\mu$ m, retienen grandes cantidades de agua difícilmente disponible y están mal aireados. El mejor sustrato se define como aquel material de textura media a gruesa, con una distribución del tamaño de los poros entre 30  $\mu$ m y

300:m, equivalente a una distribución del tamaño de las partículas entre 0.25 mm y 2.5 mm, que retiene suficiente agua fácilmente disponible y presenta, además, un adecuado contenido en aire (Puustjärvi, 1994).

### **Densidad aparente**

Se define como la masa seca del material sólido por unidad de volumen aparente del sustrato húmedo, es decir incluyendo el espacio poroso entre las partículas (Cadaña, 2000).

En los invernaderos en donde el viento no es un factor limitante. La densidad aparente del sustrato puede ser tan baja como  $0.15 \text{ g cm}^{-3}$  (Abad et al., 1993). Las plantas que crecen al aire libre deben ser cultivadas en sustratos mas fuertes, con densidades aparentes comprendidas entre  $0.50 \text{ g cm}^{-3}$  y  $0.75 \text{ g cm}^{-3}$ .

### **Poder higroscópico**

Algunos materiales orgánicos pueden presentar dificultades tanto para ser humedecidos inicialmente como para ser rehumectados una vez que se han secado en el contenedor, lo que pueden provocar un retraso y una reducción en el incremento de la planta. Las dificultades para mojar un sustrato se distribuyen generalmente a dos causas: la hidrofobicidad del material y la contracción que experimenta al secarse. El poder higroscópico se expresa como el tiempo (en minutos) necesario para que se absorban 10 ml de agua destilada, a través de la superficie de una muestra de sustrato seco a  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . El tiempo óptimo es igual o inferior a 5 minutos (Handreck y Black, 1991).

### **2.12.3. Propiedades químicas de los sustratos**

Ansorena (1994) menciona que la reactividad de un sustrato se plasma en un intercambio de materia entre el material sólido que forma el sustrato y la solución del mismo. La reactividad química de los sustratos es el conjunto de reacciones químicas que tienen lugar por la interacción del agua con el material (reactividad química principalmente por disolución e hidrólisis), por interacción de las cargas electrostáticas en la superficie del material que dan lugar al intercambio de iones entre la fase sólida y la fase líquida (reacciones de origen físico-químico). Y por la biodegradación de la materia orgánica (reacciones de tipo bioquímico).

#### **Capacidad de intercambio catiónico**

Se define como la suma de cationes cambiables que pueden ser adsorbidos por unidad de peso (o de volumen) del sustrato. Dichos sustratos quedan así retenidos frente al efecto lixivante del agua y están usualmente disponibles por las plantas (Burés, 1997).

El valor óptimo para la capacidad de intercambio catiónico de los sustratos depende estrechamente de la frecuencia de la fertirrigación (Lamiare et al., 1985). Si la fertirrigación se aplica permanentemente, la capacidad de adsorción de cationes no representa ninguna ventaja, siendo recomendable en este caso la utilización de materiales inertes, con muy baja o nula capacidad de intercambio catiónico. Si, por el contrario, la fertirrigación se aplica de modo intermitente, será interesante la utilización de sustratos con moderada ó elevada capacidad de intercambio catiónico, en todo caso superior a 20 meq/100 g (Ansorena, 1994).

Algunos autores han indicado que los materiales para el cultivo hidropónico de hortalizas, como el tomate, deberían presentar una bajísima o nula capacidad

de intercambio catiónico, es decir, deberían químicamente inertes, con objeto de permitir un mejor control nutricional de las plantas (Canovas, 1993; Martínez y García, 1993).

### **Disponibilidad de nutrientes**

La mayoría de los sustratos minerales no se descomponen biológica ni químicamente, y desde el punto de vista práctico, se puede considerar desprovistos de nutrientes.

Por el contrario, los sustratos orgánicos difieren marcadamente entre si en el contenido de nutrientes asimilables. Así, algunos (turba rubia, mantillo de bosque, etc.) poseen un nivel reducido de nutrientes asimilables, mientras que otros (compost, p. ej.) presentan niveles elevados, dependiendo dicho nivel del origen del compost y del proceso de compostaje (Nuez, 1995).

La cuantía y la fertilización dependen de la capacidad de intercambio catiónico del sustrato y del régimen de riego. Una capacidad de intercambio catiónico elevada aumenta la eficiencia de la aplicación de fertilizantes de base durante el proceso de fabricación del sustrato. Cuando se usan sustratos con baja capacidad de intercambio catiónico, los fertilizantes se aplican usualmente a través del sistema de riego (Cadañá, 2000).

### **Salinidad**

Se refiere a la concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato. La respuesta de la planta del tomate a la salinidad depende de la edad de esta, de las condiciones ambientales y de la prácticas de manejo del cultivo. En el cultivo sin suelo del tomate, el nivel óptimo de salinidad, determinada en la solución del sustrato, oscila entre 3 y 5 dS/m (Escudero, 1993).

Las causas que provocan un incremento en la salinidad del sustrato, después de estar este colocado en el contenedor, son (Lamiare et al., 1985): la presencia de fertilizantes insolubles, como los de liberación lenta, cuando se degradan para producir nitratos, o bien, liberan sales mediante difusión, en una cuantía superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas; cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución fertilizante es superior a las cantidades absorbidas por las plantas o las pérdidas por lixiviación; cuando el sustrato presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico y, al mismo tiempo, se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrientes.

## **pH**

Nuez (1995) indica que el pH ejerce sus efectos principales sobre la asimilabilidad de los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica. Bajo condiciones de cultivo intensivo, se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo reducido. La planta del tomate puede sobrevivir en un amplio intervalo de pH del sustrato sin sufrir desordenes fisiológicos aparentes, siempre y cuando todos los nutrientes se suministren en forma asimilable. No obstante, el crecimiento y desarrollo de las plantas se ven reducidos de modo marcado en condiciones de acidez o alcalinidad extremas. Escudero (1993) menciona que el nivel óptimo en el cultivo sin suelo del tomate el pH debe ser de 5.5 a 6.8.

## **Relación Carbono Nitrógeno (C/N)**

Burés (1997) menciona que la relación C/N se usa tradicionalmente como un índice de origen de la materia orgánica, de su madurez y su estabilidad. Los

daños que aparecen sobre las plantas cultivadas en materiales orgánicos inmaduros son debidos tanto a una inmovilización del nitrógeno como a una baja disponibilidad de oxígeno en la rizosfera. Esta situación está provocada por la actividad de los microorganismos, que descomponen los materiales orgánicos crudos y utilizan el nitrógeno para la síntesis de sus proteínas celulares. El oxígeno es también consumido por la actividad microbiana. (Nuez, 1995) indica que una relación C/N inferior a 20 es considerada como óptima para el cultivo en sustrato y es un índice de un material orgánico maduro y estable.

#### **2.12.4. Otras propiedades**

Además de las propiedades físicas y químicas hasta aquí señaladas, los materiales a utilizar como sustratos en hidroponía deberían reunir también las siguientes características (Sánchez, et al., 1989): libres de semillas de malas hierbas, nemátodos y otros patógenos; reproductividad y disponibilidad; bajo costo; fáciles de mezclar; fáciles de desinfectar y estabilidad frente a la desinfección; resistencia a cambios externos físicos, químicos y ambientales.

#### **2.13. Métodos para estimar la evapotranspiración**

La evapotranspiración o necesidad de agua del cultivo se puede calcular a través de diferentes métodos directos e indirectos (Aguilera y Martínez, 1990). Ambos son usados en invernadero, pues tienen ventajas que deben de ser aprovechadas.

##### **2.13.1. Métodos directos**

Estos métodos proporcionan directamente la cantidad total de agua utilizada por el cultivo (Baille et al., 1992; Salas y Urrestarazu, 2000). Para

determinarla se requiere de aparatos e implemento de fácil construcción y operación, entre estos se encuentran a los lisímetros de pesada, los muestreos de humedad del suelo, el de la bandeja de drenaje y el de la bandeja a la demanda, los dos últimos son utilizados cuando se usan sustratos como medio de cultivo (Villalobos et al., 2003).

#### **2.13.1.1. Lisímetros de pesada.**

Existen en la actualidad diferentes tipos de lisímetros, sin embargo los mas utilizados son los de tipo gravimétrico y volumétrico, estos equipos para su instalación es importante realizar una excavación en el campo de prueba, su tamaño dependerá del tipo de lisímetro, así como de los recursos económicos con que se cuente.

Este equipo esta formado por un recipiente de lámina galvanizada, el lisímetro forma un depósito o pequeña área, donde es colocado el suelo que será utilizado para la siembra del cultivo que se desea estudiar, tanto el suelo como el cultivo deben ser representativos de la región que se encuentre en estudio, es decir las características físicas y las propiedades de los parámetros de campo conocidas previamente deben ser aproximadamente las mismas tales como:

- Capacidad de campo
- Punto de Marchitez Permanente
- Densidad Aparente
- y Otros

Por debajo de la estructura es colocada una balanza que es utilizada para conocer el peso total del equipo.

La evapotranspiración se determina pesando directamente todo el conjunto que comprende el suelo, planta, agua y estructura; por diferencias de pesos se obtiene la humedad que ha sido consumida durante cierto periodo de tiempo, para llevar a cabo esta determinación existen equipos muy sencillos hasta equipos con un control automático del sistema.

### **2.13.1.2 Método del Time Domain Reflectometry (TDR)**

Hasta la fecha, la aplicación dominante del TDR ha sido la medición de humedad (o contenido de agua) de suelos no saturados. Esta aplicación ocurre con una sonda en el extremo del cable o de la línea de transmisión de dos hilos. De ésta manera, se define la localización de la sonda y el tiempo de colocación. Las medidas de la humedad (contenido de agua) se hacen en el suelo para la investigación y el control de la irrigación en los cultivos.

#### **Descripción**

El reflectómetro de contenido de humedad consiste en dos varillas de acero inoxidable conectados a una tarjeta de circuito impreso. Un cable protege cuatro hilos conductores que están conectados a la tarjeta de circuito y suministro de energía, que activa la sonda, para monitorear el pulso de salida.

La alta velocidad de los componentes electrónicos situados en la tarjeta de circuito son configurados como un multivibrador. La salida del multivibrador es conectado a las varillas de la sonda las cuales actúan como una guía para las ondas. La frecuencia de oscilación del multivibrador es dependiente de la constante dieléctrico del medio que está siendo medido. La constante dieléctrica es predominantemente dependiente del contenido de agua.

### **2.13.1.3. Método de la bandeja de drenaje.**

Villalobos et al. (2003) mencionan que cuando se usan los sustratos como medios de cultivo, se pueden instalar los dispositivos denominados: bandejas de drenaje para definir los riegos de los cultivos. Estos dispositivos se basan en medir el volumen de agua de entrada en la bandeja y el volumen de salida en el drenaje, y por diferencia se puede calcular la cantidad de agua que consumió el cultivo.

#### **2.13.1.3.1. Medición del consumo de agua por las plantas.**

El procedimiento para medir el consumo de agua del cultivo a través de la bandeja de drenaje se describe en los siguientes pasos (Ruiz, 1993; Villalobos et al., 2003):

- a) Se define el tamaño de la bandeja considerando el arreglo de los recipientes o contenedores del sustrato. Se pretende que la bandeja sea un pequeño segmento representativo de las camas, por lo que, el ancho de la bandeja tiene que ser ligeramente mayor en unos 10 centímetros que el ancho que cubre los recipientes. El largo de la bandeja en la mayoría de los casos varía de 80 a 100 cm, lo que se denomina salchicha o saco de cultivo, que contiene sustrato, y cuya longitud comercialmente se maneja de 1 metro. La bandeja debe tener bordes para retener el agua drenada de las bolsas; además, debe tener un orificio por donde descargar el agua colectada del drenaje de los recipientes.
- b) Una vez teniendo la bandeja, lo que sigue es su instalación. Es necesario proporcionarle cierta pendiente a la bandeja, tratando de colocar el punto de drenaje en el extremo más bajo.

- c) Después se conecta el punto de drenaje de la bandeja a un depósito a través de una manguera flexible de media pulgada para almacenar el agua drenada. también se introduce la manguera de descarga de los goteros de control o de referencia a otro recipiente para almacenar el volumen de entrada.
- d) Se procede a medir el consumo de agua por las plantas (CA) a través de la ecuación 2.5.

$$CA = [(VE - VD) / N_{pb}] * N_{pm} \quad (2.5)$$

Donde:

CA = Volumen de agua consumido (l/m<sup>2</sup>/día)

VE = Volumen de agua de entrada en la bandeja (l/día)

VD = Volumen de agua drenada de la bandeja (l/día)

N<sub>pb</sub> = Números de plantas puestas en la bandeja de drenaje

N<sub>pm</sub> = Número de plantas por metro cuadrado de superficie

- e) El volumen de entrada o de riego en la bandeja (VE) se obtiene multiplicando el volumen aplicado por un gotero (Vg) por el número de goteros (Ng) que riegan en la bandeja.

$$VE = Vg * Ng \quad (2.6)$$

Donde:

VE = Volumen de entrada o de riego (litros)

Vg = Volumen aplicado por un gotero (litros)

Ng = Número de goteros que riegan en la bandeja

Cuando se tiene más de un gotero de control o de referencia (Figura 3.4), se considera la media del volumen aplicado por todos los goteros como  $V_g$  en el cálculo del volumen de entrada en la bandeja (ecuación 2.6).

- f) El volumen de entrada (VD) es el volumen de agua recibido en el recipiente colector del drenaje.

#### **2.13.1.4. Método de la bandeja a la demanda**

Villalobos et al., (2003) menciona que la bandeja a la demanda es una estructura similar a la bandeja de drenaje, está provista en un extremo de un reservorio donde es depositado el agua drenada del sustrato. En un borde del reservorio está instalado un sensor compuesto de dos electrodos dispuestos a diferente profundidad. En el interior del reservorio se introduce un extremo de una manta que se extiende sobre el fondo plano de la bandeja. Sobre la manta se colocan los recipientes que contienen el sustrato y la planta. Al momento de colocar los recipientes sobre la bandeja, exactamente en el fondo se hacen perforaciones que permiten la salida de las raíces de los recipientes.

Las raíces salen de los recipientes aproximadamente a los 20 días después del trasplante, o en más tiempo dependiendo del clima. Cuando las raíces salen de los recipientes comienzan a tomar agua del reservorio a través de la manta por capilaridad. El volumen de agua que se almacena entre el electrodo de menor profundidad y el punto de drenaje del reservorio es el equivalente al volumen de agua que se almacena dentro de los recipientes con sustrato cuando se hace la perforación a una cierta altura para el drenaje; por lo tanto, el reservorio simula el estado del agua en los recipientes con sustratos.

Durante el proceso de transpiración de las plantas, las raíces que están en contacto con la manta extraen agua del reservorio, y va descendiendo el nivel del agua en el reservorio hasta alcanzar la altura del primer electrodo, al continuar la

extracción del agua, el primer electrodo queda fuera del agua y entonces, el circuito eléctrico queda abierto y se transmite una señal eléctrica que se interpreta en la computadora como la necesidad de riego, e inmediatamente se prende un motor o se abre una válvula para aplicar el riego. La bandeja a la demanda es de gran ayuda para definir la frecuencia de los riegos, pero el volumen de riego se define a partir de la capacidad de almacenamiento de agua en el sustrato y se ajusta a través del procedimiento realizado en el caso de la bandeja de drenaje.

### **2.13.2. Métodos Indirectos**

Estos métodos determinan la evapotranspiración en forma indirecta, para ello es necesario la aplicación de fórmulas empíricas que permiten obtener los consumos del agua a través del ciclo de la planta; los mismos se han clasificado en climatológicos y micrometeorológicos (Doorenbos y Pruitt, 1997).

#### **2.13.2.1. Métodos climatológicos**

Los métodos climatológicos estiman la evapotranspiración en periodos mínimos de una semana, dentro de estos por mencionar algunos tenemos el del Tanque evaporímetro tipo "A" y el de Penman-Monteith.

##### **2.13.2.1.1. Método del tanque evaporímetro tipo "A"**

Este método es bien conocido en el mundo dado que es el más simple y barato para estimar la evapotranspiración (Doorenbos y Pruitt, 1990). Además de que es el más destacado entre muchos métodos para estimar la evapotranspiración en el cultivo de tomate producido en invernadero (Castilla et al., 1990).

Los tanques evaporímetros varían en tamaño y forma. El tanque evaporímetro tipo "A" es el más popular en los Estados Unidos y en muchos otros países, tiene un diámetro de 121 cm, y 25.5 cm de profundidad. El tanque es usualmente construido de acero galvanizado, y debe ser colocado en una plataforma de madera nivelada. La parte baja del tanque debe situarse 15 cm encima de la superficie. El nivel del agua debe ser mantenido entre 5 y 7.5 cm por debajo del borde superior del tanque. El agua evaporada debe ser reemplazada cuidadosamente, en forma manual o por un sistema de flotador y un tanque de abastecimiento. Los cambios en el nivel del agua son medidos usando un tornillo vernier colocado en un recipiente especial (Jensen, 1969).

Por otro lado el tanque evaporímetros tipo "A" permite medir los efectos integrados de la radiación, el viento, la temperatura y la humedad en función de una superficie de agua libre (Palacios, 1982; Arteaga y Elizondo, 1986)). De un modo análogo, la planta responde a las mismas variables climáticas, pero diversos factores importantes pueden introducir cambios significativos en la pérdida de agua. La capacidad de reflexión de la radiación que tiene una superficie de agua es tan solo de un 5 a 8 por ciento a diferencia de que en la mayoría de las superficies vegetales es de un 20 a 25 por ciento de la radiación solar recibida. El almacenamiento diurno de calor en el tanque puede ser apreciable y provocar una distribución casi igual de la evaporación entre el día y la noche a diferencia la mayoría de los cultivos pierde un 95 por ciento o más de la que corresponde a las 24 horas durante las horas diurnas. Así mismo una gran diferencia entre las pérdidas de agua de los tanques y de los cultivos puede deberse a la variación de la turbulencia del aire justo encima de esas superficies, a la temperatura y a la humedad del aire inmediatamente adyacente a ellas.

En los resultados medidos de evaporación en el tanque evaporímetro también influyen la ubicación, el medio que lo rodea, el color y las pantallas que se usan para protegerlas contra animales. Además de que puede influir la transferencia de calor por los costados del tanque evaporímetro (Allen et al., 1998).

A pesar de estas diferencias, con una buena colocación y un buen mantenimiento del tanque evaporímetro, así como mantener en buenas condiciones el medio que lo rodea, sigue estando justificado su empleo para predecir las necesidades de agua de los cultivos en periodos de diez días o de más tiempo (Allen, 1994). A fin de relacionar la evaporación del tanque con la evapotranspiración del cultivo de referencia muchos autores sugieren coeficientes del tanque ( $K_p$ ) obtenidos empíricamente y que tienen en cuenta el clima, el tipo de tanque y su medio circundante (Norero, 1984).

La evapotranspiración del cultivo de referencia se puede predecir con la siguiente ecuación (Doorenbos y Kassam, 1979):

$$ET_o = K_p * E_p \quad (2.7)$$

Donde:

$ET_o$  = Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ )

$K_p$  = Coeficiente del tanque (adimensional)

$E_p$  = Evaporación del tanque ( $\text{mm día}^{-1}$ )

El método del tanque evaporímetro tipo "A" permite predecir los efectos del clima en la evapotranspiración del cultivo de referencia. Para tener en cuenta los efectos de las características del cultivo sobre sus necesidades de agua, se toman en cuenta los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ), esto con el objeto de relacionar la  $ET_o$  con la  $ET_r$ . El valor de  $K_c$  representa la evapotranspiración de un cultivo en condiciones óptimas y que produzca rendimientos óptimos. Por otra parte los factores que repercuten en el valor del coeficiente de cultivo, son principalmente las características del cultivo, las fechas de plantación o siembra, el ritmo de desarrollo del cultivo y la duración del periodo vegetativo, las condiciones

climáticas; especialmente durante la primera fase de crecimiento, y la frecuencia del riego. (USDA, 1967).

La relación entre la evapotranspiración del cultivo de referencia y la evapotranspiración real queda dada por la siguiente ecuación:

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (2.8)$$

Donde:

ET<sub>r</sub> = Evapotranspiración real (mm día<sup>-1</sup>)

ET<sub>o</sub> = Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm día<sup>-1</sup>)

K<sub>c</sub> = Coeficiente del cultivo (adimensional)

En atención a lo anterior se presenta en el cuadro 2.1 coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>) para los distintos estados fenológicos del cultivo del tomate bajo condiciones de invernadero (Giaquinto et al., 1990)

**Cuadro 2.1. Coeficientes de cultivo para los distintos estados fenológicos del cultivo del tomate bajo invernadero.**

Estado fenológico					
	Transplante a inicio de floración	Inicio de floración a tercer racimo cuajado	Tercer racimo cuajado a inicio de cosecha	Inicio de cosecha a 50 % de cosecha	50 % de cosecha a final de cosecha
<b>K<sub>c</sub></b>	0.1 – 0.4	0.4 – 0.95	0.95 – 1.4	1.4 -1.2	1.2

Por otra parte, en ocasiones cuando no se cuenta con información referente a coeficientes de cultivo para un determinado lugar, como es el caso de muchos invernaderos, se puede adoptar una metodología donde se establece una

relación empírica entre el Kc y el tiempo térmico acumulado (TTA) que es función de la temperatura. Esta relación está dado por el modelo Kc-TTA (Fernández, 2000).

### Expresiones para el cálculo del TTA

El tiempo térmico acumulado desde la emergencia o transplante se obtiene a partir de las temperaturas máximas ( $T_{m\acute{a}x}$ ) y mínimas ( $T_{m\acute{i}n}$ ) diarias y de tres valores de temperatura, característicos de cada cultivo, y que definen su respuesta a la temperatura (Tabla 2.1):  $T_b$  (Temperatura base),  $T_{op}$  (temperatura óptima) y  $T_{us}$  (temperatura umbral superior).

**Cuadro 2.2. Valores de temperatura base, óptima y umbral superior para cada cultivo.**

Cultivo	$T_b$	$T_{op}$	$T_{us}$
Solanáceas	10	30	40
Cucurbitáceas	12	32	42

Para el cálculo del TTA, primeramente se tiene que calcular el tiempo térmico diario (TTd) de acuerdo a las siguientes expresiones:

**a) Si  $T_{m\acute{a}x} < T_{op}$  y  $T_{m\acute{i}n} < T_b$ :**

$$TT = \frac{(T_{m\acute{a}x} - T_b)^2}{[2(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})]} \quad (2.9)$$

**b) Si  $T_{m\acute{a}x} < T_{op}$  y  $T_{m\acute{i}n} < T_b$ :**

$$TT = 0.5 * (T_{m\acute{i}n} + T_{m\acute{a}x}) - T_b \quad (2.10)$$

**c) Si  $T_{m\acute{a}x} > T_{op}$ :**

$$TT \frac{1}{(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})} * \left[ \frac{(T_{\text{op}} - T_{\text{mín}})^2}{2} + (T_{\text{mín}} - T_b) * (T_{\text{op}} - T_{\text{mín}}) + \left( (T_{\text{máx}} - T_{\text{op}}) * (T_{\text{op}} - T_b) * \left( 0.5 + \frac{0.5 * (T_{\text{us}} - T_{\text{máx}})}{T_{\text{us}} - T_{\text{op}}} \right) \right) \right] \quad (2.11)$$

Una vez calculado los valores del tiempo térmico diario, se prosigue a calcular el tiempo térmico acumulado, de acuerdo al siguiente modelo:

$$TTA = \sum_0^t TT \quad (2.12)$$

Donde:

0 = Fecha de emergencia o transplante

t = Día actual

Finalmente se aplica el modelo de Kc-TTA para el cultivo en estudio. A continuación se muestra el modelo para el tomate (Fernández, 2000):

- Si  $TTA < 200$   
 $Kc = 0.2$
- Si  $200 < TTA < 722$   
 $Kc = Kc_{\text{mín}} + 0.00268 * (TTA - 200)$   
 Donde,  $Kc_{\text{mín}}$  es el Kc mínimo
- Si  $TTA > 722$  hasta el primero de enero  
 $Kc = Kc_{\text{máx}}$   
 Donde  $Kc_{\text{máx}}$  es el Kc máximo
- Desde 1 de enero a 1 de marzo  
 $Kc = Kc_{t-1} - 0.01$   
 Donde,  $Kc_{t-1}$  es el Kc del día anterior

- A partir del primero de marzo  
 $K_c = 1.0$

Siguiendo con lo anterior también se puede seguir las recomendaciones o adoptar los criterios que toma la Allen (2000) para el cálculo del  $K_c$  en las diferentes etapas fenológicas para el cultivo del tomate, donde se menciona que el valor inicial de  $K_c$  para este cultivo es de 0.6, el valor máximo de  $K_c$  es de 1.18 y el valor de finales del cultivo es de 0.9.

Además la Allen (1994) divide el ciclo del cultivo del tomate en cuatro fases fenológicas que son las siguientes: fase inicial que dura 30 días, fase de desarrollo del cultivo que tarda 40 días, fase de mediados del cultivo que tiene una duración de 45 días y fase de finales de cultivo que dura 30 días; en total el ciclo del cultivo dura 145 días. A todo esto es importante mencionar que es para aquellos cultivos de tomate establecidos en primavera.

#### **2.13.2.1.2. Método de Penman-Monteith**

Por otro lado el gran desarrollo de la electrónica en los últimos años ha permitido el uso de sensores capaces de tomar los datos necesarios con rapidez y exactitud.

Estos métodos han evolucionado con el desarrollo de la tecnología y al avance del conocimiento científico, sobre las necesidades hídricas de los cultivos, en una reciente reunión de expertos (Doorenbos and Pruitt, 1990) se determinó recomendar universalmente el método de Penman-Monteith para estimar la ET.

En un considerable número de estudios se ha demostrado que el procedimiento de Penman-Monteith es mucho más consistente y preciso que otros. Esta ecuación incluye la mayor parte de los factores que influyen en la

pérdida de agua de la superficie de los cultivos a diferencia de otros procedimientos, por lo tanto, las estimaciones obtenidas se esperan más precisas.

En el pasado no se había utilizado en aplicaciones prácticas, dada la complejidad de los cálculos y la necesidad de definir valores normalizados para el cultivo de referencia. El pasto, como cultivo de referencia, se ha utilizado para estimaciones diarias, sin embargo, algunos otros métodos derivados de ecuaciones empíricas dan resultados diarios similares e inclusive mejores; pero con las capacidades de los microprocesadores, la mayor parte de las limitaciones han sido superadas y gran parte de las variables físicas se pueden medir o estimar de manera operacional.

$$ET_o = \frac{\Delta(Rn - G)}{\lambda(\Delta + \gamma^*)} + \frac{\gamma^* M_w (e_s - e_d)}{R K r_v (\Delta + \gamma^*)} \quad (2.13)$$

Donde:

$ET_o$  = Evapotranspiración de referencia, ( $\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ó  $\text{mm s}^{-1}$ )

$Rn$  = Radiación neta ( $\text{kw m}^{-2}$ )

$G$  = Flujo térmico del suelo ( $\text{kw m}^{-2}$ )

$M_w$  = Masa molecular del agua ( $0.018 \text{ kg. Mol}^{-1}$ )

$R$  = Constante universal de los gases ( $8.3 \cdot 10^{-3} \text{ KJ k}^{-1}$ )

$K$  = Temperatura, Kelvin ( $273 \text{ }^\circ\text{K}$ )

$e_s - e_d$  = Déficit de presión de vapor del aire (KPa)

$\lambda$  = Calor latente de vaporización del agua ( $2450 \text{ KJ kg}^{-1}$ )

$r_v$  = Resistencia al flujo de vapor de la cubierta vegetal ( $\text{s m}^{-1}$ )

$\Delta$  = Pendiente de la función de presión de vapor a saturación ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$\gamma^*$  = Constante psicrométrica aparente ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

### 2.13.2.1.2.1. Consideraciones Adicionales

Debido a la interdependencia de las variables que componen la ecuación, es muy importante utilizar correctamente las unidades en las que se vayan a expresarse estas variables. Asimismo, es preciso resaltar que, los resultados obtenidos con este modelo se han comparado con la evapotranspiración potencial medida en lisímetro, encontrando una alta correlación. Una de las desventajas de su aplicación es la falta de registros de algunos factores que en ella intervienen y que comúnmente solo se encuentran en estaciones de primera categoría (Coras, 1996). Por otro lado, es importante considerar que para la aplicación de este método debe disponerse de datos climatológicos como: Radiación solar ( $R_s$ ), Temperatura ( $T$ ), Velocidad del viento ( $U_2$ ) y la Humedad relativa (HR) o la temperatura a punto de rocío.

### 2.13.2.2. Métodos micrometeorológicos

Los métodos micrometeorológicos estiman la evapotranspiración en cortos intervalos de tiempo (20-30 min), por lo que permiten estimar este parámetro en tiempo real (Rosenberg, 1975).

Los principales métodos micrometeorológicos son: el de la Relación de Bowen, el Aerodinámico y el de la Correlación de Eddy. Lo que es claro mencionar es que estos todos métodos consisten en medir los componentes de la ecuación del balance de energía para una superficie vegetal sin considerar los términos menores, la cual se puede escribir de la siguiente forma (Stull, 1991; Pal Arya, 1988):

$$R_n - G = H + LE \quad (2.14)$$

Donde:

$R_n$  = Radiación neta ( $Wm^{-2}$ )

$G$  = flujo de calor en la superficie del suelo ( $Wm^{-2}$ )

$H$  = Flujo de calor sensible ( $Wm^{-2}$ )

$LE$  = Flujo de calor latente ( $Wm^{-2}$ )

Según Baldocchi et al. (1988) y Zermeño and Hipps (1997) los métodos micrometeorológicos tienen varias ventajas con respecto al uso de modelos empíricos que se basan en información climatológica promedio mensual. Esto se debe a que los métodos micrometeorológicos causan mínimas alteraciones del microclima del ecosistema bajo estudio, se obtienen valores muy precisos de la evapotranspiración de los cultivos en grandes superficies, permiten realizar mediciones continuas y proveen mediciones integrales del flujo.

Los problemas que se tienen al utilizar estas técnicas son sin duda el alto costo del equipo e instrumental (Estación de la Relación de Bowen), así mismo de que se debe contar con personal capacitado para su utilización, por lo que se dificulta su acceso en la mayoría de los productores (Priestley and Taylor, 1972).

#### **2.13.2.2.1. Método de la relación Bowen**

El método de la relación de Bowen ha sido empleado por muchos investigadores (Tanner, 1960; Rosenberg and Verma, 1975; Hartman and Gay, 1981; Tijerina, 2000 y Munguía 2000) para medir el flujo de calor y vapor de agua en diferentes cultivos con excelentes resultados, pero estas mediciones se han realizado únicamente en cultivos a campo abierto y no en invernaderos con cultivos sin suelo (semi-hidroponía).

Partiendo de la ecuación del balance de energía  $(R_n - G) = (LE + H)$ , y definiendo  $\beta$  como la relación entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente ( $\beta = H/LE$ ), podemos obtener:

$$LE = \frac{Rn - G}{1 - \beta} \quad (2.15)$$

Obteniendo  $LE$  y  $\beta$ , el flujo de calor sensible ( $H$ ) se obtiene con:

$$H = \beta * LE \quad (2.16)$$

El valor de la relación de Bowen se obtiene a partir de las relaciones de gradiente flujo.

El flujo de calor sensible se puede expresar de la siguiente manera:

$$H = \rho C_p K_h \frac{\partial \bar{T}}{\partial Z} \quad (2.17)$$

Donde:

$K_h$  = Coeficiente de difusividad turbulento (eddy diffusivities) para calor sensible.

$\partial \bar{T} / \partial Z$  = gradiente vertical promedio de temperatura del aire

$\rho$  = Densidad calorífica del aire.

$C_p$  = Capacidad calorífica del aire.

El flujo de calor latente se puede expresar como:

$$LE = \lambda \rho K_w \frac{\partial \bar{q}}{\partial Z} \quad (2.18)$$

Donde:

$K_w$  = Coeficiente de difusividad turbulento (eddy diffusivities) para calor latente.

$\partial \bar{q} / \partial Z$  = Gradiente vertical promedio de la humedad específica.

$\rho$  = Densidad calorífica del aire.

$\lambda$  = Calor de vaporización del agua.

El flujo de bióxido de carbono se expresa como sigue:

$$F_{CO_2} = K_{CO_2} \frac{\partial \overline{p_{CO_2}}}{\partial Z} \quad (2.19)$$

Donde:

$K_{CO_2}$  = Coeficiente de difusividad turbulento (eddy diffusivities) para bióxido de carbono.

$\partial CO_2 / \partial Z$  = Gradiente vertical promedio de bióxido de carbono.

$\rho$  = Densidad calorífica del aire.

Y el flujo de momento se expresa de la siguiente manera

$$\tau = \rho K_m \frac{\partial \overline{U}}{\partial Z} \quad (2.20)$$

Donde:

$K_m$  = Coeficiente de difusividad turbulenta (eddy diffusivities) para flujo de momento.

$\partial \overline{U} / \partial Z$  = Gradiente vertical promedio de la velocidad horizontal del viento.

$\rho$  = Densidad calorífica del aire.

Asumiendo que los gradientes verticales promedio de temperatura y humedad específica se pueden aproximar con las diferentes verticales promedio, de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$\frac{\partial \overline{T}}{\partial Z} = \frac{\Delta \overline{T}}{\Delta Z}; \dots \dots \dots y \dots \dots \dots \frac{\partial \overline{q}}{\partial Z} = \frac{\Delta \overline{q}}{\Delta Z} \quad (2.21)$$

Con la consideración anterior, la relación Bowen se puede escribir de la siguiente forma:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\rho C_p K_h \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta Z}}{\lambda \rho K_w \frac{\Delta q}{\Delta Z}} \quad (2.22)$$

Asumiendo que  $K_h = K_w$  (teoría de la símil arridad) y definiendo  $\gamma = C_p/\lambda$  tendremos:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta q} \quad (2.23)$$

Las mediciones requeridas por este método son: Radiación neta sobre el dosel del cultivo, flujo de calor en la superficie del suelo, temperatura del aire y humedad específica a dos elevaciones sobre el dosel del cultivo. Las mediciones de temperatura y humedad relativa se realizan generalmente a una separación vertical de un metro. Las principales ventajas de este método son: es muy robusto a las condiciones atmosféricas adversas, no requiere asistencia continua y puede operar por periodos prolongados de tiempo. Algunas de las desventajas de este método son: muy sensibles a los errores en las mediciones de radiación neta y flujo de calor en el suelo, en ecosistemas muy secos donde los gradientes verticales de humedad específica son muy pequeños, las mediciones son muy difíciles de realizar, cuando el resultado de la realización Bowen tiende a un valor de uno, el método es inestable.

## Instrumentación

El gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ) se mide utilizando termopares de alambre fino de chromel constantan (termopares tipo *E* de 76.2  $\mu\text{m}$  de diámetro), el gradiente de humedad específica ( $\Delta q$ ) se mide con un higrómetro de punto de rocío de respuesta rápida, estas mediciones se deben realizar a una frecuencia

de un segundo y promedio de 20 a 30 minutos. La radiación neta se mide con un radiómetro neto y el flujo de calor en la superficie del suelo se obtiene midiendo el flujo de calor a 8 cm de profundidad con un plato para flujo de calor y se realiza la corrección por cambios de temperatura del suelo sobre el plato hasta la superficie del suelo (Kimball and Jackson, 1979; Fuchs, 1986).

## **2.15. Trabajos reportados sobre evapotranspiración**

González y Hernández (1999) probaron en el Campo Experimental de la Zona Henequenera (CEZOHE) cinco tratamientos que consistieron en la aplicación de diferentes volúmenes de agua (láminas de agua) calculadas a partir de los registros diarios de evaporación en un tanque evaporímetro tipo "A" y afectados por diferentes  $K_p$  (0.6, 0.8, 1.0 y 1.2). Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con seis repeticiones. La parcela experimental constó de dos hileras dobles de tomate de 6 m de longitud, separados a 2 m que ocuparon 24 m.

Las variables que evaluaron son: rendimiento de cultivo (total, comercial y rezaga), el contenido relativo de agua y el contenido de humedad del suelo medidos gravimétricamente.

El rendimiento más elevado de tomate en las categorías total, comercial y de tercera se logró con el coeficiente 0.8 con 35.8, 23.9 y 12.5 ton/ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Igualmente este mismo tratamiento de 0.8 resultó el más eficiente en el uso de agua, con valores 5.5 y 8.3 Kg m<sup>-3</sup> de agua aplicada. Por lo anterior, señalan que afectar las lecturas del tanque evaporímetro por un coeficiente de 0.8 resulta un buen indicador para determinar las necesidades hídricas del cultivo de tomate en la zona Henequenera de Yucatán.

Lara et al.(2000) compararon en Montecillo, México el cálculo de evapotranspiración acumulada para cada día con los siguientes métodos en el

cultivo de melón (*cucumis melo*) bajo condiciones de invernadero: Penman-Monteith, Radiación y Tanque evaporímetro tipo A, con los registrados por el reflectómetro de ondas electromagnéticas a través del tiempo (TDR; CS615 marca Campbell), empleado como referencia y con el cual se estimó la ETc basándose en los cambios de contenido volumétrico de humedad promedio de cuatro diferentes puntos de las macetas muestreadas.

La ETc total medida durante el periodo de estudio fue de 26.43 cm para Penman-Monteith, 32.01 cm para radiación y 32.09 cm para la ETc medida con el TDR. Cuando realizaron la correlación entre los valores obtenidos a través del TDR y los generados a partir del método de radiación les dio como resultado un grado de asociación bajo, coeficiente de correlación ( $r$ ) de 0.65 y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.45; mientras que al correlacionar los valores del TDR con el método de Penman-Monteith se obtuvo un " $r$ " de 0.87, que consideraron como una correlación aceptable y un " $r^2$ " de 0.67. El método de Penman-Monteith, a pesar de no considerar los aspectos de resistencia aerodinámica incluidas en la ecuación general de determinación de la ETo, presentó una mejor aproximación a los valores generados con el TDR que el método de radiación.

Martelo (1989) comparó nueve modelos de ETp con respecto a la evaporación de tanque estándar tipo "A" mediante el uso de tres índices (índice estacional, relación porcentual y coeficiente de correlación) los datos utilizados fueron obtenidos de cinco estaciones climatológicas tipo C1, para un periodo de 16 años (1968-1983). Los modelos utilizados fueron: Penman, Hargreaves, Linacre, García-López, Thornthwaite, Turc, Radiación, Thornthwaite distribuido y Evaporación de tanque. El modelo mejor adaptado se determinó mediante un procedimiento de jerarquización, concluyó que: el modelo de ETp mejor adaptado fue el de Hargreaves, según los criterios de selección utilizados; sin embargo, el investigador recomienda que en trabajos posteriores se incluyan parámetros edáficos especialmente referidos a sus propiedades físicas.

Hernández (2000) señala al comparar cuatro modelos simulativos de ET<sub>p</sub>, mediante información climática generada por medio de estaciones agroclimáticas, en cuatro localidades de la región productora de papa de Coahuila y Nuevo León (Emiliano Zapata, Jame, Los Lirios y el Tunal), con el propósito de verificar cual modelo se aproxima a seguir la línea de tendencia de la ET<sub>r</sub> en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L). Observa que las comparaciones hechas a los métodos de: 1) Blaney y Criddle modificado por la FAO – 24 (1977), 2) Hargreaves – Samani (1985), 3) Método Combinado de Penman (1948) y 4) Método de Jensen – Haise.

La comparación estadística de los modelos se realizó por medio de un análisis de errores reducidos y aplicando una prueba t-student, indica que el modelo que más se aproxima a la línea de tendencia de la ET real fue el método de Jensen – Haise; sin embargo, es el que representa mayor coeficiente de variación con respecto a los demás.

La orden de precisión de los modelos fue como se indica:

- 1.- El método de Jensen – Haise.
- 2.- Blaney y Criddle modificado por la FAO.
- 3.- Método de Penman.
- 4.- Hargreaves – Samani.

Tapia y Alcantar (1995) evaluaron la ET<sub>p</sub> en el cultivo de melón en el valle de Apatzingán Michoacán al aplicar la metodología de Penman, Jensen y Haise, Blaney-Criddle y Thornthwaite a los datos climáticos para obtener los valores de ET por fase de desarrollo del cultivo. Concluye de acuerdo a los resultados obtenidos que: 1) el nivel de evapotranspiración del melón se incrementa en forma proporcional con la edad del cultivo, hasta un máximo en la formación del

fruto, 2) el método más aplicable en la región para este u otro cultivos, en la estimación de ET es el de Blaney-Criddle.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Descripción del sitio experimental**

### 3.1.1. Localización

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo durante el ciclo Primavera-Verano de 2004, en uno de los invernaderos del campo agrícola experimental del Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), localizado al Noreste de la ciudad de Saltillo, Coahuila; cuyas coordenadas geográficas son: 25° 27' de latitud Norte, 101° 02' de longitud Oeste del meridiano de Greenwich y a una altura de 1610 msnm.

### 3.1.2. Clima.

De acuerdo a la clasificación climática de Köeppen y modificada por García (1973) el clima de Saltillo corresponde aun seco estepario, con fórmula climática BsoK (x') (e').

Donde:

Bso: Es el clima más seco de los Bs.

K: Templado con verano cálido, siendo la temperatura media anual entre 12 y 18 °C, y la temperatura media del mes más caluroso de 18°C.

(x'): Régimen de lluvias intermedias entre verano e invierno.

(e'): Extremoso con oscilaciones entre 7 y 14 °C.

En general la temperatura y precipitación pluvial media anual son de 18 °C y 365 mm respectivamente, los meses más lluviosos son principalmente los que comprenden entre Julio y Septiembre, concentrándose la mayor parte en el mes de Julio. La evaporación promedio mensual es de 178 mm, presentándose las más altas en los meses de Mayo y Junio con 236 y 234 mm respectivamente (Callegas, 1988).

### **3.2. Material vegetativo**

Para la realización de este experimento se utilizó un híbrido de tomate de crecimiento indeterminado de nombre Gabriela de la casa comercial Hazera, esta híbrido es de madurez tardía, de vida prolongada apta para producción en invernadero y recomendada para cultivarse durante los ciclos de otoño, invierno y primavera temprana.

### **3.3. Establecimiento del experimento**

El experimento tuvo lugar en un invernadero de doble capilla de una superficie de 1250 m<sup>2</sup>, con dimensiones de 50 m de largo (Este - Oeste) y 25 m de ancho (Norte - Sur), de estructura metálica con una cubierta de polietileno térmico PE "larga duración" de color blanco translúcido, de 188 micras de espesor (calibre 720). El invernadero estuvo equipado con control de clima y equipo de fertirriego computarizado (Figura 3.1).

### 3.3.1. Preparación del invernadero

Antes del establecimiento de las plántulas en el invernadero, este se acondicionó de tal manera que quedara lo más listo posible para el experimento, para esto se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Primeramente se hicieron las camas dejando un desnivel hacia la parte del canal principal, a lo largo de estas se dejó un canal, esto con la intención de que el agua drenada de cada saco o taco se vertiera por esta vía y finalmente fuera depositado en el canal principal de drenaje. Además se procuró dejar más ancho un costado de cada cama para colocar los tacos. La distancia entre camas fue aproximadamente de 1.80 m.
- Se prosiguió a acolchar las camas con un plástico de polietileno de color blanco, haciendo que el plástico tomara la forma del diseño de la cama para no tener problemas con la distribución del drenaje.
- A continuación se colocaron los tacos o sacos de sustrato sobre el costado más ancho de cada cama.
- Se puso el canal principal de drenaje el cual fue de aluminio.
- Se establecieron las cintas de riego de flujo horizontal en cada cama con sus respectivos goteros para cada taco.
- Se agregaron 4 ventiladores que fueron instalados uno en cada sección o válvula del experimento.
- Se colocó el tanque evaporímetro tipo "A" en una de las secciones (sección 6) del experimento.

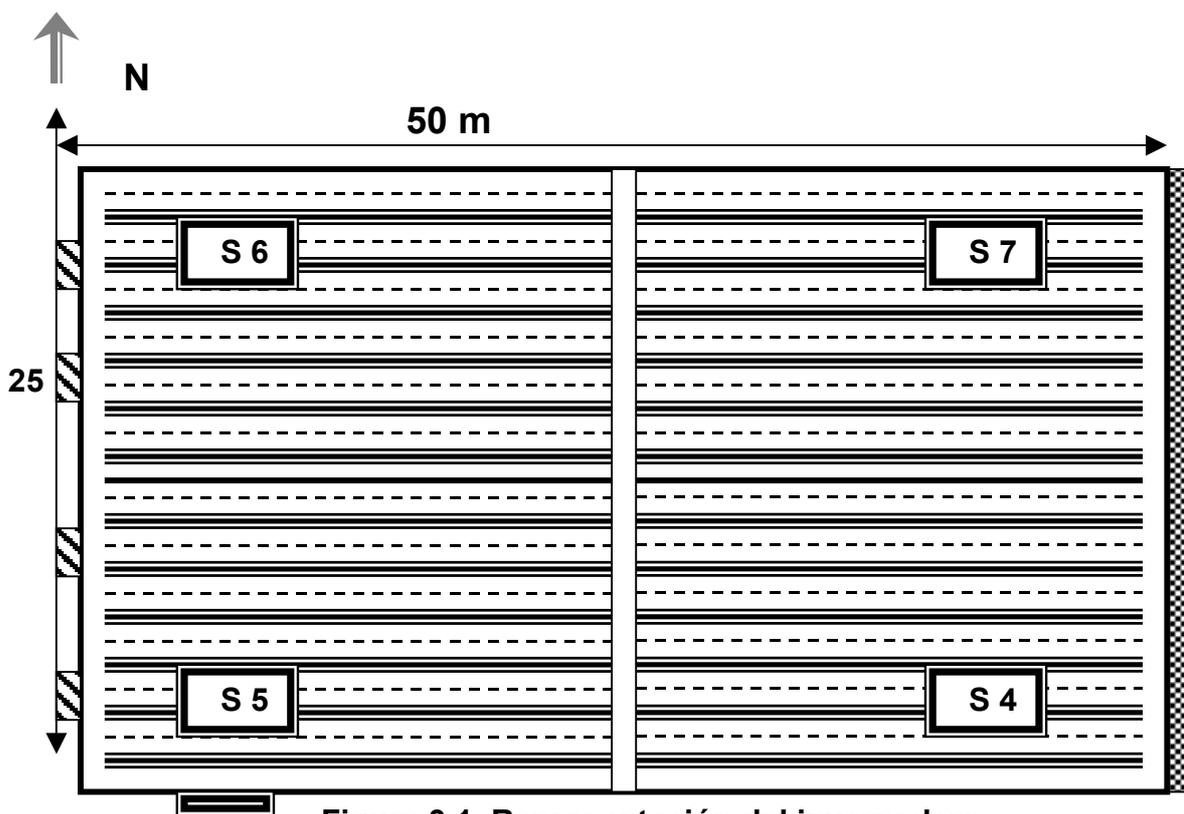


Figura 3.1. Representación del invernadero

### 3.4. Siembra

El 13 de febrero de 2004 se preparó la semilla para sembrarse en charolas de unigel de 200 cavidades, posteriormente se dejaron en un invernadero cubriéndolos con plástico color negro de polietileno donde permanecieron 45 días.

### 3.5. Transplante

El transplante se realizó el 13 de Abril de 2004 en el invernadero, en donde tuvo lugar el experimento.

### 3.6. Fertilización

La solución nutritiva se hizo de acuerdo a lo que se presenta en el cuadro 3.1.

**Cuadro3.1. Fertilización para el cultivo del tomate**

Periodo	N ( g/ha/día)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g/ha/día)	K <sub>2</sub> O (g/ha/día)
Del Transplante al primer racimo	750-1000	750-1000	750-1000
Del primer racimo hasta el cuajado completo del 5º racimo	2000-3000	1200-1800	3000-4500
Del 5º racimo al comienzo de la cosecha	5000-8000	3000-4800	7500-12000
Cosecha	6000-8000	3600-4800	9000-12000
Últimas 8 semanas hasta el fin de la cosecha	2000-3000	1200-1800	3000-4500

### 3.7. Riego

Se utilizó un equipo de fertirriego automatizado, las frecuencias de riego de 30 minutos con un tiempo de riego de 5 minutos, cuando las temperaturas eran altas se aumentaba a 6 minutos.

### 3.8. Labores culturales

### **3.8.1. Entutorado para el manejo del cultivo a dos tallos y a un tallo**

Este tipo de prácticas también es importante, ya que de un buen entutorado depende un buen crecimiento de las plantas. El entutorado se inicio desde el momento del trasplante para ambos tipos de manejo del cultivo, en el caso de las secciones 4 y 5 el entutorado del segundo tallo se hizo aproximadamente a los 20 días después del trasplante, esta práctica se prolongó hasta el final del ciclo cultivo, realizándose aproximadamente cada ocho días. Conforme se iban desarrollando los tallos, estos se iban guiando con el tutor, una vez que las plantas alcanzaron más o menos una altura de 3 metros se procedió a descolgar de manera progresiva. El material que se utilizó como guía de los tallos fue hilo de rafia; estos antes de comenzar la práctica fueron atados y enrollados en ganchos especiales para tal fin, así como también se usaron anillos o clips que fueron sujetos a uno de los extremos de cada hilo o tutor para después acomodarlos en los tallos de cada planta.

### **3.8.2. Poda de tallos o brotes**

Es bien sabido que la poda tanto de tallos como de hojas es obligatoria en variedades o híbridos de tomate de crecimiento indeterminado. Es por eso que en este experimento no podía faltar estos tipos de podas. La poda de tallos o brotes se llevó a cabo aproximadamente cada 10 días, tratando de que fuera lo más oportuno posible. La poda se realizó con tijeras especiales que se desinfectaban antes de cada uso, esto con la intención de no transmitir alguna enfermedad en las plantas.

### **3.8.3. Poda de hojas**

La poda de hojas se realizó aproximadamente cada 15 días, al igual que en la poda de brotes esta práctica se hizo con tijeras especiales desinfectadas previamente a cada uso. En la poda se eliminaron todas aquellas hojas inferiores senescentes por debajo del último racimo que iba madurando (racimo rayado). Se trató que la poda fuera lo más uniforme y equilibrada posible y que fuera ejecutada con cuidado, esto con la finalidad de evitar estresar la planta en su balance hídrico y energético y crear problemas de entrada de patógenos.

#### **3.8.4. Poda de frutos**

Este tipo de poda no fue tan frecuente como lo fue en el caso de las prácticas anteriores, pero las veces que se realizó esta práctica se trató de que se realizara lo más oportuno como fuera posible, llevándose a cabo en aquellas inflorescencias o ramilletes con gran número de flores o frutos (más de 6). Esto se hizo con la intención de que los frutos desarrollaran buen tamaño y evitar el desprendimiento total de los ramilletes.

### **3.9. Control de plagas y enfermedades**

Los primeros días después del transplante se hizo presente el parásito *Botrytis cinerea* Pers; provocando la enfermedad de la caída de plantas o “damping-off”, este hongo fue atacado con el fungicida Rally 40w, además de tener un mejor cuidado en el drenaje de los sacos, las plantas que presentaron este problema se desecharon inmediatamente para evitar reproducción del hongo. Durante el ciclo del cultivo también se presentaron enfermedades provocados por los siguientes virus: virus del rizado amarillo del tomate (TYLV), virus del bronceado del tomate (TSWV), y el virus del enanismo ramificado del tomate (TBSV). Para combatir estos tipos de enfermedades se aplicaron fungicidas como el Trevanil, Promyl, Tecto, Previcuir, Pro F + B, Cupravit, y Endosulfan.

Siguiendo con el control de virus, se eliminaron las plantas afectadas, se eliminaron las malas hierbas dentro y fuera del invernadero y se hicieron aplicaciones de insecticidas para combatir insectos vectores tales como mosca blanca (*Bemisia tabaci* G. y *Trialeurodes vaporariorum* W.) y trips (*Frankliniella occidentalis* P.)

A partir del periodo de producción se hizo manifiesto alteración en el fruto apareciendo la podredumbre apical (Blossom-end rot). Esta fisiopatía estuvo relacionada con los niveles deficientes de calcio en el fruto, el estrés hídrico y la salinidad, para la solución de este problema se aplicaron fertilizantes foliares tales como Foltron plus, Poliquel, Bionex y Quelatos de calcio, ya que esta alteración en ocasiones es debido a que la planta puede necesitar más calcio del que puede asimilar por medio de las raíces. También se presentó rajado de frutos, esta alteración se debió a los desequilibrios tanto en los riegos como en la fertilización y a la bajada brusca de las temperaturas nocturnas después de un periodo de calor, para no tener tantos problemas de este tipo fue necesario tener un mayor control del riego.

### **3.10. Consideraciones estadísticas**

El análisis de resultados se hizo en base a gráficas, usando técnica de regresiones y correlaciones.

### **3.11. Materiales utilizados**

#### **3.11.1. Método del tanque evaporímetro**

Para la realización de este método se usaron dos tanques evaporímetros con los que cuenta el CIQA, uno de ellos es de acero, el cual se ubicó en una superficie con pasto, el otro es fibra de vidrio y este se puso dentro del

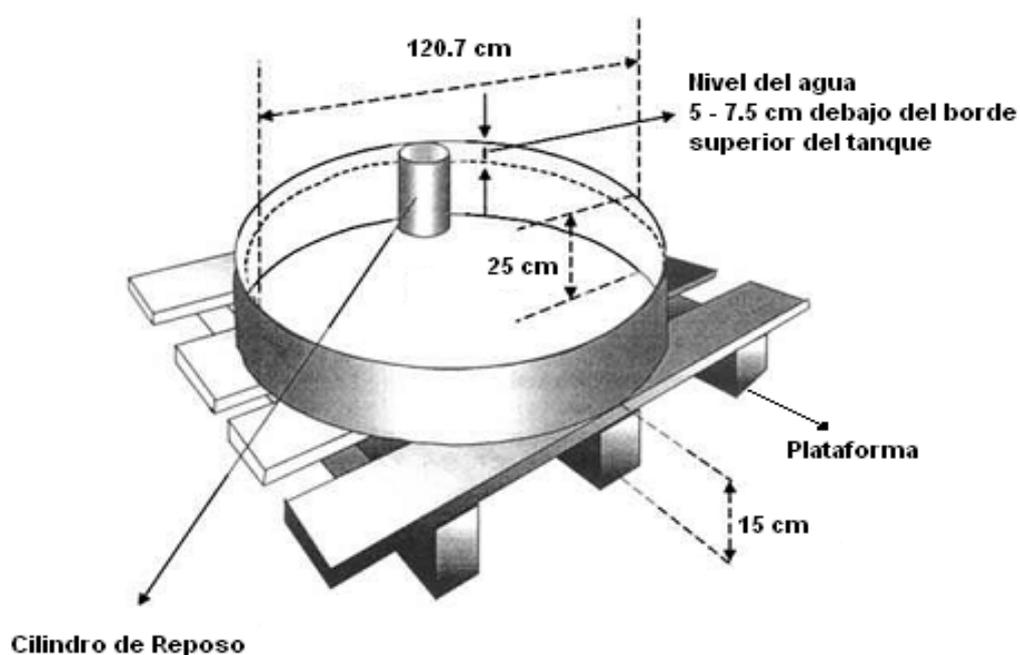
invernadero, en donde se estableció el cultivo del tomate, de los cuales se tomaron los datos de evaporación diaria para cada caso, para después ser sustituidas en la ecuación 2.8.

### 3.11.1.1. Descripción del tanque evaporímetro

Se usaron dos tanques evaporímetros tipo "A" los cuales cuentan con los siguientes elementos:

- Tanque evaporímetro
- Cilindro de reposo
- Tornillo micrométrico
- Plataforma de madera

Para obtener lecturas representativas de evaporación fue necesario mantener el agua que contenía el tanque en buen estado y no dejar que este descendiera a menos de 5 ó 7.5 cm del borde, como se aprecia en la figura 3.2.



### **Figura 3.2. Tanque evaporímetro tipo “A” del CIQA**

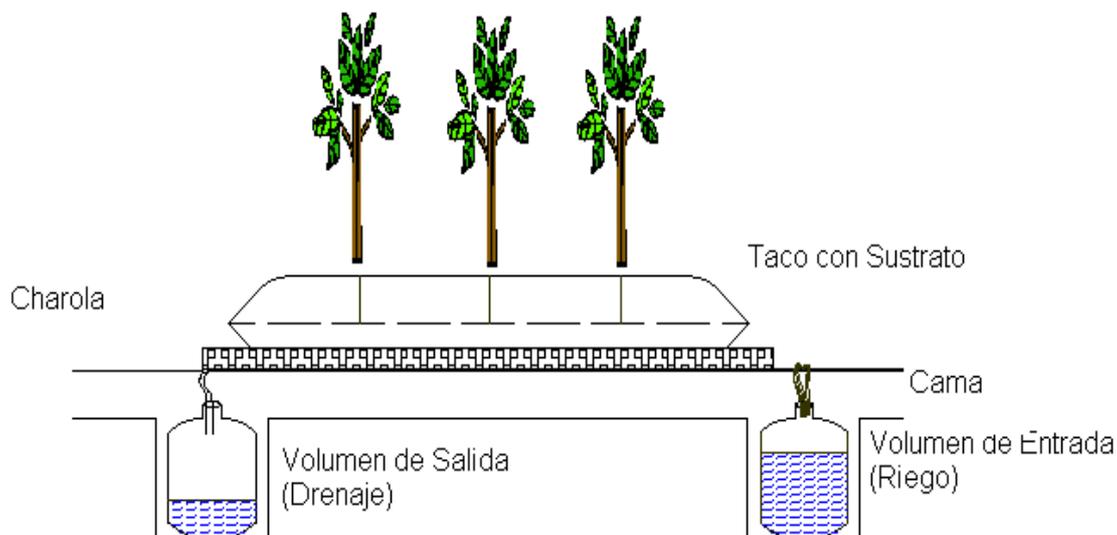
#### **3.11.2. Método de la bandeja de drenaje**

Estos dispositivos se basan en medir el volumen de agua de entrada en la bandeja y el volumen de salida en el drenaje. Para calcular el volumen de agua que consumió el cultivo se aplicó la ecuación 2.5.

##### **3.11.2.1. Descripción de la bandeja de drenaje**

La elección del material de la bandeja se hizo de acuerdo a lo que dice la literatura. Se usaron charolas ligeramente más grandes que los tacos o sacos que contenían el sustrato como se observa en la figura 3.3. A continuación se describen los componentes de la bandeja de drenaje.

- Bandeja de drenaje de 1 m de largo por 30 cm de ancho.
- Taco o saco con sustrato.
- Manguera flexible de 1 pulgada.
- Tanque colector de drenaje (ánforas de plástico de 22 litros).
- Recipiente para captar el volumen de entrada (garrafones de Plástico de 19.7 litros).
- Goteros de control o de referencia .



**Figura 3.3. Los componentes de la bandeja de drenaje**

### 3.12. Metodología en la toma de datos

#### 3.12.1. Tanque evaporímetro

El valor de la evaporación se obtuvo con las lecturas diarias del tornillo micrométrico en el tanque evaporímetro tipo "A", y por diferencia de lecturas entre la actual y la del día anterior se obtuvo la evaporación diaria en mm durante el tiempo que tardó el experimento.

#### 3.12.2. Bandeja de drenaje

Para este caso las lecturas tanto de riego (volumen de entrada) como de drenaje se tomaron diariamente a las 8:00 de la mañana, antes de que comenzara a funcionar el sistema de riego, obteniendo de esta manera por diferencia de datos de riego y drenaje el volumen de agua consumida por las plantas del día anterior.

#### **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Antes de discutir los resultados es importante mencionar que la superficie experimental (invernadero) fue dividido en cuatro secciones (4, 5, 6 y 7). En las secciones 4 y 5 el cultivo se manejo a 2 tallos y en las secciones 6 y 7 el cultivo

tuvo un manejo a un solo tallo. Por consiguiente los tiempos de riego que se manejaron en las secciones 4 y 5 fueron mayores que en las otras secciones.

Los resultados de esta investigación se discutirán básicamente por medio de técnicas de correlación, regresión y análisis de gráficas.

El análisis y discusión de los datos se presentarán en orden cronológico empezando con el comportamiento de la evaporación ( $E_p$ ) medida en tanque evaporímetro tipo "A" del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Las lecturas del tanque evaporímetro se evaluaron en condiciones de campo abierto ( $E_{p_{ca}}$ ) y en condiciones de invernadero ( $E_{p_{inv}}$ ), posteriormente discutiremos los valores de Evapotranspiración de referencia para condiciones de campo abierto ( $ET_{p_{ca}}$ ) y evapotranspiración de referencia para condiciones de invernadero ( $ET_{p_{inv}}$ ), donde se utilizaron diferentes valores de coeficiente de tanque ( $K_p$ ) propuestos por el manual 24 de la FAO. Después analizaremos el valor de la evapotranspiración real ( $ET_r$ ) para condiciones de campo abierto y condiciones de invernadero, donde se utilizó la metodología de tiempo térmico acumulado (TTA) propuesto por Fernández (2000) y la metodología propuesta por la FAO en su manual 56, Allen et al. (1998), para determinar el valor del coeficiente de desarrollo del cultivo ( $K_c$ ).

Posteriormente se discutirán los valores de  $K_c$  reales ( $K_{cr}$ ) obtenidos para los dos sistemas de producción a dos tallos (2T) y un tallo (1T).

Finalmente analizaremos el consumo de agua diario del cultivo del tomate bajo la metodología de la bandeja de drenaje.

- Análisis de los resultados de  $Ep_{ca}$  y  $Ep_{inv}$

Según la figura 4.1 nos muestra un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.99 que indica que los cambios o diferencias que existen en la variable dependiente, dependen de un 99 por ciento de la variable independiente. Por otra parte se observa que el valor de la  $Ep$  de tanque se reduce en un 34 por ciento en condiciones de invernadero, lo que nos permite hacer un uso más eficiente del agua de riego en invernadero esto debido a que en condiciones de invernadero se minimiza la velocidad así como la radiación.

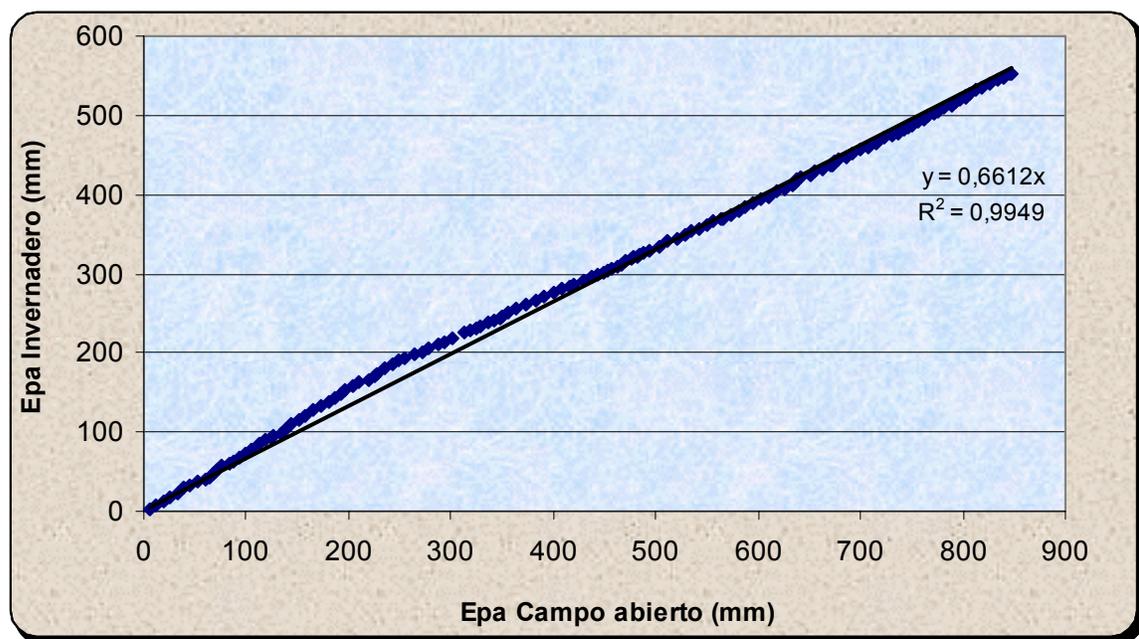


Figura 4.1. Correlación de la  $Ep_{ca}$  contra la  $Ep_{inv}$ .

- Análisis de los resultados de  $ETp_{ca}$  y  $ETp_{inv}$ .

En la figura 4.2 se aprecia un  $R^2$  de 0.99 que indica que los cambios o diferencias existentes en la variable dependiente, dependen de un 99 por ciento de la variable independiente. Además se observa que para condiciones de invernadero se tiene un 24 por ciento menos de evapotranspiración potencial, debiéndose a los factores como el viento y la radiación que son menores en condiciones controladas de ambiente.

Por otra parte debido a los cambios en las condiciones climáticas que ocasiona la producción en invernadero es importante realizar investigaciones que nos permitan ajustar los nuevos valores de  $K_p$ .

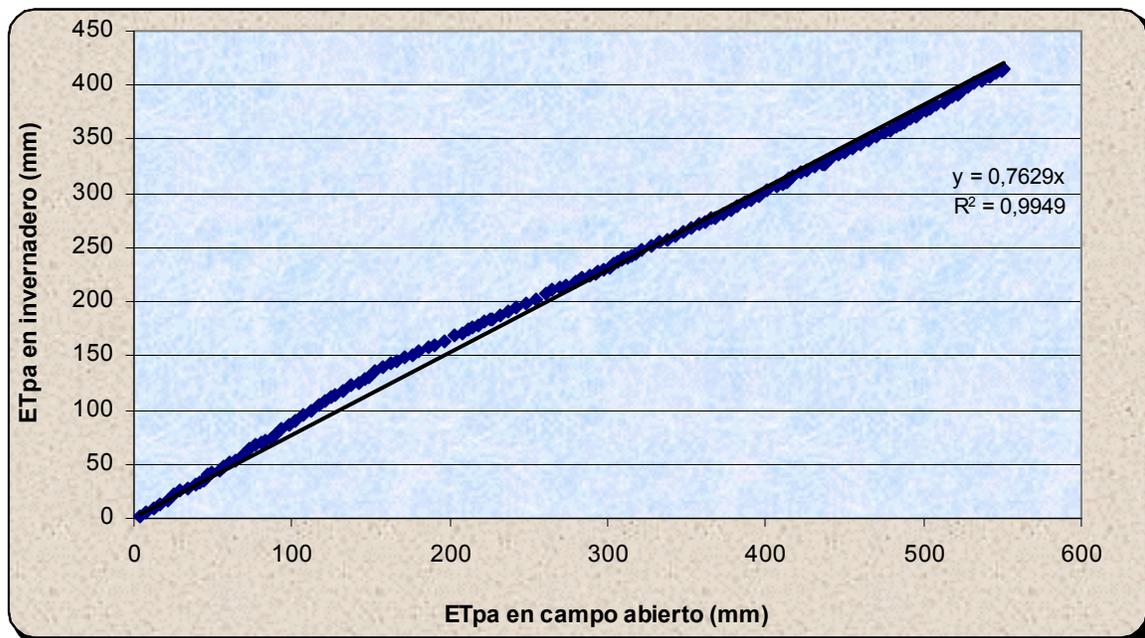
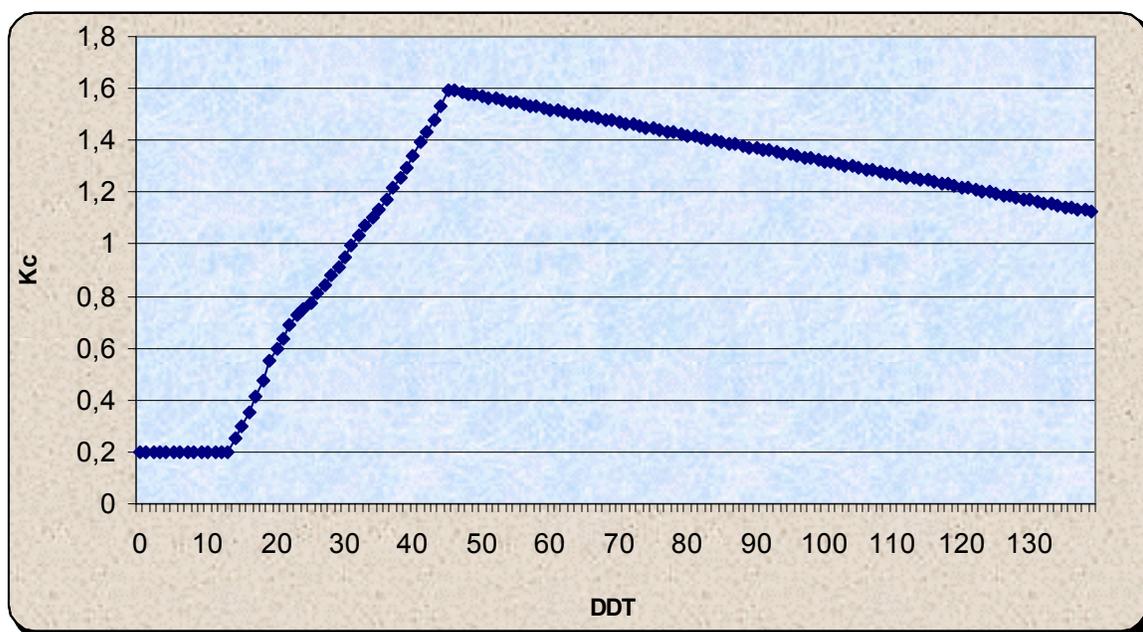


Figura 4.2. Correlación de la  $ETp_{ca}$  contra la  $ETp_{inv}$ .

- Análisis de la curva de  $K_c$  obtenido por la metodología del TTA para el cultivo del tomate.

En la figura 4.3 se observa que el valor de  $K_c$  inicial es de 0.2 que pertenece a la etapa fenológica de inicio del cultivo y duró 13 días, se observa que la etapa vegetativa tiene valores de  $K_c$  que van desde 0.2 hasta 1.59 que es el valor máximo, esta etapa inició el día 14 y terminó el día 45 DDP y por último se aprecia que inmediatamente los valores empiezan a descender hasta 1.12 formando la etapa de producción y finales del cultivo; esto se dio a partir del día 46 hasta el día 139 DDT.



**Figura 4.3. Curva de  $K_c$  obtenido por la metodología del TTA para el cultivo del tomate**

- Análisis de la curva de  $K_c$  obtenido de la metodología del manual 56 de la FAO para el cultivo del tomate.

Cabe mencionar que el valor de  $K_c$  inicial, máximo y de finales de cultivo como se aprecia en la figura 4.4 fueron tomados de acuerdo a la literatura y que recomienda la FAO en el manual 56. La única modificación que se hizo fue ajustar los días de duración para cada etapa fenológica, ya que según la literatura el ciclo

del cultivo del tomate cultivado en primavera dura 145 días y en esta investigación se está tomando como duración del cultivo 139 días.

En la figura 4.4 se observa que la etapa fenológica inicial dura 30 días y que el valor de  $K_c$  para esta etapa es de 0.6, también se observa que la etapa de desarrollo tiene valores de  $K_c$  desde 0.7 hasta alcanzar el valor máximo de 1.15, esta etapa inicia el día 31 y termina el día 69 DDT. El valor de 1.15 permanece estable durante toda la etapa de mediados del periodo que se da a partir del día 70 al día 111 DDT, a partir de este día se observa que los valores empiezan a descender hasta 0.9, que es la etapa de finales de cultivo que empieza el día 112 y termina el día 139 DDT.

De acuerdo a los valores de  $K_c$  que arrojan ambas figuras tiende a ser más confiable la metodología de la FAO, ya que en sistemas de producción intensivo el crecimiento es más estable debido a la poda y bajado de tallos, además de que la etapa de producción es más precoz y prolongada.

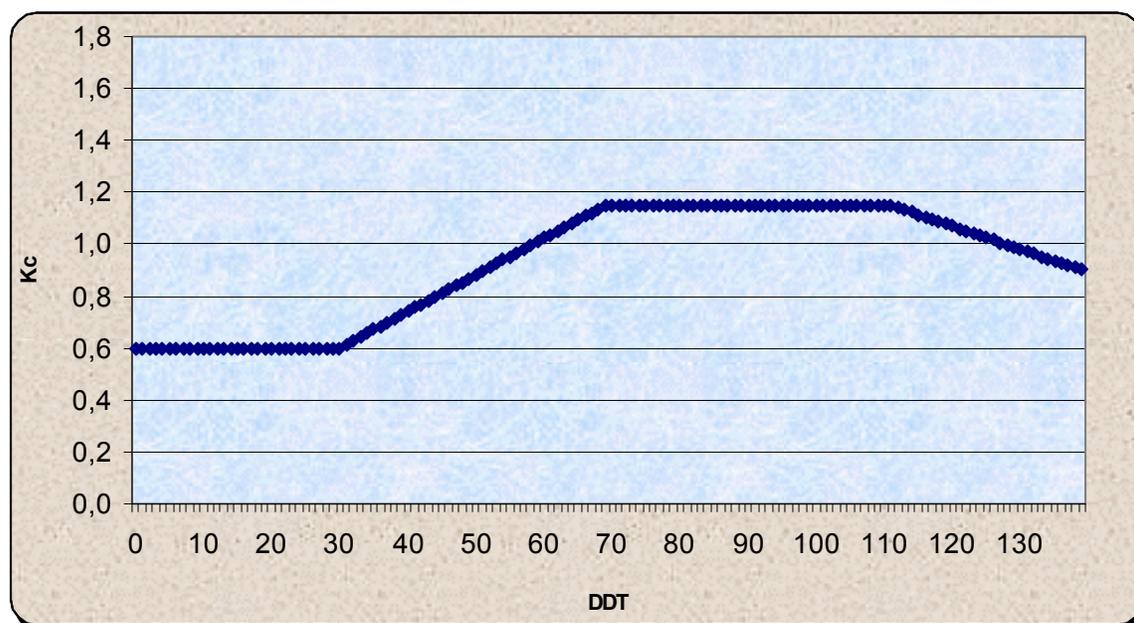


Figura 4.4. Curva de  $K_c$  obtenido por la metodología de la FAO para el cultivo del tomate

- Análisis de los Kcr

Primeramente es importante mencionar que para obtener los valores de Kcr para cada manejo de cultivo se utilizó la siguiente ecuación:

$$Kcr = \frac{ETr}{ETp} \quad (4.1)$$

Donde:

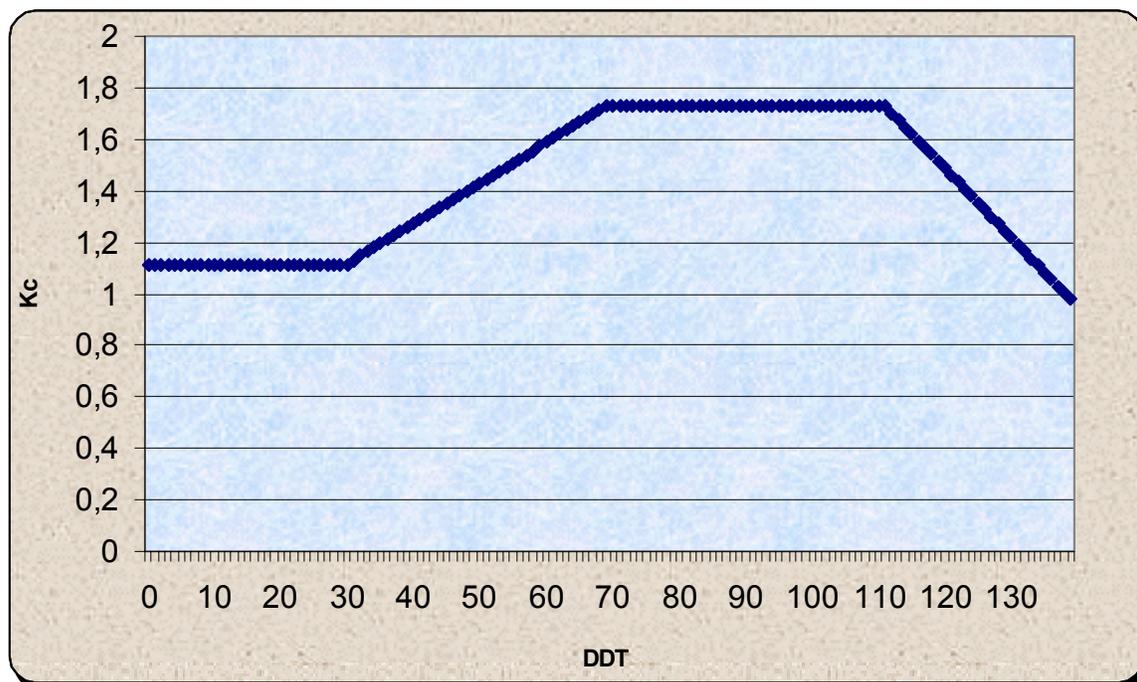
Kcr = Coeficiente de cultivo real

ETr = Evapotranspiración real (mm día<sup>-1</sup>)

ETp = Evapotranspiración potencial (mm día<sup>-1</sup>)

- Análisis del Kcr para el manejo del cultivo a 2T y utilizando ET<sub>pca</sub>.

En la figura 4.5 se aprecia que los valores iniciales de Kcr (fase inicial) son de 1.1 que empieza desde el día cero hasta el día 30 DDT, así mismo se observa que los valores de la fase vegetativa van desde 1.1 hasta el máximo valor que se obtiene de que es de 1.72 esta fase empezó a partir del día 31 hasta el día 70 DDT. A partir de este día el valor máximo permaneció estable hasta el día 111 DDT, a esta fase le denominamos fase de producción o de mediados del cultivo. Por último podemos notar que los valores empiezan a descender hasta un valor de 0.97 esto sucede a partir del día 112 hasta el 139 DDT, a esta fase se le llamó fase de finales del cultivo.



**Figura 4.5. Curva de Kcr para el manejo del cultivo del tomate a 2T y utilizando una  $ET_{pca}$ .**

- Análisis del Kcr para el manejo del cultivo a 1T y utilizando  $ET_{pca}$

En la figura 4.6 observamos que los valores iniciales de Kcr son de 0.35 que empieza desde el día cero hasta el día 30 DDT, también se observa que los valores de la fase vegetativa van desde 0.35 hasta el máximo valor que se obtiene de Kcr que es de 0.99 esta fase empezó a partir del día 31 hasta el día 70 DDT. A partir de este día el valor máximo permaneció estable hasta el día 111 DDT, a esta fase le denominamos fase de producción. Por último podemos notar que los valores empiezan a descender hasta un valor de 0.38 esto sucede a partir del día 112 hasta el 139 DDT, a esta fase se le llamó fase de finales de cultivo.

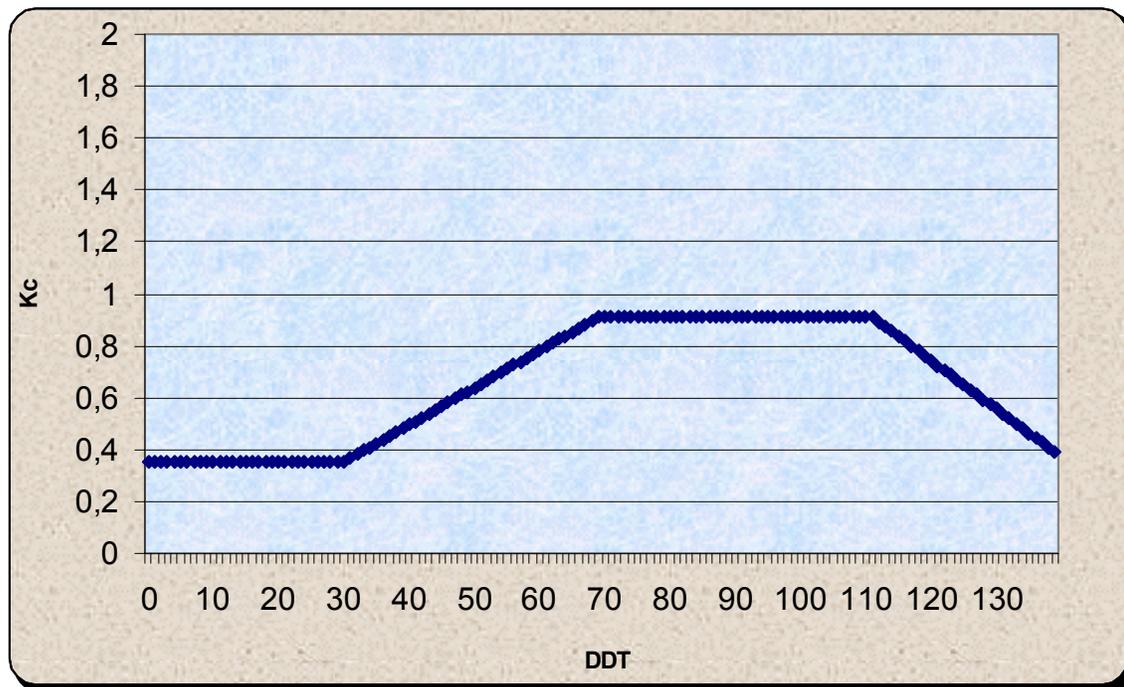


Figura 4.6. Curva de Kcr para el manejo del cultivo del tomate a 1T y utilizando  $ET_{p_{ca}}$

- Análisis del Kcr para el manejo del cultivo a 2T y utilizando  $ET_{p_{inv}}$

En la figura 4.7 observamos que los valores iniciales de Kcr son de 1.37 que empieza desde el día cero hasta el día 30 DDT, también se observa que los valores de la fase vegetativa van desde 1.37 hasta el máximo valor que se obtiene que es de 3.088 esta fase empezó a partir del día 31 hasta el día 70 DDT. A partir de este día el valor máximo permaneció estable hasta el día 111 DDT, a esta fase le denominamos fase de producción. Por último podemos notar que los valores empiezan a descender hasta un valor de 1.25 esto sucede a partir del día 112 hasta el 139 DDT, a esta fase se le llamó fase de finales de cultivo.

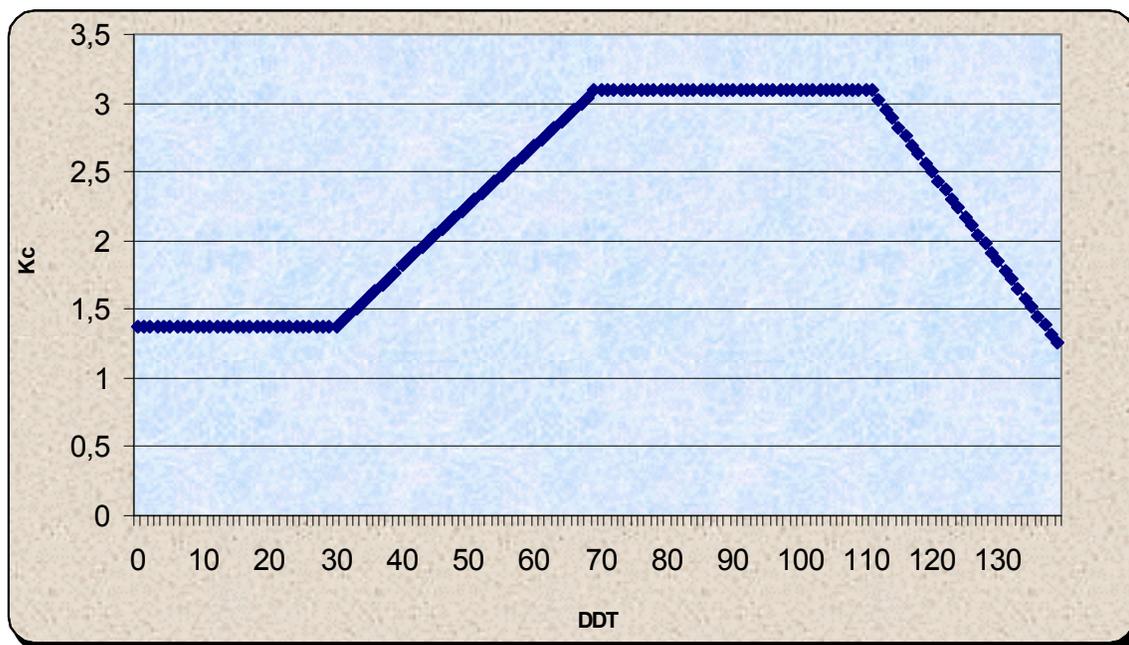


Figura 4.7. Curva de Kcr para el manejo del cultivo del tomate a 2T y utilizando  $ET_{p_{inv}}$

- Análisis del Kcr para el manejo del cultivo a 1T y utilizando  $ET_{p_{inv}}$ .

En la figura 4.8 observamos que los valores iniciales de Kcr son de 0.49 que empieza desde el día cero hasta el día 30 DDT, también se observa que los valores de la fase vegetativa van desde 0.49 hasta el máximo valor que se obtiene que es de 1.59 esta fase empezó a partir del día 31 hasta el día 70 DDT. A partir de este día el valor máximo permaneció estable hasta el día 111 DDT, a esta fase le denominamos fase de producción. Por último podemos notar en la figura que los valores empiezan a descender hasta un valor de 0.53 esto sucede a partir del día 112 hasta el 139 DDT, siendo la fase de finales de cultivo.

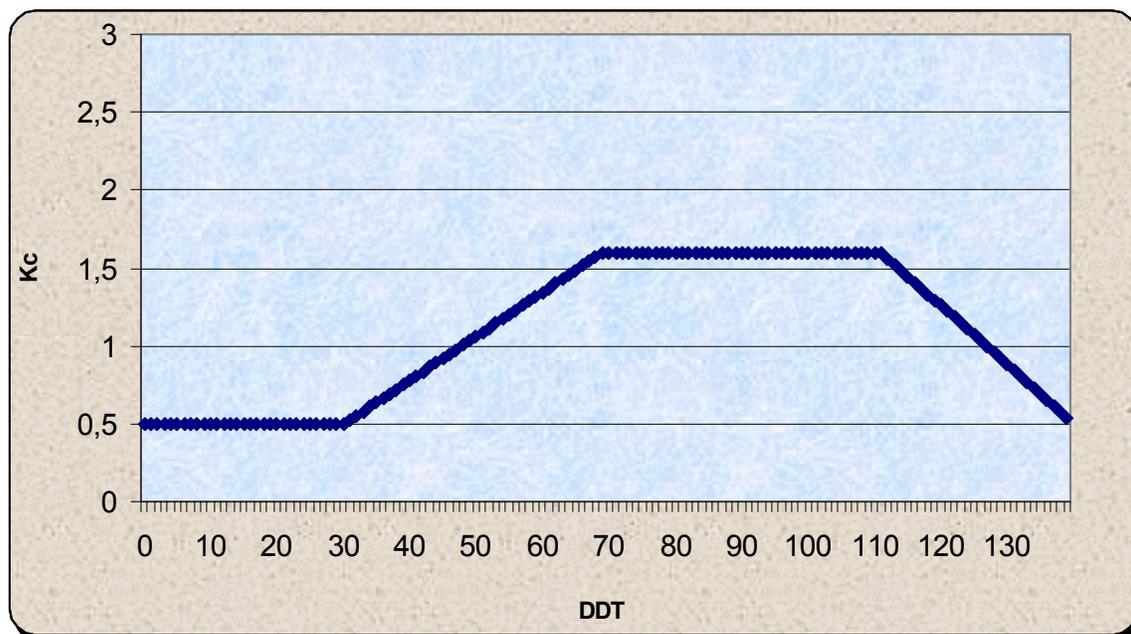


Figura 4.8. Curva de Kcr para el manejo del cultivo del tomate a 1T y utilizando  $ETp_{inv}$

- Análisis de Kcr para ambos tipos de manejo del cultivo y tomando en cuenta la utilización de los dos tipos de  $ETp$ .

En este análisis general de Kcr donde es tomado en cuenta el manejo del cultivo de ambos tipos y se toma en cuenta la  $ETp$  determinados en ambas condiciones, es donde recae la verdadera importancia del análisis de los resultados de los Kc.

Empezamos analizando la diferencia que se tiene entre el Kcr que se calculó utilizando una  $ETp_{ca}$  y el Kcr que se calculó utilizando una  $ETp_{inv}$ . Primeramente tenemos que los valores de  $Ep_{ca}$  son más altos en comparación a los valores de  $Ep_{inv}$ , esto se debe a que los factores como el viento y la radiación influyen directamente sobre la superficie evaporante en condiciones de campo abierto y en condiciones de invernadero el viento es casi nulo y la radiación no afecta directamente a la superficie evaporante, también es debido al factor de la humedad

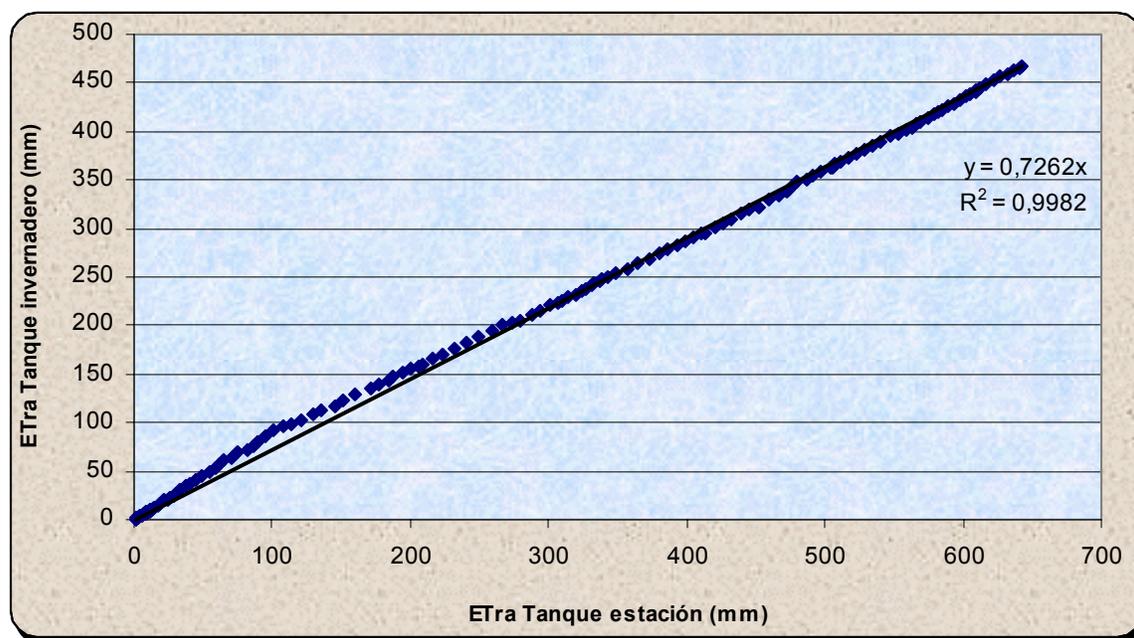
relativa, ya que es menor en campo abierto que en condiciones de ambiente controlado (invernadero).

De todo lo anterior podemos decir que entre más alto sea el valor de  $ET_p$  menor será el  $K_{cr}$ , es por eso que las figuras (4.5 y 4.6) representan valores más bajos para todas las etapas fenológicas en comparación a las figuras 4.7 y 4.8 que presentan valores más altos para todas las etapas fenológicas. Para terminar este análisis general de  $K_{cr}$ , tomando en cuenta los dos tipos del manejo del cultivo, podemos observar de entrada que el valor de  $K_{cr}$  fue mayor en la figura 4.5 en comparación con la figura 4.6, lo mismo refleja la figura 4.7 al compararlo con la figura 4.8, dicho de otra manera los valores altos de  $K_{cr}$  se observan en donde el cultivo se manejó a 2T; esto se debe a que el área foliar es más grande para este caso que en las plantas que se manejaron a 1T y esto trae como consecuente que el consumo de agua sea mayor cuando se cultiva a 2T. También es posible ver que al comparar los  $K_{cr}$  obtenidos con la  $ET_{p_{ca}}$  son más bajos con relación a los  $K_{cr}$  obtenidos con la  $ET_{p_{inv}}$ . Por otra parte si nos fijamos en las figuras 4.21 y 4.22 donde los datos reflejan que hubo mayor rendimiento en las secciones en donde el manejo del cultivo fue a 2T con respecto a las secciones donde se manejó a 1T. Todo esto representa que a mayor área foliar y mayor cantidad de agua aplicada a las plantas mayor es el  $K_{cr}$ .

- Análisis de los resultados de la  $ETr$  en campo abierto ( $ETr_{ca}$ ) y  $ETr$  en invernadero ( $ETr_{inv}$ ) estimados por medio del método indirecto en donde se utilizaron valores de  $K_c$  obtenidos a través de las metodologías de TTA y FAO.

- A continuación analizaremos los resultados de ETr acumulado para ambas condiciones de ambiente y utilizando los Kc obtenidos del modelo del TTA.

La figura 4.9 nos muestra un  $R^2$  de 0.99, lo cual nos indica que las diferencias existentes en la variable dependiente, dependen en un 99 por ciento de la variable independiente. Por otra parte también se observa que el valor de la ETr se reduce en un 28 por ciento en condiciones de invernadero.

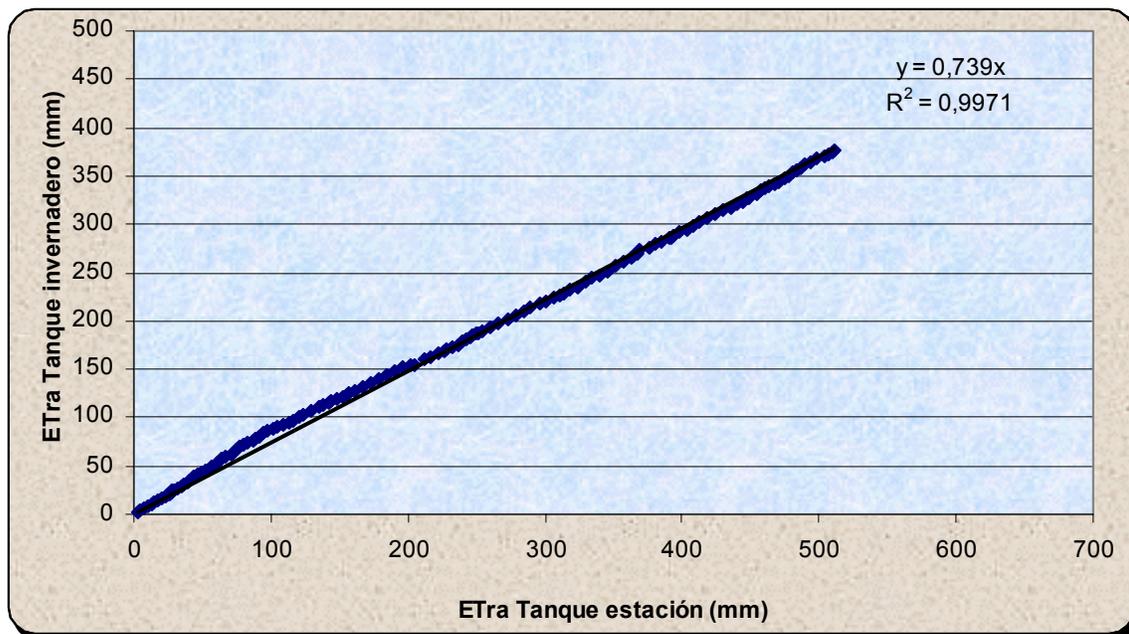


**Figura 4.9. Correlación de la  $ETr_{ca}$  del tanque evaporímetro contra la  $ETr_{inv}$  en el cultivo del tomate con Kc obtenidos de la metodología del TTA.**

- Analizando los resultados de ETr acumulado para ambas condiciones de ambiente y utilizando los Kc obtenidos de la metodología que recomienda la FAO tenemos lo siguiente:

La figura 4.10 nos muestra un  $R^2$  de 0.99, lo cual nos indica que las diferencias existentes en la variable dependiente, dependen en un 99 por ciento de la

variable independiente. También se observa que la ETr se reduce en un 27 por ciento en condiciones de invernadero.

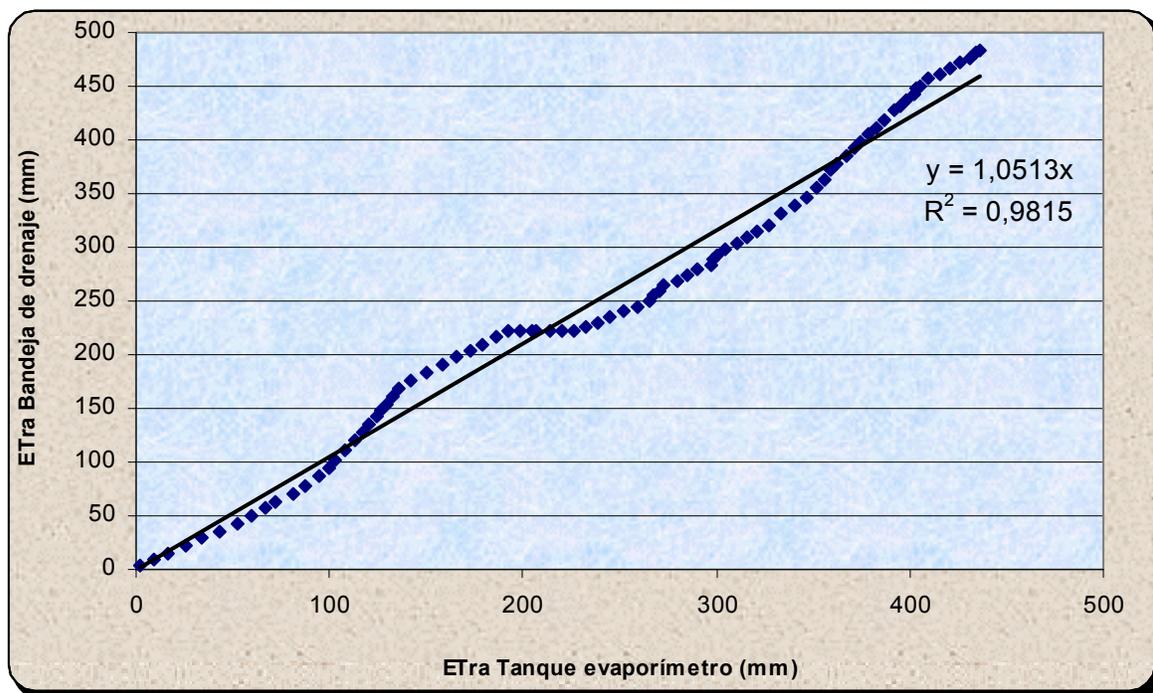


**Figura 4.10. Correlación de la ETr<sub>ca</sub> del tanque evaporímetro contra la ETr<sub>inv</sub> en el cultivo del tomate con Kc obtenidos de la metodología de la FAO.**

Haciendo un análisis de manera general de los valores acumulados de ETr se puede notar que se extienden en porcentaje mayor en la figura 4.9 en comparación con la figura 4.10, esto se debe básicamente al uso de las diferentes metodologías de Kc, ya que la metodología del TTA considera valores más altos de Kc para todas la etapas fenológicas en comparación con la metodología que recomienda la FAO.

- Análisis de los resultados de ETr<sub>ca</sub> utilizando los Kc determinados por el modelo del TTA, y de los resultados de ETr obtenidos del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.

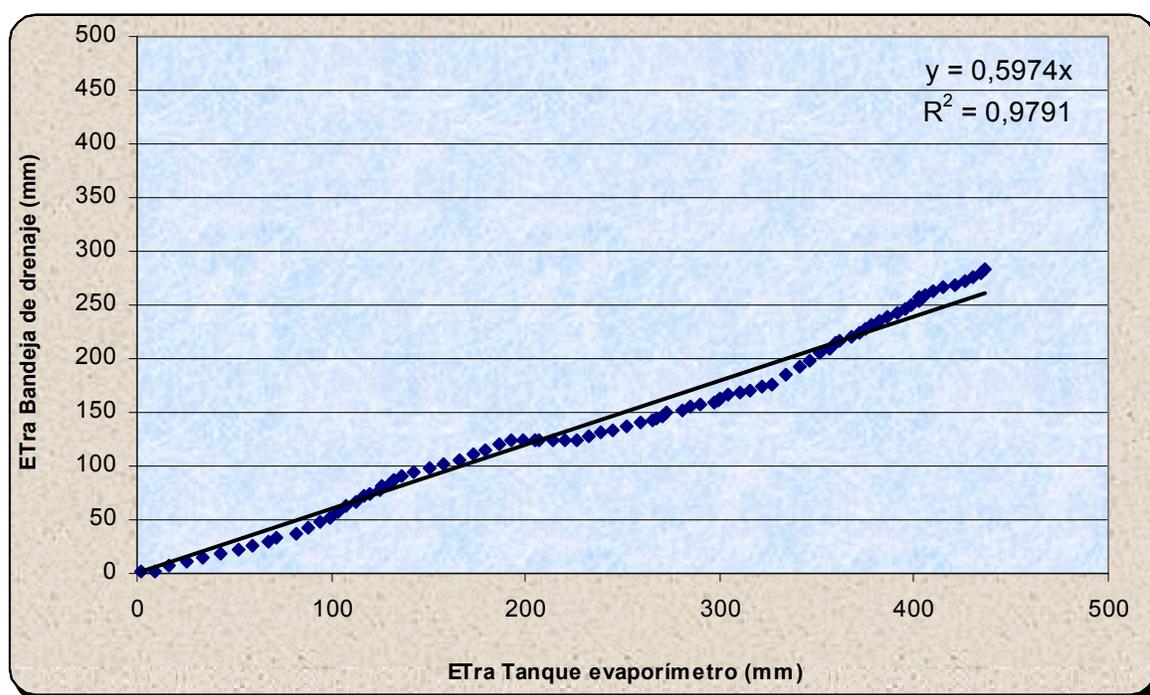
En la figura 4.11 donde se correlaciona la ETr acumulada del método indirecto contra la ETr acumulada del método directo se observa un  $R^2$  de 0.98, lo cual nos indica que los cambios o diferencias existentes en la variable dependiente dependen de un 98 por ciento de la variable independiente. Además se observa que cuando se tiene en el método indirecto un valor de ETr de uno, en el método directo aumenta en un uno por ciento.



**Figura 4.11. Correlación de la  $ETr_{ca}$  del método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  obtenidos de la metodología del TTA contra la ETr del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.**

- Análisis de los resultados de  $ETr_{ca}$  calculados con el método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  determinados por el modelo del TTA, y de los resultados de ETr obtenidos del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.

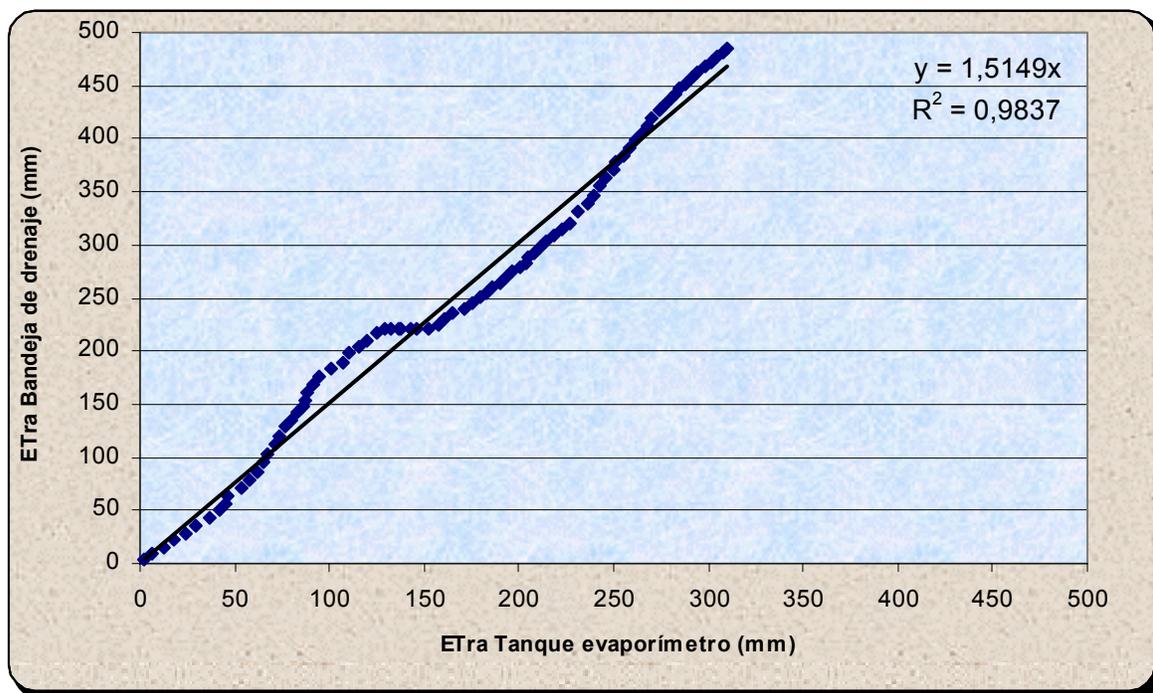
En la figura 4.12 donde se correlaciona la ETr acumulada del método indirecto contra la ETr acumulada del método directo se observa un  $R^2$  de 0.97, lo cual nos indica que los cambios o diferencias existentes en la variable dependiente dependen de un 97 por ciento de la variable independiente. Además se puede observar que los valores de la  $ETr_{ca}$  calculados con el método del tanque evaporímetro disminuye en un 41 por ciento.



**Figura 4.12. Correlación de la  $ETr_{ca}$  del método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  obtenidos de la metodología del TTA contra la ETr del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.**

- Análisis de los resultados de  $ETr_{inv}$  calculados con el método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  determinados por el modelo del TTA, y de los resultados obtenidos del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.

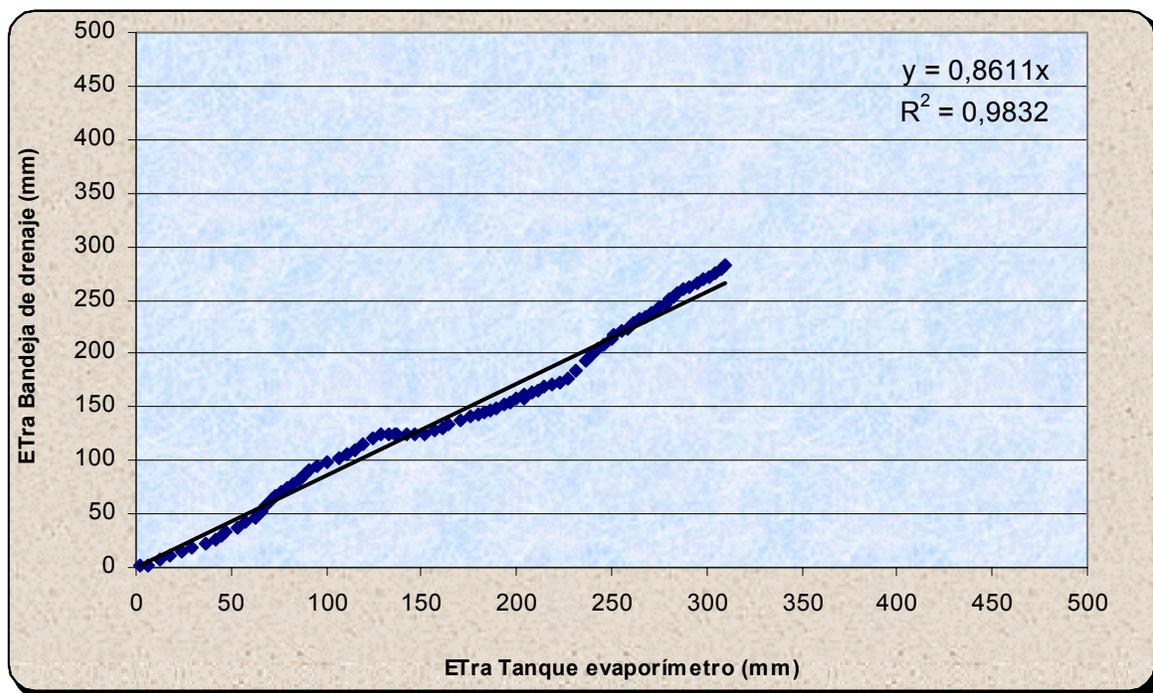
En la figura 4.13 donde se correlaciona la ETr acumulada del método indirecto contra la ETr acumulada del método directo se observa un  $R^2$  de 0.98, lo cual indica que los cambios o diferencias existentes en la variable dependiente dependen de un 98 por ciento de la variable independiente. Además se observa que cuando en la variable independiente se tiene un valor de ETr de 1.5, la variable dependiente aumentara en un uno por ciento.



**Figura 4.13. Correlación de la  $ETr_{inv}$  del método del tanque evaporímetro utilizando los  $K_c$  obtenidos de la metodología del TTA contra la ETr del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.**

- Análisis de los resultados de  $ETr_{inv}$  calculados con el método del tanque evaporímetro utilizando los  $K_c$  determinados por el modelo del TTA, y de los resultados obtenidos del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.

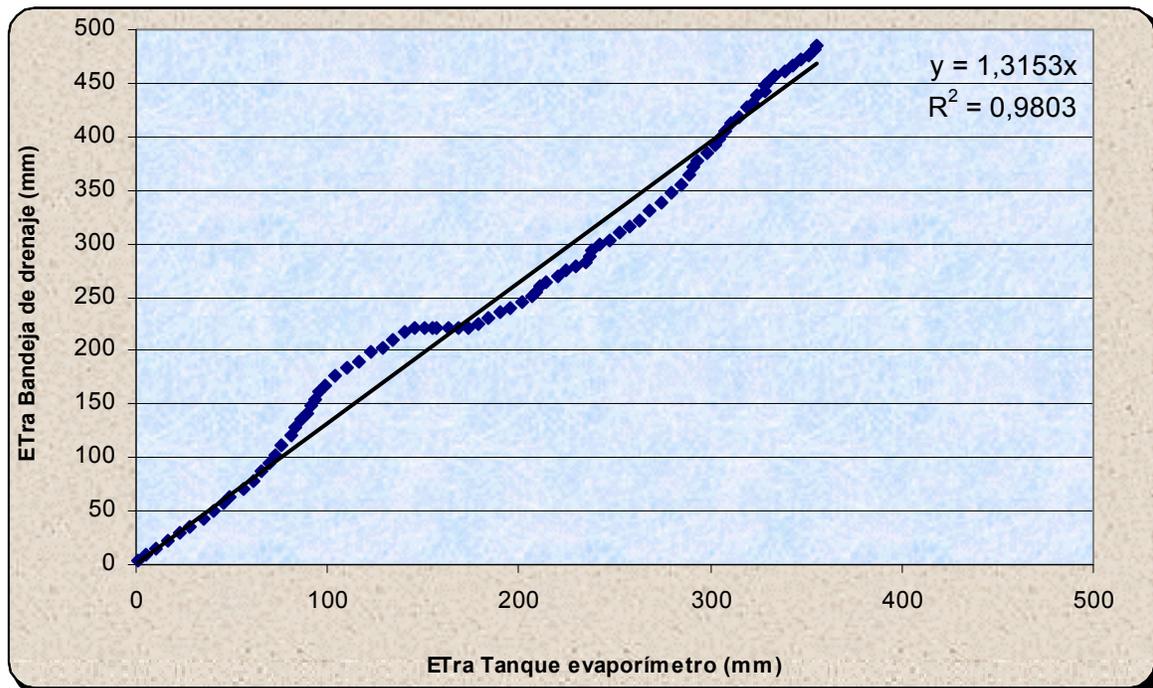
En la figura 4.14 donde se correlaciona la ETr acumulada del método indirecto contra la ETr acumulada del método directo se observa un  $R^2$  de 0.98, lo cual indica que los cambios o diferencias existentes en la variable dependiente dependen de un 98 por ciento de la variable independiente. Además se observa que los valores de la ETr calculados con el método del tanque evaporímetro en condiciones de invernadero disminuye en un 14 por ciento.



**Figura 4.14. Correlación de la  $ETr_{inv}$  del método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  obtenidos de la metodología del TTA contra la ETr del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.**

- Análisis de los resultados de  $ETr_{ca}$  calculados con el método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  determinados por la metodología de la FAO y de los resultados obtenidos del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.

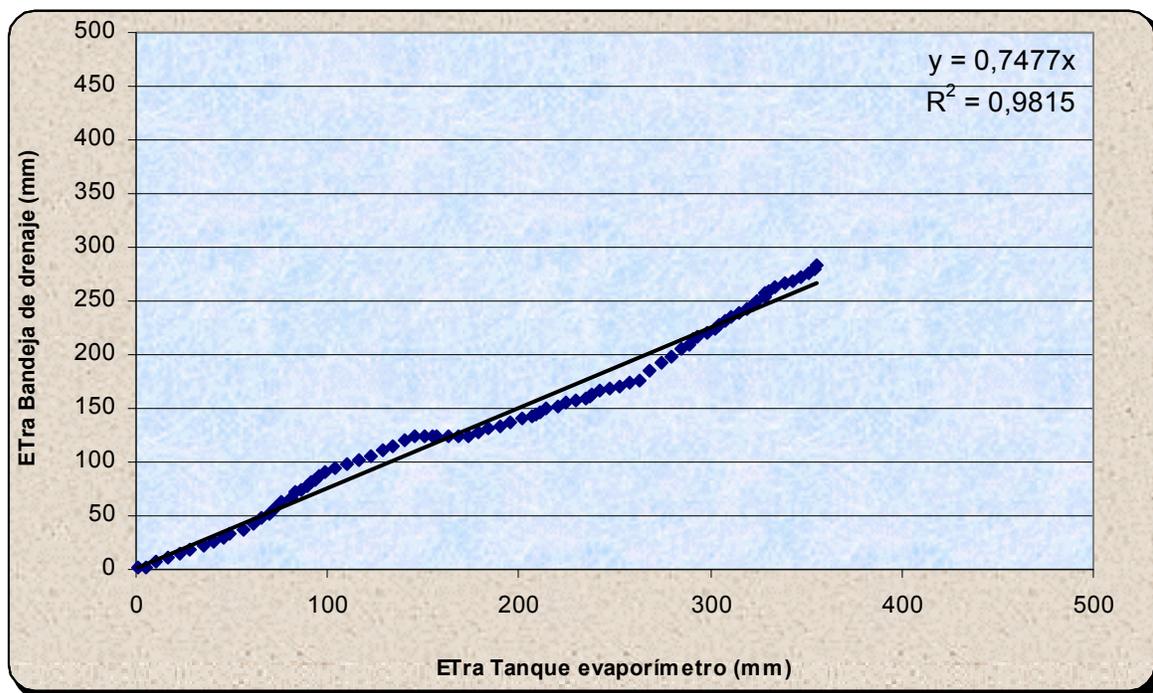
En la figura 4.15 donde se correlaciona la ETr acumulada del método indirecto contra la ETr acumulada del método directo se observa un  $R^2$  de 0.98, lo cual indica que los cambios o diferencias existentes en la variable dependiente dependen de un 98 por ciento de la variable independiente. Además se observa que cuando se tiene un valor de ETr de 1 en el método indirecto, el valor del método directo aumentara en 1.3 por ciento



**Figura 4.15. Correlación de la  $ETr_{ca}$  del método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  obtenidos de la metodología de la FAO contra la ETr del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.**

- Análisis de los resultados de  $ETr_{ca}$  calculados con el método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  determinados por la metodología de la FAO y de los resultados obtenidos del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.

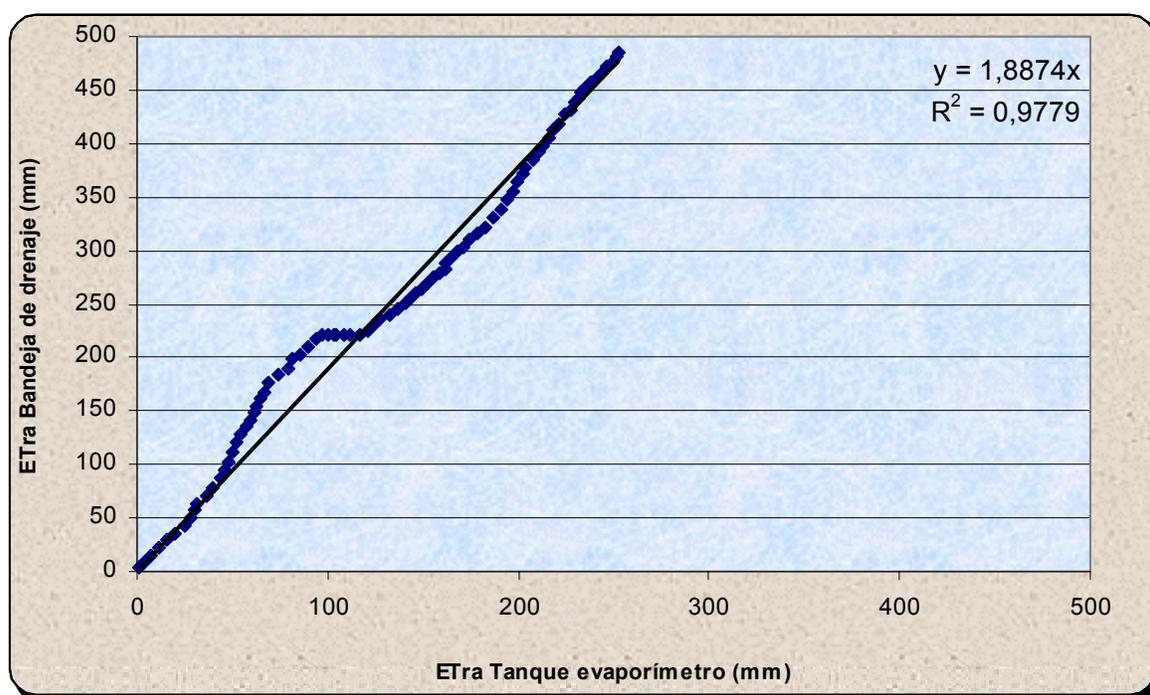
En la figura 4.16 donde se correlaciona la ETr acumulada del método indirecto contra la ETr acumulada del método directo se observa un  $R^2$  de 0.98, lo cual indica que los cambios o diferencias existentes en la variable dependiente dependen de un 98 por ciento de la variable independiente. Además se observa que los valores de la  $ETr_{ca}$  calculados con el método del tanque evaporímetro disminuye en un 26 por ciento.



**Figura 4.16. Correlación de la  $ETr_{ca}$  del método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  obtenidos de la metodología de la FAO contra la ETr del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.**

- Análisis de los resultados de  $ETr_{inv}$  calculados con el método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  determinados por la metodología de la FAO y de los resultados obtenidos del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.

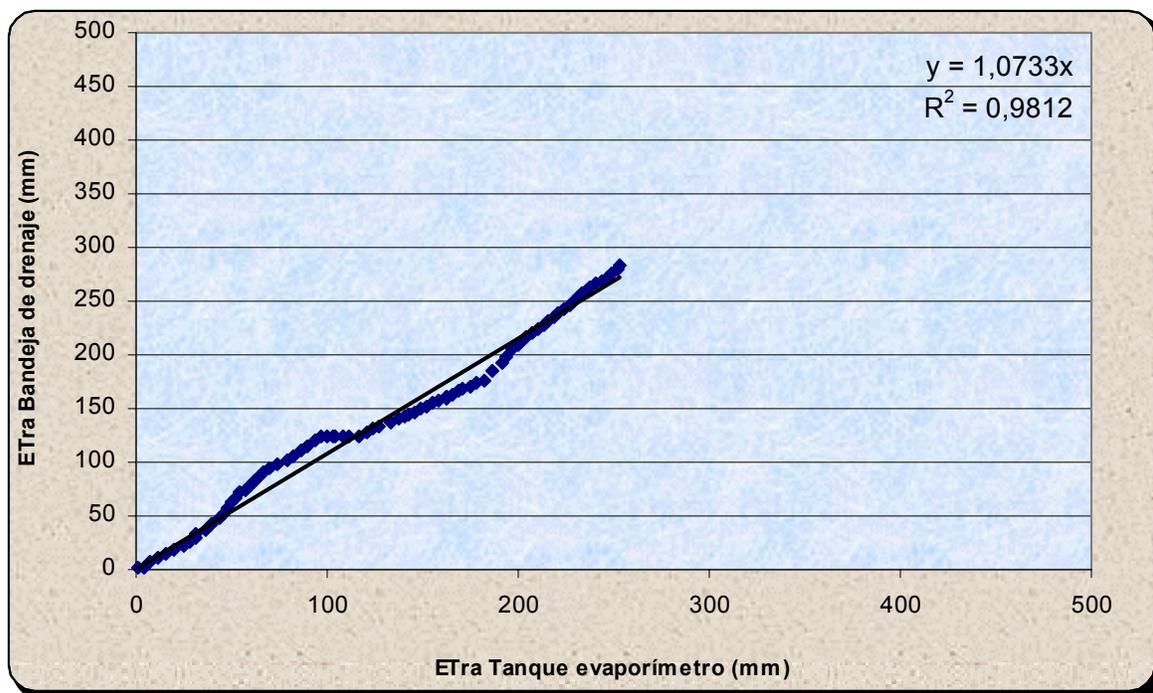
En la figura 4.17 donde se correlaciona la ETr acumulada del método indirecto contra la ETr acumulada del método directo se observa un  $R^2$  de 0.97, lo cual indica que los cambios o diferencias existentes en la variable dependiente dependen de un 97 por ciento de la variable independiente. Además se observa que cuando el valor de ETr por el método indirecto es de 1, en el método directo será un 1.88 por ciento mayor.



**Figura 4.17. Correlación de la ETr<sub>inv</sub> del método del tanque evaporímetro utilizando los Kc obtenidos de la metodología de la FAO contra la ETr del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 2T.**

- Análisis de los resultados de ETr<sub>inv</sub> calculados con el método del tanque evaporímetro utilizando los Kc determinados por la metodología de la FAO y de los resultados obtenidos del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.

En la figura 4.18 donde se correlaciona la ETr acumulada del método indirecto contra la ETr acumulada del método directo se observa un  $R^2$  de 0.98, lo cual quiere decir que los cambios o diferencias existentes en la variable dependiente dependen de un 98 por ciento de la variable independiente. Además se observa que cuando el valor de ETr por parte del método indirecto es de uno, el valor del método directo aumentará en un porcentaje de 1.07.



**Figura 4.18. Correlación de la  $ETr_{inv}$  del método del tanque evaporímetro utilizando los  $Kc$  obtenidos de la metodología de la FAO contra la ETr del método de la bandeja de drenaje para el manejo del cultivo del tomate a 1T.**

Como se puede observar en las figuras 4.19 y 4.20 representan los consumos de agua en litros por día, donde se aprecia que los valores más altos fueron en donde el cultivo del tomate fue manejado a 2T.

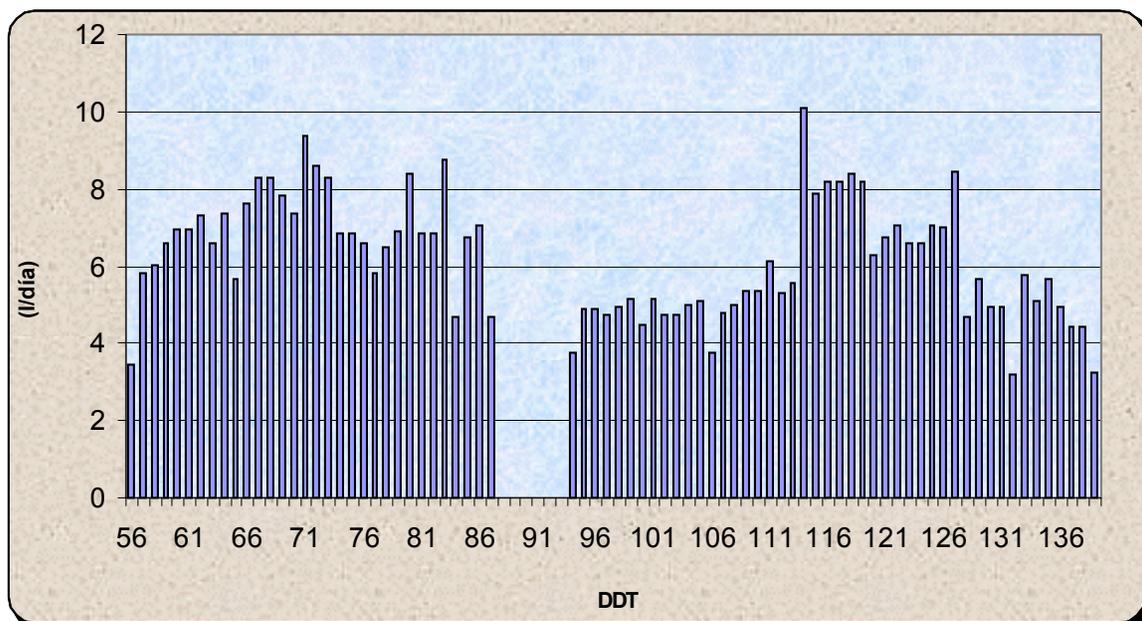


Figura 4.19. Consumo de agua del cultivo del tomate a 2T bajo invernadero

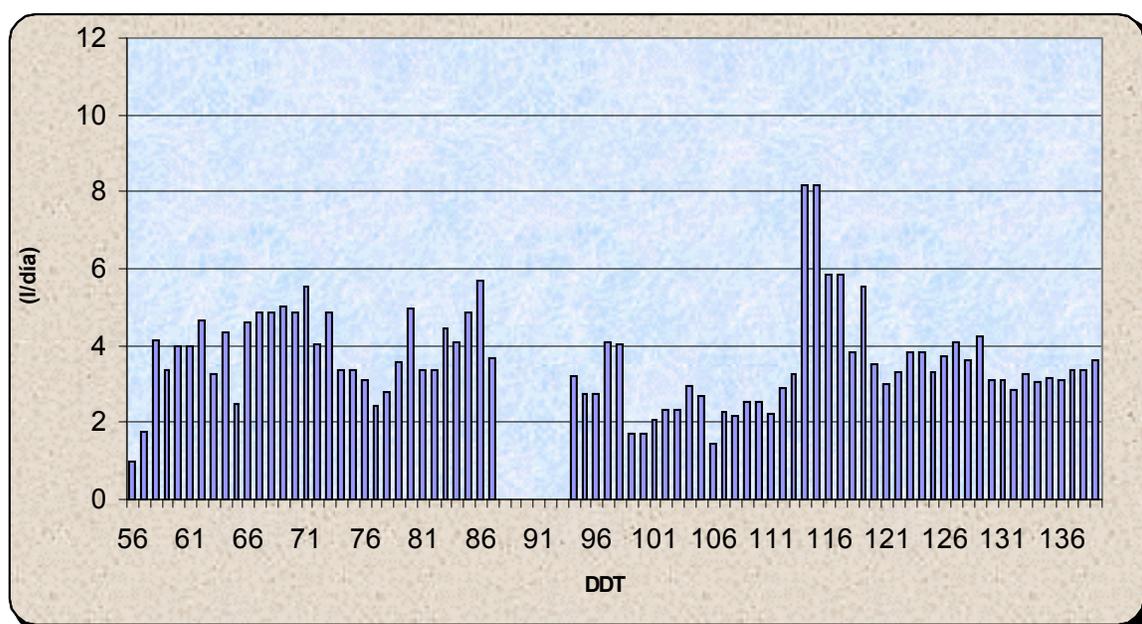


Figura 4.20. Consumo de agua del cultivo del tomate a 1T bajo invernadero

Las figuras 4.21 y 4.22 presentan los rendimientos del cultivo del tomate para ambas condiciones de manejo. Se observa que los valores son más altos en donde el cultivo se manejó a 2T.

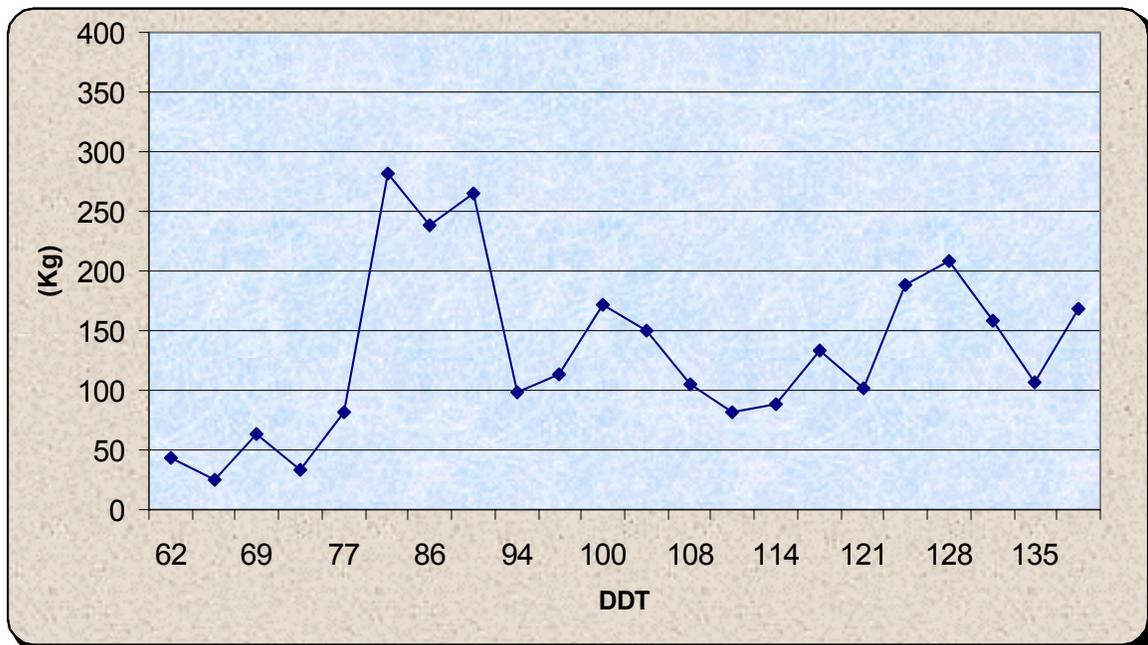


Figura 4.21. Rendimiento del cultivo del tomate a 2T bajo invernadero

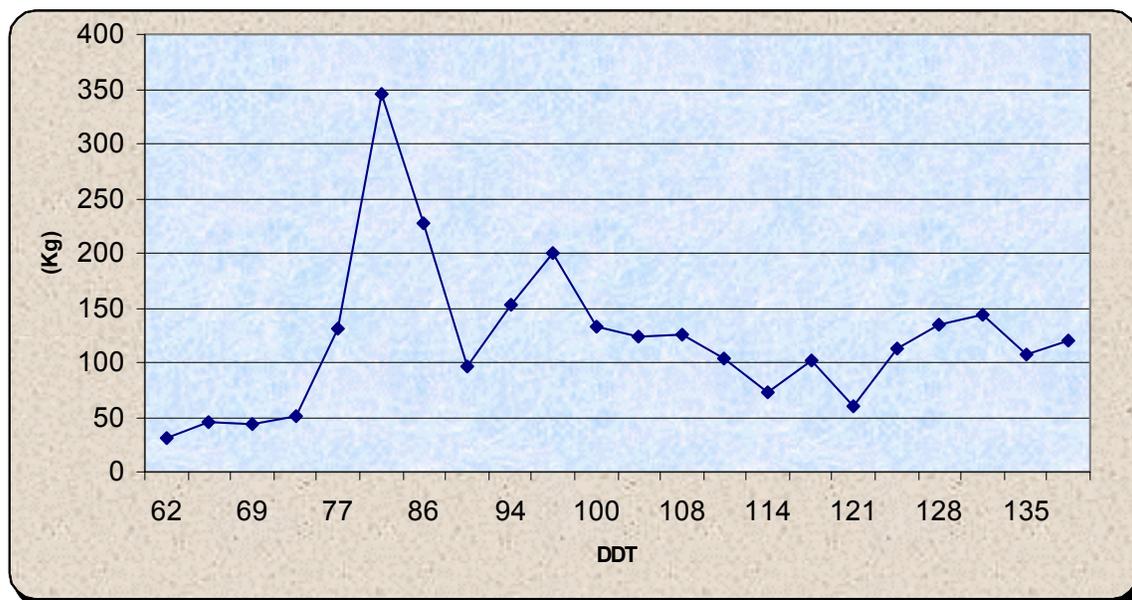


Figura 4.22. Rendimiento del cultivo del tomate a 1T bajo invernadero

## V. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el estudio se concluye lo siguiente:

En invernadero es menor la evaporación debido a que es menor la velocidad del viento, además de que la radiación no influye directamente sobre la superficie evaporante y de que la humedad relativa en estas condiciones es mayor. De igual forma la ETp también es menor en invernadero a pesar de que se usó un Kp mayor (0.7) para estas condiciones que para las condiciones de campo abierto, esto es debido a la estrecha relación que tiene con los resultados de Ep, lo cual quiere decir que a mayor Ep mayor será la ETp, también se debe a que a mayor radiación solar mayor ETp.

Por lo que respecta a las metodologías para determinar los Kc fue apreciablemente mejor la metodología que recomienda la FAO, ya que considera un Kc inicial mayor, un Kc de mediados de cultivo menor y un Kc de finales de cultivo más bajo, todo esto con respecto a los Kc obtenidos a través de la metodología de TTA.

Con base al análisis de los resultados de las figuras que muestran los valores de Kcr podemos concluir que son más altos cuando se utiliza la ETp determinado bajo condiciones de invernadero que cuando se usa la ETp para condiciones de campo abierto, debiéndose a que los valores de ETp determinados a campo abierto son más altos. Por otra parte cuando el cultivo se maneja a dos tallos para ambas condiciones de ambiente los valores de Kcr aumentan con respecto a los valores de

Kcr para el manejo del cultivo a un tallo, debiéndose a que el área foliar en una planta con dos tallos es mayor por consiguiente el consumo de agua es más alto, lo benéfico de lo anterior es que aumenta el rendimiento de la cosecha.

Con respecto a los valores de ETr son más altos los estimados por la bandeja de drenaje en comparación con los estimados por el tanque evaporímetro.

## VI. LITERATURA CITADA

- Abad, M., V. Noguera., M. D. Martínez. 1993. Evaluación Agronómica de los Sustratos de Cultivo. *Acta Horticulturae*. 11: 141-154.
- Adams, P. and Ho, L. C. 1993. Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and on the incidence of blossom-end rot. *Plant and soil* 145: 127-132.
- Aguilera, C. M. y R. Martínez. 1990. Relaciones agua suelo planta atmósfera. 4ta. edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 321 p.
- Alpi, A. y Tognioni, F. 1991. Cultivo en invernadero. Actual orientación científica y técnica . 3<sup>ra</sup> ed. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 343 p.
- Allen R. G. 2000 Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evaporation intercomparison study. *J Hydrol* 229: 27-41.
- Allen, R. G. Pereira L. S., Raes D, Smith M,1998. Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. (FAO Irrigación and drainage paper 56) FAO, Rome.
- Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L. S., 1994. An Update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bull.* 43 (2), 1-92.
- Ansorena, M. J. 1994. Sustratos, Propiedades y Caracterización. Ediciones Mundi-prensa. Barcelona, España. 172 p.
- Arnulfo, G. M. Y Bertha A. H. L. 2000. Estimación de las necesidades hídricas del tomate.

- Arteaga, R. R. y R. M. Elizondo. 1986. La evaporación como un indicador de la evaporación potencial. Departamento de irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Edo. De México.
- ASCE (American Society of Civil Engineers). 1978. Agricultural Salinity Assessment and Management. Manuals and Repots on Engineering Practice No. 71. New York, New York. 619 p.
- Ayers, R. S. y D. G. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. FAO, Serie riego y drenaje No. 29. Roma, Italia.

- Baille, M. ; Laury, J. C. ; Baille, A. 1992. Same Comparative results on evapotranspiration of greenhouse ornamental crops, using lisimeter, greenhouse H<sub>2</sub>O balance and LVDT sensors. *Acta Horticulturae*: 304, 199-208.
- Baldocchi, D. D., B. B. Hicks y T. P. Meyers. 1988. Measuring Biosphere-Atmosphere Exchanges of Biologically Related Gases With Micrometeorological Methods, *Ecology*, 69 (5), 1331-1340.
- Baselga, J., Prieto, M. H. Rodríguez, A. 1993. Response of processing tomato to there diferent levels of water and nitrogen applications. *Acta Horticulturae*. 335: 149-156.
- Blancard, D. 2000. Enfermedades del tomate. Observar, Identificar Luchar. INRA, Ediciones Mundi- Prensa. 212P.
- Bunt, A. C. 1991. The realtionship of oxigen difusion rate to the air-filled porosity of poting sibstrates. *Acta Horticulturae*. 294: 215-224.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas S. L. Madrid, España. 17-25 pp.
- Burke, S., M. Milligan and J. B. Thornes. 1999. Optimal irrigation efficiency for maxiximun plant productivity and minimum water loss. *Agricultural water Management*. 40: 337- 391.
- Bustamante O., J. D. 1997. Bioespacios y el control del "Chino". Primer Encuentro Científico. Gobierno del Estado de Morelos.
- Cadahía, C. 2000. Fertirrigación Cultivos Hortícolas y Ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. 2ª edición. Madrid, España. 475 p.
- Canovas, F., 1993. Principios básicos de hidroponia. Aspectos comunes y diferenciales de los cultivos con o sin suelo. Almería, España. pp. 29-42.
- Cárdenas. T. F. 1999. El cultivo del tomate en El parador de Roquetas de Mar. Vol. 1/3. P. 293-333. En: Francisco Camacho F. Técnicas de producción de frutas y hortalizas en cultivos protegidos. Caja rural de Almería, Es.
- Castaños, C. M. 1993. Horticultura manejo simplificado, 1ra edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 527.
- Castellanos, R., J. L. Ojo de agua, F. Méndez, S. Villalobos, A. Sosa, P. Vargas y V. Badillo. 2001. Nutrición del ajo en condiciones de riego por goteo. 1er. Foro Nacional en el cultivo de ajo, del 15 y 16 de marzo. Celaya Gto. Pp. 12.16.
- Castilla, N., F. Elías, y E. Ferenes.1990. Evapotranspiration en cultivos hortícolas en invernadero en Almería. *Invest. Agr. Prod. Prot. Veg.* 5: 117-125.

- Contijoch. 1998. Resultados del programa de fertirrigación y perspectivas a corto plazo. pp. 203-216. In: Memorias del III Simposium Internacional sobre Fertirrigación. León, Gto., México.
- Cook, R. 2003. Giannini Foundation of Agricultural Economics. U. C. Cooperative Extension Economist in the ARE department at UC. Davis.
- Coras M. P. M. 1996. Evapotranspiración y Programación de Riegos. UACH, Chapingo, México.
- CNA (Comisión Nacional del Agua) Colegio de postgraduados. 1997. Requerimientos de agua para riego. Manual Nacional de Ingeniería. Traducción del Capítulo 2, parte 623. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de suelos (SCS).
- De Mediros, Gerson; Flavio B. Arruda, Emilio Sakai, Mamor Fujiwara. 2001. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) Agricultural Water Management 49 (2001) 211-224.
- Domínguez, V., 1993. Fertirrigación. Ediciones Mundi-prensa. Madrid, España. 217 p.
- Doorenbos J, Kassam AH (1979) Yield response to water. (FAO Irrigation and Drainage Paper 33) FAO, Rome.
- Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1990. Las necesidades de agua de los cultivos, FAO Riego y drenaje No 24. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, Roma. 194 p.
- Doorenbos, S. y W. O. Pruitt. 1977. Crop water requirements Irrigation and drainage. Paper No.: 24. FAO. Roma, Italia.
- Drake, B. G. Raschke, y Frank B. Salisbury. 1970. Temperatures and transpiration resistances of xanthium leaves as affected by air temperatures, humidity, and wind speed. Plant Physiology 46: 324-330.
- Elizondo René M. y Contreras Mauricio Aguilera. 1996. Relación Agua Suelo Planta Atmósfera. UACH. México. P. (29, 165-250).
- Escudero, J., 1993. Cultivo hidropónico del tomate. Curso superior de especialización sobre cultivos sin suelo. Universidad de Almería. Almería, España. pp. 263-270.
- Escudero, S. J. 1999. Cultivo hidropónico del tomate. P. 451\_483. In: Milagros Fernández F. e Isabel Ma. Cuadrado G. (Eds.) Cultivo sin suelo II. Curso superior especialización. Junta de Andalucía, FIAPA, Caja Rural de Almería.

- Febeiro, C., F. Martín de Santa Olalla and J. A. de Juan. 2001. Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agricultural Water Management*. 48:225-266.
- Fernández F., Milagros y Cuadrado Gómez, Isabel Ma. 1999. Cultivos sin suelo II. Curso superior de especialización. Caja Rural de Almería, España.
- Fernández Ma. D. 1993. Calibración y evaluación de métodos para la determinación de la Evapotranspiración de referencia bajo condiciones de invernadero tipo parral de Almería. Trabajo profesional fin de carrera. Universidad de Córdoba.
- Fernández Ma. D. 2000. Necesidades hídricas y programación de riegos en cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado de Almería. Tesis doctoral. Universidad de Almería.
- Garzón, T., A.; Becerra F., A.; Marín A. Mejía A., C. y B yerly M., K. F. 2003. Manejo Integrado de la enfermedad "permanente del tomate", en el Bajío. 95-100 p. En: R. Bujanos M yA. Marín J. (coord.) Memoria del taller sobre Insectos vectores de virus y Fitoplasmas en cultivos de solanáceas. SAGARPA, INIFAP. SDA, Fundación Produce A: C. Gto. 8ESAVEG, UARPAPA- Gto. CONAPA Celaya, Gto. Feb. 2003.
- Garzón, T. J. A. 1987. Presencia de virus en los cultivos de chile (*capsicum annum* L.) y tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en México. Temas en Virología II. Soc. Méx. De Fitop. P. 156-181.
- Gianquinto, G., P. Ceccon, and R. Giovanardi, 1990. Evapotranspiration, growth and yield of fresh market tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) at two irrigation levels. *Acta Horticulturae* 278: 579-586.
- González, V. F. 1996. El cultivo de tomate en la Cañada y Vega de Almería. Vol. 1/3: 255-292. En: Francisco Camacho F. (coord.) Técnicas de producción de frutas y hortalizas en los cultivos protegidos. Instituto Rural, Almería, España.
- Handreck, K. A. y Black, N. D., 1991. *Growin Media for Ornamental Plants and Turf*. New South Wales University Press Kensington. 401 p.
- Hargreaves, G. H., Samani, 2.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engrg. In Agric.*, 1 (2): 96-99.
- Hargreaves, G. H., y Samani, 2.A. 1982. Estimating Pontential Evapotranspiration. Tech note. *J. Irrig. and drain. Engrg.*, ASCE, 108 (3): 225-230.
- Hatfield, J. L. y R. G. Allen. 1996. Evapotranspiration estimates under deficient water supplies *Journal of Irrig. and Drain. Engineering*. September/October.
- Hernández M. F. 2000. Simulación de la evapotranspiración Orientada a la Operación de Sistemas de Riego en el Cultivo de papa (*Solanum*

- Tuberosum* L) Tesis de licenciatura. UAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, pág. 87.
- Jensen, M. E. 1969. Plant and irrigation water requirements. Sprinkler Irrig. Assoc., Washington, D. C.
- Jensen, M. E. And Collins W. L. 1996. Hidroponic Vegetable Prodction. In Horticultural Reviews. Volume 7. Ed. J. Janick. The AVI Publishing. Pp. 483-558.
- Jensen, M. E., R. D. Burman and R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. Asce. Manual and reportson engineering practice N. 70. American Society of Civil Engineers. USA.
- Jones, H. G. 1990. Physiological aspects of the Control of water status in horticultural crops. Hort science 25 (1): 19-26.
- Kinet, J. M. y Peet, M. M. 1997. Tomato. P. 207-258. En: H. Wien (Ed.) The physiology of Vegetable Crops. CAB International.
- Lamaire, F. A. Dartigues and L. M. Riviere. 1985. Properties of substrate made with spent mushroom com-post. Acta Hoticulturae 172: 13.29.
- Manjarrez, J. R. S. 1980. Riegos. El cultivo del tomate para consumo fresco en el valle de Culiacán. CEVAS-CIAPAN-SARCH.
- Marín R. J. 2001. Portagrano 2001 Vademécum de Variedades Hortícolas. Ecir Ddit. p. 229, 237, 272, 292.
- Martínez, C. y M. García Lozano. 1993. Cultivos sin suelo. Hortalizas de Clima Mediterráneo. Compendio de Horticultura Número 3. Ediciones de Horticultura. Barcelona, España. 123 p.
- Medrano, F., M. C. Sánchez Guerrero, P. Lorenzo y F. Aguilar. 1998. Estimación de la transpiración en función de las variables climáticas para el control de riego en cultivo sin suelo en la zona mediterránea. Actas de horticultura. Vol. 21 VI Jornadas del grupo de Horticultura. 4-6 Noviembre 1998.
- Michael, A. M. 1983. irrigation (Theory and Practice). Vikas Publishing House (Pvt) Ltd. New Delhi, India.
- Munguía, L. J. 2000. Análisis de los Componentes de Balance de Energía en el Cultivo de Melón (*Cucumis melo* L) con Acolchado de Suelos. Tesis Doctoral. Programas de Graduados de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah. Méx.
- Muñoz O., P. ; Antón V., A. y Montero C., J. I. 1998. Diseño de Invernaderos. Estructuras de invernadero. Topología y Materiales. P. 67-99. En : J. Jerónimo Pérez P. e Isabel Ma. Cuadrado G. (Eds.) Tecnología de

- invernaderos II, curso Superior de especialización. 2ª. Ed. Consejería de Agricultura y Pesca. FIAPA. Caja Rural de Almería.
- Muñoz- Ramos, J. J. 2003. Estructuras de invernaderos y cubiertas de protección. P. 18-39. En: J. J. Muñoz- Ramos y J. 2. Castellanos (Eds.). Manual de producción hortícola en invernadero. INCAPA. México.
- Nonero, A. 1984. La evapotranspiración de los cultivos. Aspectos agrofísicos. SIDITA, Mérida, Venezuela.
- Nuez, F. 1995. El cultivo del tomate. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 793 p.
- Nuez, F. 1999. El cultivo de tomate. Ediciones Mundi-Prensa. 793 P.
- Ortega- Farías, S., J. Márquez, H. Valdés, y H. Paillán. 2001. Efecto de cuatro láminas de agua sobre el rendimiento y calidad de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill., CV. FA-144) de invernadero producido en otoño. Agric. Téc. (Chile) 61: 479-487.
- Pal Arya, S. 1988. Introduction to Micrometeorology. Academic Press Inc., U. S. A. p.307
- Palacios, V. E. 1981. Estimación de los requerimientos de agua de los cultivos para conocer el cuando y el cuanto regar. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.
- Papadopoulos, A. P. and N. Liburdi. 1989. The "Harrow fertigation manager" – A computerized multifertilizer injector. Acta Hort. 260: 255-265.
- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Met. Soc. London. 198: 120-145.
- Priestley, C. H. B. and R. J. Taylor. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. Monthly Weather Review 100:81-92.
- Puustjärvi, V. 1994. La turba y su Manejo en Horticultura. Ediciones de Horticultura S. L. Reus. 123 p.
- Raviv, M., Chen, Y. And Invar, Y. 1986. Peat and peat substitutes as growth media for Container-grown plants. In : the role of organic matter in modern agriculture. pp. 257-287.
- Resh, H. M. 2001. Cultivos Hidropónicos. Quinta edición. Mundi-Prensa. Madrid España. pp. 357-390.
- Rosenberg, N. J., B. L.. S. B. Verma. 1975. Microclimate: The Biological Environment, 2<sup>nd</sup> Edition. John Wisley y Sons. U.S.A. p. 8209-187).

- Ruiz B. T., 1993. Características del riego en cultivo sin suelo: Exigencias en aportación y manejo. P. 199-208. En: Canovas M. F. y Días A. S. R. (Eds). Cultivos sin suelo. Curso superior de especialización. FIAPA. Almería, España.
- SAGARPA, 2002. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. Volumen 1. Centro de Estadística Agropecuaria. D. F. México. pp. 598-617.
- Salas-S, M. C. y Urrestarazu G., M. 2001. Objetivos, Controles y métodos de fertirrigación en cultivo sin suelo. Horticulturae 157 Vol. XIX N. 8. p. 38-48.
- Salisbury, F. B. and C. W. Ross. 1994. Fisiología Vegetal. Editorial Iberoamericana. México, D. F. 759 p.
- Salomón, K. H. 1985. Global uniformity of trickle Irrigation system. ASAE. Transact. Vol. 28-4 U.S.A. 1.151-1.158.
- Sánchez del C. F. y E. Escalante R. 1989. Hidroponia un sistema de producción. Tercera edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.
- Sholto, D. J. 1976. Advanced guide to hidroponics. Drack Publishers, inc. New York. Estados Unidos. 333 p.
- Stegman, E., Musick, J., Stewart, J. 1980. Irrigation Water management. Desing and operation of farm irrigation system. Michigan, U.S.A. pp. 763-779.
- Stull, R. B. 1991. An Introduction to Bunday Layer Meteorology. Kiuwer Academic Publisher. U.S.A. p. 666.
- Tanner, C. B. 1960. enrgy Balance Approach to Evapotranspiration fron Crops. Soil Sci, Soc. Amer. Proc., 24, 1-9.
- Tarantino, E., H. Singh, and W. Pruitt. 1982. The microclimate and evapotranspiration of processing tomatoes under drip and furrow irrigation. Revista de agronomía. (6:21-29).
- Urrestarazu, G. M. 2000. Bases y sistemas de los cultivos sin suelo. P. 51-87. En: Miguel Urretarazu (coord). Manuel de cultivo sin suelo 2ª Edición. Manuales 5. Universidad de Almería, Servicio de Publicaciones.
- Urrutia, A. 2002. Perspectivas de la Industria de Invernaderos en México. Memoria del Congreso de Asociación Nacional de Productores de Hortalizas en Invernadero. Guadalajara, Jalisco del 26 al 28 de Julio de 2002.

- USDA, 1967. Department of Agriculture. Soil Requirement. Technical Release No. 21. Engineering DIV. SCS 83 p.
- Villalobos Reyes, Salvador. 2003. Rendimiento y calidad del Brócoli sometido a diferentes tensiones de humedad. Tesis. Maestro en ciencias. Programa en hidrociencias. Colegio de posgraduados. Montecillo, Texcoco, México.
- Villareal, R., 1980. Tomato in the tropics. Westview Press, Boulder CO, USA, p. 171.
- Wien, H. C. 1997. Transplanting. En: The Physiology of Vegetable Crops. H C. Wien, (Eds.) CAB International. P. 37-67.
- Zermeño G. A. and L. E. Hipps. 1997. Downwind Evolution of Surface Fluxes Over a Vegetated Surface During Local Advection of Heat and Saturation Deficit. Journal of Hidrology 192: 189-210.