



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
CIIDIR MICHOACÁN**



DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES

**ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO Y
REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DEL TOMATE (*Solanum
lycopersicum* Mill. cv. El Cid) EN INVERNADERO.**

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS**

PRESENTA:

RODRIGO MACIAS HERNÁNDEZ

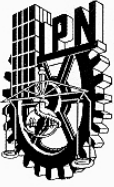
DIRECTOR:

DR. JOSÉ VENEGAS GONZÁLEZ

CODIRECTOR:

DR. GILBERTO VÁZQUEZ GÁLVEZ

JIQUILPAN, MICHOACÁN, DICIEMBRE DE 2009



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Jiquilpan, Mich. siendo las 12:30 horas del día 4 del mes de diciembre del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIIDIR-MICHOACÁN para examinar la tesis titulada:

“Estimación de la evapotranspiración de cultivo y requerimientos hídricos del tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. cv. El Cid) en invernadero”.

Presentada por el alumno:

MACIAS

Apellido paterno

HERNÁNDEZ

Apellido materno

RODRIGO

Nombre(s)

Con registro:

B	0	6	1	2	1	3
---	---	---	---	---	---	---


aspirante de:

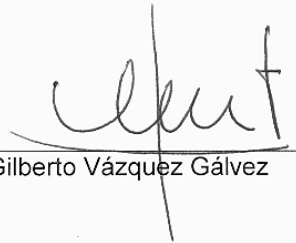
La Maestría en Producción Agrícola Sustentable

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

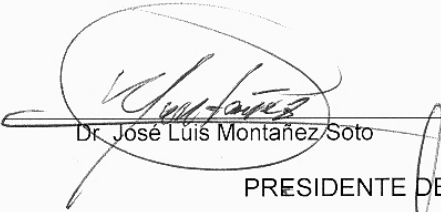
Directores de tesis


Dr. José Venegas González


Dr. Gilberto Vázquez Gálvez


M.C. Salvador Ochea-Estrada


Dra. Martha A. Velázquez Machuca


Dr. José Luis Montañez Soto

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


Dr. Carlos V. Muñoz Ruiz





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Jiquilpan, Michoacán el día 4 del mes diciembre del año 2009, el (la) que suscribe Rodrigo Macías Hernández alumno (a) del Programa de Maestría en Producción Agrícola Sustentable con número de registro B061213 adscrito al Centro de Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Michoacán, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. José Venegas González y Dr. Gilberto Vázquez Gálvez y cede los derechos del trabajo intitulado “Estimación de la evapotranspiración de cultivo y requerimiento hídrico del tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. cv. El Cid) en Invernadero” al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones jvenegasg@ipn.mx, rinconhonda@gmail.com, gvazquez43@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

RODRIGO MACÍAS HERNÁNDEZ

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en forma muy valiosa a mis Directores de Tesis, Dr. Gilberto Vázquez Gálvez y Dr. José Venegas González, por planear, dirigir y mantener el desarrollo del proyecto de investigación; así como por su enseñanza y por todo el tiempo invertido en el mismo.

A la Dra. Fabiola Gabriela Zuno Floriano por su valioso apoyo sin el cual no hubiera sido posible este trabajo.

A todas aquellas personas de la institución involucradas de manera directa e indirecta en el desarrollo de mi proyecto en especial a Marco Antonio Mejía por su ayuda en la toma de datos en el invernadero.

A mis padres y hermanos por su incondicional apoyo en todos los aspectos de mi vida.

A mi institución CIIDIR-IPN, Mich., por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de superación y a cumplir esta importante meta de mi vida.

A todos y todas,

Muchas gracias!!

A mis sobrinos Alan, Alexa y Renata.

RESUMEN

El conocimiento de la evapotranspiración de cultivo (ETc) es fundamental para la estimación de las necesidades de agua y la consiguiente programación de los riegos, el método del tanque evaporímetro tipo A es un método sencillo y económico para estimar la evaporación (ETo). Se realizó una investigación en el invernadero del CIIDIR-Michoacán, (19° 59' 57.30"N, 102° 42' 23.56" O, 1545 m.s.n.m.) durante los meses de abril a julio del 2008 con el objetivo de evaluar el efecto de volúmenes de agua sobre el rendimiento y calidad de un cultivo de tomates (*Solanum lycopersicum* Mill. cv. El Cid) regado por goteo. Los tratamientos correspondieron en aplicar tres láminas de riego; T1=1.00; T2=1.25 y T3=0.75 de la ETc calculada a partir de los registros diarios de evaporación de un tanque evaporímetro tipo A instalado en el interior del invernadero cuyos valores fueron corregidos por un coeficiente de bandeja local y el coeficiente de cultivo del tomate, y T4=Testigo; con una lámina de agua que el agricultor utiliza tradicionalmente en la zona. Durante el desarrollo de este estudio Eo registró valores entre 6 y 8 mm, mientras que ETc registró valores entre 2 a 5 mm, con sus respectivos valores de Kc entre 0.3 y 1.2, el volumen de agua aplicado para los tratamientos T1 (3283 m³ ha⁻¹) y T2 (4103 m³ ha⁻¹) fue aproximadamente dos veces mayor que el volumen aplicado en el tratamiento testigo T4 (1848 m³ ha⁻¹). Los resultados indicaron que el rendimiento total y comercial aumentaron a medida que se incrementó la dosis de agua aplicada siendo T2 (1.25 ETc) el mejor tratamiento produciendo significativamente un 23 % más de fruto calidad comercial que cualquier otro tratamiento. En cuanto al tamaño, diámetro, y peso promedio del fruto, no se observaron diferencias significativas entre las distintas láminas de agua evaluadas. La utilización de la metodología FAO-Tanque evaporímetro es una herramienta útil, fácil y barata para estimar la evapotranspiración del cultivo, determinar los requerimientos de agua y elaborar un calendario básico de riego en el cultivo de tomate bajo invernadero regado por goteo.

ABSTRACT

Knowledge of crop evapotranspiration (ETc) is essential for estimating water needs and the subsequent irrigation scheduling. A pan method is a simple and inexpensive way for estimating evaporation (ETo). An investigation was conducted in the CIIDIR-Michoacán greenhouse, (19 ° 59 '57.30 "N, 102 ° 42' 23.56" W, 1545 m.a.s.l) during the months of April through July 2008 to investigate the influence of water volumes on the yield and quality of greenhouse-grown fresh market tomato (*Solanum lycopersicum* Mill cv. El Cid) irrigated by drip. Treatments were applied in three irrigation levels T1 = 1.00, T2 = 1.25 and T3 = 0.75 ETc calculated from daily records of evaporation of a type A pan installed inside the greenhouse where values were corrected by local tray coefficient and the coefficient of tomato crop, and the control was the irrigation level that farmers usually apply in the region. During the course of this study Eo values recorded between 6 and 8 mm, while ETc values recorded 2 to 5 mm, with their respective Kc values between 0.3 and 1.2, the amount of water applied to treatments T1 (3283 m³ ha⁻¹) and T2 (4103 m³ ha⁻¹) was approximately two times the volume applied in the control treatment T4 (1848 m³ ha⁻¹). The results indicated that total and commercial yield increased as the dose increased water applied being T2 (1.25 ETc) the best treatment produced significantly more than 23% commercial grade fruit than any other treatment. In terms of size, diameter, and average weight of fruit, no significant differences between the different layers of water tested. The methodology we evaporimeter FAO-Tank is a useful, easy and cheap to estimate crop evapotranspiration, determine water requirements and develop a master calendar of irrigation in greenhouse tomato crop irrigated by drip.

ÍNDICE

CAPITULO	PAGINA
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. HIPÓTESIS	4
4. MARCO TEÓRICO	5
4.1 IMPLICACIONES SOCIALES Y ECONÓMICAS DEL USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA.	5
4.2 CONSUMO DE AGUA POR LOS CULTIVOS	6
4.2.1. Productividad del agua en la agricultura.....	7
4.2.1.1 Productividad del agua en el cultivo de tomate.	8
4.2.2. Conceptos relacionados con la ETc	10
4.2.2.1. Evaporación (E) y transpiración (T).....	10
4.2.2.2. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo).....	11
4.2.2.3. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc).....	12
4.2.3. Factores que determinan la ET.....	13
4.2.3.1. Factores climatológicos	13
4.2.3.2. Factores edáficos.....	14
4.2.3.3. Factores biológicos.	14
4.2.3.4. Factores fitotécnicos.	15
4.2.3.5. Factores geográficos.....	16
4.2.4. Determinación de la evapotranspiración	16
4.2.4.1. Medición de ET.....	16
4.2.4.2. Métodos de balance de energía y microclimáticos	16
4.2.4.3. Balance de agua en el suelo	18
4.2.4.4. Lisímetros	19
4.2.5 ET calculada con datos meteorológicos	20
4.2.6. ETo estimada con el tanque de evaporación	21

4.3. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO.....	24
4.3.1. Comportamiento del coeficiente de cultivo.....	26
4.4 PROGRAMACIÓN DEL RIEGO	27
4.4.1. Programación del riego localizado	29
4.4.1.1. Porcentaje de suelo mojado.....	29
4.4.1.2. Lámina de riego	29
4.4.1.3. Coeficiente de uniformidad	30
4.4.1.4. Intervalo de riego	30
4.4.1.5. Tiempo de riego.....	31
4.4.1.6. Necesidades brutas de riego	31
4.4.1.7 Eficiencia del sistema de riego.....	31
4.4.1.8. Necesidades de lavado de sales	32
4.5. CULTIVO DE TOMATE.....	34
4.5.1. Cultivo de tomate en México	36
4.5.2. Cultivo de tomate en invernadero	37
4.5.2.1. Sustratos.....	37
4.5.2.2. Fertirriego.....	38
4.5.2.3. Siembra	39
4.5.2.4. Manejo del almácigo	40
4.5.2.5. Trasplante.....	41
4.5.2.6. Control de plagas y enfermedades	41
5. MATERIALES Y MÉTODOS	43
5.1 SÍTIO EXPERIMENTAL.....	43
5.2 SIEMBRA	43
5.3. TRASPLANTE	43
5.4. SISTEMA DE RIEGO	44
5.5. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS.....	44
5.6. MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACION DEL CULTIVO (ETc)	45

5.7. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO.....	46
5.8. MEDICIÓN DE DATOS DENTRO DEL INVERNADERO.....	47
5.8.1. Datos de cosecha	47
5.8.2. Tamaño de planta	47
5.8.3. Eficiencia del uso del agua	48
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
6.1 EVAPOTRANSPIRACION DE CULTIVO (ETc) Y EVAPORACION (Eo).....	49
6.2 VOLUMEN DE AGUA APLICADO	50
6.3. EFECTO DEL AGUA SOBRE LAS VARIABLES VEGETATIVAS Y REPRODUCTIVAS	52
6.3.1. Altura de planta.	52
6.4 CALENDARIO DE RIEGO.....	57
7. CONCLUSIONES.....	59
8. BIBLIOGRAFÍA	61

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PAGINA
Cuadro 1. Ejemplos de opciones disponibles para mejorar la eficiencia del uso del agua a nivel de campo.	9
Cuadro 2. Valores del factor de mayoración (f) en función del coeficiente de uniformidad de la instalación de riego por goteo.	32
Cuadro 3. Valores de la mínima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que reducen la cosecha a cero (MaxCEe) y valores de la máxima conductividad del agua de riego (CEi) que tolera cada cultivo sin que se reduzcan los rendimientos.	33
Cuadro 4. Composición química del tomate.	35
Cuadro 5. Enfermedades fisiológicas del tomate, causas y soluciones.	36
Cuadro 6. Fertilizante necesario para 1000 litros de solución en riego de hortalizas.	38
Cuadro 7. Altura de planta de los diferentes tratamientos.	52
Cuadro 8. Efecto de cuatro láminas de riego sobre características del fruto.	53
Cuadro 9. Rendimiento comercial, desecho y total de los diferentes tratamientos.	55
Cuadro 10. Productividad del agua en el cultivo de tomate en invernadero.	56
Cuadro 11. Calendario de Riego para 1.00 ETc.	58

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PAGINA
Figura 1. Evapotranspiración.....	10
Figura 2. Balance de agua en el suelo.....	18
Figura 3. Tanque evaporímetro tipo A.....	22
Figura 4. Sistema de riego.....	43
Figura 5. Evaporación (Eo) y evapotranspiración (Etc) semanales del cultivo de tomate c.v el Cid.....	49
Figura 6. Volumen total de agua aplicado ($m^3 ha^{-1}$) en diferentes periodos fenológicos a un cultivo de tomate bajo invernadero sometido a tres tasas de riego.....	51
Figura 7. Correlación entre el peso del fruto y agua aplicada.....	54
Figura 8. Correlación entre el diámetro del fruto y el agua aplicada.....	54

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el aumento de la población a nivel mundial exige una mayor producción de alimentos con menos insumos, entre ellos los más importantes son los fertilizantes y el agua de riego. La creciente población necesita mayores cantidades de alimento, para poder satisfacer esta demanda teniendo presente la pérdida de terrenos agrícolas, se necesita contar con métodos de producción de alimentos que garanticen altos rendimientos en espacios pequeños. Paralela a esta necesidad existe una creciente exigencia comercial por aumentar la calidad del producto y por lograr además una mayor precocidad de los cultivos. El método más eficaz para alcanzar tales resultados es la producción de cultivos forzada con el uso de invernaderos. Por las bondades que tiene este tipo de agricultura, se garantiza que se realice una producción de cultivos durante todo el año y con un rendimiento por unidad de superficie mucho mayor que el que se obtiene con los sistemas tradicionales (Rosegrant *et al.*, 2007)

El uso de invernaderos no es nuevo en el país, actualmente existen agricultores que conocen el manejo de este sistema de producción, sin embargo persiste un vacío en el conocimiento del comportamiento de las variables meteorológicas dentro de los invernaderos. En México no se cuenta con métodos específicos que permitan. Bajo estas condiciones, calcular los requerimientos de agua de los cultivos (Zamora y Guerrero, 2005)

El conocimiento del requerimiento de agua del cultivo es indispensable para realizar una planificación correcta del riego y mejorar así la eficiencia de los sistemas de riego, proveyendo al cultivo de la cantidad de agua suficiente para satisfacer plenamente sus necesidades (Fernández, 2000). Con el riego se debe aplicar la cantidad justa para cubrir las necesidades en el consumo de agua del cultivo. Un exceso de agua de riego supone el lavado de fertilizante y desperdicio, mientras que una aportación de agua

inferior a las necesidades de consumo de agua del cultivo puede llegar a provocar déficit hídrico y por tanto una reducción de la producción. En la agricultura forzada se modifican algunos factores ambientales que provocan cambios en la evapotranspiración (Antón, 2002) por lo tanto, para alcanzar los objetivos del proyecto resulta de importancia central la medición de la evapotranspiración bajo condiciones de invernadero y evaporación que unidas al estado fenológico del cultivo son pieza clave para generar un método para estimar la evapotranspiración de cultivos que crecen en ambientes forzados.

En nuestro país se han utilizado fórmulas empíricas para la determinación de evapotranspiración bajo invernadero, pero no se sabe con exactitud si estos valores se correlacionan bien con la evapotranspiración real dentro de estos, ya que los datos de evapotranspiración medida directamente son prácticamente inexistentes. Sobre esta base es de primordial importancia establecer un procedimiento sencillo y económico con el fin de realizar medidas de evapotranspiración en el cultivo forzado, que permita ajustar fórmulas de estimación en base a elementos climáticos (Zamora y Guerrero, 2005)

Fernández (2000) correlaciona valores de evapotranspiración (ET) calculados mediante el método del tanque evaporímetro dentro del invernadero con valores de ET medidos en el interior de este en Almería, España. En el presente proyecto se pretende realizar un análisis semejante para el clima en la Ciénega de Chapala Michoacán, México.

Del resultado del proyecto se espera obtener información acerca de las necesidades de riego del cultivo de tomate bajo invernadero, que actualmente no existe.

2. OBJETIVOS

1. Estimar la evapotranspiración del cultivo de tomate variedad 'El Cid' bajo invernadero regado por goteo, utilizando la metodología del tanque evaporímetro.
2. Determinar los requerimientos hídricos del cultivo de tomate variedad 'El Cid' en invernadero con base en la evaluación de la aplicación de tratamientos de volúmenes de agua sobre el crecimiento y rendimiento de fruto.
3. Seleccionar el mejor tratamiento y proponer un calendario básico de riego por goteo para el cultivo de tomate en invernadero.

3. HIPÓTESIS

Ho. No hay diferencia del efecto de los tratamientos de volúmenes de agua sobre el crecimiento y rendimiento de fruto del cultivo del tomate variedad 'El Cid' en invernadero.

Ha. Si hay diferencia del efecto de los tratamientos de volúmenes de agua sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo del tomate variedad 'El Cid' en invernadero.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 IMPLICACIONES SOCIALES Y ECONÓMICAS DEL USO DEL AGUA EN LA AGRICULTURA.

Las predicciones sobre el uso del agua a escala global indican grandes incrementos en la demanda futura para cubrir las necesidades de los sectores urbano, industrial y agrícola. Esto se debe a que más de una sexta parte de la población mundial no tiene acceso al agua potable o a instalaciones sanitarias, así como a la insuficiente atención que se ha puesto, hasta ahora, para conocer los requerimientos de los ecosistemas naturales. Ésto nos da a conocer que el mayor problema del agua a nivel mundial es la escasez (Jury y Vaux, 2005). Hay una gran incertidumbre acerca de cuál será el nivel del volumen de agua disponible para las generaciones futuras. Según datos proporcionados por la FAO (2006), para el año 2050, el volumen de agua disponible para riego será un 25% menos que el actual.

La agricultura de riego es el usuario principal del agua que se consume globalmente, alcanzando una proporción que excede el 70 a 80 % del total en las zonas áridas y semi-áridas. A nivel mundial, la producción de alimentos con riego representa más del 40 % del total y utiliza alrededor del 17 % de la tierra dedicada a la producción de alimentos (Fererres y Connor, 2004). Actualmente la agricultura de riego ha caído entre dos percepciones que son contradictorias; algunos perciben que esa agricultura es altamente ineficiente por sembrar “cultivos sedientos de agua” (Postel *et al.*, 1996), mientras otros enfatizan que el riego es esencial para la producción de alimentos suficientes en el futuro, debido a los anticipados incrementos en la demanda de comida por el crecimiento de la población mundial y de los cambios en las dietas (Dyson, 1999). Sin embargo, esta agricultura de riego continúa siendo practicada en muchas áreas del mundo sin observar los principios básicos de conservación de recursos y sustentabilidad, por ello, el manejo del agua de riego en

esta era de escasez de este recurso tiene que ser manejada más eficientemente, ayudando a cuidar el agua y a maximizar su productividad.

4.2 CONSUMO DE AGUA POR LOS CULTIVOS

El riego es aplicado para evitar los déficits de agua que reducen la producción de los cultivos. El proceso de uso del agua por los cultivos tiene dos componentes principales: uno debido a las pérdidas por evaporación del suelo y del cultivo, usualmente llamada evapotranspiración del cultivo (ETc) y el otro que incluye todas las pérdidas resultantes de la distribución del agua en el cultivo. Todas las aguas de riego contienen sales y conforme el agua se evapora, las sales se concentran en el perfil del suelo y tienen que ser desplazadas debajo de la zona radicular antes de que alcancen una concentración que limite la producción del cultivo. El lavado de las sales se realiza por el movimiento del agua aplicada en exceso de la ETc. Por ello, algunas pérdidas de agua son inevitables y son necesarias para mantener el balance de las sales; sin embargo, estas pérdidas son minimizadas con métodos de riego eficientes y con un manejo apropiado del cultivo. Reducir la ETc sin afectar la producción de los cultivos es mucho más difícil, por la razón de que la transpiración de los cultivos está fuertemente asociada con la asimilación de carbono (Tanner y Sinclair, 1983; Monteith, 1990; Steduto *et al.*, 2006).

El conocimiento de la ETc es fundamental para la estimación de las necesidades del agua de los cultivos y la consiguiente programación de los riegos. El uso consuntivo está formado por la evapotranspiración más el agua que utilizan las plantas en la formación de sus tejidos durante todo el ciclo y equivale al 1% del agua total utilizada aproximadamente, por lo que el consumo total de agua por la planta puede considerarse igual a la evaporación (Aguilera y Martínez, 1996)

4.2.1. Productividad del agua en la agricultura

La producción de nueva biomasa en cualquier cultivo o comunidad vegetal está fuertemente determinada por la cantidad de agua disponible en el suelo. Ésto resulta evidente a la simple observación del paisaje natural y lo es mucho más cuando se cuantifica la producción anual (cosecha o biomasa acumulada en g ha^{-1}) y el agua utilizada (en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) (Wright, 1982). Esta relación se cumple cuando se compara la precipitación anual y la producción en diferentes biomas, a pesar de la fuerte interferencia de otros factores limitantes como la temperatura, la disponibilidad de nutrimentos o las horas de luz, así como de las dificultades de estimación de la producción de biomasa en determinados biomas, la relación resulta evidente a escala global. Cuando la comparación se hace para una única especie y en diferentes regímenes de disponibilidad hídrica, el ajuste de la producción a la disponibilidad de agua es muy superior, de forma que la cosecha queda totalmente determinada por el agua utilizada (Stanghellini, 2005). La razón está en que el proceso base de la producción de nueva biomasa (la fotosíntesis) y el del gasto de agua (transpiración) se producen a la vez y la entrada del dióxido de carbono y la salida del agua utilizan la misma vía, es decir, los estomas en las hojas. Cuanto más abiertos están, más fácilmente entra el CO_2 pero también más rápidamente se escapa el agua. El precio, el agua gastada para la producción de biomasa, es por tanto inevitable y alto. La producción de biomasa sin agua es imposible para las plantas. La cuestión está en conocer más sobre si se trata de un costo único, si varía con el tipo de planta, o si depende de las condiciones ambientales (Bacon, 2004).

Producir un gramo de biomasa supone gastar entre 100 y 1000 g de agua y el valor exacto depende tanto del tipo de planta como de las condiciones ambientales. La causa de que algunos cultivos como la caña de azúcar, maíz y sorgo presenten menores requerimientos hídricos por kilogramo de cosecha, se esclareció en los años 60 por fisiólogos que demostraron que estas especies disponían de una vía de

fotosíntesis de mayor rendimiento (fotosíntesis C4), así, se abrieron planteamientos nuevos sobre la capacidad de mejorar la economía hídrica de las plantas aumentando la eficiencia de los procesos fotosintéticos (Medrano *et al.*, 2002).

La eficiencia en el uso del agua (EUA), es la relación existente entre la biomasa presente en un determinado momento en un cultivo por unidad de agua utilizada por este (Simsek *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2004). Aujla *et al.* (2005) obtuvo la EUA como la relación entre el rendimiento total del cultivo y el total del agua aplicada (productividad del agua).

Para algunos cultivos como el trigo, la EUA equivale a 1 kg de grano por m³ de agua, mientras que para arroz es de 1.2. Sin embargo, estos son requerimientos bajos de agua comparados con cantidades de 1.7 y 2 m³ de agua que se utilizan para producir rendimientos de granos en zonas templadas, y de 3 a 5 m³ en regiones áridas (FAO, 2006). Existe un gran potencial para mejorar la eficiencia en el uso del agua. Wallace y Batchelor (1997), proponen en el Cuadro 1, algunas opciones para tal efecto.

4.2.1.1 Productividad del agua en el cultivo de tomate.

La utilización de técnicas de inundación, como se venía haciendo hasta principios de los años ochenta, utilizaban para regar una hectárea de tomate entre 7 000 y 8 000 m³ de agua y se obtenía entre 70 y 80 t de tomate, siendo el rendimiento de unos 100 m³ de agua por tonelada de tomate producido, es decir, 10 kg m⁻³ de agua. Con la utilización de técnicas de riego por goteo se suele aportar a una hectárea entre 6 000 y 5 000 m³ de agua para producir unas 140 t de tomate con lo que el rendimiento es de 40 m³/t, es decir, la EUA se eleva hasta 25 kg m⁻³ de agua (López-Gálvez 2000).

En Holanda con cultivo en sustrato a solución perdida, utilizando un invernadero de cristal y sistema de calefacción, la demanda hídrica del cultivo de tomate se sitúa entre los 15 m³ ton⁻¹. Reciclando el agua se podría llegar, en buenas condiciones

Cuadro 1. Ejemplos de opciones disponibles para mejorar la eficiencia del uso del agua a nivel de campo.

Categoría de mejora	Opciones
Agronómica	Manejo del cultivo para mejorar la captura de la precipitación o reducir la evaporación del agua (ej., residuos de cultivo, labranza cero y arreglo topológico); variedades mejoradas; estrategias avanzadas de cultivo que maximicen el área cultivada durante periodos de poca demanda de agua y/o periodos cuando la lluvia puede tener más probabilidad de ocurrencia.
Ingeniería	Sistemas de riego que reduzcan las pérdidas de aplicación de agua, incrementen la uniformidad de la distribución, o ambos; sistemas de cultivo que incrementen la captura de la lluvia (ej., residuos de cultivo, subsoleo profundo, terrazas y represas).
Manejo	Programación del riego en base la demanda; bajo un moderado déficit de riego para promover la extracción profunda de agua del suelo; impidiendo el incremento en la salinidad en la zona radicular; mantenimiento preventivo del equipo para reducir las fallas inesperadas de este.
Institucional	Participación de los usuarios en la operación y el mantenimiento de los distritos de riego; incremento en el costo del agua e incentivos legales para reducir el uso del agua y multas por uso ineficiente; entrenamiento y oportunidades de educación para aprender nuevas y más avanzadas técnicas.

(Wallace y Batchelor)

de cultivo, hasta $10 \text{ m}^3/\text{t}$, lo que representa una reducción de 4 veces a lo que es habitual en los cultivos más avanzados de nuestro país y 10 veces menor de lo que todavía se viene aportando en los menos avanzados (FAO, 2006).

4.2.2. Conceptos relacionados con la ETc

4.2.2.1. Evaporación (E) y transpiración (T)

Como se observa en la figura 1, la evapotranspiración del cultivo (ETc) según Allen *et al.*, (1998) representa la cantidad de agua que, por el proceso de transpiración la planta emite como vapor de agua a la atmósfera, mas la cantidad de agua que se pierde por evaporación desde la superficie del suelo. Esta cantidad de agua, debe ser satisfecha mediante el riego. Un exceso de agua riego supone el lavado de fertilizantes, lo que puede acarrear problemas medioambientales por la contaminación de las aguas subterráneas, mientras que una aportación de agua inferior a la ETc puede llegar a provocar déficit hídrico y por tanto una reducción de la producción (Fernández *et al.*, 2006)

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en

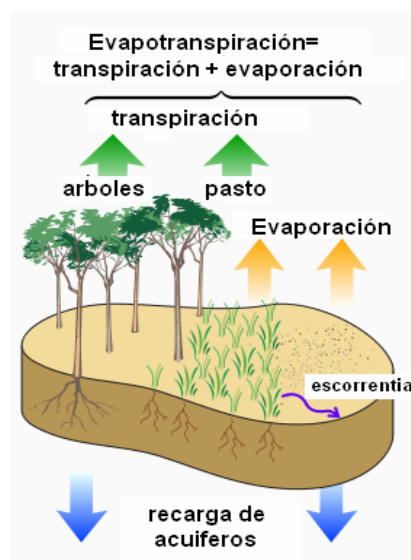


Figura 1. Evapotranspiración (Allen, 1998)

los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y

finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal. En el momento de la siembra, casi el 100% de la ET ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración. La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un período completo de cultivo o un año. Como una hectárea tiene una superficie de 10 000 m² y 1 milímetro es igual a 0,001 m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m³ de agua por hectárea. Es decir 1 mm día⁻¹ es equivalente 10 m³ ha⁻¹ día⁻¹ (Allen *et al.*, 1998).

Allen *et al.*, (1997), mencionan que el concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{c aj}). ET_o es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. ET_{c aj} requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo.

4.2.2.2. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración del cultivo de referencia, y se denomina ET_o. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. No se recomienda el uso de otras

denominaciones como ET potencial, debido a las ambigüedades que se encuentran en su definición (Allen *et al.*, 1998)

El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre la ET. El relacionar la ET a una superficie específica permite contar con una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies. Además, se elimina la necesidad de definir un nivel de ET para cada cultivo y periodo de crecimiento. Se pueden comparar valores medidos o estimados de ETo en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que se hace referencia a ET bajo la misma superficie de referencia. Los únicos factores que afectan ETo son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ETo es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ETo expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el único método de determinación de ETo con parámetros climáticos. Este método ha sido seleccionado debido a que aproxima de una manera cercana la ETo de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos (Shuttleworth, 1993).

4.2.2.3. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc)

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se denomina ETc, y se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo

óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas existentes (Alves, 1995).

4.2.3. Factores que determinan la ET

La ET ocurre en función de factores climatológicos, edáficos, biológicos, fitotécnicos y geográficos, los más importantes son descritos de la siguiente forma por de Santa Olalla y de Juan Valero (1993).

4.2.3.1. Factores climatológicos

La radiación incidente en un cultivo es la fuerza motriz del proceso de la ET, se reparte entre calor sensible y calor latente. Si el cultivo está bien provisionado de agua, una fracción grande de la radiación neta se disipa como calor latente para evaporar el agua. En trabajos sobre la ET se suele considerar la radiación en sus distintas acepciones, la radiación neta, la radiación solar global y la radiación solar extraterrestre o máxima teórica.

Para que la evaporación tenga lugar, es necesario que haya una diferencia de tensión de vapor de agua, entre la superficie evaporante y el aire que la rodea, igualmente, la cantidad de agua transpirada está gobernada por la diferencia de tensión de vapor de agua en el espacio entre el estoma de la planta y la atmósfera. El déficit de saturación está muy influido por la humedad relativa y temperatura del aire, planta y suelo.

El viento actúa como agente transportador de agua, mezclando las capas con mayor contenido del mismo con otras que poseen menor cantidad, favoreciendo la difusión y alejando por tanto el vapor de las proximidades de la superficie evaporante, con lo cual se evita que las capas próximas a la cubierta vegetal queden pronto saturadas y cese por consiguiente la ET.

La temperatura en si misma no es un factor que afecte directamente a la ET. En términos generales, la temperatura media del aire está influida por la radiación, de tal

modo que los meses en que sus valores son más altos, son aquellos en los se recibe más radiación.

4.2.3.2. Factores edáficos

La disponibilidad de agua en el suelo tiene efectos marcados sobre el proceso de ET. El crecimiento y desarrollo de las plantas no se ven afectados por las variaciones de humedad en el suelo siempre que estas se produzcan entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, intervalo conocido como humedad aprovechable. En este intervalo de agua útil disponible en el suelo, las plantas evapotranspiran al máximo.

Después de una lluvia o riego, la evaporación de agua desde el suelo tiende al máximo. Al cabo de unos días, la superficie del suelo se ha secado y la evaporación desde el suelo inicia su reducción. Sin embargo, la transpiración del cultivo continúa a una tasa dictada por la demanda evaporativa del ambiente, siempre que las raíces puedan absorber agua de la capas más profundas del suelo para reemplazar las pérdidas.

4.2.3.3. Factores biológicos.

Cuando el cultivo crece y va cubriendo el suelo, la tasa de ET aumenta como consecuencia del incremento del índice de área foliar y de altura de las plantas. El efecto de la altura del cultivo en la ET, está implícitamente considerado en las definiciones de ETP y ETr, al referirse ambas a una masa vegetal verde que cubre íntegramente en terreno y de reducida altura. Con un criterio estrictamente físico, el aumento de altura del cultivo afecta al intercambio de energía y a la capacidad de almacenar y transmitir calor, a consecuencia del creciente espesor de la masa vegetativa. Además, contrariamente a lo que ocurre con la evaporación de una superficie libre de agua, en la cual el área es constante, la superficie de transpiración de una planta se modifica constantemente con su crecimiento.

La ET está asimismo regulada por el mecanismo de apertura de los estomas, que controlan en gran parte el volumen de transferencia de vapor de agua entre los tejidos vegetales y el aire. Los estomas constituyen la resistencia principal al flujo de evaporación de agua por las hojas y al mismo tiempo la puerta de entrada del CO₂ atmosférico.

4.2.3.4. Factores fitotécnicos.

En la ET incide la salinidad, este hecho se debe en parte a la reducida disponibilidad de agua, a un crecimiento deficiente, provocado por desequilibrios de nutrición y a los efectos tóxicos de determinados iones en la solución.

Los efectos de la densidad poblacional sobre la ET son similares a los del grado de cobertura o sombreado del terreno por el cultivo. La acción de los nemátodos y enfermedades criptogámicas influyen sobre la eficiencia del uso del agua por los cultivos y, en consecuencia, sobre el proceso de la ET.

El empleo de mallas de sombreado en invernaderos, la asociación de cultivos de conformación conveniente así como el hecho de recurrir a plantas de sombra reduce la radiación excesiva. Las láminas de plástico flexible, tan extendidas con la técnica de acolchonado, son efectivas para reducir la ET, si bien los resultados de su aplicación depende del grado de recubrimiento del suelo y del porcentaje de cubierta vegetal. La técnica de enarenado no es sino un acolchonado de arena, con la ventaja de su aireación. La arena rompe la ascensión capilar del agua almacenada disminuyendo la ET.

En la ET del cultivo repercute muy poco el método de riego si el sistema está bien diseñado y maneja, pero no en el caso de riegos aéreos de alta frecuencia o cuando la cubierta del suelo es baja, se han señalado reducciones en la ET cuando el sistema de riego es por goteo solamente en el caso de cultivos poco densos y de plantaciones arbóreas jóvenes.

4.2.3.5. Factores geográficos.

Azis (2003), define la advección como “el intercambio de energía, humedad y cantidad de movimiento debido a la heterogeneidad horizontal” según definición, la ET de una cubierta vegetal estará influida por las características de su entorno.

4.2.4. Determinación de la evapotranspiración

4.2.4.1. Medición de ET

La evapotranspiración no es simple de medir. Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos o el balance del agua del suelo en lisímetros. Los métodos experimentales de campo, son en general caros, exigiendo precisión en las mediciones, y pueden ser completamente realizados y analizados apropiadamente sólo por personal de investigación suficientemente preparado. A pesar de que estos procedimientos no son apropiados para mediciones de rutina, siguen siendo importantes para la evaluación de las estimaciones de ET obtenidas con otros métodos indirectos (Aguilera y Martinez, 1996).

4.2.4.2. Métodos de balance de energía y microclimáticos

Antón (2002) menciona que la evaporación de agua requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de calor sensible o de energía radiante. Por ello, el proceso de evapotranspiración es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de energía. La energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo periodo de tiempo.

Todos los flujos de energía deben ser considerados cuando se deriva una ecuación de balance de energía. La ecuación para una superficie de evaporación se puede escribir como:

$$R_n - G - \lambda T - H = 0$$

donde:

- R_n es la radiación neta,
- H es el calor sensible,
- G es el flujo de calor del suelo,
- λT es el flujo de calor latente.

Los distintos términos pueden ser positivos o negativos. Cuando R_n es positiva, proporciona energía a la superficie y cuando G , λT y H son positivos retiran energía de la superficie. El flujo de calor latente (λT) representa la fracción de la evapotranspiración que puede ser derivada de la ecuación del balance de energía si todos los otros componentes son conocidos. La radiación neta (R_n) y el flujo de calor del suelo (G) pueden ser medidos o estimados en función de parámetros climáticos. Por el contrario la medición del calor sensible (H) es compleja y sus valores no pueden obtenerse fácilmente. La determinación de H incluye mediciones precisas de los gradientes de temperatura por encima de la superficie.

Otro método para estimar la evapotranspiración es el método de transferencia de masa. Este enfoque considera los movimientos verticales de pequeñas cantidades de aire (remolinos) por encima de una amplia superficie homogénea. Los remolinos transportan la materia (vapor de agua) y la energía (calor, momentum) desde y hacia la superficie de evapotranspiración. Asumiendo condiciones de equilibrio y que los coeficientes de transferencia de los remolinos para el vapor de agua son proporcionales a aquellos para el calor y el momentum, la evapotranspiración puede ser calculada a partir de los gradientes verticales de la temperatura del aire y vapor de agua usando la relación de Bowen. Otros métodos de observaciones directas, utilizan gradientes de velocidad del viento y de vapor de agua. Estos métodos y otros como el

de la covarianza de remolinos, requieren medidas precisas de la presión de vapor, y de la temperatura del aire o velocidad del viento a diferentes niveles sobre la superficie. Por lo tanto su aplicación se restringe principalmente, a situaciones de investigación.

4.2.4.3. Balance de agua en el suelo

La evapotranspiración también puede determinarse midiendo varios componentes del balance de agua en el suelo. El método consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo (Figura 2). El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática sub-superficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo sub-superficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (FS). Sin embargo, excepto bajo condiciones de pendientes pronunciadas, normalmente los valores de FSin y FSout son mínimos y pueden no ser considerados.

La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua de la zona radicular. Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (SW) a lo largo de un periodo de tiempo:

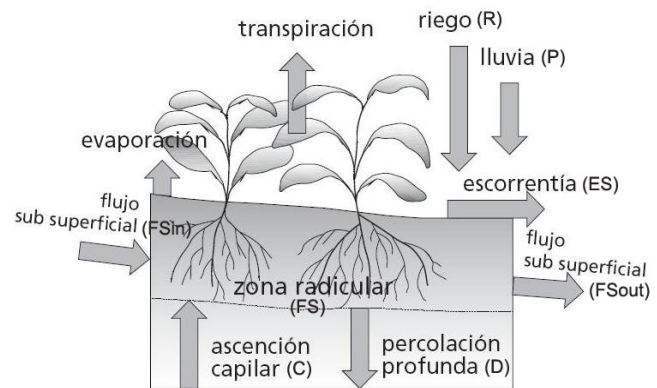


Figura 2. Balance de agua en el suelo (FAO, 2006)

$$ET = R + P - ES - D + C \pm FS \pm SW$$

Algunos flujos como el flujo sub-superficial, la percolación profunda y la capilaridad desde la capa freática son difíciles de medir y pueden no considerarse en periodos cortos de tiempo. El método del balance de agua en el suelo generalmente solo puede dar estimaciones de ET para periodos largos de tiempo del orden de una semana o diez días (FAO, 2006) .

4.2.4.4. Lisímetros

Si se aísla la zona radicular del cultivo y se controlan los procesos que son difíciles de medir, los diversos términos en la ecuación del balance de agua en el suelo se pueden determinar con apreciable exactitud. Esto se hace en lisímetros que son tanques aislados llenados con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. En lisímetros de pesaje de precisión, la evapotranspiración se puede obtener con una exactitud de centésimos de milímetro, donde la pérdida de agua es medida directamente por el cambio de masa y períodos pequeños tales como una hora pueden ser considerados (Bastiaanssen, 1995)

En lisímetros de drenaje, la evapotranspiración es medida por un período dado, restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo de los lisímetros, de la cantidad total de agua ingresada. Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar). Este requisito no se ha respetado normalmente en muchos estudios de lisimetría y ha dado lugar a datos seriamente desviados y poco representativos de ET_c y K_c (Anda, 1994).

Como los lisímetros son difíciles de manejar y caros de construir y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, su uso se restringe normalmente a trabajos de investigación (Gebet, 1991).

4.2.5 ET calculada con datos meteorológicos

Debido a la dificultad de obtener mediciones de campo precisas, ET se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Una gran cantidad de ecuaciones empíricas o semi-empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del cultivo o de referencia utilizando datos meteorológicos. Algunos de los métodos son solamente válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas y no se pueden aplicar bajo condiciones diferentes de las que fueron desarrolladas originalmente. Numerosos investigadores han analizado el funcionamiento de los varios métodos del cálculo para diversas localidades. Como resultado de una Consulta de expertos, el método FAO Penman Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiration de referencia, ETo. La ET del cultivo bajo condiciones estándar se determina utilizando los coeficientes de cultivo (Kc) que relacionan la ETc con la ETo.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

donde:

- ET_o evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)
- R_n radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)
- R_a radiación extraterrestre (mm día⁻¹)
- G flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)
- T temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
- u₂ velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)
- e_s presión de vapor de saturación (kPa)
- e_a presión real de vapor (kPa)
- e_s - e_a déficit de presión de vapor (kPa)
- Δ pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)
- γ constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

Esta ecuación determina la evapotranspiración de la superficie hipotética de referencia y proporciona un valor estándar con el cual se puede comparar la evapotranspiración en diversos periodos del año o en otras regiones así como también puede relacionarse con la evapotranspiración de otros cultivos. No obstante, esta ecuación requiere de datos meteorológicos que muchas veces no están disponibles para su uso. Por ello se opta por otras metodologías que aunque no son tan precisas presentan una correlación muy grande con la metodología FAO Penman-Monteith.

Muchos programas informáticos como el CROPWAT utilizan ya la ecuación FAO Penman-Monteith para determinar ETo. Estos programas están disponibles en línea y facilitan la estimación de ETo con tan solo proporcionar algunos datos meteorológicos. La determinación de la ETc se hace introduciendo en el cálculo el coeficiente de cultivo. Posteriormente se mencionarán algunas metodologías para el cálculo del Kc.

4.2.6. ETo estimada con el tanque de evaporación

El método FAO Penman-Monteith se mantiene como el método estándar único para el cómputo de la ETo de datos meteorológicos. Sin embargo, la evaporación de una superficie libre de agua, proporciona un índice del efecto integrado de la radiación, la temperatura del aire, la humedad del aire y del viento en la evapotranspiración. Sin embargo, diferencias entre la superficie de agua y las superficies cultivadas producen diferencias significativas entre la pérdida de agua de una superficie libre de agua y una superficie cultivada. El tanque ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para estimar la evapotranspiración de referencia observando la pérdida por evaporación de una superficie de agua y aplicando coeficientes empíricos para relacionar la evaporación del tanque con ETo.

El tanque evaporímetro tipo A está construido de fierro galvanizado sin puntas, de 122 cm de diámetro y de 25.4 cm de profundidad, (figura 3) expuesto y montado sobre un marco de madera construido de tal forma que deje circular el aire libremente por debajo del tanque (Aguilera y Martínez, 1996).

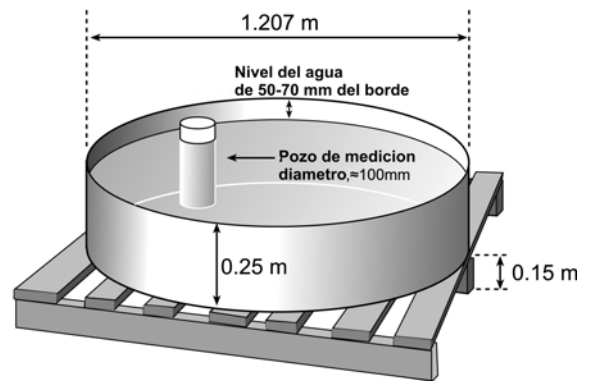


Figura 3 Tanque evaporímetro tipo A. (Aguilera y Martínez, 1996).

Doorenbos y Pruitt (1977) proponen un método para la estimación de la ETo a partir de los datos medidos de evaporación de una lámina libre de agua en el tanque tipo A. la ecuación correspondiente, toma la forma siguiente:

$$E_{To} = K_p(E_o)$$

donde:

- ETo Evapotranspiración de referencia (mm/día)
- Eo Evaporación del tanque tipo A (mm/día)
- Kp Coeficiente del tanque (adim)

El coeficiente del tanque está en función de la humedad relativa ambiental, del recorrido del viento tomado a 2 m sobre el nivel del terreno y de la distancia en metros desde el tanque hasta el extremo de la cubierta sobre la que se ubica. Los valores de Kp fluctúan alrededor de 0.80 por considerar que hay diferencias significativas en la pérdida de agua de una superficie libre en comparación a la de un cultivo, siendo mayor en la superficie libre que en al del cultivo. El almacenaje de calor dentro del tanque puede ser apreciable y puede causar una significativa evaporación durante la noche mientras que la mayoría de los cultivos transpiran

solamente durante el día. También se distinguen diferencias en la turbulencia, temperatura y humedad del aire que se encuentran inmediatamente sobre estas dos superficies. La transferencia de calor a través de las paredes del tanque también afecta el balance energético (Allen *et al.*, 1998).

Fernández *et al.*, (2001) proponen otros modelos como el de la radiación que ha sido utilizado para calcular la ETo dentro del invernadero con mucha precisión dado que hay una alta relación de la transpiración con la radiación solar. El modelo propone la siguiente expresión:

- Si $DDA < 220$, $ET_o = 0.8028 + 0.9001) DDA RS_{inv}$
- Si $DDA > 220$ $ET_o = 1.9033 - 0.80028) DDA RS_{inv}$

donde, DDA es el día del año, siendo el 1 de enero el día 1 y el 31 de diciembre el día 365, RS_{inv} es la radiación solar dentro de invernadero expresada en $mm\ día^{-1}$. En caso de no disponer de sensor de radiación, los valores de radiación dentro de invernadero pueden estimarse a partir de datos medidos en exterior y un valor de transmisividad, que es función del material de cubierta, tipo de cubierta, encalado, etc.

$$RS_{inv} = RS_{ext} * t$$

donde:

RS_{ext} es la radiación solar medida en exterior

t es la transmisividad de la cubierta.

Allen *et al.*, (1998) mencionan que como una opción alternativa, la ETo se puede estimar usando la ecuación de Hargreaves donde:

$$ET_o = 0.0023(T_{media} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a$$

todos los parámetros para esta ecuación han sido previamente definidos. Las unidades de ET_o y R_a en la Ecuación son mm día^{-1} . Antes de aplicar esta ecuación en cada nueva región, se debe verificar la validez de sus resultados comparándolos con estimaciones de la ecuación de FAO Penman-Monteith en estaciones meteorológicas donde se dispone de datos de radiación solar, temperatura del aire, humedad, y velocidad del viento.

4.3. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO

El coeficiente de cultivo (K_c) integra los efectos de tres características primarias que diferencian un cultivo de una pradera de gramíneas: altura de cultivo, resistencia y albedo de la superficie suelo-cultivo. Es decir, los valores de K_c dependen, sobre todo, del cultivo y su manejo. El K_c es un coeficiente que expresa la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la superficie del pasto de referencia (Allen *et al.*, 1998). Además, depende de las condiciones climáticas, de la disponibilidad de agua en el suelo, del estado sanitario del cultivo, de las técnicas culturales aplicadas y, especialmente durante la primera etapa de crecimiento, de la frecuencia de lluvias o riego (Doorenbos y Pruitt, 1974 y 1987). La mayor parte de los métodos que se utilizan para el cálculo de los coeficientes de cultivo parten de la relación entre la ET_o del cultivo y la ET_c , es decir, $ET_c = ET_o * K_c$; despejando el k_c de la expresión anterior:

$$k_c = \frac{ET_c}{ET_o}$$

Según Jensen (1974), los coeficientes k_c se basan fundamentalmente en mediciones de E_t efectuadas mediante técnicas de balance hídrico en el suelo, que son menos precisas que las obtenidas con lisímetros. Estos coeficientes son válidos para condiciones “medias”, que incluyen técnicas culturales normales y condiciones

hídricas en el suelo también comunes y que no requieren corrección alguna. Wrigth (1982), da a conocer datos de coeficiente de cultivo obtenidos mediante mediciones con lisímetros. El término que utiliza para referirse a ellos es el de “basal crop coefficients” y aconseja utilizarlo cuando no existe evaporación desde la superficie del terreno y las disponibilidades hídricas del suelo no limitan la ET.

Los valores de Kc han sido determinados experimentalmente para numerosos cultivos hortícolas bajo invernadero. La ETo y ETc se midieron mediante balance de agua en lisímetros ubicados en dos invernaderos, uno sembrado de gramíneas perennes, donde se midió la ETo, y otro con suelo enarenado, donde se midió la ETc. Los valores de Kc a lo largo del ciclo de cultivo se determinaron como: $ETc = ETo * Kc$ (Fernández *et al.*, 2001). Por su parte Norero (1974) citado por Palacios (1981) propone una fórmula para la estimación del coeficiente kc, la cual incluye la evaporación medida en tinta como indicador de la ETc.

$$kc_i = a + F \left(\frac{t_i}{t_c} \right)^2 \left(1 - \frac{t_i}{t_c} \right)$$

donde:

- kc_i Coeficiente de cultivo en el momento i
- a Parámetro de la fórmula que depende del cultivo y varía de 0.3 a 0.6
- F Índice de área foliar medio del cultivo
- t_i Duración del cultivo hasta el momento i (días)
- t_c Duración total del ciclo vegetativo del cultivo (días)

Allen *et al.*, (1998) por su parte, proponen un método gráfico para elaborar la curva del Kc en estudios preliminares o de planificación en el que solamente se requiere de tres valores de Kc para la descripción y elaboración de esta curva. Esta curva, se construye a través de los pasos siguientes: 1. Dividir el período de crecimiento en las

cuatro etapas generales que describen la fenología o desarrollo del cultivo (inicial, desarrollo del cultivo, mediados de temporada y final); 2. Determinar la duración, en días, de las cuatro etapas de crecimiento e identificar los tres valores de K_c que corresponden a K_c inicial, K_c de mediados de la temporada y K_c final. Ajustar los valores de K_c según la frecuencia del humedecimiento o las condiciones climáticas de las etapas de crecimiento; 3. Construir una curva uniendo segmentos de línea recta a través de cada una de las etapas de crecimiento. Se deberán trazar líneas horizontales a través de K_c inicial en la etapa inicial y a través de K_c de mediados de temporada. Se deberán trazar líneas diagonales desde K_c ini hasta K_c med durante la etapa de desarrollo del cultivo y desde K_c med hasta K_c fin durante la etapa final.

4.3.1. Comportamiento del coeficiente de cultivo

Los valores de k_c aumentan a medida que lo hacen el índice de área foliar y la cobertura del suelo por parte del cultivo. A medida que el cultivo avanza en su ciclo biológico y empieza la senescencia foliar los valores de k_c decrecen además aumenta cuando se riega o llueve, si bien esto ocurre entre los 2 ó 3 días siguientes, en una cantidad que es función del agua que se almacena en el suelo y del porcentaje de sombreado del cultivo.

Posteriormente el k_c decrece a valores que dependen del grado de sombreado del terreno y de la disponibilidad de agua en el suelo para el cultivo. La evolución del coeficiente de cultivo en el tiempo es conocida como la curva de los k_c del cultivo, representada matemáticamente por la forma polinomial (George, 1998).

Diversas escalas se utilizan como referencia para representar la evolución en el tiempo de los valores del coeficiente de cultivo, entre las más importantes se encuentran los días transcurridos entre dos cortes sucesivos de cultivos de alfalfa. El porcentaje de los días desde la siembra o plantación hasta la cobertura total del terreno y, a la ETo acumulada.

4.4 PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

La programación del riego debe responder a dos preguntas básicas: cuándo se debe regar y con qué cantidad de agua es preciso hacerlo; responder a la primera es determinar el periodo de riego, la segunda, es definir su volumen. Por tanto se llama periodo al tiempo transcurrido entre dos aplicaciones de agua, y volumen, a la cantidad puesta a disposición de la planta en cada aplicación. (Ducrocq, 1990). Los métodos para estimar la cantidad de agua a aplicar, ya se describieron anteriormente, por ello, en esta sección se tratarán algunas cuestiones relacionadas con los métodos para determinar cuándo regar.

Un método que se utiliza comúnmente para determinar el momento para regar, es seguir el agotamiento de la humedad del suelo. Al crecer la planta, esta consume el agua en el perfil del suelo de la zona radicular. Como el agua está siendo utilizada por las plantas, la humedad en el suelo llega finalmente a un nivel en el que se requiere un riego o bien la planta experimentará estrés. Si el agua no se aplica, la planta seguirá utilizando lo poco que queda del agua hasta que se agota el agua disponible en el suelo y muere (Martínez, 1991).

El agua de riego se almacena en el suelo, que actúa como un depósito, para luego ser usada por las plantas. El agua almacenada en el suelo y que puede ser utilizada por el cultivo (agua total disponible), es la diferencia entre la cantidad de agua almacenada a capacidad de campo (CC; contenido de agua a una tensión de humedad del suelo de 1/3 atm) y punto de marchitez permanente (PMP; contenido de agua a una tensión de humedad en el suelo de 15 atm) (Allen *et al.*, 1998). CC es el contenido de agua de un suelo cuando ha sido mojado abundantemente por riego y después se ha dejado drenar libremente hasta que éste sea despreciable, y PMP es el contenido de agua que hay en un suelo cuando la planta se marchita de forma permanente. Si se parte de un suelo con un contenido de humedad próximo a su CC el cultivo va extrayendo

agua sin que se reduzca la ETc, sin embargo, el valor de la ETc empieza a disminuir antes de alcanzar PMP. La reducción de la ETc por debajo de su valor máximo se suele traducir en una reducción de la producción. La fracción del agua total disponible que un cultivo puede extraer del suelo sin que sufra estrés es el agua realmente disponible (Allen *et al.*, 1998).

Los sensores que miden el contenido de agua en el suelo permiten conocer cómo el cultivo va extrayendo el agua del suelo, de forma que el riego puede programarse para mantener un contenido de agua en el suelo entre dos niveles de humedad. El límite superior es fijado para evitar drenajes, y por tanto lavado de fertilizantes, y el límite inferior representaría el punto a partir del cual el cultivo sufre estrés hídrico.

Los sensores más utilizados para la medida del contenido de agua en el suelo son: los bloques de yeso, la sonda de neutrones o los diversos tipos de tensiómetros (González y Ruz, 2001).

En los tensiómetros la humedad se mide según la fuerza con la que se adhiere el agua a las partículas del suelo. Cuanta más agua haya, con menos fuerza se pegará a las partículas del suelo. Esta medida se suele dar en bares o centibares que es equivalente a los kilopascales. Entonces, cuando el suelo llegue a la capacidad de campo el agua se perderá por gravedad ya que no está adherida al suelo y las lecturas de los tensiómetros serán cero. El rango operativo de los tensiómetros es de 0 a 75 centibares. Cero indica, como ya se mencionó, que el suelo está saturado, mientras que las lecturas de 10 a 20 centibares indican para la mayoría de los suelos capacidad de campo. Lecturas de 75 centibares indican que el 80% del agua disponible ha sido utilizada por la planta en suelos de textura gruesa (arenosos), pero solamente el 25% en suelos de textura fina (arcillosos).

Los bloques de yeso miden la tensión del suelo en centibares, de forma similar a las lecturas del tensiómetro. Para sistemas en riego por goteo es aconsejable regar

cuando el 20 a 25 % del agua disponible se ha consumido, lo cual corresponde a 75 a 80 % de la capacidad de campo.

Celis *et al.*, (2001), propone utilizar medidores de flujo de savia (stem flow gauges) para determinar la transpiración de cultivos que crecen en ambientes forzados y correlacionar estas mediciones con parámetros biofísicos ambientales y el tanque de evaporación. Además de realizar mediciones de flujo de savia a intervalos horarios, usando el método de balance de calor y simultáneamente monitorear en el invernadero y fuera de él, temperatura del aire radiación solar, radiación neta, humedad atmosférica y evaporación del tanque.

4.4.1. Programación del riego localizado

La programación del riego localizado consiste en determinar y analizar el porcentaje del suelo mojado, la lámina de riego, la evapotranspiración del cultivo, el coeficiente de uniformidad del sistema de riego, el intervalo y el tiempo de riego (Martínez, 1991) las definiciones de tales factores presentadas por el mismo autor son expuestas a continuación. Las dosis de riego calculadas a partir de ETc son dosis netas, por lo que hay que tener en cuenta también la falta de uniformidad del sistema de riego y las necesidades de lavado para el cálculo de la dosis bruta de riego.

4.4.1.1. Porcentaje de suelo mojado

El porcentaje de suelo mojado es el área mojada en relación con el área total de cultivo, cuanto mayor sea el volumen del suelo mojado, menor será la posibilidad de que se produzca un imprevisto stress hídrico, cuando se amplía el intervalo entre riegos por alguna avería en la instalación, ya que se aumenta la posibilidad de utilizar la reserva de agua del suelo (Jensen, *et al.*, 1990).

4.4.1.2. Lámina de riego

La lámina de riego que se va a aplicar a un terreno utilizando riego localizado debe considerar el valor del porcentaje del suelo mojado con el fin de definir únicamente

las áreas que fueron mojadas y por otro lado, la humedad a la cual se desea se aplique el siguiente riego, en riego por gravedad o aspersión es conocido como punto crítico, lo anterior equivale a la lámina de aplicación media (Jensen, *et al.*, 1990).

4.4.1.3. Coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad es el parámetro que se utiliza para definir cuantitativamente la forma de aplicación del agua de riego, este dato es el más importante de la evaluación del sistema debido a que de él depende la buena o mala aplicación del riego. Este coeficiente sirve para evaluar un sistema y para ponderar las láminas de riego que requiere el cultivo (Keller y Bliesner 1990).

4.4.1.4. Intervalo de riego

Para un diseño de riego localizado, se obtiene el intervalo para los días de mayores necesidades del cultivo. El intervalo en este método de riego fluctúa de 1 a 3 días, de tal manera que el agua este fácilmente disponible en el suelo, tendiendo a obtener la máxima producción del cultivo, ya que la disponibilidad del agua no es limitante (Ratliff, *et al.*, 1983).

Fereres 1998, citado por Fernández *et al.*, (2001) menciona que cuando se utilizan sistemas de riego por goteo, dada la elevada frecuencia de riegos se suele ignorar el papel del suelo como almacén de agua, y se considera que el contenido de agua en el suelo no varía con el tiempo. Por tanto, bajo invernadero la programación del riego se simplifica, ya que no hay que preocuparse por determinar el momento del riego y el proceso de programación se enfoca hacia cuánta agua hay que aplicar basándose en estimaciones de la ETC. Por su parte Moreno (2003), indica que un manejo adecuado de la operación de riego implica restituir al sustrato el agua consumida una vez que se ha agotado una cantidad predeterminada del total de agua que hay en el contenedor. Para cultivos hortícolas en invernadero en riego por goteo y sustratos como perlita que tiene una capacidad de almacenamiento de agua del 50%, tras saturación y

drenaje hasta el equilibrio, cada riego calculado por ETc se debe aplicar una vez que se agote el 10% de su capacidad de almacenamiento (Moreno, 2003).

4.4.1.5. Tiempo de riego

El tiempo de riego depende de la lámina de riego que se requiere aplicar y del caudal medio del emisor. Si el intervalo de riego se deja fijo durante todo el ciclo del cultivo, es necesario considerar como variable el tiempo de riego, ya que las necesidades del cultivo son diferentes en cada época del ciclo vegetativo (Keller y Bliesner 1990).

4.4.1.6. Necesidades brutas de riego

Las dosis de riego calculadas a partir de ETo y ETc son dosis netas, por lo que hay que tener en cuenta la falta de uniformidad del sistema de riego y las necesidades de lavado para el cálculo de la dosis bruta de riego (Fernández, 2000).

4.4.1.7 Eficiencia del sistema de riego

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 %, al estar el volumen radicular más concentrado en las zonas húmedas y trabajar con bajas tensiones de humedad del suelo (Fritsch, 1980)

El CU puede disminuir de forma considerable con el uso continuado de la instalación, por tanto, se deberían evaluar todos los años las instalaciones de riego por goteo, y en función del CU calcular las necesidades brutas de riego. Por tanto, las dosis brutas de riego (R_b) teniendo en cuenta la eficiencia del sistema de riego se calculan:

$$Rb = \frac{ETc}{CU}; Rb = ETc * f$$

En el cuadro 2 se dan los valores del factor de mayoración f .

Cuadro 2. Valores del factor de mayoración (f) en función del coeficiente de uniformidad de la instalación de riego por goteo.

CU	f
100	1.0
95	1.05
90	1.11
85	1.18
80	1.25
75	1.33

(Fernández *et al.*, 2006)

4.4.1.8. 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 disminuye 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, 1976).

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 radicular. A esta cantidad de agua se la denomina fracción de lavado (FL), y se define como la fracción del agua que penetra en el suelo y sobrepasa el sistema de raíces.

$$FL = \frac{CEi}{2 * (MaxCEe)}$$

Donde:

- CEi es la conductividad del agua de riego
- MaxCEe es la mínima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que reducirá la cosecha a cero.

En el cuadro 3 se dan para los cultivos hortícolas los valores de la máxima CEi que tolera cada cultivo sin que se reduzcan los rendimientos y de MaxCEe.

Cuadro 3. Valores de la mínima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que reducen la cosecha a cero (MaxCEe) y valores de la máxima conductividad del agua de riego (CEi) que tolera cada cultivo sin que se reduzcan los rendimientos.

CULTIVO	MaxCEe (dS/m)	CEi (dS/m)
Judía	6.5	0.7
Melón	16.0	1.5
Tomate	12.5	1.7
Pimiento	8.5	1.0
Pepino	10.0	1.7

(Fernández *et al.*, 2006)

Las dosis brutas de riego, teniendo en cuenta las necesidades de lavado, se calculan mediante la siguiente expresión:

$$Rb = \frac{ETc}{1 - FL}; Rb = ETc * f$$

Donde:

F es el factor de mayoración en función de la fracción de lavado según la conductividad eléctrica del agua de riego. En la Tabla 9 se dan los valores del factor de mayoración f' para aguas de riego con distinta CE.

4.5. CULTIVO DE TOMATE

El tomate, mejor conocido en el centro de México como jitomate, está dentro de la familia de las solanáceas y su nombre científico (género y especie) es *Solanum lycopersicum*. La palabra tomate proviene del nahualt “xitli” (ombligo) y “tinatim” (tomati o tomatera) y es el nombre común que se le ha dado a una planta herbácea de tallo voluble, largo y cubierto por numerosos pelos, reproducible por semilla y que se desarrolla favorablemente en zona tropical costera. Es originario de una planta silvestre nativa de los Andes, América del sur. Es un refrescante y poderoso aperitivo, por lo que se utiliza como ingrediente en muchísimos platillos. Giovannucci, dice que: “la clave de tal capacidad preventiva del tomate es el antioxidante llamado licopeno”. Según explico: “los tomates son ricos en sustancias fitoquímicas, con propiedades anticancerígenas que conducen a la formación de carotenoides como el licopeno, compuesto que protege a las células de los efectos de la oxidación” en el cuadro 2 se presenta su composición química.

El tomate es un cultivo anual y puede ser semiperenne en regiones tropicales, florece a los dos meses del trasplante y a los tres meses comienza la recolección. La planta y

su fruto son particularmente sensibles a las bajas temperaturas y a la humedad ambiental, que les predisponen a las enfermedades criptogámicas. El tomate es una hortaliza tolerante a la acidez, con valores de pH 6.8-5.0 en lo referente a la salinidad es medianamente tolerante.

Cuadro 4. Composición química del tomate.

Composición química del tomate/100g			
Agua	94 g	Vitamina A	1,113 UI
Calcio	7 mg	Carbohidratos	4.3 g
Fierro	0.5 mg	Fibra	0.5 g
Fósforo	23 mg	Grasa	0.2 g
Potasio	204 mg	Proteínas	0.9 g
Sodio	13 mg	Energía	19 kcal
Acido ascórbico	17.6 mg		

Fuente INFOAGRO (2002)

En el cuadro 3 se exponen las enfermedades más frecuentes que presenta el tomate, así como las posibles causas que las provocan y las soluciones para contrarrestarlas.

Las plagas y enfermedades que atacan al tomate son: conchilla prieta (*blapstimus* spp), pulgas saltona (*Epitrix cucumeris*), diabrotica (*Diabrotica balteata*), mosquita blanca (*Bemisia tabaci*), acaro (*Phyllocoptes gracilis*), gusano del cuerno (*Manchuca quinquemaculata*), gusano falso medidor (*Trichoplusia ni*), gusano soldado (*Spodoptera exigua*), gusano alfiler (*Keiferia lycopersicella*), gusano del fruto (*Heliothis virescens*), damping off (*Phytium* spp), secadera (*Rhizotocina* spp) , mancha bacteriana (*Xanthomonas Versicatoria*), entre otras.

Cuadro 5. Enfermedades fisiológicas del tomate, causas y soluciones.

Enfermedades	Causas	Solución
Amarillamiento del tomate	Cambios del pH del suelo hacia reacción ácida	Aplicación de cal (Ca (OH) ₂)
Enrollamiento de la hoja	Largos periodos de sequía o humedad	Sembrar en suelos con buen drenaje
Cara de gato	Tiempo frío durante la floración	No existe medidas específicas
Decoloración interna	Elevada humedad relativa, sombreado de los frutos; cambios de temperatura	Usar cultivares resistentes
Deformación de los frutos	Factores nutrimentales y del medio que afecta la polinización	Fertilizar con altas cantidades de P y evitar exceso de N
Pudrición basal del tomate	Cambios de humedad y ataque secundario de microorganismos	Proporcionar a las plantas una humedad más uniforme posible
Pudrición apical del fruto	Deficiencia de calcio	Aplicar cloruro de calcio al 95%, 1kg/200 L de agua
Quemaduras de sol	Frutos expuestos directamente al sol en plantas que han perdido su follaje	Evitar defoliación, combatir enfermedades foliares, orientación adecuada a los surcos
Rajaduras del fruto	Es común en periodos de lluvias acompañadas de altas temperaturas	Establecer cuidados y calendario de riego estricto

Fuente INFOAGRO (2002)

4.5.1. Cultivo de tomate en México

México está considerado a nivel mundial como el centro más importante de domesticación del tomate. Esta hortaliza fue llevada a Europa en 1554 y empezó a comercializarse en Estados Unidos hacia el año 1835. En México el tomate está considerado como la segunda especie hortícola más importante por la superficie

sembrada y como la primera por su valor de producción, a esta hortaliza de fruto se le encuentra en los mercados durante todo el año, y se le consume tanto fresco como procesada (puré). Entre las diferentes variedades que se producen en México, se encuentra el tomate rojo saladette, cherry, tomate verde y otras variedades como el criollo, tan pequeño como una uva, que se da en la selva de Chiapas. La variedad más importante de tomate que se produce en México es el tomate rojo saladette. El estado de Sinaloa tiene un 40% de la producción total del país, seguido por Baja California Norte, San Luis Potosí y Michoacán (Velasco y Nieto, 2005)

En agricultura al aire libre, el ciclo otoño-invierno es el de mayor producción de tomate en México, aportando el 57% del total nacional mientras que el 43% se obtiene del ciclo primavera-verano. En la cosecha del periodo otoño-invierno se realizan las mayores exportaciones de tomate mexicano, principalmente hacia EUA.

4.5.2. Cultivo de tomate en invernadero

El tomate es la hortaliza más cultivada tanto en invernaderos como en sistemas hidropónicos en el mundo; ello se debe principalmente a que con los altos rendimientos y calidad que se obtienen con estas técnicas y su alto precio en el mercado internacional, se logran muy buenas utilidades por unidad de superficie a pesar de los altos costos de producción.

Sánchez (2002) propone lo siguiente respecto al manejo de cultivo de tomate en invernadero en México:

4.5.2.1. Sustratos

En la Universidad Autónoma Chapingo se han caracterizado y evaluado muchos sustratos diferentes con el sistema de producción de tomate bajo invernadero o en hidroponía. Resultados similares en el rendimiento y calidad se han dado con agrolita, vermiculita, peatmoss, arena de tezontle, tepojal, arenas de mina como la poma, arena de río no caliza, aserrín de pino composteado, cascarilla de arroz composteada,

fibra de coco y varias mezclas entre estos materiales, siempre que el material sea escogido con las propiedades adecuadas y ha sido manejado propiamente. Por razones de economía, disponibilidad y facilidad de manejo se han preferido las arenas, particularmente el tezontle.

4.5.2.2. Fertirriego

La fertilización de los cultivos en invernadero e hidroponía es una labor que se efectúa prácticamente todos los días a través del riego agregando al agua una solución diluida en la que se aportan todos los nutrimentos esenciales para el crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas. Esta solución se prepara diluyendo en agua cantidades indicadas de los fertilizantes mencionados en el cuadro 6.

Con esas cantidades se obtienen las siguientes concentraciones de cada elemento en g/1000 litros: nitrógeno 200, fósforo 60, potasio 250, calcio 250, magnesio 60, azufre 240, hierro 3, manganeso 0.5, boro 0.5, cobre 0.1 y zinc 0.1 (Sánchez, 2002)

Cuadro 6. Fertilizante necesario para 1000 litros de solución en riego de hortalizas.

Fertilizante comercial	Cantidad requerida (g)	Nutrientes que aportan
Nitrato de Calcio	1000	Nitrógeno y Calcio
Sulfato de Potasio	560	Potasio y Azufre
Acido Fosfórico al 85%	220	Fósforo
Sulfato de Magnesio	600	Magnesio y Azufre
Sulfato Ferroso	15	Fierro
Sulfato de Manganeso	2	Manganeso
Bórax	4	Boro
Sulfato de Cobre	0.4	Cobre
Sulfato de Zinc	0.4	Zinc

Fuente: Sánchez (2002).

Aunque el cloro y el molibdeno son elementos esenciales, se requiere en tan pequeña cantidad que, con seguridad, se encuentran como impurezas en los fertilizantes considerados o en el agua de riego, por lo que no es necesaria su inclusión separada en la solución (Villareal, *et al.*, 2002).

Aunque la solución nutritiva anterior se toma como base, su concentración, o la de alguno de sus elementos en particular, se puede hacer variar en función de las condiciones climáticas, la edad de la planta y la especie considerada, lo cual se hará eventualmente. Por ejemplo, para las plántulas en el almácigo se inició con una solución a la mitad de la concentración normal; es decir la mitad de la cantidad de los fertilizantes señalados en el cuadro 4, diluido en la misma cantidad de agua. Durante las dos últimas semanas de cosecha se recomienda regar con una solución donde solo se mantenga el sulfato de potasio y la mitad de concentración de nitrato de calcio (Aguilar *et al.*, 2005)

Se recomienda la aplicación de la solución nutritiva mediante un sistema de riego por micro-aspersión en el almácigo y por goteo a partir del trasplante. El riego después del trasplante de preferencia debe aplicar en dos tiempos, uno entre las 10 y las 11 h y el segundo entre las 14 y 15 h.

4.5.2.3. Siembra

Los precios de venta del tomate más altos durante el año en el mercado nacional comprenden desde fines de mayo hasta fines de junio y de la segunda quincena de noviembre hasta la tercer semana de diciembre.

La primera ventana de precios altos se da porque en mayo termina la producción de Sinaloa debido a las altas temperaturas y aún no empieza la producción en otros estados productores a cielo abierto como San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco y Michoacán, ya que ellos trasplantan hasta marzo o abril cuando el peligro de las heladas ha pasado.

Los precios altos en la segunda ventana se explican porque la producción de San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco y Michoacán ha terminado, lo mismo que la de Morelos que es de temporal y termina a fines de octubre y principios de noviembre; mientras que Sinaloa tiene que retrasar su siembra hasta que las temperaturas de verano bajen, sus siembras más tempranas en semillero normalmente las hacen en agosto y el trasplante hasta mediados de septiembre, consecuentemente su producción importante inicia hasta fines de diciembre.

El único productor fuerte en las mismas fechas que las de aprovechamiento para el invernadero es Baja California Norte; pero el volumen de su producción en mercado nacional no impacta negativamente los precios, porque su flete es muy costoso y su producto se destina principalmente a la exportación.

Por lo tanto, considerando que la cosecha del tomate inicia aproximadamente a los 120 días después de la siembra de las semillas y que el periodo de cosecha es más de 30 días, se propone sembrar en el almácigo o semillero entre mediados de febrero o primeros días de marzo para el primer ciclo de cultivo y para el segundo ciclo entre mediados de julio o inicios de agosto, así las cosechas se iniciarán entre mediados de noviembre o finales de diciembre para el segundo ciclo.

4.5.2.4. Manejo del almácigo

Se debe sembrar en charolas con cavidades (almácigo) rellenas con el sustrato. Para ello se humedecerá con agua hasta el punto de escurrimiento; después, se colocara una semilla por cavidad tapándola con una capa de 5 a 7 mm del mismo sustrato, volviendo a mojar asperjando el agua con chorro fino para no perturbar el sustrato.

Inmediatamente después se deben estibar las charolas y taparse con un plástico de color blanco por tres días, después de los cual se deben destapar y colocar en su lugar definitivo en el semillero iniciándose los riegos preferentemente por micro-aspersión.

Una vez iniciada la germinación (que varía entre 4 y 10 días después de la siembra), deberán iniciarse riegos frecuentes con solución nutritiva al 50% de la concentración normal. Aunque se requiere de riegos frecuentes hay que vigilar que la humedad relativa del aire sea mayor del 50% por menor al 80% para evitar problemas de enfermedades, para ello se requiere contar con ventilación natural.

Durante el crecimiento de las plántulas en el semillero, particularmente en los primeros días de crecimiento, es importante evitar la insolación directa ya que esta puede ocasionar daños a la base del tallo y eventualmente la muerte de plántulas, pero también es necesario evitar un sombreado excesivo que ocasionara elongación y etiolación y por tanto un debilitamiento de las plántulas. Se recomienda entonces un sombreado ligero que evite la radiación solar directa pero que de un máximo de radiación difusa, ésto se puede lograr mejor haciendo sombra parcial con una capa móvil de plástico blanco lechoso delgado colocando a dos metros de altura.

4.5.2.5. Trasplante

Las plántulas, según la especie de que se trata estarán en listas para el trasplante en el área de producción de los 21 a los 30 días después de la siembra. Previo al trasplante, el sustrato de las camas deberá removerse a fin de disminuir la compactación y darle mejores condiciones de aireación a la raíz; inmediatamente después se debe dar un riego pesado con agua sola. La plántula debe introducirse con todo y cepellón, con las raíces dirigidas hacia abajo, se deben tapar a la altura de las hojas cotiledonares o un poco encima de ellas.

4.5.2.6. Control de plagas y enfermedades

Actualmente existe un uso indiscriminado de pesticidas para lograr rendimientos satisfactorios en la mayoría de las especies cultivadas; ésto es particularmente cierto en el caso del tomate cultivado a cielo abierto, ya que esta hortaliza puede ser atacada por más de 100 especies de plagas más de 300 especies de hongos y más de

100 tipos de virus, además de un buen número de especies de bacterias y micoplasmas.

En el caso de producción bajo invernadero la situación es diferente, estas estructuras, cuando se diseñan apropiadamente, permiten la ventilación pero actúan como barrera física contra la gran mayoría de los insectos; la cubierta del invernadero también actúa como un escudo que evitan daños a las plantas ocasionados por fenómenos como la precipitación excesiva y el anegamiento del suelo consecuencia de la misma.

El control de insectos vectores, la disminución de daños mecánicos ocasionados por la lluvia o los vientos fuertes y el mantenimiento del follaje limpio y seco, favorecen el control de muchas enfermedades, por lo que también se reduce notablemente el número de aplicaciones de productos químicos.

Por lo anterior, se propone que el control de plagas y de varias enfermedades tanto en los almácigos como en los invernaderos sea esencialmente preventivo. Que se basa principalmente en el uso de mallas antiáfidos en las ventanas, en dobles puertas para el acceso con tapetes sanitarios para desinfección de zapatos, en el mantenimiento del follaje seco y de una humedad relativa media, así como también cuidar la dispersión de enfermedades por transmisión mecánica a través de prácticas culturales como la poda o los despuntes y a través de la desinfección de las herramientas de trabajo.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 SÍTIO EXPERIMENTAL

El estudio fue realizado en el invernadero del CIIDIR-Michoacán, durante los meses de abril a julio del 2008. El sitio del experimento se ubicó en los 19° 59' 57.30" de Latitud Norte y los 102° 42' 23.56" de Longitud Oeste, a una altitud de 1545 m.s.n.m. El clima está clasificado como (A) C (wo) (w) es de tipo semicálido subhúmedo con lluvias en verano, tiene una precipitación pluvial anual de 826 milímetros y la temperatura ambiente máxima va de mayo a julio (27° C a 30° C) y la mínima de diciembre a febrero (9° C a 12° C en promedio) (García, 1995).

5.2 SIEMBRA

Las plantas de tomate cv. El Cid, se sembraron el día 4 de marzo del 2008, en un invernadero con estructura metálica tipo capilla, cubierto con polietileno blanco lechoso de 0,5 mm de espesor.

5.3. TRASPLANTE

El trasplante del cultivo se hizo el día primero de abril (un mes después de la siembra en las charolas), siguiendo las recomendaciones mencionadas en el apartado 4.5.2.5. Se utilizaron bolsas negras con capacidad de 10 lt calibre 200. La distancia de plantación fue de 35 cm sobre la hilera con dos plantas por bolsa y 120 cm entre hileras, obteniéndose una densidad de 3.36 plantas por m². La conducción del crecimiento de las plantas se efectuó a un eje mediante la poda de brotes laterales y posterior despunte sobre el octavo racimo floral. El cultivar de tomate El Cid se caracteriza por presentar un crecimiento indeterminado y frutos de prolongada vida de postcosecha.



Figura 4. Sistema de riego

5.4. SISTEMA DE RIEGO

El riego se efectuó por medio de una manguera por tratamiento a la cual se le instaló un emisor autocompensado marca Toro® con caudal de 8 litros/hr por cada 4 bolsas, a este emisor se le colocaron goteros individuales tipo “espagueti” suministrando un caudal de 2 lt/hr a cada bolsa, a una presión de trabajo de 55 kPa (Figura 5). La concentración en mgL⁻¹ de los elementos en la solución nutritiva (SN) utilizada en el tratamiento al 100 % fue de: N = 224; P = 62; K = 235; Ca = 160; Mg = 24; S = 32; Cl = 1.77; Fe = 1.12; B = 0.27; Mn = 0.11; Zn = 0.131; Cu = 0.032 y Mo = 0.05.

El sistema de riego por goteo estuvo compuesto por depósitos de solución nutritiva con capacidad de 2,500 litros para cada tratamiento, que se distribuyó a las plantas impulsada por una bomba centrífuga de 0.20 caballos de fuerza, a través de los goteros autocompensantes colocados en los contenedores o bolsas de cultivo.

5.5. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental estuvo compuesta por ocho plantas. Se probaron cuatro tratamientos, tres de ellos consistieron en aplicar tres láminas de riego; T1=1.00; T2=1.25 y T3 0.75 de la ETc calculada a partir de los registros diarios de evaporación de un tanque evaporímetro tipo A; y T4=Testigo; con una lámina de agua que el agricultor utiliza tradicionalmente en la zona. El coeficiente del cultivo que se utilizó en este trabajo (Kc) dependió de su ciclo. Por ello, en la primera semana se utilizó un valor de 0.3, después se aumentó a 0.6, 0.8 y 1, y al final del ciclo aumento a un valor de 1.2 (Allen *et al.*, 1997).

A fin de utilizar la misma cantidad de fertilizante en los tratamientos con una cantidad diferente de agua al T1 (100%), en T3 se concentró la SN, mientras que en T2 se diluyó.

Para la comparación de promedios entre tratamientos se utilizó la prueba de Tukey con un intervalo de confianza del 95%.

5.6. MEDICIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACION DEL CULTIVO (ETc)

La evapotranspiración del cultivo (ETc), se calculó con la formula $ETc = ETo *Kc$ (Allen *et al.*, 1998), donde: $ETo =Kp*Eo$ es la evapotranspiración de referencia estimada con un tanque evaporímetro tipo A en el centro del invernadero sobre una estructura de madera a 15 cm del suelo; cuyas dimensiones fueron un diámetro de 120 cm y altura de 33 cm (Márquez, 1998). y Kc es el coeficiente del cultivo, el cual tomó un valor inicial de 0.3, y después aumentó a 1.2.

La lámina de riego se calculó como:

$$Lr = ETc / Ea$$

donde:

Ea eficiencia de aplicación del riego por goteo (0,95).

Después se determinaron los litros por metro cuadrado mediante la siguiente ecuación:

$$Lm = Lr$$

Posteriormente se determinó los litros por bolsa para lo cual se utilizó la siguiente ecuación.

$$Lb = \left(\frac{Lm}{Pl} \right) Pg$$

donde:

Lb litros por bolsa
Lm litros m⁻²
Pl plantas por m⁻²
Pg plantas por gotero (Márquez, 1998).

Para determinar el tiempo de riego por tratamiento se utilizó la siguiente ecuación.

$$Tr = Lb * Q$$

donde:

- Tr tiempo de riego (min -1)
- Q caudal del gotero.

5.7. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO

Con la finalidad de asegurar el correcto funcionamiento del sistema de riego por goteo del invernadero se efectuó su evaluación, la cual consistió en la determinación de los coeficientes de uniformidad (CU) y variación (CV). El CV representa la variabilidad existente en la construcción de los emisores (Martínez, 1991).

Material:

- Cronómetro
- Probetas de plástico

Procedimiento:

- Se puso en funcionamiento el sistema automático de riego esperando su estabilización.
- Se aforaron volumétricamente 16 emisores durante un minuto realizando 3 repeticiones de lecturas para cada uno.
- Con las lecturas obtenidas a partir del aforo se conformó una tabla en donde se capturaron los gastos de cada emisor calculados a partir de las lecturas de volumen divididas entre el tiempo de aforo (un minuto en este caso).
- Se calculó la media de los caudales de los emisores que representaron la cuarta parte de más bajo caudal (q25%). Se calculó la media de los 4 de menor caudal.

- Se calculó la media de los caudales medidos en todos los emisores, q_m .
- Una vez que se conoció la media de los caudales de los emisores que representan la cuarta parte de más bajo caudal y la media de todos los caudales medios, se calculó el coeficiente de uniformidad mediante la siguiente fórmula.

$$CU = \frac{q_{25\%}}{q_m} \times 100$$

5.8. MEDICIÓN DE DATOS DENTRO DEL INVERNADERO

5.8.1. Datos de cosecha

Durante el desarrollo del trabajo se evaluaron las siguientes variables: rendimiento de fruto (total, comercial y desecho). En los frutos de calidad comercial, se agruparon aquellos que presentaron un peso mayor o igual a 50 gr, no magullados ni deformados. Los frutos remanentes se agruparon en la calidad desecho. La suma de las dos categorías dio el rendimiento total. También se evaluó la calidad de los frutos producidos según su peso individual, tamaño y diámetro, para el peso se utilizó una balanza granataria y para el tamaño un vernier graduado en mm^{-1} . Para ello se seleccionaron al azar 10 frutos por unidad experimental dentro del período de cosecha. Los frutos fueron colectados de una a dos veces por semana, cuando alcanzaron 30% de color de cubrimiento.

5.8.2. Tamaño de planta

Se realizaron 3 muestreos durante el desarrollo del experimento, a los 30, 60 y 90 días después del trasplante para medir el tamaño total hasta el meristemo apical de la planta, para ello se utilizó un flexómetro.

5.8.3. Eficiencia del uso del agua

Para determinar la eficiencia del uso del agua (EUA) se utilizó la siguiente ecuación:

$$EUA = \frac{Pt}{I}$$

donde:

- EUA eficiencia del uso del agua
- Pt producción total (kg ha⁻¹)
- I volumen total aplicado (m³ ha⁻¹)

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 EVAPOTRANSPIRACION DE CULTIVO (ETc) Y EVAPORACION (Eo)

En la Figura 5 se presenta la variación semanal de la evaporación (Eo) y de la evapotranspiración (ETc) durante el desarrollo del experimento. En las primeras 6 semanas del 1 de abril al 5 de mayo la Eo fue mayor que ETc lo cual se explica porque el cultivo estaba en las primeras etapas de su desarrollo y los valores de Kc fueron pequeños. Eo registró valores entre 6 y 8 mm, mientras que ETc registró valores entre 2 a 5 mm, con sus respectivos valores de Kc entre 0.3 y 1.2. A partir de la semana 7 ambos parámetros se mantuvieron con valores similares hasta finalizar el ciclo del cultivo. La Eo bajó por la presencia de nublados y una disminución de la temperatura, lo cual es característico de la temporada de lluvias, mientras que la ETc aumentó con el desarrollo del cultivo, lo cual se asoció con el aumento de los valores del Kc (desde 0.3 hasta 1.2).

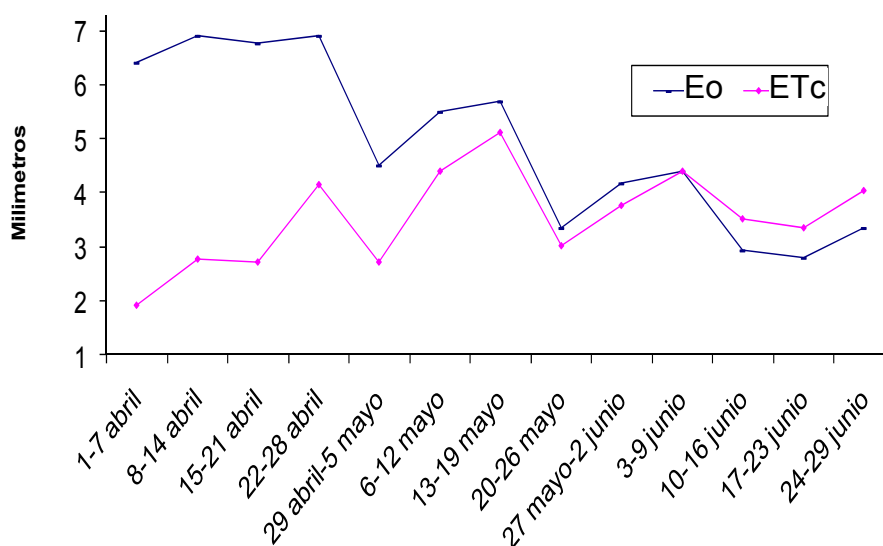


Figura 5. Evaporación (Eo) y Evapotranspiración (ETc) semanales del cultivo de jitomate C.v. El Cid.

Durante el ciclo del cultivo Los valores de ET_c variaron entre 1.92 y 5.11 mm día^{-1} , estos valores concuerdan con los reportados por Heredia (2003) para el cultivo de tomate en invernadero con diferentes sustratos, los cuales fluctuaron desde 1.7 hasta 7.5 mm día^{-1} . La ET_c máxima registrada en este experimento fue de 5.2 mm día^{-1} , equivalente a un volumen de agua evapotranspirado de 52.63 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$. Estos valores pueden tomarse como valores de referencia para la planificación del sistema de riego en lo relativo a la disponibilidad de agua (Van der Gulik, 1999), y también para considerarlo como un valor en que se limite la saturación de la zona radicular y se minimice la cantidad de agua que se pueda drenar por debajo de la zona radicular activa (Hartz, 1995)

6.2 VOLUMEN DE AGUA APLICADO

En función de la estimación de la ET_c , se calcularon los volúmenes de agua que se utilizaron en los tratamientos evaluados. Como se observa en la Figura 6, el volumen de agua aplicado tradicionalmente en la zona con base en el conocimiento empírico de los agricultores (T4=Testigo) fue inferior al utilizado en los tratamientos en los que se utilizaron distintas proporciones de la ET_c . Así, el volumen de agua aplicado para los tratamientos T1 (3283 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) y T2 (4103 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) fue aproximadamente dos veces mayor que el volumen aplicado en el tratamiento testigo T4 (1848 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$). Mientras que entre T2 y T1 hubo una diferencia de 820 m^3 que representó el 24 % más de agua que en T1.

En relación al consumo de agua para cada período fenológico, la figura 6 indica que la mayor demanda hídrica del tomate se dio entre el inicio y fin de la cosecha. En este período el tomate consumió 56 % en los tratamientos del 1, 2 y 3, y un 68 % del volumen total en el tratamiento 4, lo cual coincide con la etapa de mayor crecimiento del cultivo cuando las plantas presentaron su mayor área foliar y transpiración y con

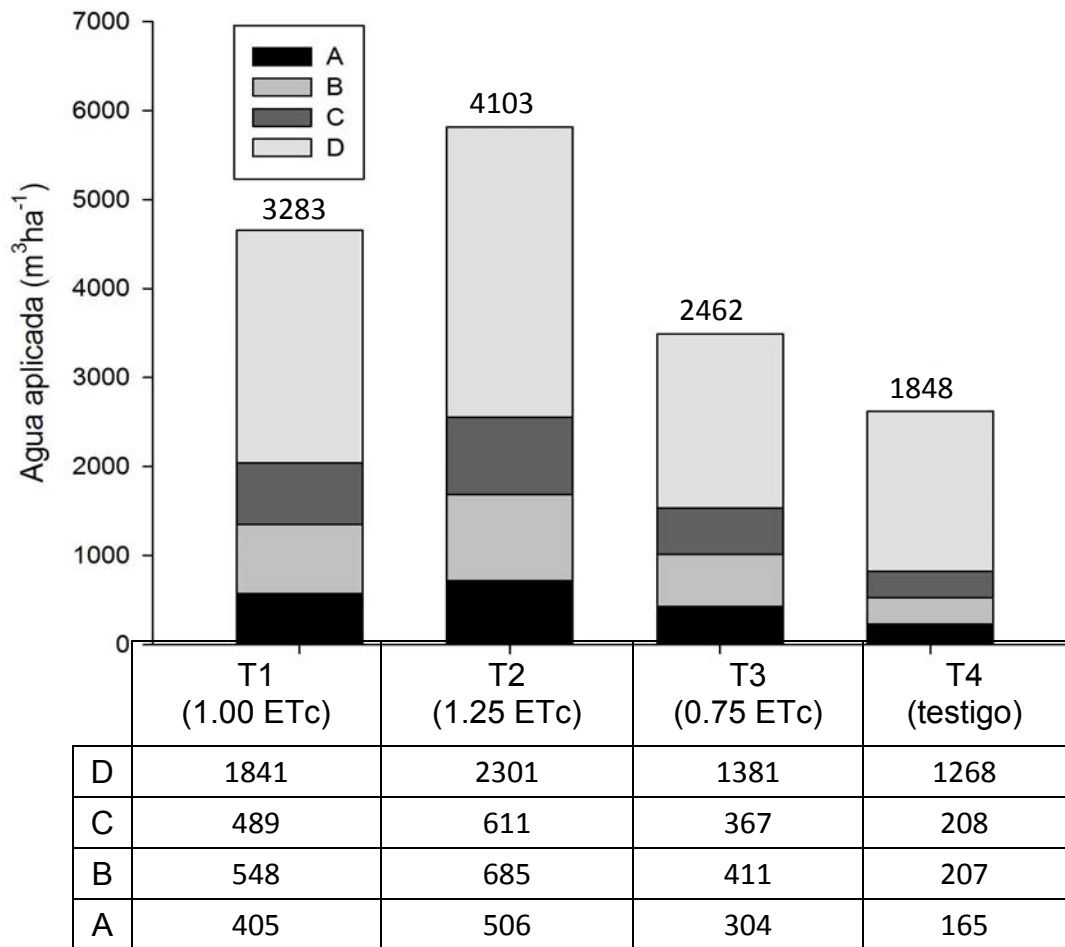


Figura 6. Volumen total de agua aplicado ($m^3\ ha^{-1}$) en diferentes periodos fenológicos a un cultivo de tomate bajo invernadero sometido a tres tasas de riego.

A= transplante a inicio de floración; B= inicio de floración a tercer racimo cuajado. C= tercer racimo cuajado a inicio de cosecha; D= inicio a término de cosecha.

ello una mayor demanda de agua (Allen *et al.*, 1998). Estos resultados difieren con los obtenidos por Ortega-Farías, *et al.*, (2003) quienes encontraron que los agricultores aplicaron un volumen total de agua de $7614\ m^3\ ha^{-1}$ el cual fue tres veces superior al volumen aplicado en el tratamiento a 1.00 ETc.

6.3. EFECTO DEL AGUA SOBRE LAS VARIABLES VEGETATIVAS Y REPRODUCTIVAS

6.3.1. Altura de planta.

Se puede apreciar en el cuadro 7 que la altura de planta fue afectada significativamente por el volumen de agua aplicado. En general se aprecia una mayor altura de planta en los tratamientos donde se aplicó una mayor cantidad de agua. En todos los muestreos sobresale en primer lugar T2 (1.25 ETc) con una altura promedio de 146 cm, y le sigue T1 con 132 cm, tratamientos que registraron significativamente la mayor altura de planta. La menor altura de planta se obtuvo con el tratamiento 3 registrándose un valor promedio de 118 cm en los tres muestreos realizados. Estos resultados no concuerdan con los reportados por Zotarelli *et al.*, (2009) quienes no encontraron diferencias estadísticas significativas para esta variable al aumentar el volumen de agua aplicado.

Cuadro 7. Altura de planta de los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Altura de plantas 1 ^{er} muestreo (cm)	Altura de plantas 2 ^{do} muestreo (cm)	Altura de plantas 3 ^{er} muestreo (cm)
T1 (1.00 ETc)	63.0±4.08b*	129.00±10.13b	205.0±24.83ab
T2 (1.25 ETc)	75.50±3.41a	140.75±7.93a	222.25±19.79a
T3 (0.75 ETc)	57.00±2.16c	113.75±7.68c	185.00±8.29b
T4 (testigo)	57.50±3.50c	118.25±6.50c	191.75±10.44b

* Cifras seguidas por la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey ≤ 0.5).

6.3.2 Tamaño, diámetro y peso de fruto

El efecto de la cantidad de agua aplicada sobre la calidad del fruto basada en su tamaño, diámetro y peso se presenta en el Cuadro 8, en el cual se puede observar que hubo una tendencia a aumentar el tamaño de fruto con la cantidad de agua, pero no

Cuadro 8. Efecto de cuatro láminas de riego sobre características del fruto.

Tratamiento	Tamaño de fruto (mm)	Diámetro de fruto (mm)	Peso de fruto (g)
T1 (1.00 ETc)	66±5a*	44±3a	77±9a
T2 (1.25 ETc)	64±5a	44±3ab	78±7a
T3 (0.75 ETc)	64±4a	43±4ab	70±12ab
T4 (testigo)	60±7a	40±4b	62±7b

* Cifras seguidas por la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey ≤ 0.5).

hubo diferencia significativa en esta variable por efecto de los tratamientos de agua. Con relación al diámetro del fruto también se observa una relación directa de esta variable y la cantidad de agua aplicada. El tratamiento 1 registró el mayor diámetro de fruto pero fue estadísticamente igual a los tratamientos 2 y 3, los cuales son estadísticamente iguales al tratamiento 4, que a su vez solo fue estadísticamente diferente del tratamiento 1. El tratamiento T4 (testigo) mostró la menor calidad del fruto (40±4 mm y 62±7 g, respectivamente). Al igual que el diámetro de fruto, el tamaño de fruto registró su mayor tamaño en T1 y T2, pero estos tratamientos son estadísticamente iguales a T3. T4 por su parte registró el menor tamaño de fruto y fue estadísticamente igual a T3.

La cantidad de agua aplicada afectó significativamente las características físicas de los frutos obtenidos, con una disminución progresiva del peso de los frutos a medida que se redujo el volumen de agua aplicada.

Al relacionar las variables diámetro y peso del fruto y volumen de agua aplicada, resultó que el peso del fruto fue la variable que presentó una mayor relación con la cantidad de agua aplicada, dando una R^2 de 0.889 (figura 7).

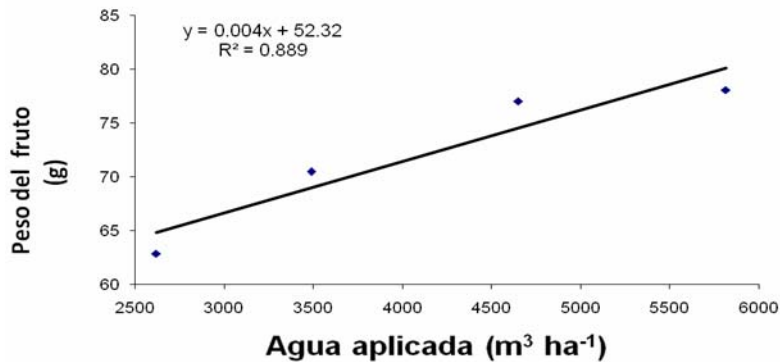


Figura 7. Correlación entre el peso del fruto y agua aplicada.

Para el diámetro de fruto esta relación fue menor con una $R^2=0.667$, tal como se observa en la Figura 8. Resultados similares fueron observados por Fritsch (1980) y Tuzel y Tuzel (1993) quienes encontraron frutos con un peso mayor al aumentar el agua aplicada. Sin embargo, estudios realizados por Vanadia *et al.*, (1982) y Ortega-Farias *et al.*, (2001) indicaron un efecto nulo del volumen de agua de riego sobre las características físicas de los frutos de tomate producidos en invernadero.

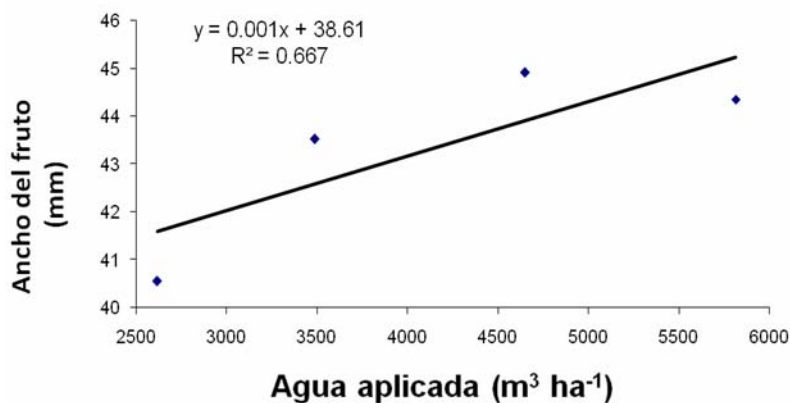


Figura 8. Correlación entre el diámetro del fruto y el agua aplicada.

6.6.3 Rendimiento de fruto

El efecto de la cantidad de agua aplicada sobre el rendimiento total de fruto, frutos calidad comercial y frutos calidad desecho se presenta en el Cuadro 9. En este Cuadro se puede observar que hubo un efecto significativo de la aplicación de agua sobre el rendimiento de fruto, el cual tuvo una tendencia a aumentar con una mayor cantidad de agua de riego aplicada. T1 registró significativamente el mayor rendimiento de fruto comercial y le siguió T2 el cual fue estadísticamente superior a T3 y T4, los cuales fueron estadísticamente iguales. Con relación al rendimiento total, T1 y T2 fueron superiores estadísticamente a T3 y T4. Con un rendimiento total promedio de 43 ton ha⁻¹, T1 y T2 rindieron un 50% más fruto que el promedio de T3 y T4.

Cuadro 9. Rendimiento comercial, desecho y total de los diferentes tratamientos

Tratamiento	Rendimiento (ton ha ⁻¹)		
	Comercial	Desecho	Total
T1 (1.00 ETc)	33.45±7.03b*	7.98±.53a	41.45±6.68a
T2 (1.25 ETc)	41.36±2.47a	4.87±2.05a	46.24±0.93a
T3 (0.75 ETc)	23.53±4.10c	6.75±.78a	30.29±4.80b
T4 (testigo)	22.70±4.42c	5.22±1.7a	27.92±4.79b

* Cifras seguidas por la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey ≤ 0.5).

En este cuadro se puede apreciar un aumento en el rendimiento total y comercial al incrementar el volumen de agua aplicado en el cultivo del tomate, donde a medida que se aplicó una mayor cantidad de agua (T2 1.25 ETc) el rendimiento comercial aumentó (41.36±2.47 ton ha⁻¹). En cuanto al desecho no se apreciaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados. Para el rendimiento total los mejores tratamientos de riego fueron T1 y T2 (1.00 y 1.25 de la ETc con

rendimientos de 41.45 ± 6.68 y 46.24 ± 0.93 respectivamente). Asimismo se aprecia que al disminuir la cantidad de agua aplicada, el rendimiento comercial fue menor (T4 con 22.70 ± 4.42 ton ha⁻¹).

Estos resultados coinciden con los reportados por Vanadia *et al.*, (1982), Eliades y Orphanos (1986) y Ortega-Farias (2003), quienes indicaron que el rendimiento comercial y total fue mayor al aumentar la cantidad de agua en tomate cultivado bajo invernadero. Los mayores rendimientos comerciales obtenidos por Eliades y Orphanos (1986) y Ortega-Farias (2003) fueron de 135 ton ha⁻¹ para 1.25 de la ETC y de 180 t ha⁻¹ para 1.40 de la ETC, respectivamente.

6.6.4. Eficiencia en el uso del agua (EUA)

En el Cuadro 10 se muestran los resultados de la productividad del agua en el rendimiento de fruto de jitomate. Se observó que el mejor tratamiento fue el testigo (T4) con una EUA de 15.10 kg⁻¹ por m⁻³ de agua aplicada, seguido por el T1 con 12.62 kg⁻¹ por m⁻³ de agua aplicada. Farrell-Poe y Martin (2008) reportan una EUA en tomate de 1.4 y 5.5 kg m⁻³ de agua para tomate a cielo abierto y en invernadero respectivamente, mientras que Nurundin (2001) obtuvo una eficiencia de hasta 24.5 kg m⁻³ para tomate en invernadero, Zotarelli *et al.*, (2009) indican una EUA desde 8.7

Cuadro 10. Productividad del agua en el cultivo de tomate en invernadero.

Tratamiento	Rendimiento total (ton ha ⁻¹)	Agua aplicada (m ³ ha ⁻¹)	EUA (kg m ⁻³)
T1 (1.00 Etc)	41.45±6.68 ^a	3283	12.62b
T2 (1.25 Etc)	46.24±0.93 ^a	4103	11.26c
T3 (0.75 Etc)	30.29±4.80b	2462	12.30b
T4 (testigo)	27.92±4.79b	1848	15.10a

* Cifras seguidas por la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey ≤ 0.5).

hasta 18.4 kg m^{-3} con 1.25 y 0.75 ETc respectivamente lo cual concuerda con los resultados obtenidos en el presente trabajo, lo cual indica que se puede obtener una mejor EUA al disminuir la cantidad de agua aplicada, pero con un impacto negativo en el rendimiento final. Por otro lado también se observa que con una mayor cantidad de agua se puede incrementar el rendimiento pero con una eficiencia menor.

Por su parte Seilsepour y Ghaemi (2006) reportan valores mínimos de EUA entre 1.35 y 4.71 kg m^{-3} basados en la utilización del 80% de la evaporación de la bandeja de clase A estándar. Valores máximos en el rango de 9.26 a 13.3 kg m^{-3} fueron obtenidos por Sadreghaen *et al.* (2002) con una combinación de micro irrigación y déficit hídrico.

6.4 CALENDARIO DE RIEGO

Con base en un buen rendimiento y calidad de fruto, y una adecuada eficiencia en el uso del agua, se deriva el calendario de riego para el cultivo del tomate en invernadero utilizando los datos para el cálculo de la ETc del tratamiento 1 (1.00 ETc). En el cuadro 11 se aprecia que durante el desarrollo del cultivo en los meses de abril a Junio se registraron valores semanales de Eo desde 2.80 hasta 6.90 cm, lo que derivó en una aplicación de láminas de riego desde 2.03 hasta 5.26 mm equivalentes a un volumen de agua de 20.30 hasta $52.63 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ con un promedio $36.47 \text{ m}^3 \text{ Ha}^{-1}$. Se observa además que la lámina total acumulada desde abril hasta junio fue de 328.30 mm equivalente a un volumen total de agua aplicado durante el ciclo del cultivo de $3,283 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Cuadro 11. Calendario de Riego para 1.00 ETc

Semana	Fecha	E ₀ (cm dia ⁻¹)	ETc (cm dia ⁻¹)	Lr (mm dia ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹ dia ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹ semana)	Kc
1	1-7 abril	6.40	1.92	2.03	20.30	142.10	0.3
2	8-14 abril	6.90	2.76	2.20	21.97	153.81	0.4
3	15-21 abril	6.76	2.70	3.63	36.33	254.35	0.5
4	22-28 abril	6.90	4.14	3.94	39.38	275.70	0.6
5	29 abril- 5 mayo	4.52	2.71	4.13	41.25	288.80	0.6
6	6-12 mayo	5.50	4.40	4.09	40.87	286.09	0.8
7	13-19 mayo	5.68	5.11	5.26	52.63	368.47	0.9
8	20-26 mayo	3.34	3.01	4.69	46.88	328.16	0.9
9	27 mayo- 2 junio	4.18	3.76	3.74	37.42	261.97	0.9
10	3-9 junio	4.41	4.41	4.45	44.46	311.26	1.0
11	10-16 junio	2.93	3.52	3.21	32.10	224.73	1.2
12	17-23 junio	2.80	3.36	3.10	30.96	216.75	1.2
13	24-29 junio	3.36	4.03	2.84	28.42	170.52	1.2
Total				\bar{X}	36.47	3283	

7. CONCLUSIONES

La utilización de la metodología FAO-Tanque evaporímetro es una herramienta útil, fácil y barata para estimar la evapotranspiración del cultivo, determinar los requerimientos de agua y elaborar un calendario básico de riego en el cultivo de tomate bajo invernadero regado por goteo.

La ET_c máxima registrada en este experimento fue de 5.2 mm día⁻¹, equivalente a un volumen de agua evapotranspirada de 52.63 m³ ha⁻¹, valor que se toma como referencia para el diseño del sistema de riego en relación a la demanda de agua del cultivo.

La aplicación de volúmenes de agua relativos a la ET_c calculada con la metodología FAO-Tanque evaporímetro (T1=100% de la ET_c, T2=125%, T3=75% y T4=Testigo regional) afectaron significativamente a variables del rendimiento y calidad de fruto de jitomate. La aplicación de T2 produjo significativamente un 23 % más de fruto calidad comercial que cualquier otro tratamiento, aunque T2 fue significativamente igual que T1 en cuanto al rendimiento de fruto total (46 y 41 ton ha⁻¹, respectivamente); sin embargo, el volumen de agua de riego aplicada en T2 fue de 820 m³ mas que T1, y con una eficiencia en el uso del agua (EUA) de 11.26 kg m⁻³, la cual fue significativamente menor que T1 que registró una EUA de 12.62 kg m⁻³. Con respecto a los tratamientos T3 y T4 en que se aplicó un volumen de agua menor al del T1, los rendimientos de fruto comercial y total fueron significativamente menores; sin embargo sus altas EUA de 12.30 y 15.10 kg m⁻³ para T3 y T4 no compensaron la disminución del rendimiento de fruto.

Con base en un buen rendimiento y calidad de fruto, y una adecuada eficiencia en el uso del agua, se deriva el calendario básico de riego para el cultivo del tomate en invernadero utilizando los datos para el cálculo de la ET_c del tratamiento 1 (100%

ETc), lo que derivó en una aplicación de láminas de riego desde 2.03 hasta 5.26 mm equivalentes a un volumen de agua de 20.30 hasta 52.63 m³ ha⁻¹ con un promedio de 36.47 m³ ha⁻¹ y una lámina total acumulada desde abril hasta junio de 328.30 mm equivalente a un volumen total de agua aplicado durante el ciclo del cultivo de 3 283 m³ ha⁻¹.

8. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar A. J. L., G. J. Capulín, C. O. A. Grageda, M. E. Solís, C. M. A. Vuelas, C. T. Medina, M. M. Hernández, R. A. Ramírez, 2005. Efecto del nitrógeno, algaenzims y fertirrigación por goteo en chile jalapeño en Guanajuato. pp 231-235. *In*: Second World Pepper Convention 2005, del 14 al 16 de agosto, Zacatecas, Zac.

Aguilera C. M. y E. R. Martínez. 1996. Relaciones agua suelo planta atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo. México. 256 p.

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 92-5-104219-5

Allen R. G., M. Smith, L. S Pereira y W. O. Pruitt, 1997. Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements. In: Chartzoulakes, K. S. (ed.). Proc. 2nd. Int. Sym. on Irrigation of Horticultural Crops, ISHS, Acta Hort. Vol. I: 17-33.

Alves, I. L. 1995. Modelling crop evapotranspiration. Canopy and aerodynamic resistances. Ph.D. Dissertation, ISA, Univ. Tec. Lisboa.

Anda, A. (1994). Problem in lysimeter use for water demand determination in sugarbeet. ICID, 17th regional Conf. Bulgaria. vol 1, pp. 77-82.

Antón, A. 2002. El control del clima en los cultivos intensivos: del parral a los invernaderos modernos. Fórum Internacional de Tecnología Hortícola. (FITECH VI). Almería, España.

Ayers r. S., d. W. Westcot. 1976. Calidad del agua para la agricultura. FAO Riego y Drenaje, nº 29.

Azcón-Bieto J. y A. Talón. 2000. Fundamentos de Fisiología Vegetal. McGraw-Hill Interamericana, Madrid.

Azis M. I., D. L. Clements y M. Lobo. 2003. A boundary element method for steady infiltration from periodic channels. ANZIAM J., 44(E):C61--C78.

Bacon, M.A. 2004. *Water use efficiency in plant biology*. Blackwell publishing, Oxford, UK, 327 págs.

Bastiaanssen, W.G.M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Países Bajos, 273 pp.

Celis J. 2001. Departamento de riego y drenaje. Facultad de Ingeniería Agrícola Universidad de Concepción. Chile.

Comisión Nacional Del Agua. 2008. Información sobre temperatura y evaporación en las estaciones climatológicas de Sahuayo y Emiliano Zapata. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Estatal en Michoacán. Distrito de Riego 061 Zamora. Documento Inédito.

Crespo Álvarez, F. 1999. Necesidades de riego en invernadero. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica agrícola. Valladolid, España.

Doorenbos, J., Pruitt, W.O. 1977. Guidedlines for predicting crop water requeriments. FAO irrigation and drainage paper nº 24, pág. 179.

Ducrocq, M. 1990. Les bases de l'irrigation. Serie tech agric medit. Ed. TDL, pág. 118.

Dyson T. 1999. World food trends and prospects to 2025. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 96, 5929–5936.

Eliades, G., y P. Orphanos. 1986 Irrigation of tomatoes grown in unheated greenhouses. J. Hort. Sci. 61:95-101.

FAO. 2006. Riego y , drenaje. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO. Nº 65. Roma. Italia.

Faci, J.M. 1996. Consumo de agua por los cultivos. Capítulo del libro Prácticas agrarias compatibles con el medio natural: el agua. Ed MAPA. Madrid, pp. 33-58

Farrell-Poe K. y Martin E. 2008. Engineering Water for Sustainability and Productivity. ABE department, University of Arizona. Water Summit.

Fereres E, Connor D. 2004. Sustainable water management in agriculture. In: Cabrera E, Cobacho R, eds. Challenges of the new water policies for the XXI century. Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema, 157–170.

Fernández Ma. D. 2000 Necesidades hídricas y programación de riegos en los cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado de Almería. Tesis de doctorado. España.

Fernández Ma D., F. Orgaz, E. Fereres, J. C. López A. Céspedes, J. Pérez, S. Bonachela, M. Gallardo. 2006 . Programación del Riego en los cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. CAJA MAR (Caja Rural de Almería y Málaga) España. 70 pp.

Fritsch, N. 1980. Determinación de la tasa de riego en tomates regados por goteo. Investigación Agrícola 6:79-86.

García, E., 1995. Modificación a la Clasificación Climática de Köppen. Inst. Geog., Univ. Nal. Autón. México. 75 pp.

George. W. 1998. New crop coefficients estimate water use of vegetables, row crops. California Agriculture, vol 52, nº 1, pp. 16-21.

Grebet, P. y R.H. Cuenca, 1991. History of lysimeter design and effects of environmental disturbances. in Allen, R.G., Howell, T.A., Pruitt, W.O., Walter, I.A., y Jensen, M.E. (Editors), Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements, ASCE, New York, Estados Unidos de América, p. 10-18.

González, M., y E. Ruz. 2001. Efecto de la aplicación de diferentes volúmenes de agua de riego y fertilización nitrogenada sobre el rendimiento y calidad de tomate industrial. Agricultura Técnica (Chile) 59:319-330.

Jensen, M.E. 1969. Plant and irrigation water requirements. Sprinkler Irrig. Assoc., Washington, D.C.

Jensen, M.E. 1974. Consumptive use of water and irrigation water requirements. ASCE. Report of Irrig. Water Requir. N. York. pág. 215.

Jensen, M. E., R. D. Burman y R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. 332 p.

Jury Wa. Jr., H. Vaux 2005. The role of science in solving the world's emerging water problems. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 102, 15715–15720.

Hargreaves, H.G. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. Our. Irrig. and drain. Eng. ASCE. nº 120, pp. 1132-1139

Hartz, T.K. 1995. Manejo del Agua en la Producción de Hortalizas con Riego por Goteo. en: Seminario Internacional de Plasticultura. Hermosillo, Sonora, México. 27 y 28 de Febrero de 1995.

Howell, T. A., S. R. Evett, J. A. Tolk, A. D. Schneider y J. L. Steiner. 1996. Evapotranspiration of corn - Southern High Plains. In: Camp, C. R., Sadler, E. J. and Yoder, R. E. (eds.). Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, ASAE: 158-166.

<http://www.infoagro.com/hortalizas/tomate.htm>

Keller, J. y R. D. Bliesner. 1990. Sprinkle and Trickle Irrigation van Nostrand Reinhold., New York, NY. 652 p.

López-Gálvez, J. 2000. Informe Anteproyecto de Plan Hidrológico Nacional. Ministerio de Medio Ambiente.

Márquez, J. 1998. Determinación de las necesidades de agua en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill., cv. FA-144) de otoño bajo invernadero en la zona de Talca. 83 p. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Talca, Escuela de Agronomía, Talca, Chile.

Martínez, R. 1991. Riego localizado: diseño y evaluación. Depto. de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 161 p.

Medrano H., J. M. Escalona, J. Bota, J. Gulias, J. Flexas, 2002. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: the interest of stomatal conductance as a reference parameter, *en Annals of Botany*, vol. 89, págs. 895-905.

Monteith JI. 1990 Conservative behaviour in the response of crops to water and light. In Rabbinge R, Goudriaan J, van Keulen H, Penning de Vries FWT, van Laar HH (Eds.). Theoretical production ecology: reflections and prospects Wageningen, The Netherlands Pudoc pp. 3–16.

Moreno, I.T. 2003. Dotaciones de riego en cultivos sin suelo. *Horticultura*. 172:26-32.

Nurundin M. M. 2001. Effect of water stress on tomato at different growth stages. Department of agricultural biosystems engineering. McGill University, Macdonald Campus, Montreal, Canada.

Ortega-Farias, S., B. H. Leyton, H. Valdez y H. Paillán 2003. Efecto de cuatro láminas de agua sobre el rendimiento y calidad de tomates de invernadero producido en primavera-verano. *Agricultura Técnica, Chile*. 63(4):394-402.

Palacios Vélez, E. 1981. Manual de operación de distritos de riego. Universidad Autónoma Chapingo. México. 328 p.

Penman, H. L., 1956. Evaporation: an introductory survey, *Netherlands J. Agric. Sci.*, 4(1), 9-29.

Postel SI, Gc Daily, Pr. Ehrlich. 1996. Human appropriation of renewable freshwater. *Science* 271, 785–788.

Pruitt W.O., E. Fereres, K. Kaita, R.L. Snyder. 1987. Reference evapotranspiration (ET_o) for California. *Agr. Exp. Sta. Bull.* 1922, Univ. of California, 16 pp.

Ratliff, L. F., J. T. Ritchie, y D. K. Cassel, 1983. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 770-775.

Rothd, D., R. Günter, R. Roth. 1988. Transpiration koeffizienten und wasser ausnutzungsraten landwirtschaftlicher fruchtarten. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, nº 32, pp. 392-403.

Rosegrant, M. W., S. Msangi, T. Sulser y C. Ringler 2007. Future Scenarios for Agriculture: Plausible Futures to 2030 and Key Trends in Agricultural Growth". Documento de antecedentes elaborado para el Informe sobre el desarrollo mundial 2008.

Sánchez M. I. 2002. Métodos para el estudio de la evaporación y la evapotranspiración, Cuadernos Técnicos Sociedad Española de Geomorfología, nº 3, 36 pp.

Santa Olalla, F., J. A. De Juan Valero. 1993. *Agronomía del riego*. Ed. Mundi-prensa. Madrid, pág. 732.

Simsek, M., T. Tonkaz, M. Kacira, N. Comlekoglu, Dogan Z., 2005. The effects of different irrigation regimes on cucumber (*Cucubis sativa* L.) yield and yield characteristics under open field conditions. *Agric. Water Manage.* 73, 173–191.

Stanghellini, C. 2005. Irrigation water: use, efficiency and economics. *en* Improvement in water use efficiency in protected crops, Junta de Andalucía, Sevilla, págs. 23-33.

Steduto P., Tc Hsiao, E. Fereres. 2006 On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science* (in press).

Shuttleworth, W.J. 1993. Evaporation. In: D.R. Maidment (ed) *Handbook Hydrology*. McGraw Hill, New York, Estados Unidos de América: 4.1-4.53.

Tanner Cb, y Tr. Sinclair 1983 Efficient water use in crop production: research or research? In Taylor HM, Jordan WR, Sinclair TR (Eds.). *Limitations to efficient water use in crop production* Madison, WI ASA, CSSA, SSSA pp. 1–27.

Teare, I.D., M.M. Peet. 1983. *Crop-water relations*. Ed. Wiley-Interscience. N. York. pág. 547.

Tuzel, Y., y I. Tuzel. 1993. Effects of different irrigation intervals and rates on spring-season glasshouse tomato production. I. Yield and plant growth. *Acta Hort.* 366:381-388.

Vanadia, S., V. Dellacecca, E L. Mancini. 1982. influencia del regime irriguo sulla resa del pomodoro in serra fredda. *Colture Protette*. 11:27-32.

Velasco, H. E, Nieto, A. R. 2005. Cultivo de jitomate en hidroponia e invernadero. Universidad Autónoma Chapingo, México 100 pp.

Sadreghaen, S.H., R. Shafieajbishe, M. Rafati And D. Shahriari, 2002. *Technical Evaluations of Micro Irrigation Systems and Assessing their Application in Deficit Irrigation and Compared with Surface Irrigation on Tomato*. Research note: Iranian Ministry of Agricultural Research and Education Organization, Varamin Agricultural Research Center, No: 263

Seilsepour, M. y M.R. Ghaemi, 2006. Effect of different irrigation water quantities and use of Fe and Zn on yield and water use efficiency of tomato. *Iranian J. Soil. Water Sci.*, 2: 309–18

Van der Gulik, T.W. 1999. B.C. Trickle Irrigation Manual. British Columbia Ministry of Agriculture and Food Resource Management Branch and Irrigation Association of British Columbia. p. 321

Wallace, J.S., y C.H. Batchelor. 1997. Managing water resources for crop production. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B* 352:937–947.

Williams, D.G., W. Cable, K. Hultine, J.C.B. Hoedjes, E.A. Yopez, V. Wright, J.L., 2001. Crop coefficients for estimates of daily crop evapotranspiration *Irrig. Sched.for Water and Engergy Conserv. in the 80's*, ASAE, p. 18-26.

Wright, J.L. 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. *Journal of irrigation and Drainage Division*, ASCE, 108:57-74.

Zamora, E. Y C. Guerrero. 2005. Sistemas utilizados para el control del clima bajo invernaderos. *Tecnoagro núm. 23*, editada por Elto S.A. de C.V. Estado de México, México.

Zhang Y., E. Kendy, Y. L. QiangChangming, S. Yanjun, S. Hongyong, 2004. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield and water use efficiency in the north China Plain. *Agric. Water Manage.* 64, 107–122.

Zotarelli L. A, J. M. Scholberg, M. D. Dukes, R. Muñoz-Carpena, Icerman J. 2009. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agricultural Water Management* 96 23–34.