

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA DEL DURAZNERO (*Prunus persica* L. Batsch) MEDIANTE LISIMETRÍA DE COMPENSACIÓN CON NAPA FREÁTICA CONSTANTE

por

Lucía PUPPO COLLAZO

**TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magister en Ciencias Agrarias
opción Ciencias del Suelo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2009**

Tesis aprobada por:

Nombre completo y firma

Nombre completo y firma

Nombre completo y firma

Fecha: -----

Autor: -----
Nombre completo y firma

Director: -----
Nombre completo y firma

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Quiero expresar mi agradecimiento:

A mi tutor y amigo Dr. Mario García por su paciencia y dedicación en cada una de las etapas de la realización de este trabajo.

Al Sr. Walter Marrero, funcionario de campo del Centro Regional Sur, Facultad de Agronomía, por su gran colaboración durante la instalación del lisímetro y en el cuidadoso registro de los datos.

Al Ing. Agr. Jorge Franco, del Departamento de Estadística y Cómputos de la Facultad de Agronomía, por su apoyo en el ajuste del modelo tri-segmentado.

Al Ing. Agr. Andrés Beretta por su invaluable apoyo en el análisis estadístico para la calibración y validación de los coeficientes de tanque.

Al Ing. Pier Gino Megale y al Laboratorio Nazionale dell' Irrigazione P. Celestre de la Universidad de Pisa, por la donación del microlisímetro y su constante apoyo.

A mis compañeros y amigos de la Unidad de Hidrología: Ing. Agr. Pablo Morales, Ing. Agr. Raquel Hayashi, Ing. Agr. Lisette Bentancor e Ing. Agr. Leticia Martinez, con los que pude contar SIEMPRE.

A mi querido esposo, quien una vez más demostró ser incondicional en su compañerismo y se convirtió en un experto en contar hojas de duraznero, así como en la reparación de la ingeniosa pero delicada “maquinita” del lisímetro, siempre con la mejor actitud, recordándome que las tareas obligatorias pueden ser a la vez disfrutables.

Este trabajo se lo dedico:

A mis padres, Roberto y Elayde, quienes me transmitieron siempre confianza y cariño, y que a través de su ejemplo he aprendido que no existe límite de edad para perseguir nuevas metas.

A mis hijos, Sofía y Manuel, que son mi orgullo más grande y a quienes les auguro una vida plagada de logros.

A la memoria de mi queridísima amiga Raquel, quien graciosamente decidió llamarle “lucymetro” al lisímetro de este trabajo y se las ingenió para continuar a mi lado, con su alma generosa, durante esta etapa de mi vida.

ÍNDICE

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE.....	IV
LISTA DE CUADROS Y FIGURAS.....	VII
RESUMEN.....	IX
SUMMARY.....	X
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	1
1.1.1 <u>Métodos para medir ET_c</u>	2
1.1.1.1 Balance de agua.....	2
1.1.1.2 Métodos micrometeorológicos.....	3
1.1.1.3 Lisimetría.....	3
1.1.2 <u>Métodos para estimar ET_c</u>	7
1.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA (ET _o).....	8
1.2.1 <u>Penman-Monteith FAO</u>	9
1.2.2 <u>El método evaporímetro clase “A”</u>	10
1.3 COEFICIENTE DE CULTIVO (K _c).....	12
1.3.1 <u>Coeficientes del cultivo duales</u>	15
1.3.1.1 Procedimiento de cálculo del K _e	17
1.3.1.2 Cálculo del K _c máx.....	17

1.3.1.3 Cálculo de la fracción húmeda y expuesta.....	18
1.3.1.4 Cálculo del coeficiente de reducción de la evaporación.....	18
1.4 VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DEL CULTIVO CON LA CANOPIA DEL DURAZNERO.....	21
1.5 ANTECEDENTES NACIONALES.....	22
2. DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA DEL DURAZNERO POR LISIMETRÍA	25
2.1 Resumen.....	25
2.2 Abstract	25
2.3 Introducción.....	26
2.4 Material y métodos.....	28
2.5 Resultados y discusión.....	32
2.5.1 Consumo.....	32
2.5.2 Coeficiente de cultivo.....	36
2.5.3 Ajustes metodológicos.....	40
2.6 Conclusiones.....	41
2.7 Agradecimientos.....	42
2.8 Literatura citada.....	42
3. ESTIMACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE TANQUE “A” PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA EN LA ZONA SUR DEL URUGUAY.....	45
3.1 Resumen.....	46
3.2 Summary.....	47
3.3 Introducción.....	48

3.4 Metodología.....	50
3.5 Resultados y Discusión.....	53
3.6 Conclusiones.....	58
3.7 Agradecimientos.....	59
3.8 Bibliografía.....	59
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL</u>	61
5. <u>CONCLUSIONES GLOBALES</u>	71
6. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	72
7. <u>ANEXOS</u>	77
7.1 ESTRUCTURA DEL LISÍMETRO.....	77
7.2 PARÁMETROS HÍDRICOS Y FÍSICOS DEL SUELO DE RELLENO DEL LISÍMETRO.....	82
7.2.1 Curva de retención del suelo de relleno del lisímetro.....	82
7.2.2 Análisis textural y densidad aparente.....	84
7.3 CRECIMIENTO VEGETATIVO.....	84
7.3.1 <u>Volumen de copa y sección del tronco</u>	84
7.3.2 <u>Índice de área foliar</u>	86
7.3.3 <u>Fracción de intercepción de radiación por la copa</u>	86
7.4 DATOS ANALIZADOS PARA DETERMINAR EL CONSUMO HÍDRICO DEL ARBOL.....	88
7.5 AJUSTE DE LOS DATOS DE CONSUMO AL MARCO DE PLANTACIÓN.....	88

7.6 INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES DE LA REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRICOLA E AMBIENTAL (AGRIAMBI) CORRESPONDIENTES AL ARTÍCULO CIENTÍFICO.....	90
--	----

7.7 INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES DE LA REVISTA AGROCIENCIA CORRESPONDIENTE A LA COMUNICACIÓN BREVE.....	97
---	----

LISTA DE FIGURAS Y CUADROS

DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA DEL DURAZNERO POR LISIMETRÍA

Figura N°	Página
1. Evapotranspiración del duraznero (ETc) y evapotranspiración de referencia (ETo) en las tres temporadas estudiadas.....	33
2. Lluvia acumulada y coeficiente de evaporación (Ke) ajustado por período en las tres temporadas estudiadas.....	35
3. Evolución del Índice de Área Foliar (IAF), referido a todo el marco de plantación (4,5 x 2,5), en las temporadas 2005-2006 y 2006-2007.....	36
4. Coeficiente del cultivo (Kc), Coeficiente de base (Kcb) y Coeficiente de evaporación (Ke) del duraznero, en las tres temporadas estudiadas.....	37
5. Coeficientes de base (Kcb) observados y curva de ajuste usando el modelo tri-segmentado lineal-plateau-lineal, en las tres temporadas estudiadas.....	39

ESTIMACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE TANQUE “A” PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA EN LA ZONA SUR DEL URUGUAY

Figura N°	
1. Relación entre la ETo estimada con el método 4 y la ETo PM-FAO.....	56
2. Errores relativos del método 4 respecto a la ETo PM-FAO	

Para el período octubre-abril.....	57
------------------------------------	----

RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL

Figura N°	Página
1. Evapotranspiración del duraznero ajustada al marco de plantación 2,5 x 4,5, con entrefila empastada (E_{Tc} aj) y evapotranspiración de referencia (E_{To}) en las tres temporadas evaluadas	60
2. Coeficientes del cultivo (K_c aj), coeficiente de base (K_{cb} aj) ajustados al marco de plantación 2,5 x 4,5, con entrefilas empastadas en las tres temporadas estudiadas y coeficiente de evaporación (K_e).....	63
3. Coeficientes de base (K_{cb}) observados ajustados al marco de plantación y curva de ajuste usando el modelo tri-segmentado lineal-plateau-lineal, en las tres temporadas estudiadas.....	66

Cuadro N°

1. Coeficientes de tanque calibrados por Corsi para la Estación Experimental las Brujas.....	51
2. Coeficientes de tanque (K_p , calibrados) para la Estación Experimental Las Brujas	52
3. Comparación de medias (t de Student para datos apareados) de la E_{To} PM-FAO con la E_{To} estimada por el método alternativo.....	54

RESUMEN

En el año 2004 se instaló un lisímetro de compensación de 2 x 2 x 0,80 m con capa freática constante en un monte de durazneros, con el objetivo de estudiar el consumo de agua de ese cultivo en la región sur del Uruguay. Las mediciones se hicieron en las tres primeras temporadas de crecimiento. El consumo en la primera temporada fue de 5 mm d⁻¹, equivalente a 56 L en el marco de plantación. En la segunda temporada llegó a 5,6 mm d⁻¹ (63 L) y cuando el árbol alcanzó su tamaño adulto, el consumo máximo alcanzó el valor de 6,3 mm d⁻¹ (71 L). El coeficiente de cultivo (K_c) fue de 0,9 en la primera temporada, y de 1,2 en las dos siguientes. Se calcularon los coeficientes de base (K_{cb}) y su valor se ajustó por el modelo tri-segmentado. Su valor fue de 0,78 en la primera temporada, 0,91 en la segunda y 1,1 en la tercera. Se hacen algunas observaciones metodológicas sobre el uso de este lisímetro, proponiéndose incorporar la variación de agua en el suelo a la ecuación de balance de volúmenes y se propone adicionar riego desde la superficie. Asimismo se estimaron para la región sur del Uruguay los coeficientes de tanque (K_p) para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia según Penman-Monteith modificado por FAO (ET_o PM-FAO). El uso de un K_p único (0,71) durante toda la estación de riego permitió una buena estimación para la zona sur del país. El empleo de este coeficiente único para corregir el dato de evaporación de tanque es una herramienta simple, fácil de adoptar por los productores y constituye una buena estimación de la ET_o. Este valor deberá calibrarse para otras zonas del país.

Palabras claves: coeficiente basal de cultivo, coeficiente de cultivo, evaporación, evapotranspiración, *Prunus persica* L. Batsch, Penman-Monteith, necesidades de riego, programación de riego

SUMMARY

A compensation lysimeter with constant freatic water table of 2 x 2 x 0.80 m was installed in 2004 in a peach grove, in order to study the crop water consumption of the south of Uruguay. Measurements were taken in the first three growing seasons. Evapotranspiration at the first season reached 5 mm d⁻¹, equivalent to 56 L in the whole area. In the second season, it went up to 5.6 mm d⁻¹ (63 L). When the tree got its adult size, the maximum consumption remained around 6.3 mm d⁻¹ (71 L). The crop coefficient (K_c) was around 0.9 at the first season, and 1.2 in the following two seasons. Basal crop coefficient (K_{cb}) was calculated and its value was adjusted by the tri-segmented model. The value was 0.78 at the first season 0.91 in the second one and 1.1 in the third one. Some methodological observations are made regarding the lysimeter use. We suggested to add the soil water changes to the mass balance equation, as well as to incorporate irrigation from the surface. Another objective was to make local estimations of the pan coefficients (K_p) for the south of Uruguay to calculate the reference crop evapotranspiration according to Penman-Monteith modified by FAO (FAO-PM ETo). The use of a single K_p (0.71) during the irrigation season gave a good estimate for the south of the country. The use of this single coefficient to correct the pan evaporation data is a simple tool, easy to take by producers and represents a good estimate of the ETo. This value must be calibrated for other areas of the country.

Key words: basal crop coefficient, crop coefficient, evaporation, evapotranspiration, *Prunus persica* L. Batsch, Penman-Monteith, irrigation requirements, irrigation scheduling

1. INTRODUCCIÓN

1.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN

En todo suelo cultivado se produce una pérdida continua de agua cuyo destino es la atmósfera. Puede producirse directamente desde la superficie del suelo, evaporación directa, o bien a través del sistema conductor de la planta, transpiración. La dificultad para evaluarlas separadamente obliga a considerarlas de manera conjunta, surgiendo así el concepto de evapotranspiración (ET).

Las pérdidas debidas a la ET se dan como respuesta a la demanda evaporativa del aire, derivada del clima y de la propia dinámica del aire. Para que este flujo de vapor hacia la atmósfera se mantenga se necesita un aporte continuo de energía, el cual proviene de la radiación solar. Esta sufre interacciones en su pasaje por la atmósfera, correspondiendo realizarle a la que alcanza la superficie, un balance para obtener la radiación neta (R_n), que es la energía disponible para evaporar (Allen *et al.*, 1998). La R_n se usa en parte para evaporar, según la disponibilidad o facilidad del agua para alcanzar la superficie y el resto se emplea para generar calor sensible hacia el aire.

La necesidad de agua del cultivo es la suficiente para compensar la ET y el agua retenida en los tejidos vegetales. La última representa sólo el 1% del total de agua evapotranspirada por un cultivo a lo largo de su ciclo, sin embargo la ET además de su importancia cuantitativa tiene incidencia directa sobre la producción dado que al limitarla se reduce el rendimiento y calidad del producto cosechado.

Existen diversos métodos tanto para medir como para estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c).

1.1.1 Métodos para medir ET_c

1.1.1.1 Balance de agua

Este método ha sido utilizado para determinar el consumo hídrico tanto en cultivos anuales como en árboles frutales. El balance de agua, junto con la lisimetría, ha sido usado para proveer información de base en el desarrollo, validación y calibración de los métodos para estimar la ET_c (Allen *et al.*, 1991).

Se efectúa en una parcela experimental, en la que además de los aportes de agua de riego y lluvia, es preciso controlar mediante instrumentación adecuada los cambios producidos en el contenido de humedad en todo el volumen de suelo ocupado por las raíces, así como las posibles pérdidas por percolación y escorrentía.

En el método del balance, el error cometido en la estimación de los distintos términos se acumula en la ET_c, por lo tanto una de las limitaciones del método es que la precisión puede no ser elevada. Sin embargo Abrisqueta *et al.* (2001), utilizaron este método para determinar la ET_c del damasco para el SE de España y los resultados obtenidos permitieron recomendaciones que condujeron a un ahorro del 14% en el agua con riego localizado. Parkes *et al.* (2005) utilizaron este método en duraznero a fin de evaluar distintos métodos de estimación del consumo e identificar el de mejor ajuste. Koumanov *et al.* (1997) simplificaron los cálculos del balance al reducir al mínimo el drenaje durante y entre riegos y obtuvieron valores diarios de la evapotranspiración real de almendros regados con micro-jets, en California.

En nuestro país, García-Petillo y Castel (2007), utilizaron esta metodología para determinar ET_c real y a partir de ésta el coeficiente del cultivo (K_c) de árboles adultos de naranja Valencia, en la zona sur. En este trabajo los autores hacen referencia a que existieron dos componentes que estuvieron sujetos a mayor incertidumbre en su

determinación: la lluvia efectiva y el drenaje. Por este motivo y con el fin de disminuir los errores de estimación, trabajaron sólo con los períodos en que las lluvias acumuladas no superaron los 30 mm semana⁻¹.

1.1.1.2 Métodos micrometeorológicos

En trabajos más recientes la ET_c tanto de cultivos anuales como de montes frutales ha sido evaluada con métodos micrometeorológicos, como la relación de Bowen o la covarianza eddy. Este último ha prevalecido en la actualidad debido a su mayor practicidad (Ruiz Reverter, 2008). El uso de este método proporciona valores muy precisos de ET_c diaria, pero requiere de instrumental costoso.

La técnica de la covarianza eddy consiste en medir la velocidad vertical del viento a altas frecuencias y la concentración de una variable escalar como la densidad del vapor de agua o la temperatura del aire para obtener el flujo de calor latente o el flujo de calor sensible, respectivamente. Para su cálculo se hacen los promedios de la velocidad del viento y de la variable escalar en intervalos cortos de tiempo (por ejemplo 30 min), se realiza la covarianza entre ambas y se obtiene la magnitud promedio del flujo. Una de las ventajas de esta técnica es que todos los componentes del balance de energía en superficie pueden ser medidos al mismo tiempo, lo cual hace posible la detección de errores, su medición y corrección (Villalobos *et al.* 2009; Paço *et al.* 2006).

1.1.1.3 Lisimetría

El lisímetro es un dispositivo que contiene un volumen de suelo aislado hidrológicamente del suelo circundante, en el cual resulta posible controlar y medir los diferentes términos que intervienen en el balance.

El uso de lisímetros ha sido frecuente para determinar el consumo hídrico de cultivos anuales, pero en el caso de árboles frutales, su utilización ha sido menos habitual debido al tamaño requerido para albergar un árbol adulto así como la necesidad de coleccionar datos durante un período de tiempo relativamente largo para obtener datos de validez (Ayars *et al.*, 2003; Johnson *et al.*, 2005).

En un lisímetro se mide la evapotranspiración y el cambio de energía uni-dimensional (vertical) de un cultivo. Para ello es esencial que el cultivo dentro y fuera del lisímetro tenga similares características de forma que la energía evaporativa se dé en un único plano, sin recibir aportes de radiación y turbulencias de aire que generen cambios de calor y vapor desde las áreas adyacentes. Asimismo es importante que la pérdida de agua medida en el lisímetro, en volumen, sea referida al área de vegetación correcta, de forma de obtener con exactitud la evapotranspiración en milímetros. En aquellos casos en que las medidas del lisímetro se aparten demasiado de las ecuaciones con fuertes bases físicas en la estimación de este proceso, como Penman-Monteith, es necesario que sean revisadas exhaustivamente (Allen *et al.*, 1991).

Cuando el objetivo del estudio es calibrar el coeficiente de cultivo (K_c), al cual se hará referencia más adelante, es importante que los instrumentos para medir las distintas variables climáticas, que permitirán estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia (E_{To}) estén ubicados en un predio cultivado con condiciones de vegetación y humedad similares a las que afectan la evapotranspiración del lisímetro de forma de asegurar que el balance energético sea comparable.

En base al principio de funcionamiento, existen dos tipos básicos de lisímetros: pesantes y no-pesantes.

En los lisímetros pesantes los cambios de peso representan una medida directa de las entradas y salidas de agua del lisímetro y se pueden clasificar en: 1) mecánicos, con

básculas y balanzas, 2) electrónicos, con indicadores de resistencia mecánica ó 3) hidráulicos, distinguiendo los que registran los cambios de peso como cambios de presión ó aquellos que lo hacen como cambios de flotación (Aboukhaled *et al.*, 1981).

De los tres grupos los últimos son los más económicos. Los lisímetros hidráulicos de presión permiten valores diarios aceptables y valores semanales de gran confiabilidad pero su costo duplica, al de un lisímetro no-pesante de drenaje de igual tamaño. Además la reparación o reemplazo del mecanismo de cámaras de presión es difícil y complicado. En cuanto a los lisímetros hidráulicos flotantes, están sujetos a errores térmicos y por lo general son afectados por el viento (Aboukhaled *et al.*, 1981).

Los lisímetros de báscula de alta precisión, sirven para medir la ET durante intervalos cortos de tiempo (una hora ó menos), con una sensibilidad de hasta 0.03 ó 0.05 mm de agua, que resulta en valores diarios de gran confiabilidad (Aboukhaled *et al.*, 1981). Como contraparte a sus beneficios, necesitan calibraciones periódicas y tienen un costo muy alto que hace difícil su uso en el Uruguay. Existen varios trabajos de investigación, en el ámbito internacional, que utilizaron lisímetros de pesada de precisión para determinar el consumo de agua de duraznero (Ayars *et al.*, 2003; Bryla *et al.*, 2003; Girona *et al.*, 2002; Girona *et al.*, 2004; Johnson *et al.*, 2000; Johnson *et al.*, 2004).

Los lisímetros no-pesantes se conocen también como volumétricos. Dentro de éstos se pueden distinguir: 1) de drenaje, sin nivel freático y 2) de compensación, con alimentación de agua a partir de un nivel freático artificial (lisímetros de nivel freático constante), en los cuales generalmente también se mide el volumen de drenaje.

En el caso de los lisímetros de drenaje, el agua de riego en exceso es colectada en el fondo y medida volumétricamente. A pesar de ser posible medir diariamente el agua de drenaje, el cálculo de balance hídrico y de evapotranspiración se debe realizar entre dos ocurrencias sucesivas de drenaje. Una de las principales fuentes de error es la debida a

los cambios de retención de agua por el suelo, pudiendo resultar que el contenido correspondiente a capacidad de campo del suelo del lisímetro no sea el mismo luego de varios ciclos sucesivos de drenaje, debido a cambios en su estructura. Los lisímetros de drenaje con y sin nivel freático han sido usados para determinar el requerimiento hídrico de árboles frutales de hoja caduca y frutales de carozo (Boland *et al.*, 1993; Boland *et al.*, 2000; Iancu, 1997; Stevenson, 1989).

En los lisímetros de nivel freático constante, aunque las medidas diarias son posibles, el balance de agua y valores de evapotranspiración son normalmente calculados para períodos de 10 días. El movimiento ascendente del nivel freático puede resultar inadecuado, principalmente en condiciones de alta demanda atmosférica, pudiendo recurrir al riego superficial para compensar este error (Aboukhaled *et al.*, 1981).

En base a las características del suelo de relleno, existen los lisímetros monolíticos y los lisímetros de relleno.

En los primeros el suelo se mantiene en un bloque monolítico sin ninguna perturbación, siendo esta condición muy importante para estudios de infiltración y percolación. Como contraparte se incrementa, en forma importante, el costo de instalación. En los segundos se pueden distinguir distintos grados de perturbación del suelo, aquellos en los que se reconstruye la secuencia de horizontes del suelo circundante así como su densidad o aquellos donde se rellena con un suelo de textura y densidad homogénea en toda su profundidad. Aboukhaled *et al.* (1981) establecieron que el efecto de la perturbación del suelo en los estudios de consumo de agua de los cultivos no perjudica las determinaciones de evapotranspiración, siempre y cuando estas perturbaciones no afecten el desarrollo normal de los cultivos y haya limitaciones en la disponibilidad de agua.

El lisímetro usado en el presente trabajo fue desarrollado por el Laboratorio Nazionale dell'Irrigazione P. Celestre, Dipartimento di Agronomia e Gestione dell'agro-ecosistema de la Università di Pisa. Éste es un microlisímetro de compensación con napa freática constante de mecanismo simple y económico e inicialmente se estudió su uso como sensor evapotranspirométrico para comandar el riego localizado en cultivos hortícolas en invernáculo (Bertolacci y Megale, 1991; Pardossi *et al.*, 1993).

El principio de funcionamiento de este lisímetro consiste en la compensación por capilaridad del consumo hídrico del cultivo confinado en un macetón enterrado a nivel del suelo, desde una napa de agua que se mantiene a nivel constante en el fondo del mismo. Cuando el nivel de la napa desciende, un dispositivo flotante abre una válvula que permite el pasaje de agua hacia un gotero en forma automática. Esta señal puede ser utilizada para activar el equipo de riego.

En otros estudios, este microlisímetro fue utilizado para medir el consumo hídrico y definir la curva rendimiento-volumen de riego de distintos cultivos anuales en invernáculo y a campo (Magnani *et al.*, 1990; Solinas, 2000). En trabajos posteriores se utilizó para la determinación del coeficiente del cultivo (Megale y Bertolacci, 1999; González, 2005).

1.1.2 Métodos para estimar ET_c

Dada la dificultad de obtener mediciones directas y exactas de la ET_c en condiciones reales existen diversos métodos para predecirla. Algunos de los cuales son válidos únicamente para las condiciones climáticas y agronómicas para las cuales fueron desarrollados. En este sentido y en particular para los frutales de hoja caduca y de carozo, diversos autores (Ayars *et al.*, 2003; Girona *et al.*, 2004) coinciden en que la cantidad de agua requerida expresada como una función del crecimiento, varía

dependiendo del clima, del suelo y su manejo, del método de riego y su utilización, entre otros.

En la última publicación sobre ETc de la FAO (Allen *et al.*, 1998), se propone un doble paso de estimación: se calcula primeramente la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), asumiendo como tal un cultivo de gramíneas de 0,12 m de altura, con una resistencia de superficie de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23; luego se multiplica por el Kc que tiene en cuenta la especificidad del cultivo.

El concepto de ETo es importante en la teoría del riego, pues da una medida de la demanda evaporativa del aire y se usa como dato de partida para el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos.

La ETc se estima con la siguiente fórmula:

$$ETc = ETo * Kc$$

Pereira *et al.* (2006) fundamentan que la transpiración de un árbol bien regado puede estimarse sólo con la ETo y el área foliar del árbol (A_f), según la siguiente relación $ETo * A_f / 2,88$, sin recurrir al uso del Kc y sin necesidad de una calibración local. Estos autores asumen que el índice de área foliar para el cultivo de referencia es 2,88 de acuerdo con Allen *et al.* (1998).

1.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA (ETo)

Allen *et al.* (1998) sugieren el uso de dos métodos para la estimación de la ETo: Penman-Monteith modificado por FAO (PM-FAO) y el método del tanque evaporímetro clase “A”.

1.2.1 Penman-Monteith-FAO

Como resultado de una consulta de expertos llevada a cabo en mayo de 1990, el método PM-FAO es considerado el método estándar para la definición y cálculo de la ETo.

Su formula es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde:

ETo - Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm d⁻¹)

Rn - radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² d⁻¹)

G - calor sensible desde la superficie al interior del suelo (MJ m⁻² d⁻¹)

T - temperatura media diaria medida a 2m de altura (°C)

u₂ - velocidad del viento media diaria medida a 2m de altura (m s⁻¹)

e_s - presión de vapor a saturación (KPa)

e_a - presión de vapor real del aire (KPa)

e_s - e_a - déficit de presión de vapor (KPa)

Δ - pendiente de la curva T- Presión de vapor a saturación (KPa °C⁻¹)

γ - cte psicrométrica del aire (KPa °C⁻¹)

El método PM-FAO, requiere de las siguientes variables climáticas medidas para su cálculo: temperatura máxima (T_{máx}), temperatura mínima (T_{min}), humedad relativa (HR %), velocidad del viento (u₂) y radiación neta (Rn) (ó en su defecto radiación solar, Rs, ó número de horas diarias de insolación, n). La temperatura, humedad relativa y velocidad del viento corresponden a las medidas realizadas a 2 m de altitud. Thakur y

Sepia (2007) comprobaron, en un trabajo realizado para calcular la ET_c de duraznero en India, que PM-FAO fue el mejor estimador de la ET_o, entre 10 métodos que utilizaban variables climatológicas. En un trabajo similar, Iancu (1997) encontró que PM fue uno de los cuatro métodos que estimó mejor la ET_o de los 15 métodos evaluados.

1.2.2 El método evaporímetro clase “A”

Este método permite medir los efectos integrados del clima en función de la evaporación de una superficie libre de agua (E_o). Si bien la evapotranspiración de un cultivo se produce en respuesta a las mismas variables climáticas que la evaporación desde la superficie del tanque, existen una serie de factores que tienden a producir diferencias y éstas quedan corregidas al multiplicar E_o por el coeficiente de tanque (K_p).

La ventaja del método del tanque evaporímetro clase “A” radica en su simplicidad, dado que requiere de una sola medida fácilmente realizable, además de su bajo costo de instalación y mantenimiento. Esto ha determinado que sea un método de uso frecuente en proyectos (Conceição, 2002; Stanhill, 2002; Sentelhas y Folegatti, 2003) y numerosos investigadores lo han usado específicamente para calcular los requerimientos hídricos de duraznero y damasco (Boland *et al.*, 1993; Bolland *et al.*, 2000; Abrisqueta, 2001).

La ET_o se estima mediante la siguiente fórmula:

$$ET_o = E_o \times K_p$$

Allen *et al.* (1998) sugieren la utilización de K_p obtenidos empíricamente, a través de una regresión derivada de la tabla de Doorenbos y Pruitt (1977).

Dichos coeficientes se estiman como sigue:

$$K_p = 0.108 - 0.0286u_2 + 0.0422\ln(FET) + 0.1434\ln(HRmedia) - 0.000631[\ln(FET)]^2 \ln(HRmedia)$$

FET - distancia de la cubierta verde a barlovento (m)

HR media - humedad relativa media mensual (%)

u_2 - velocidad media mensual del viento ($m\ s^{-1}$)

Esta fórmula tiene en cuenta el control estomático del cultivo de referencia que se hace tanto más eficaz, a medida que aumenta la velocidad del viento y disminuye la humedad relativa del aire, mientras que la E_o responde a la demanda atmosférica sin resistencias.

Debido a que el método es susceptible a las condiciones microclimáticas bajo las cuales está funcionando el tanque, es importante respetar las pautas estandarizadas de construcción, instalación y mantenimiento, que han sido detalladas por Allen *et al.* (1998) y Strangeways (2001).

Allen *et al.* (1998) ponen énfasis en la recomendación de calibrar, localmente los K_p en función de la ETo medida con un lisímetro o calculada por el método PM-FAO.

Corsi (1994) calibró los K_p para la Estación Experimental INIA Las Brujas (EELB), ubicada en la zona sur del Uruguay, mediante la relación de la ETo calculada por el método de Penman con E_o (Cuadro 1). Dado que el método de Penman puede sobreestimar la ETo en determinadas condiciones de demanda atmosférica (Allen *et al.*, 1998), el uso de estos K_p podría conducir a la sobreestimación de las necesidades de riego de los cultivos de la zona.

Cuadro 1. Kp calibrados para la Estación Experimental INIA Las Brujas (Corsi, 1994)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Kp	0,7	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7

1.3 COEFICIENTE DEL CULTIVO (Kc)

El coeficiente de cultivo (Kc) representa la integración del efecto sobre la ETc de tres factores: 1) la altura del cultivo, que afecta la rugosidad y la resistencia aerodinámica del pasaje de vapor hacia la atmósfera; 2) la resistencia a la pérdida de agua desde la superficie cultivo-suelo, que está afectada por el área foliar, la fracción del suelo cubierto por el cultivo y el grado de humedad de éste y 3) el albedo de la superficie cultivo-suelo, que es el factor determinante en la radiación neta disponible en superficie, principal fuente de energía en el proceso de evapotranspiración (Pereira, 2004; Allen *et al.*, 2005a).

El coeficiente del cultivo (Kc) dependerá del cultivo correspondiente, de su fase de crecimiento y de las condiciones climáticas predominantes.

Una forma linearizada de la curva de Kc a lo largo del ciclo del cultivo fue introducida por Doorenbos y Pruitt (1977), transformando la curva en cuatro segmentos de rectas correspondientes a los períodos: inicial, desarrollo, mediados de ciclo y final. En la gráfica del Kc con el día del año, los cuatro segmentos son definidos por tres valores: Kc inicial (Kc ini), Kc de mediados de ciclo (Kc med) cuando se ha completado el follaje y Kc final (Kc fin) correspondiente al final de la estación. Williams *et al.* (2003b) encontraron ventajas en presentar la evolución del Kc con los grados-días (grados por encima de 10°C acumulados desde brotación) en lugar de hacerlo con los días del año, dada la alta correlación de la superficie foliar con la temperatura

acumulada, evitando así gran parte de la variabilidad entre años. Según estos autores el uso de los grados-días para graficar el K_c , podría eliminar también la variabilidad del K_c en el inicio de la temporada, debido a las variaciones de las condiciones climáticas.

Allen *et al.* (1998) recomiendan valores para duraznero adulto, a ser utilizados mientras no se disponga de valores surgidos de investigaciones locales (Cuadro 2). Los valores de K_c med y K_c fin son los correspondientes a humedad relativa mínima (RHmin) de 45 %, velocidad del viento media (u_2) de 2 m s^{-1} , heladas ligeras y altura máxima del cultivo de 3 m, condiciones similares a las predominantes en la zona frutícola del sur de Uruguay.

Cuadro 2. Coeficientes de cultivo (Allen *et al.*, 1998)

	K_c ini	K_{cmed}	K_c fin
Con cubierta vegetal	0,8	1,15	0,85
Sin cubierta vegetal	0,55	0,9	0,65

Cuando las condiciones climáticas difieren a las anteriores, Allen *et al.* (1998) proponen el siguiente ajuste:

$$K_{cmáx} = K_{cmáx} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH \text{ min} - 45)](h / 3)^{0.3}$$

Donde h es la altura media del cultivo durante el período de cálculo.

En la bibliografía internacional existe una gran variabilidad de valores para los coeficientes K_c máximos correspondientes a árboles de duraznero adulto (Cuadro 3).

Cuadro 3. Coeficientes de cultivo para duraznero adulto citados en la bibliografía internacional

Autor	Región	Kc máx	K	Método utilizado	Marco
Ayars <i>et al.</i> , 2003	California	1,06		Lisím. de pesada	1,8 x 4,9
Boland <i>et al.</i> , 2000	Victoria (Australia)		1.16	Lisím. de drenaje	1 m ³
Girona <i>et al.</i> , 2001	California	0,83		Lisím. de pesada	1,8 x 4,9
Johnson <i>et al.</i> , 2000	California	1,15		Lisím. de pesada	1,8 x 4,9
Paço <i>et al.</i> , 2006	Portugal	0,5		Covarianza eddy	5,0 x 2,0
Parkes <i>et al.</i> , 2005	NW China	0,75		Balance hídrico	2,1 x 2,7

El coeficiente K propuesto por Boland *et al.* (2000) surge de relacionar la ET_c con el dato de evaporación de tanque ($K = K_c \times K_p$) y no está ajustado para el marco de plantación (Cuadro 3).

La diversidad de valores (Cuadro 3) se debe al empleo de distintas metodologías para medir la ET_c, distintas metodologías para estimar ET_o, diferente manejo del cultivo así como de la entrefila del monte y distintos métodos de riego. Según lo reseñado por Snyder *et al.* (2000), existen en la bibliografía internacional muchos valores de K_c que fueron calibrados determinando la ET_c, únicamente con técnicas de monitoreo de humedad en el suelo (ej. sonda de neutrones) o midiendo el agua aplicada y asumiendo eficiencias de aplicación, dando como resultado una gran variedad de coeficientes. Este autor puntualiza además, que las ecuaciones para estimar la ET_o han cambiado considerablemente, especialmente en los últimos 20 años.

Snyder *et al.* (2000) desarrollaron un modelo, basado en el método presentado por Doorenbos and Pruitt (1977), para determinar los K_c, con cálculos adicionales para mejorar la precisión y la simplificación de las estimaciones. Estos autores fijaron un

valor máximo de K_c de 1,15 para un monte maduro de duraznero con un porcentaje de área de sombreado mayor a 62% y con entrefila empastada. Este valor fue escogido en base a un K_c de 1,05, correspondiente a varios años de medidas realizadas en lisímetros de pesada con árboles de duraznero con entrefila sin cobertura, agregándole 0,1 para contemplar las pérdidas de agua en la entrefila con cobertura.

1.3.1 Coeficiente del cultivo duales

Los coeficientes de cultivo se pueden ajustar como K_c medios ó como K_c duales (Wright, 1982; Jensen *et al.*, 1990). Según Pereira (2004) el uso de los K_c medios correspondientes a las distintas etapas del ciclo del cultivo proporciona resultados satisfactorios aún para estimaciones de ET_c diaria, mientras que para Paço *et al.* (2006) este método sólo debe usarse para cálculos de ET_c promedio para una semana o períodos más largos. En riegos de alta frecuencia, cultivos con cobertura parcial del suelo (montes frutales y algunos cultivos hortícolas) y regiones con precipitaciones frecuentes, el uso de la metodología de los coeficientes de cultivo duales permite resultados más exactos en la estimación de la ET_c (Pereira, 2004, Allen *et al.*, 2005b).

El método de coeficientes duales propuesto en FAO-56 utiliza el coeficiente basal (K_{cb}) para representar la transpiración del cultivo con la superficie de suelo seca y predice en forma separada la evaporación, mediante un balance hídrico en la capa de suelo más superficial, húmeda y expuesta a la radiación y ventilación (Allen *et al.*, 2005a, 1998). Una vez calibrados, el uso de estos coeficientes podría extrapolarse a diferentes patrones de mojado o métodos de riego distintos para los que fueron ajustados. El K_c resulta en la suma de los dos coeficientes antes mencionados, según la fórmula siguiente:

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

Donde:

Kcb - coeficiente base del cultivo

Ke - coeficiente de evaporación del agua del suelo

El Kcb es definido como la relación ET_c/ET_o cuando la superficie del suelo está seca y no existe evaporación, pero la transpiración se da a la tasa potencial (Allen *et al.*, 2005a; 1998). El Kcb representa el límite inferior del Kc, cuando se le sustraen los efectos de humedecimiento causados por el riego o por la precipitación en la capa superficial del suelo (Godinho *et al.*, 2007; Williams *et al.*, 2003a).

El Ke describe el componente de evaporación de la ET_c que se da en la fracción húmeda y expuesta del suelo hasta 0,1- 0,2 m de profundidad (Ze). Los valores menores de profundidad corresponden a suelos arenosos y los valores mayores a suelos de francos a pesados (Pereira, 2004). El valor del Ke es máximo luego de un riego o lluvia y decrece a medida que se incrementa el agua evaporada acumulada en Ze. El valor de este coeficiente nunca puede exceder el Kc máx, valor gobernado por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo, limitado a su vez a la fracción de suelo húmeda y expuesta (few). En este cálculo, el proceso de evaporación tiene igual importancia que el proceso de transpiración en cuanto al consumo de energía (Allen *et al.*, 2005a).

El valor de este coeficiente se calcula como sigue:

$$Ke = Kr (Kc_{máx} - Kcb) \leq few * Kc_{máx}$$

1.3.1.1 Procedimiento de cálculo del Ke

Consiste en determinar con paso diario: el límite superior (Kc máx), la fracción húmeda y expuesta (few) y el coeficiente de reducción de la evaporación (Kr) mediante

un balance en los 0,10-0,20 m de la zona húmeda y expuesta (Allen *et al.*, 2005a, 1998). El K_e estimado con esta metodología, mostró una buena coincidencia con las medidas realizadas por Paço *et al.* (2006) en microlisímetros distribuidos en la fila entre dos árboles consecutivos y en la entrefila de un monte de durazneros sobre suelo arenoso.

1.3.1.2 Cálculo del K_c máx

El K_c máx representa un límite superior para los valores de evaporación y transpiración, en forma conjunta y es introducido para reflejar las limitaciones naturales en la energía disponible para estos procesos.

Este coeficiente se puede estimar mediante la fórmula:

$$K_{cmáx} = máx \left[\left\{ 1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} + 0.05\} \right]$$

Este valor será siempre, por lo menos $K_{cb} + 0,05$, dado que luego de un período de humedecimiento, el suelo húmedo incrementa el valor de este coeficiente por encima del K_{cb} y según Allen *et al.* (2005a) estará comprendido entre 1,05 y 1,3 cuando se utilizan las gramíneas como cultivo de referencia.

El valor 1,2 de la fórmula, refleja el efecto de que alrededor de un cultivo con cobertura parcial, se incrementa la remoción de masas de aire por el aumento de la rugosidad aerodinámica, así como la acumulación de calor debido al albedo reducido del suelo húmedo, cuando los eventos de humedecimiento están separados por más de 3 ó 4 días. En el caso que los eventos de humedecimiento se den con más frecuencia, diariamente ó cada 2 días, entonces el suelo tiene menos oportunidad de absorber calor y este valor podría reducirse a 1,1 (Allen *et al.*, 2005a).

1.3.1.3 Cálculo de la fracción húmeda y expuesta (few)

Cuando la superficie del suelo se moja en su totalidad como sucede con la precipitación ó con métodos de riego que no son localizados, la fracción húmeda y expuesta (few) es igual a $(1 - f_c)$, siendo f_c la fracción de la superficie del suelo cubierta por la vegetación, la cual varía a medida que el cultivo se va desarrollando (Allen *et al.* 2005a, 1998).

En aquellos métodos de riego en que el agua se aplica en sólo una fracción de la superficie del suelo (fw), entonces few queda limitada a fw.

Por estabilidad numérica, tanto $1 - f_c$ como fw, tienen los límites (0,01-1) (Allen *et al.*, 2005a). El valor f_c es determinado generalmente por observaciones visuales.

Allen *et al.* (2005a, 1998) proponen una fórmula para estimar f_c , siguiendo en forma proporcional las variaciones diarias del K_{cb} , decreciendo hacia el final de la temporada cuando se produce la senescencia de las hojas del cultivo permitiendo el transporte de calor sensible a la superficie del suelo.

1.3.1.4 Cálculo del coeficiente de reducción de la evaporación (Kr)

El K_r describe la teoría bifásica de la evaporación (Allen *et al.*, 2005b). Un proceso de secado en tres fases puede ser aplicado en suelos con rajaduras, siendo una de las extensiones propuestas al método de los coeficientes duales de FAO-56 por Allen *et al.*, 2005a.

El valor de este coeficiente depende del contenido de humedad del suelo en la few en la profundidad Z_e (Allen *et al.*, 1998). En la fase 1, el K_r vale 1, siempre que el contenido de agua en el suelo sea igual o mayor al agua fácilmente evaporable (REW),

cumpléndose la máxima evaporación para las condiciones de demanda atmosférica. En la fase 2, las propiedades hidráulicas del suelo comienzan a limitar el transporte del agua a la superficie y el valor del K_r se hace menor a 1 hasta alcanzar el valor de 0 cuando se agota el agua evaporable total (TEW).

En esta fase el $K_r = \frac{TEW - De_{i-1}}{TEW - REW}$, para $De_{i-1} > REW$

Siendo:

De_{i-1} - evaporación acumulada, en mm, en t_{i-1} a la radiación solar directa correspondiente al día previo.

El REW se puede estimar en función de la textura del suelo correspondiente a Z_e (Ritchie *et al.*, 1998; citado por Pereira, 2004).

Para suelos medios la ecuación de estimación es:

$$REW \text{ (mm)} = 8 + 0,08 \% \text{ arcilla}$$

Si bien Allen *et al.* (2005a) hacen referencia a que los usuarios deberían seleccionar el valor de TEW o incluso el valor de Z_e , mediante el método gravimétrico o algún otro método para determinar humedad, el TEW se puede estimar (Allen *et al.*, 1998; Pereira, 2004) a partir de la capacidad de retención de agua del suelo y la fórmula parte del supuesto que el suelo está bien abastecido de agua en los 0,40-0,50 m de profundidad, considerando que en la medida que la demanda atmosférica aumenta existe aporte por capilaridad de las capas que están por debajo de los 0,10-0,20 m.

La fórmula para estimar este parámetro (Pereira, 2004) es la siguiente:

$$TEW = Ze(\Theta_{CC} - 0.5\Theta_{CMP}) \quad \text{para } ETo \leq 5 \text{ mm d}^{-1}$$

$$TEW = Ze(\Theta_{CC} - 0.5\Theta_{CMP})\sqrt{\frac{ETo}{5}} \quad \text{para } ETo > 5 \text{ mm d}^{-1}$$

Siendo:

Θ_{CC} - humedad correspondiente a capacidad de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Θ_{CMP} - humedad correspondiente a coeficiente de marchitez permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Ze - profundidad del suelo que puede secarse por evaporación (100 mm-200 mm)

El balance para la determinación del Kr deberá tener en cuenta los siguientes términos (Allen *et al.*, 1998):

$$De_i = De_{i-1} - P_i + \frac{E_i}{f_{ew}} + Tew_i + DPe_i$$

Siendo:

De_i - Déficit en el día i, en términos de evaporación acumulada (mm), desde la fracción húmeda y expuesta, en la profundidad 0.10-0.20 m

De_{i-1} - Déficit del día anterior (mm)

P_i - Precipitación en el día i (mm)

Dpe_i - Pérdida por percolación profunda cuando la humedad excede el contenido correspondiente a capacidad de campo (mm)

$\frac{E_i}{f_{ew}}$ - Evaporación en el día i, calculándose como $E_i = K_e ETo$, concentrada en la fracción húmeda y expuesta (f_{ew})

$T_{ew, i}$ - Transpiración desde la fracción húmeda y expuesta del suelo superficial en el día i (mm)

Para cultivos con raíces de profundidad (Z_r) mayor a 0,50 m, T_{ew} puede considerarse despreciable. En cambio para cultivos con raíces de Z_r menor ó igual a 0,50 m, la T_{ew} deberá estimarse como sigue, (Pereira, 2004):

$$T_{ew} = f_{ew} \left(\frac{0.15}{Z_r} \right)^{0.6} (K_{cb, i}) E_{To, i}$$

1.4 VARIACION DEL COEFICIENTE DEL CULTIVO CON LA CANOPIA DEL DURAZNERO

Fereres *et al.* (1982) encontraron una relación para predecir el consumo de agua de árboles jóvenes de almendro, como una proporción del K_c de árboles maduros a partir del porcentaje de área sombreada. Esta relación confirma que la transpiración es función principalmente de la proporción de luz interceptada por la copa (una vez consideradas las características propias de cada especie para oponer resistencia a la transpiración), mientras que la evaporación es función de la frecuencia de humedecimiento de la superficie del suelo y depende sólo de las condiciones meteorológicas.

Asimismo, fue reportada una buena correlación del K_c con el porcentaje de intercepción de radiación por la canopia al mediodía (Johnson and Ayars, 2000; Ayars *et al.*, 2003), lo cual es esencialmente lo mismo que el porcentaje de área sombreada usada por Fereres *et al.* (1982). Los anteriores autores encontraron que esta única variable explicó bien tanto la variación del K_c entre años, como la variación estacional en la temporada.

Williams *et al.* (2003b) encontraron una relación lineal entre el K_c de la vid y el área foliar de la planta, similar a la encontrada por Ayars *et al.* (2003) en duraznero con el % de intercepción de radiación, manteniendo la variación del K_c un patrón similar al desarrollo del área foliar en los 4 años de evaluación.

Goodwing *et al.* (2005) sugieren la utilización del área sombreada efectiva (EAS) para estimar el K_{cb} . En este trabajo la EAS fue determinada por una combinación de fotografía, tomada desde la dirección del sol, y medidas del porcentaje de intercepción de radiación en el área sombreada por el árbol en tres momentos del día: 9 a.m., 12 a.m. y 15 a.m., utilizando el promedio para la correlación.

Según Johnson *et al.* (2004) el K_{cb} se correlaciona muy bien con el porcentaje de intercepción de radiación por la canopia, pudiendo adoptar una pendiente de 1,5 para predecir el K_{cb} a partir de la intercepción de radiación (en el rango 0 y 70 %). Dado que las medidas de intercepción de radiación requieren el uso de un ceptómetro, no siempre disponible en predios comerciales, los anteriores autores presentan una estimación de la intercepción de radiación a partir de la altura y diámetros del árbol.

1.5 ANTECEDENTES NACIONALES

El conocimiento de la ET es esencial para un manejo eficiente del riego ajustando el volumen y la frecuencia del riego a los requerimientos de los cultivos. Un manejo correcto del riego permite apuntar a rendimientos altos, con estabilidad entre años, y a una calidad óptima del producto cosechado, haciendo posible un uso racional del agua y de la energía, minimizando el desperdicio de ambos recursos y la contaminación del medio ambiente. Asimismo este dato es fundamental para un correcto diseño de los sistemas de riego.

Esto es de resaltar cuando se considera lo reportado por García-Petillo *et al.* 2003, en cuanto a que los productores frutícolas de la zona Sur del país no riegan en cantidad suficiente como para cubrir los requerimientos del cultivo y obtener rendimientos diferenciales en la cantidad y calidad de la producción que justifiquen el costo del riego. Este riego insuficiente es consecuencia de fuentes de menor capacidad a las requeridas y/o equipos subdimensionados, así como del desconocimiento por parte de los productores en lo referente a un correcto manejo del riego.

Básicamente el requerimiento de riego representa la diferencia entre la ET_c y la precipitación efectiva, considerando un plus de agua para compensar la ineficiencia de aplicación, falta de uniformidad y lavado de sales cuando sea necesario.

A pesar de lo relevante del tema, en el país existen pocas determinaciones en el consumo de agua de los cultivos. García Petillo y Castel (2007) determinaron la evapotranspiración real de un monte cítrico, en la zona sur del país, calculando a partir de ella los coeficientes del cultivo (K_c).

En el presente trabajo se plantean los siguientes objetivos:

- 1) Medir el consumo de agua de una planta de duraznero durante varios ciclos de crecimiento, desde su implantación hasta su tamaño definitivo.
- 2) Determinar el coeficiente de cultivo (K_c) y el coeficiente base (K_{cb}) para la zona frutícola del Sur del Uruguay.
- 3) Estimar localmente los coeficientes de tanque “A” para calcular la ET_o PM-FAO en la zona Sur del Uruguay.

Los objetivos 1 y 2 son abordados en el Artículo científico: Determinación del consumo de agua del duraznero por lisimetría.

El objetivo 3 es abordado en la Comunicación breve: Estimación de los coeficientes de tanque “A” para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia en la zona sur del Uruguay.

El Artículo científico y la Comunicación breve son el capítulo 2 y 3 de la tesis respectivamente.

Determinación del consumo de agua del duraznero por lisimetría

Lucía Puppo¹ & Mario García-Petillo¹

¹Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Avda. E. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. Fone: +(5982)3570491 E-mail: ;

Resumen: En el año 2004 se instaló un lisímetro de compensación de 2 x 2 x 0.80 m con capa freática constante en un monte de durazneros, con el objetivo de estudiar el consumo de agua de ese cultivo en la región sur del Uruguay. Las mediciones se hicieron en las tres primeras temporadas de crecimiento. El consumo en la primera temporada alcanzó valores de 5 mm d⁻¹, equivalente a 56 L pl⁻¹ día⁻¹ en la superficie del lisímetro. En la segunda temporada llegó a 6 mm d⁻¹ (68 L pl⁻¹ día⁻¹), aunque alcanzó valores extremos de más de 7 mm d⁻¹. Cuando el árbol alcanzó su tamaño adulto, el consumo máximo se mantuvo alrededor de los 6 mm d⁻¹, aunque este valor se alcanzó más temprano que en la temporada anterior. Este adelanto se correspondió con un mayor índice de área foliar (IAF). El coeficiente de cultivo (K_c) fue de alrededor de 1,2 en la primera temporada, y de 1,4 en las dos siguientes. Se calcularon los coeficientes de base (K_{cb}) y su valor se ajustó por el modelo tri-segmentado. Su valor fue de 0,91 en la primera temporada, 1,04 en la segunda y 1,20 en la tercera. Se hacen algunas observaciones metodológicas sobre el uso de este lisímetro, proponiéndose incorporar la variación de agua en el suelo a la ecuación de balance de volúmenes y se propone adicionar riego desde la superficie.

Palabras-clave: coeficiente basal de cultivo, coeficiente de cultivo, evapotranspiración, *Prunus persica* L. Batsch, riego

Determination of water use in peach trees with a lysimeter

Abstract: A compensation lysimeter with constant freatic water table of 2 x 2 x 0.80 m was installed in 2004 in a peach grove, in order to study the crop water consumption of the south of Uruguay. Measurements were taken the first three growing seasons. Evapotranspiration at the first season reached 5 mm d⁻¹, equivalent to 56 L pl⁻¹ day⁻¹ in the lysimeter surface. The second season, it went up to 6 mm d⁻¹ (68 L pl⁻¹ day⁻¹), reaching extreme values of 7 mm d⁻¹ and more. When the tree got its adult size, the maximum consumption remained around 6 mm d⁻¹, although this value was reached earlier than the season before. This early behavior came together with higher leaf area index (LAI). The crop coefficient (K_c) was around 1.2 the first season, and 1.4 the following two seasons. Basal crop coefficient (K_{cb}) was calculated and its value, was adjusted by the tri-segmented model. The value was 0.91 the first season, 1.04 the second one, and 1.20 the third season. Some methodological observations are made regarding the lysimeter use. Adding the soil water changes to the mass balance equation is suggested, as well as incorporating irrigation from the surface.

Key words: basal crop coefficient, crop coefficient, evapotranspiration, *Prunus persica* L. Batsch

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la evapotranspiración de los cultivos (ET_c) es esencial para un manejo eficiente del riego ajustando el volumen y la frecuencia del riego a los requerimientos de los cultivos. Un manejo correcto del riego permite apuntar a rendimientos altos, con estabilidad entre años, y a una calidad óptima del producto cosechado, haciendo posible un uso racional del agua y de la energía, minimizando el desperdicio de ambos recursos y la contaminación del medio ambiente. Asimismo este dato es fundamental para un correcto diseño de los sistemas de riego.

Esto es de resaltar cuando se considera lo reportado por García-Petillo et al. (2003), en cuanto a que los productores frutícolas de la zona Sur del país no riegan en cantidad suficiente como para cubrir los requerimientos del cultivo y obtener rendimientos diferenciales en la cantidad y calidad de la producción que justifiquen el costo del riego. Este riego insuficiente es consecuencia de fuentes de menor capacidad a las requeridas y/o equipos subdimensionados, así como del desconocimiento por parte de los productores en lo referente a un correcto manejo del riego.

A pesar de lo relevante del tema, en el Uruguay no existe investigación en el consumo de agua de los cultivos, siendo la excepción un trabajo en citrus para el Sur del país (García Petillo & Castel, 2007).

Existen diversos métodos tanto para medir como para estimar la ET_c . Los lisímetros son dispositivos que contienen un volumen de suelo, aislado hidrológicamente del suelo circundante, en el cual resulta posible controlar y medir los diferentes términos que intervienen en el balance. Dentro de estos, los lisímetros de pesada sirven para medir la ET durante intervalos cortos de tiempo (una hora ó menos). Su sensibilidad puede ser de 0,03 ó 0,05 mm de agua pero con un costo muy alto que lo hace inviable para el Uruguay.

Existen diversos métodos para predecir la ET_c dada la dificultad de obtener mediciones directas y exactas en condiciones reales. Algunos de ellos son válidos, únicamente, para las condiciones climáticas y agronómicas para las cuales fueron desarrollados.

La FAO (Allen et al., 1998), propone un doble paso de estimación, calculando primero la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y considerando luego la especificidad del cultivo a través de un coeficiente de cultivo (K_c).

Los coeficientes de cultivo se pueden ajustar como K_c medios ó como K_c duales, siendo (Wright, 1982; Allen et al., 2005a):

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (1)$$

donde:

K_{cb} - coeficiente base del cultivo

K_e - coeficiente de evaporación del agua del suelo

El K_{cb} es definido como la relación ET_c/ET_o cuando la superficie del suelo está seca, no existiendo evaporación, pero la transpiración se da a la tasa potencial dado que el agua no es limitante para el proceso.

El K_e describe el componente de evaporación de la ET_c que se da en la fracción húmeda y expuesta del suelo, a 0,1-0,2 m de profundidad. Los valores menores de profundidad corresponden a suelos arenosos y los valores mayores a suelos de francos a pesados.

Pereira (2004) y Allen et al. (2005b) presentan criterios para seleccionar el método de cálculo de los coeficientes de cultivo. Proponen que se utilicen los coeficientes culturales de base ($K_{cb} + K_e$) en lugar de los coeficientes culturales medios (K_c) cuando se trata de trabajos con fines de investigación, así como en la conducción del riego en tiempo real con sistemas de alta frecuencia, sobre todo en regiones con precipitaciones frecuentes.

El valor del K_e es máximo luego de un riego o lluvia y decrece a medida que aumenta la cantidad de agua evaporada acumulada, en la profundidad de suelo que interviene en la evaporación. El valor de este coeficiente nunca puede exceder el $K_{c\text{ máx}}$, valor máximo gobernado por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo, limitado a su vez por la fracción de suelo húmeda y expuesta (few).

Los objetivos de este trabajo fueron:

- 4) Medir el consumo de agua de una planta de duraznero durante varios ciclos de crecimiento, desde su implantación hasta su tamaño definitivo.
- 5) Determinar el coeficiente de cultivo (K_c) y el coeficiente de base (K_{cb}) para la zona frutícola Sur del Uruguay.

MATERIAL Y MÉTODOS

A comienzos del 2004 se instaló en el Centro Regional Sur de la Facultad de Agronomía (34° 40' S, 56° 00' W), en Canelones, Uruguay, un lisímetro de

compensación con capa freática constante, inmediatamente después de la implantación de un monte de duraznero (*Prunus persica* L. Batsch) cv. Dixiland, con el que se midió el consumo de agua durante las temporadas 2004-2005, 2005-2006 y 2006-2007. El monte se plantó a 4,5 m entre filas y 2,5 m entre plantas, determinando un marco de plantación de 11,25 m² y una densidad de 889 árboles ha⁻¹.

El lisímetro, instalado dentro del monte, constó de un macetón de PVC de 1 mm de espesor de pared, cuyas dimensiones fueron 2 x 2 x 0,8 m de profundidad, enterrado, asegurando que el mismo quedase nivelado. Este lisímetro de capa freática constante, de estructura simple y bajo costo, fue desarrollado por el Departamento de Agronomía y Gestión del Agroecosistema de la Universidad Pisa y ha sido utilizado principalmente para cultivos hortícolas en invernáculos (Magnani et al., 1990; Bertolacci & Megale, 1991). En este trabajo se le hicieron las modificaciones necesarias en la instalación, para adaptarlo a los intereses de este estudio.

En el fondo del macetón se mantuvo una capa libre de agua de altura constante, que por capilaridad compensó el consumo de agua del árbol de duraznero confinado en la estructura. La altura de la capa se mantuvo en un mismo nivel mediante un dispensador de agua (gotero de 8 Lh⁻¹) con un contador que permitió medir la entrada de agua, mientras que un sistema con flotador cerró el pasaje del agua cada vez que se alcanzó la altura de napa prefijada (12 cm).

Para asegurar el drenaje en el interior del macetón se realizó el rellenado del mismo siguiendo una secuencia granulométrica diferencial desde el fondo hasta la superficie como sigue: 5 cm de pedregullo, 2 cm de arena, 2 cm de una mezcla 75% arena y 25% de suelo franco, 2 cm de 50% arena y 50% suelo franco, 2 cm de 25% arena y 75% suelo franco y el resto hasta la superficie con suelo franco dispuesto en capas de a 2 cm compactadas suavemente con un pisón de madera.

Si bien los lisímetros con rellenos monolíticos representan mejor las condiciones naturales del campo y por lo tanto deben ser preferidos sobre todo en suelos estratificados, los lisímetros de relleno como el utilizado en este trabajo permiten

obtener datos confiables de ETo y consumo de agua de los cultivos que no estén sometidos a condiciones de estrés (Aboukhaled et al., 1986).

Para que el sistema de alimentación funcionase adecuadamente requirió de una cierta carga, para lo que se colocó un tanque elevado cuyo fondo se ubicó a 3 m por encima de la entrada de agua.

El lisímetro contó además con un sistema para evacuar los excesos de agua que pudiesen ocurrir con las lluvias, el cual consistió en un tubo abierto que permitió la salida del agua por encima del nivel de la capa recolectándose en un tanque enterrado cuyo fondo está a 1 m por debajo del fondo del macetón. Este tanque fue vaciado después de cada medida.

En la temporada 2004-2005 se instalaron en el lisímetro dos tensiómetros a 15 y 30 cm de profundidad. En la temporada 2005-2006 se agregó un tercer tensiómetro a 60 cm.

Se determinó la curva de retención del suelo de relleno del lisímetro, utilizando la olla de presión.

Diariamente se registró:

- volumen de agua de entrada al lisímetro con un contador volumétrico;
- precipitaciones ocurridas, con un pluviómetro de 0,20 m de diámetro ubicado a 30 m de la instalación;
- volumen de drenaje con una escala calibrada;
- volumen de entrada de agua al tanque elevado con un contador volumétrico;
- tensión de agua en el suelo con tensiómetros.

La ET_c se calculó por balance de volúmenes mediante la fórmula:

$$ET_c = R + PP - D \pm \Delta Hs \quad (2)$$

Siendo:

ET_c - evapotranspiración real del duraznero

R - riego

PP - precipitación sobre el lisímetro

D - drenaje del lisímetro

ΔH_s - Variación de la humedad del suelo

La metodología utilizada (Magnani et al., 1990; Bertolacci & Megale, 1991) considera que el volumen de suelo del lisímetro siempre está a capacidad de campo (CC) o muy próximo, al comienzo de cada ciclo diario, por lo tanto $\Delta H_s = 0$.

El volumen de la copa se calculó con una frecuencia mensual durante las tres estaciones de crecimiento evaluadas, a partir de medidas de altura, diámetro longitudinal y diámetro transversal.

Con la misma frecuencia se estimó el área total de hojas. Para ello se contó la totalidad de las hojas y se midió el área de una muestra de 100 hojas. Se calculó el Índice de Área Foliar (IAF) dividiendo el área total de hojas entre el marco de plantación, 11,25 m² en este caso. En los mismos momentos se midió interceptación de radiación con un ceptómetro PAR Sunfleck.

A fin de verificar que la planta del lisímetro estuviese en condiciones similares que las otras plantas del monte, se midió el potencial hídrico con cámara de presión, según lo reseñado por Boland et al. (1993) y siguiendo las precauciones de uso del método enumeradas por Hsiao (1990). Asimismo se midió conductancia estomática con un porómetro marca DELTA-T, modelo AP4.

Se calculó la ET_0 con la fórmula Penman-Monteith modificada por FAO (Allen et al., 1998), utilizando los datos climáticos diarios de la Estación Experimental Las Brujas (34°40' S; 56°20' W), ubicada a 15 km del sitio del ensayo.

Se ajustó el coeficiente de cultivo (K_c), como el cociente entre la ET_c medida en el lisímetro y la ET_0 -PM.

Se separó la evaporación directa del suelo (E_s) realizando un balance hídrico de paso diario en los 15 cm superiores de la fracción del suelo húmeda y expuesta del lisímetro (few), siguiendo la metodología de Pereira (2004). Esta metodología demostró un buen desempeño al ser validada con datos observados de campo por Allen et al. (2005b) y Godinho et al. (2007). La fracción húmeda y expuesta se calculó como:

$$f_{ew} = 1 - \left(\frac{As * R_{int}}{Al} \right) \quad (3)$$

Siendo:

As - área del lisímetro sombreada por la copa

R_{int} - fracción de la radiación interceptada por la copa al mediodía

Al - área del lisímetro

En forma complementaria, Goodwin et al. (2006) utilizaron la fracción de la radiación interceptada por la copa, en combinación con fotografías de la copa desde la dirección del sol, para estimar el área efectiva de sombreado, ajustando una relación entre ésta y la transpiración del árbol.

La transpiración directa de la planta se calculó como $T = ET_c - E_s$ (Johnson et al., 2004). Por lo tanto, el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) se calculó como $K_{cb} = (ET_c - E_s) / ET_o$.

Se ajustó la curva del K_{cb} mediante el modelo tri-segmentado, lineal- plateau-lineal (Allen et al., 1998; Ayars et al., 2003).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Consumo

El consumo en la primera temporada (2004-2005), en que la planta tenía sólo un año de instalada, alcanzó valores de 5 mm d^{-1} , equivalente a 56 L para el marco de plantación de $11,25 \text{ m}^2$ (Figura 1).

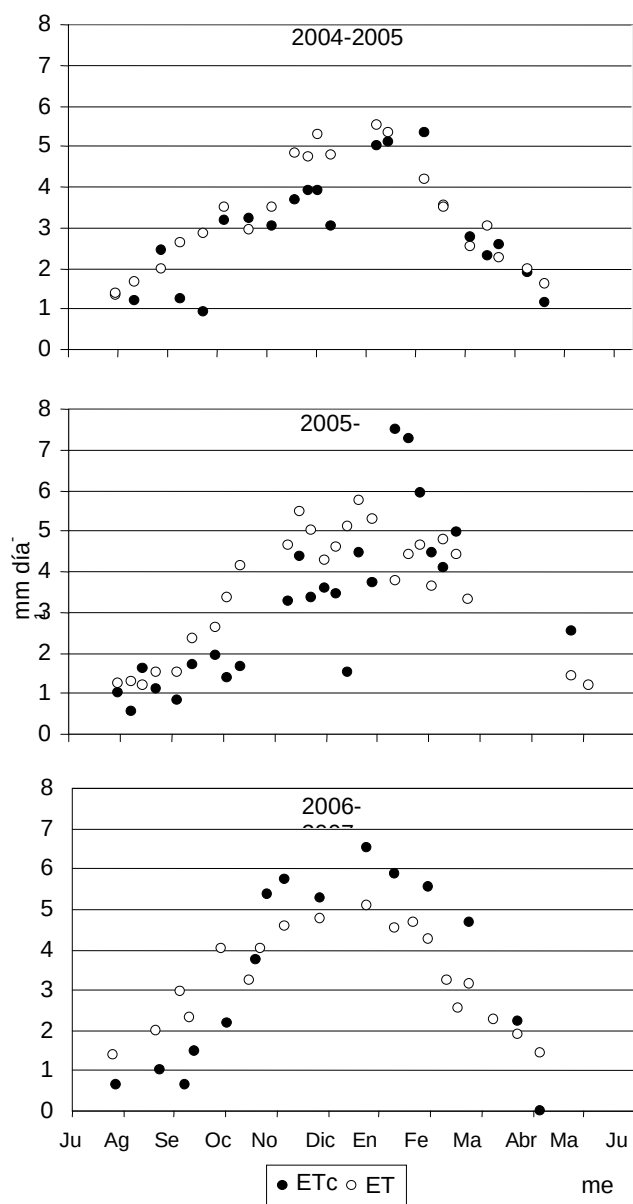


Figura 1. Evapotranspiración del duraznero (ET_c) y Evapotranspiración de referencia (ET_o) en las tres temporadas estudiadas

En la segunda temporada (2005-2006), el consumo llegó a alrededor de 6 mm d^{-1} (68 L), aunque en la segunda quincena de enero alcanzó valores extremos de más de

7 mm d⁻¹, equivalentes a más de 80 L. Estos valores de consumo concuerdan con los reportados por Ayars et al. (2003) para árboles adultos de una variedad tardía de duraznero en California. Sin embargo, Paço et al. (2006) reportaron menores valores de consumo, 3,3 mm d⁻¹, con valores de ETo de 2,5-2,6 mm d⁻¹ y IAF de 1,4, también más bajos que los correspondientes a este trabajo y que explicarían esta diferencia. El alto consumo de ese período posiblemente se debió a un incremento en la evaporación directa desde el suelo como consecuencia de las importantes lluvias ocurridas, 86 mm el día 14 de enero y luego lluvias semanales de entre 10 y 15 mm (Figura 2), cuando el árbol aún no había alcanzado el máximo IAF de la temporada (Figura 3).

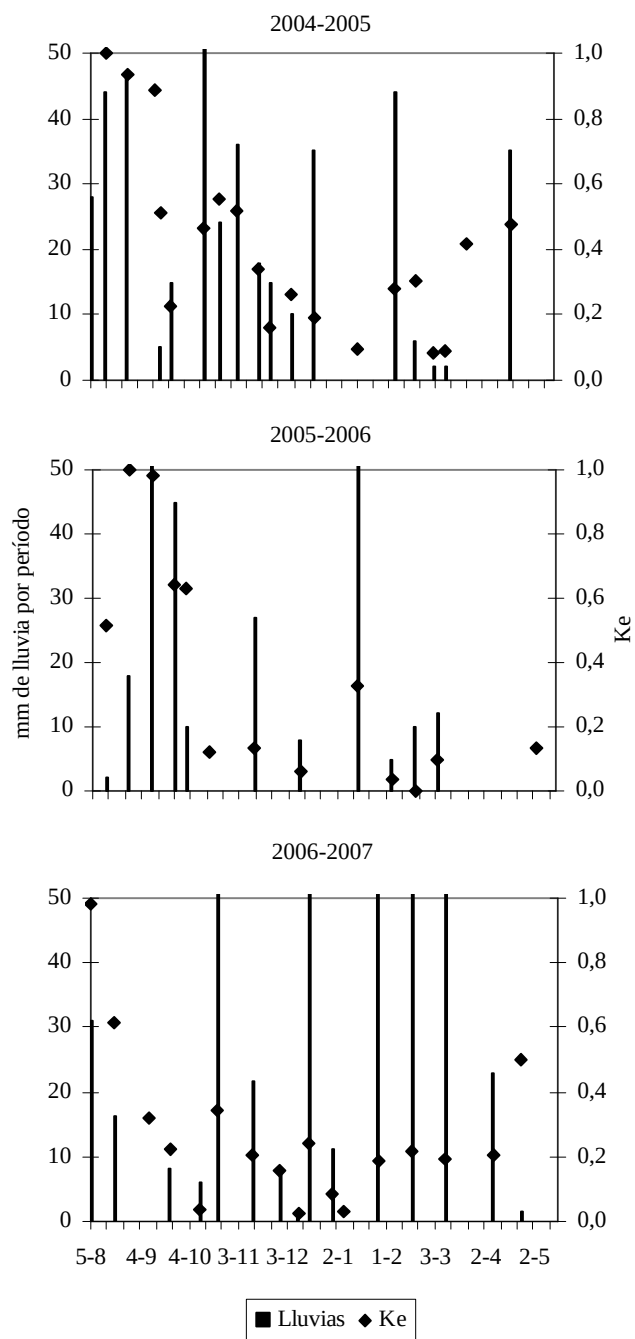


Figura 2. Lluvia acumulada y coeficiente de evaporación (Ke) ajustado por período en las tres temporadas estudiadas

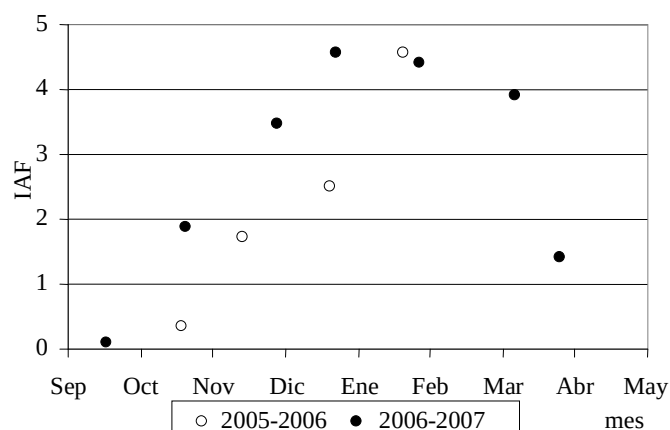


Figura 3. Evolución del Índice de Área Foliar (IAF), referido a todo el marco de plantación (4,5 x 2,5 m), en las temporadas 2005-2006 y 2006-2007

En la tercera temporada (2006-2007), en que la planta ya alcanzó su tamaño adulto, el consumo máximo se mantuvo alrededor de los 6 mm d⁻¹, aunque este valor se alcanzó más temprano que en la temporada anterior (segunda quincena de noviembre).

El valor de 68 L día⁻¹ debería ser el parámetro de diseño de los equipos de riego para este cultivo en esta región.

Si se observa la evolución del área foliar (Figura 3) se ve que en la temporada 2006-2007 a fines de noviembre el IAF era de aproximadamente 3, mientras que en la temporada anterior ese valor de IAF recién se alcanzó a mediados de enero.

Sin embargo, en ambas temporadas, se alcanza el mismo IAF máximo, de aproximadamente 4,6.

Coefficientes de cultivo

En la temporada 2004-2005, cuando la planta tenía sólo un año de edad, los coeficientes de cultivo (K_c) tuvieron un valor aproximadamente constante a lo largo de toda la temporada y no reflejaron las fases de desarrollo del cultivo. En este primer año la mayor parte de la superficie del suelo del lisímetro estuvo expuesta a la radiación solar, por lo que al humedecerse esa superficie ante cada lluvia, los valores de coeficiente de evaporación (K_e) fueron importantes (Figura 2), resultando en valores

altos de K_c , aún en los inicios de la temporada de crecimiento, cuando la planta tenía muy poco desarrollo foliar (Figura 4).

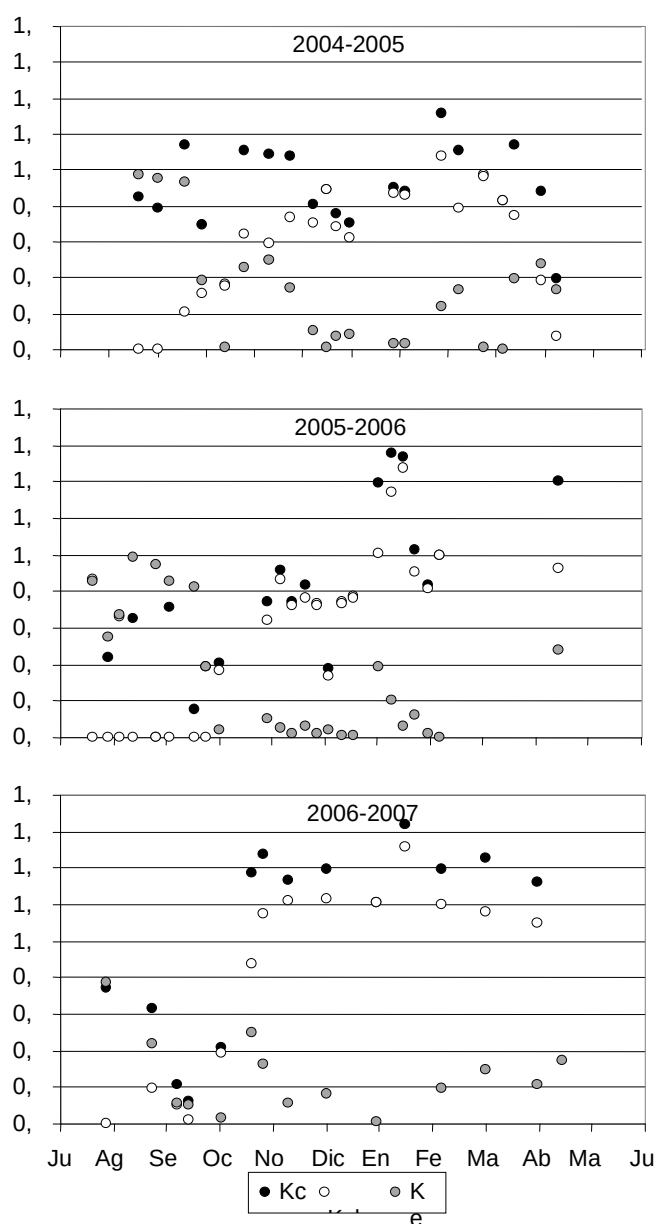


Figura 4. Coeficiente del cultivo (K_c), Coeficiente de base (K_{cb}) y Coeficiente de evaporación (K_e) del duraznero, en las tres temporadas estudiadas

En dicha figura se observa que en la etapa inicial del desarrollo vegetativo del cultivo existen valores de K_e mayores que los valores de K_c . Esto, que es un error del punto de vista conceptual, ya que $K_c = K_e + K_{cb}$, se debe al método usado para determinar los coeficientes: el K_c fue medido directamente en el lisímetro y el K_e fue estimado mediante el cálculo teórico ya detallado.

A medida que el follaje de la planta se fue desarrollando, los valores de K_e fueron decreciendo, para volver a aumentar hacia el final del ciclo del cultivo, coincidiendo con la senescencia del follaje (Figura 2).

En la segunda temporada de evaluación, se repitieron los altos valores de K_e al inicio del ciclo del cultivo, que luego se mantuvieron bajos en el resto del ciclo (Figura 2). En la segunda quincena de enero se observaron valores extremadamente altos de K_c (1,55), que coinciden con los valores extremos de consumo mencionados en el apartado anterior.

En la tercera temporada, se mantuvo un valor de K_c alrededor de 1,4 desde noviembre hasta marzo.

Los K_{cb} ajustados por el modelo tri-segmentado se presentan en la Figura 5.

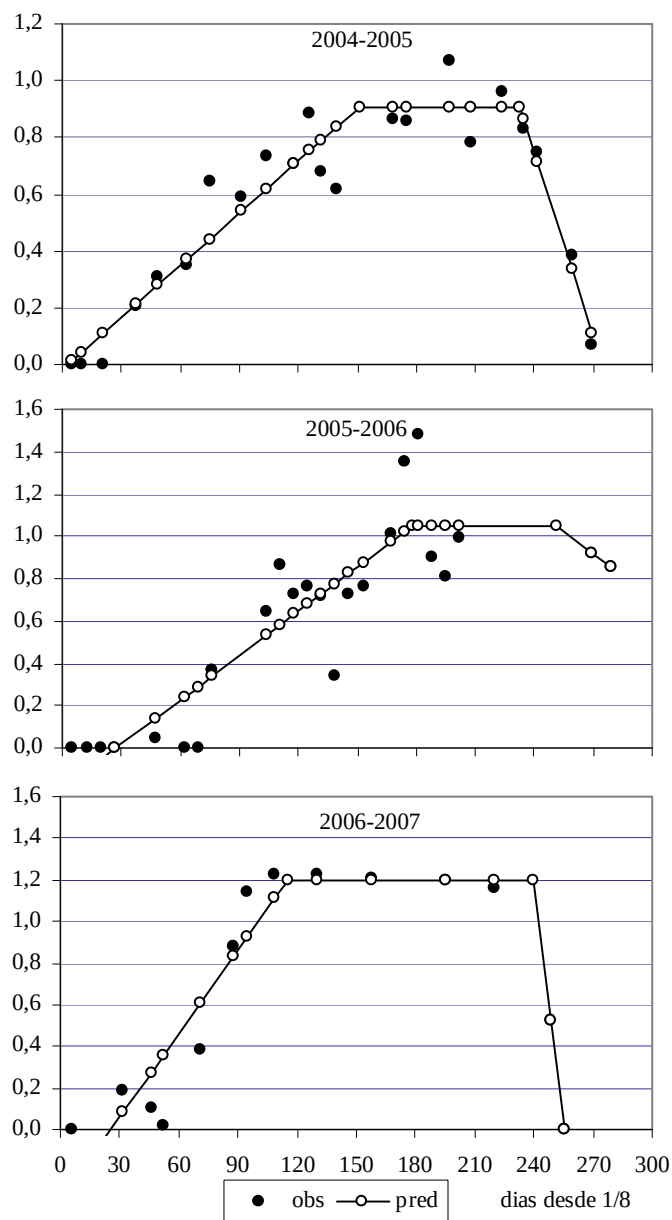


Figura 5. Coeficientes de base (K_{cb}) observados y curva de ajuste usando el modelo tri-segmentado lineal – plateau – lineal, en las tres temporadas estudiadas

Los máximos valores fueron 0,91; 1,04 y 1,20 para las temporadas 2004-2005 a 2006-2007, respectivamente. Esos valores se alcanzaron el día 30 de diciembre; 26 de enero y 24 de noviembre.

El aumento del valor del K_{cb} de la primera a la segunda temporada se debió al incremento del tamaño de la planta. Sin embargo, a pesar que en la segunda y la tercera temporada el índice de área foliar (IAF) máximo alcanzado fue similar (Figura 3), el K_{cb} fue mayor en la temporada 2006-2007. Los coeficientes de cultivo son afectados por las condiciones climáticas, aumentando su valor en la medida en que es mayor la velocidad del viento y menor la humedad relativa mínima (Allen et al., 1998). En este sentido, Johnson et al. (2004) encontraron que una gran parte de la variabilidad del K_{cb} de duraznero era explicada por la variación del déficit de presión de vapor al mediodía. En la última temporada, se registraron valores más extremos tanto en la humedad relativa como en la velocidad del viento (datos no presentados), que explicarían este mayor K_{cb} .

En la temporada 2005-2006 el K_{cb} máximo se alcanzó, de acuerdo al modelo, el día 26 de enero, mientras que en la temporada siguiente se alcanzó el 24 de noviembre. Este adelanto concuerda en esta última temporada que al 24 de noviembre ya se había alcanzado un IAF de aproximadamente 3 (Figura 3), mientras que en la anterior ese índice se alcanzó recién a mediados de enero.

Estos resultados sugieren que habría un valor umbral del IAF, por encima del cual no seguiría aumentando el K_{cb} . Este valor sería aproximadamente 3, pero para ajustar con más precisión la relación K_{cb} / IAF, se deberá tener más información experimental.

Ajustes metodológicos

A los efectos de facilitar la realización de trabajos similares en el futuro, también se presentan como resultados algunos ajustes metodológicos surgidos de la práctica de estos tres años.

a. En los trabajos publicados por la Universidad de Pisa en los cuales se utiliza el mismo lisímetro que en esta investigación, se considera que el volumen de suelo siempre está a capacidad de campo (CC) o muy próxima a este contenido de agua, al comienzo de cada ciclo diario. Esta consideración resulta válida para los trabajos realizados, en su

mayoría con cultivos hortícolas con profundidades de macetón de 0,40 – 0,50 m (Magnani et al., 1990; Bertolacci & Megale, 1991). Para esta investigación, por tratarse de árboles frutales, se utilizó un macetón mayor, con una profundidad total de 0,80 m. En el primer año de desarrollo del árbol, se mantuvo el supuesto anterior. Sin embargo, en años sucesivos, con el desarrollo de la planta se constató que existían variaciones en el contenido de humedad a las diferentes profundidades del suelo. Debido a esto se debió incorporar el término de variación de la humedad en el balance para el cálculo de la ET_c . A estos efectos se recurrió a las lecturas de los tensiómetros ubicados a 15, 30 y 60 cm de profundidad y mediante la curva de retención se pudo contabilizar la ΔH_s .

b. En la última temporada, con la planta totalmente desarrollada, en los períodos de alta demanda atmosférica y con escaso o nulo aporte de las lluvias, el aporte de agua del lisímetro, por ascenso capilar de la napa, resultó insuficiente para satisfacer el consumo de la planta. Esto se evidenció en las mediciones de potencial hídrico y de conductancia estomática. Para solucionarlo, se aplicaron volúmenes medidos de agua desde la superficie del lisímetro.

c. La ecuación (2) para estimar la ET_c se puede calcular diariamente. Sin embargo, los resultados así obtenidos resultaron algo erráticos, debido fundamentalmente a los procesos de redistribución de agua en el perfil, que se producen con retardo respecto a los aportes, principalmente lluvias. Por el contrario, al tomar períodos de cinco días o más, los resultados obtenidos fueron coherentes.

CONCLUSIONES

1. El consumo de una planta de duraznero en la zona sur del Uruguay es de 5 mm día⁻¹ en su primer año y de 6 mm día⁻¹ en el segundo y tercero, equivalentes a 56 y 68 L día⁻¹, respectivamente.
2. Los valores de K_{cb} máximo obtenidos en las tres temporadas fueron superiores a los propuestos por FAO.

3. El máximo valor de K_{cb} se alcanza cuando el Índice de Área Foliar llega a un valor de 3, y luego se mantiene constante aunque el IAF continúa aumentando.
4. En lisímetros de este tipo, y con este tamaño del macetón, se debe incluir el término ΔH_s en la ecuación de balance hídrico.
5. En condiciones de alta demanda atmosférica y la planta de tamaño adulto, se hace necesario regar para complementar el aporte por ascenso capilar de la napa.
6. Este método permite el ajuste del K_{cb} para intervalos de tiempo mayores a cinco días.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Agr. Jorge Franco, del Departamento de Estadística y Cómputos de la Facultad de Agronomía, por su apoyo en el ajuste del modelo tri-segmentado.

Al Ing. Pier Gino Megale y al Laboratorio Nazionale dell Irrigazione. P. Celestre de la Universidad de Pisa, por la donación del microlisímetro, y su generoso y constante apoyo.

LITERATURA CITADA

- Aboukhaled, A. A.; Alfaro, A.; Smith, M. Los lisímetros. Roma: FAO, 1986. 68p. Paper 39.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. Paper 56.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Smith, M.; Raes, D.; Wright, J. L. FAO-56 Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.131, p.2-13, 2005a.
- Allen, R. G.; Clemmens, A. J.; Burt, C. M.; Solomon, K.; O'Halloran, T. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.131, p.24-36, 2005b.

- Ayars J. E.; Johnson R. S.; Phene C. J.; Trout T.; Clark D. A.; Mead R. Water use by drip-irrigated late-season peaches. *Irrigation Science*, v.22, p.187-194, 2003.
- Bertolacci M; Megale P. G. Automazione degli impianti irrigui con microlisimetri. *Colture Protette*, v.6, p.CCV-CCVIII, 1991.
- Boland, A. M.; Mitchel, P. D.; Jerie, P. H.; Goodwin, I. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach. *Journal of Horticultural Science*, v.68, n.2, p.261-274, 1993.
- García-Petillo, M.; Puppo, L.; Romero, G.; Baccino, G. Respuesta al riego de duraznero, manzano y peral en montes comerciales. *Revista Agrociencia*, v.VII, n.2, p.49-61, 2003.
- García-Petillo, M.; Castel, J. R. Water balance and crop coefficient (K_c) estimation of a citrus orchard in Uruguay. *Spanish Journal of Agricultural Research*, v.5, n.2, p.232-243, 2007.
- Godinho, P.; Sequeira, B.; Paredes, P.; Pereira L. S. Simulação das necessidades de água das culturas pela metodologia dos coeficientes culturais duais. Modelo SIMDualKc. In: Taller Modernización de riegos y usos de tecnologías de información. Redes de Riegos de CYTED y PROCISUR. La Paz. Bolivia, 2007. CD Rom.
- Goodwin I.; Whitfield D. M.; Connor D. J. Effects of tree size on water use of peach (*Prunus persica* L. Batsch). *Irrigation Science*, v.24, p.59-68, 2006.
- Hsiao, T. C. Measurements of plant water status. In: Stewart and Nielsen (Ed.) *Irrigation of agricultural crops*, Madison, p.244-279, n.30, 1990. Agronomy Monograph.
- Johnson, R. S.; Ayars, J.; Hsiao, T. Improving a model for predicting peach tree evapotranspiration. *ISHS Acta Horticulturae*, International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, 4, 2004, Davis. n.664, p.341-346, 2004.
- Magnani, G.; Bertolacci, M.; Oggiano, N.; Megale, P.; Cecarelli, E. Ottimizzazione della tecnica irriga in tunnel coperti con diversi materiali plastici rigidi (PMMA, PVC e PRFV). *Colture Protette*, v.7, p.XXV-XXXII, 1990.

- Paço, T. A.; Ferreira, M.; Conceição, N. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. *Agricultural Water Management*, v. 85, p.305-313, 2006.
- Pereira, L. S. *Necessidades de água e métodos de rega*. Publicações Europa-América Lda. Mem Martins, Portugal, 2004. 312p.
- Wright, J. L. New Evapotranspiration crop coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage*, ASCE, v.108, p.57-54, 1982.

**Estimación de los coeficientes de tanque “A” para calcular la evapotranspiración
del cultivo de referencia en la zona sur del Uruguay**

Puppo, L.¹; García-Petillo, M.¹

¹Grupo Disciplinario de Ingeniería Agrícola, Unidad de Hidrología - Departamento de Suelos y Aguas - Facultad de Agronomía - Avda. E. Garzón 780 - 12900 Montevideo - Uruguay.

Correo electrónico: lpuppo@fagro.edu.uy

Coeficientes de tanque “A” para la zona sur del Uruguay

Estimación de los coeficientes de tanque “A” para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia en la zona sur del Uruguay

Resumen

El objetivo del trabajo fue estimar localmente los coeficientes de tanque (K_p) para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia según Penman-Monteith modificado por FAO (E_{To} PM-FAO). Se utilizó una serie de datos climáticos correspondiente a 34 años (1975-2008) de la Estación Experimental INIA Las Brujas (EELB), representativa de la zona sur del país. Los años pares se usaron para calibrar un K_p para cada mes y para cada año (K_p -calibrado) y los años impares se usaron para su validación. Se probaron cuatro métodos de estimación de la E_{To} , mediante el producto de la evaporación mensual (E_o) por distintos coeficientes K_p ($E_{To} = E_o \times K_p$). Los coeficientes K_p evaluados fueron: K_p -FAO; K_p -Corsi; K_p -calibrado y $\overline{K_p}$ calculado como el promedio de los K_p -calibrados obtenidos en el período octubre-abril. Para evaluar el ajuste de los cuatro métodos se hizo la comparación de los valores de E_{To} estimados a partir del valor de E_o mensual de los años impares y sus respectivos K_p con el método patrón (E_{To} PM-FAO) para los mismos años, mediante la prueba t de Student para datos apareados ($\alpha = 0,05$). El uso del K_p calibrado dio la mejor estimación de la E_{To} PM-FAO. El $\overline{K_p}$ obtenido fue 0,71 y su utilización durante toda la estación de riego permitió una buena estimación para la zona sur del país. El empleo de este coeficiente único para corregir el dato de evaporación de tanque es una herramienta

simple, fácil de adoptar por los productores y constituye una buena estimación de la ETo.

Palabras clave: Penman-Monteith, necesidades de riego, evaporación, programación de riego

Estimated class "A" pan coefficients to calculate the reference crop evapotranspiration in the south of Uruguay

Summary

The objective was to estimate the local pan coefficients (K_p) to calculate the reference crop evapotranspiration according to Penman-Monteith modified by FAO (FAO-PM ETo). The climatic data used corresponds to 34 years (1975-2008) and was taken from the Estación Experimental INIA Las Brujas (EELB), which is representative of the south of the country. Even years were used to calibrate a K_p for each month and for each year (K_p -calibrated) and the odd years were used for validation. Four alternative methods were tested to estimate ETo, using the following equation: $ETo = E_o \times K_p$. Where E_o corresponds to the monthly pan evaporation. The evaluated K_p coefficients were: K_p -FAO; K_p -Corsi; K_p -calibrated and $\overline{K_p}$ calculated as the average of the K_p calibrated obtained in the period October-April. To evaluate the adjustment of the four methods, the values of ETo estimated from the monthly E_o values corresponding to odd years and its K_p were compared with the standard method (FAO-PM ETo) for the same years, by

the t-Student test for matched up data ($\alpha = 0.05$). The use of calibrated K_p gave the best estimation of FAO-PM ETo . The $\overline{K_p}$ was 0.71 and its use during the irrigation season allowed a good estimation for the south of the country. The use of this unique coefficient to correct the pan evaporation data is a simple and easy tool to adopt by the producers, and constitutes a good estimation of the ETo .

Key words: Penman-Monteith, irrigation requirements, evaporation, irrigation scheduling

Introducción

Un método comúnmente utilizado para predecir la evapotranspiración de los cultivos (E_{Tc}) es el propuesto por Allen *et al.* (1998) el cual involucra un doble paso de estimación: primeramente se calcula la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) y luego se multiplica por el coeficiente de cultivo (K_c).

Allen *et al.* (1998) sugieren el uso de dos métodos de estimación para la ETo : Penman-Monteith modificado por FAO (PM-FAO) y el método del tanque evaporímetro clase “A”.

Como resultado de una Consulta de Expertos realizada en mayo de 1990, el método PM-FAO es ahora considerado el método estándar para la definición y cálculo de la ETo . (Allen *et al.*, 1998) Para aplicar la ecuación de PM-FAO se necesitan las siguientes variables climáticas medidas: temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$), temperatura mínima ($T_{m\acute{i}n}$), humedad relativa (HR %), velocidad del viento a 2 m de altura (u_2) y radiación neta (R_n)

(ó en su defecto radiación solar incidente, R_s , ó número de horas diarias de insolación, n). Este método ha demostrado predecir correctamente la ETo en un amplio rango de localidades y climas, con tiempos cortos de resolución.

En contraste el método del tanque evaporímetro clase “A” tiene como ventaja su simplicidad, dado que permite medir los efectos integrados del clima en función de una única medida: la evaporación de una superficie libre de agua (E_o). Asimismo su costo de instalación y mantenimiento es bajo. Esto ha determinado que sea un método de uso frecuente en proyectos y programación de riego (Conceição, 2002; Stanhill, 2002; Sentelhas y Folegatti, 2003). Para la instalación y manejo hay que respetar las especificaciones descriptas por Strangeways (2001).

La evapotranspiración de un cultivo se produce en respuesta a las mismas variables climáticas que la evaporación desde la superficie del tanque pero existen una serie de factores que tienden a producir diferencias y éstas quedan corregidas al multiplicar la evaporación del tanque “A” por el coeficiente de tanque (K_p).

Allen *et al.* (1998) sugieren la utilización de K_p obtenidos empíricamente, a través de una regresión derivada de la tabla de Doorenbos y Pruitt (1977). Su cálculo necesita de los promedios mensuales de la HR y de la u_2 , así como de la distancia y características del medio circundante del tanque. Sin embargo estos mismos autores enfatizan en la recomendación de calibrar localmente los K_p en función de la ETo medida con un lisímetro o calculada por el método PM-FAO.

Corsi (1994) calibró los K_p para la Estación Experimental INIA Las Brujas (EELB), mediante la relación de la ETo calculada por el método de Penman con E_o . Estos K_p son

los utilizados hasta el momento para corregir los datos de evaporación de tanque “A” de esta estación y para estimar la demanda de riego en la zona horti-frutícola del sur del país. Dado que el método de Penman puede sobreestimar la ETo en determinadas condiciones de demanda atmosférica (Allen *et al.*, 1998) en el presente trabajo se propone calibrar localmente los Kp a partir de la estimación de la ETo realizada por el método PM-FAO. con el fin de conseguir mayor exactitud en la estimación de este parámetro.

Metodología

Se utilizó una serie de datos climáticos correspondiente a 34 años (1975-2008) de la Estación Experimental INIA Las Brujas (EELB) ubicada en las coordenadas: latitud 34° 40' S, longitud 56° 20' W y altitud 32 m s.n.m., en Rincón del Colorado, departamento de Canelones. La información climática fue proporcionada por una estación meteorológica, emplazada en un predio horti-frutícola de 446 ha.

La ETo se calculó con la ecuación de PM-FAO (Allen *et al.*, 1998) a partir de los valores promedios mensuales de las variables requeridas por la fórmula.

Su fórmula es la siguiente:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

(1)

Donde:

ET_o - Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm mes^{-1})

R_n - radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{mes}^{-1}$)

G - calor sensible desde la superficie al interior del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{mes}^{-1}$)

T - temperatura media mensual medida a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$)

u_2 - velocidad del viento media mensual medida a 2 m de altura (m s^{-1})

e_s - presión de vapor a saturación (KPa)

e_a - presión de vapor real del aire (KPa)

$e_s - e_a$ - déficit de presión de vapor (KPa)

Δ - pendiente de la curva T- Presión de vapor a saturación ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ - cte psicrométrica del aire ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

La radiación solar incidente fue estimada según la relación que indican Allen *et al.* (1998) a partir del número de horas diarias de insolación.

De la serie de 34 años, se usaron 17 (años pares) para calibrar para cada mes y para cada año un coeficiente de tanque (K_p -calibrado) calculado como:

$$K_p = \frac{ET_o}{E_o}$$

(2)

Donde:

ET_o - Evapotranspiración del cultivo de referencia calculada con la ecuación (1) (mm mes^{-1})

E_o - Evaporación del tanque (mm mes^{-1})

Los años impares de la serie se usaron para validar la ETo estimada al utilizar dichos coeficientes.

Dado que en la zona de estudio el riego se utiliza casi exclusivamente entre octubre y abril, se promedió un único Kp para este período ($\overline{Kp}$).

Se calculó el Kp-FAO (Allen *et al.*, 1998), para cada mes y para cada año, con la siguiente ecuación:

$$Kp = 0.108 - 0.0286u_2 + 0.0422\ln(FET) + 0.1434\ln(HRmedia) - 0.000631[\ln(FET)]^2 \ln(HRmedia) \quad (3)$$

Donde:

FET - distancia de la cubierta verde a barlovento (m)

HR media - humedad relativa media mensual (%)

u_2 - velocidad media mensual del viento (ms^{-1})

La distancia circundante al tanque utilizada en la ecuación (3) se fijó en 1000 m, dada la ubicación de la estación meteorológica en un predio horti-frutícola de extensa superficie.

Esta es la máxima distancia prevista para la estimación del Kp tanto en el ajuste de la regresión de Allen *et al.* (1998) como en la tabla de Doorenbos y Pruitt (1977).

Se utilizaron los Kp-Corsi (Corsi, 1994) que se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Coeficientes de tanque calibrados por Corsi para la Estación Experimental las Brujas.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
0,7	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7

Se calculó la ETo por el método del tanque mediante el producto de la Eo mensual de los años impares por los coeficientes: Kp-FAO; Kp-Corsi; Kp-calibrado y $\overline{Kp}$ calculado como el promedio de los Kp-calibrados obtenidos en el período octubre-abril, a los que se nombró método 1, método 2, método 3 y método 4 respectivamente.

Para evaluar el ajuste de los métodos propuestos se hizo la comparación de los valores de ETo obtenidos por los mismos a partir del valor de Eo mensual de los años impares y sus respectivos Kp con el método patrón (ETo PM-FAO) para los mismos años, mediante la prueba t de Student para datos apareados ($\alpha=0,05$).

Se hizo la regresión entre la ETo estimada por el método 4 y la calculada por el método patrón (ETo PM-FAO) y se graficaron los errores relativos.

Resultados y Discusión

Los Kp-calibrados para la EELB (Cuadro 2), utilizados para la estimación de la ETo por el método 3, muestran una marcada estacionalidad, con valores más bajos en el período de mayo a setiembre.

Cuadro 2. Coeficientes de tanque (Kp, calibrados) para la Estación Experimental Las Brujas.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
0,71	0,72	0,71	0,73	0,65	0,62	0,58	0,63	0,65	0,68	0,72	0,71

Dado que en el período entre octubre y abril los coeficientes calibrados presentaron diferencias menores al 5 % respecto a su media (Cuadro 2), se promedió un único coeficiente para esta etapa ($\overline{Kp}$), su valor fue 0,71, el que fue utilizado para la

estimación de la ETo por el método 4. Este valor coincide con el coeficiente único calibrado por Sentelhas y Folegatti (2003) para el sur de Brasil. El coeficiente calibrado por estos investigadores fue determinado mediante la relación de la ETo medida en lisímetro con la Eo.

Los cuatro métodos evaluados tuvieron diferente desempeño como estimadores de la ETo PM-FAO.

El método 1 sobrestimó la ETo entre un 13 % y 45 %, en todos los meses del año (Cuadro 3). Sentelhas y Folegatti (2003) también reportaron una sobrestimación, pero sólo del 4 al 12 %, al utilizar el mismo método en la zona de San Pablo, Brasil. López y Dennett (2005) también encontraron que el método sobreestimó la ETo. Estos últimos autores utilizaron el Kp tabulado por Doorenbos y Pruitt (1977), por esta razón parte de la inexactitud del método la atribuyeron al amplio rango previsto en las variables tabuladas. El método 1 evaluado en el presente trabajo es el propuesto por Allen *et al.* (1998).

Cuadro 3. Comparación de medias (t de Student para datos apareados) de la ETo PM-FAO con la ETo estimada por el método alternativo.

Mes	ETo PM-FAO mm d ⁻¹	Diferencias de medias (†)				p t< T (‡)			
		mét. 1	mét. 2	mét. 3	mét. 4	mét. 1	mét. 2	mét. 3	mét. 4
Ene	5,42	0,96	0,08	0,16	0,16	<0,0001	n.s.	n.s.	n.s.
Feb	4,52	0,59	0,42	-0,07	-0,13	0,0004	0,0056	n.s.	n.s.
Mar	3,48	0,52	-0,13	-0,08	-0,08	<0,0001	0,04448	n.s.	n.s.
Abr	2,28	0,62	-0,22	0,23	0,16	<0,0001	0,0078	0,0136	n.s.
May	1,45	0,28	-0,17	-0,07		0,0161	0,0252	n.s.	
Jun	0,99	0,37	-0,02	0,01		<0,0001	n.s.	n.s.	
Jul	1,00	0,45	0,03	0,002		<0,0001	n.s.	n.s.	
Ago	1,47	0,42	-0,12	-0,05		<0,0001	0,0143	n.s.	
Set	2,20	0,51	0,11	-0,06		<0,0001	n.s.	n.s.	
Oct	3,14	0,62	0,06	-0,04	0,10	<0,0001	n.s.	n.s.	n.s.
Nov	4,21	0,70	0,59	0,12	0,05	<0,0001	<0,0001	n.s.	n.s.
Dic	5,08	0,97	0,13	0,20	0,20	<0,0001	n.s.	n.s.	n.s.

† Media método alternativo - Media PM-FAO

‡ Se consideran diferencias significativas valores de p<0,05, n.s. no significativo

Cuando se analizó el desempeño del método 1 en el período de riego, octubre-abril, la sobrestimación de la ETo resultó del 18 % en promedio. Esto significaría una sobrestimación en la ETc de 1660 m³ por cada hectárea de cultivo, si se considera un cultivo horti-frutícola hipotético con Kc máximo igual a 1,1. Esta sobrestimación de los requerimientos hídricos alcanzaría los 30 millones de m³ si se tienen en cuenta las más de 18000 ha de producción horti-frutícola en la zona sur del país (DIEA-MGAP, 2006). Los meses con mayor valor de ETo (Cuadro 3) diciembre y enero resultaron en una sobrestimación del parámetro del 19 y 18 %, respectivamente. Dado que para la mayoría de los cultivos de la zona el consumo máximo se da en estos 2 meses, los equipos de riego resultarían sobredimensionados en ese mismo porcentaje.

El método 2 no fue un buen estimador del método patrón en la mitad de los meses del año. La ETo resultó sobrestimada en los meses de febrero y noviembre por un 9 y 14 %, respectivamente. Mientras que en los meses de marzo, abril, mayo y agosto fue subestimada entre un 4 y 12 % (Cuadro 3). Si se tiene en cuenta que estos meses son de moderada a baja demanda atmosférica, los resultados no coinciden con Allen *et al.* (1998) quienes expresaron que el método de Penman, utilizado para calibrar los Kp-Corsi, frecuentemente sobrestima la ETo en condiciones de baja demanda atmosférica. El mejor desempeño del método 2 en comparación al método 1 (Cuadro 3) se puede explicar porque los Kp-Corsi fueron calibrados localmente y lograron describir en forma más exacta la influencia de las características locales del clima sobre la ETo. Dado que este método es un buen estimador de la ETo en los meses de máximo consumo (diciembre y enero), su uso no produciría errores en el diseño de los equipos, pero el riego aplicado sería excesivo en los meses de noviembre y febrero.

El método 3 fue un buen estimador del método patrón como era de esperar dado que los Kp-calibrados utilizados para la estimación de este método surgen de la ecuación (2) con la ETo PM-FAO calculada a partir de una amplia serie climática local. Solo en el mes de abril existió diferencia estadísticamente significativa, con una sobrestimación de la ETo de un 10 % (Cuadro 3).

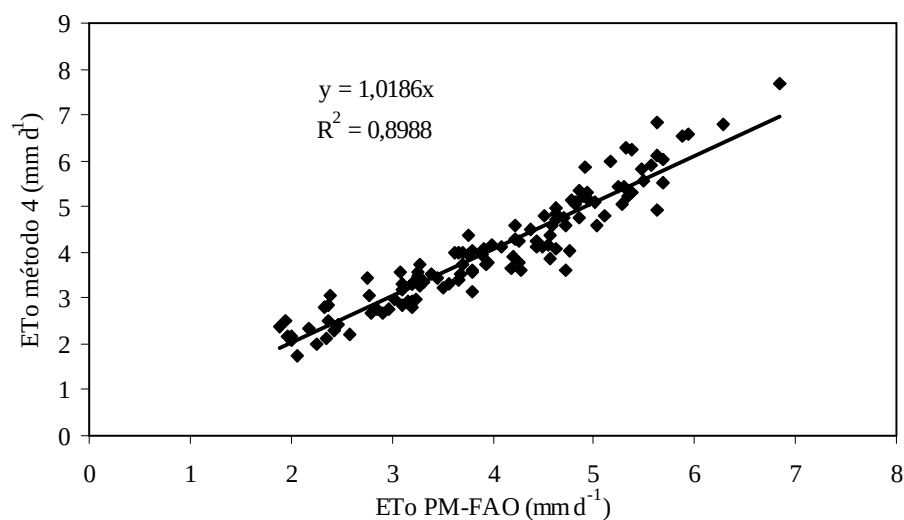


Figura 1. Relación entre la ETo estimada con el método 4 y la ETo PM-FAO.

La relación de la ETo estimada a partir del método 4 (con $\overline{Kp}$) con la ETo PM-FAO (Figura 1) muestra una leve sobrestimación del método para los valores altos de ETo. Sin embargo cuando se graficaron los errores relativos en función de la ETo PM-FAO este sesgo no se apreció (Figura 2).

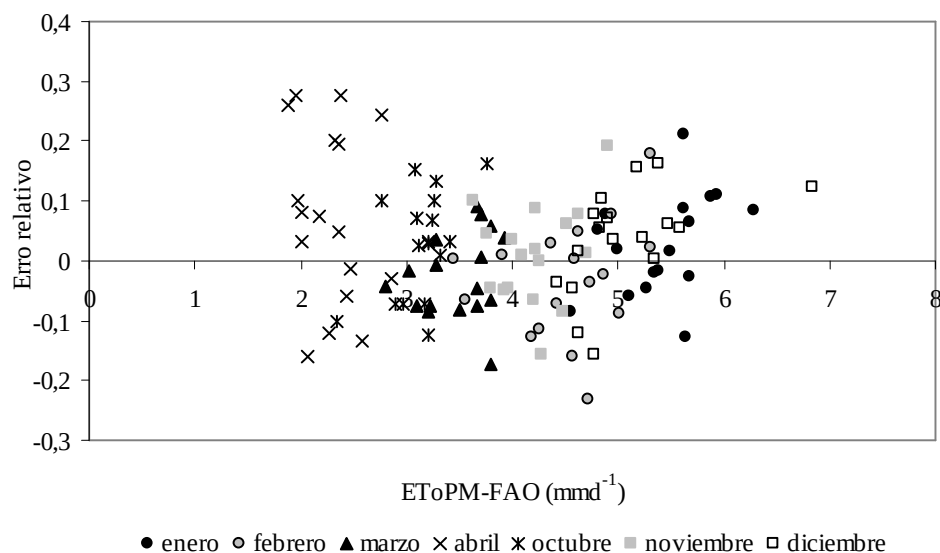


Figura 2. Errores relativos del método 4 respecto a la ETo PM-FAO para el período octubre- abril.

Conclusiones

El uso de un coeficiente de tanque ($\overline{Kp}$) único (0,71) durante toda la estación de riego tuvo un buen comportamiento en la estimación de la ETo PM-FAO para la zona sur del país.

El empleo de este coeficiente único para corregir el dato de evaporación de tanque es una herramienta simple, fácil de adoptar por los productores y constituye una buena estimación de la ETo.

Este valor deberá calibrarse para otras zonas del país.

Agradecimientos

Al Ing. Agr. Andrés Beretta por su invaluable y desinteresado apoyo en el análisis estadístico de los datos.

Bibliografía

- Allen, R.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper 56, Rome.
- Conceição, M. A. F. 2002. Reference evapotranspiration based on Class A pan evaporation. *Scientia Agricola* 59 (3): 417-420.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje Tomo 24 (4ª edición), Roma.
- Corsi, W. (1994). Programación del riego con informes de evaporación. En: Manejo de la información agroclimática para apoyo a la toma de decisiones en riego. Serie de actividades de difusión. INIA. Las Brujas N° 26: 1-16.
- López, J.; Dennett, M. 2005. Comparación de dos métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) en una zona semárida de Venezuela. *Bioagro* 17(1): 41-46.
- Sentelhas, P.; Folegatti, M. 2003. Class A pan coefficients (K_p) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_o). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 7(1): 111-115.

Stanhill, G. 2002. Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements? *Agricultural and Forest Meteorology* 112: 233-236.

Strangeways, I. 2001. Back to basics: the “metenclosure”. Part 7. Evaporation. *Weather* 56: 419-427.

Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. DIEA. Encuesta frutícola N° 254. 2006.

Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. DIEA. Encuesta hortícola sur y litoral norte N° 263. 2006.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN GENERAL

Los valores de ET_c , K_c y K_{cb} se presentan en el artículo científico “Determinación del consumo de agua del duraznero por lisimetría”, referidos a la superficie del lisímetro.

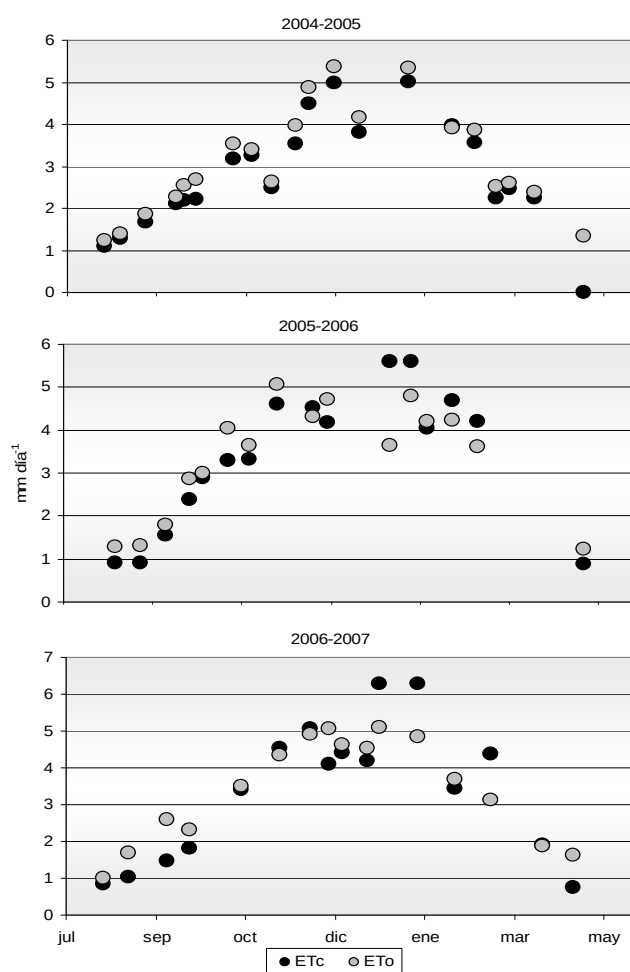


Figura 1. Evapotranspiración del duraznero ajustada al marco de plantación 2,5 x 4,5, con entrefila empastada (ET_c aj) y evapotranspiración de referencia (E_{To}) en las tres temporadas evaluadas.

Para que estos resultados sean comparables a los presentados en la mayoría de los trabajos de investigación se les realizó el ajuste descrito en la sección 7.5 del ANEXO.

Los valores de consumo máximos alcanzados por el cultivo de duraznero (Figura 1), $6,3 \text{ mm d}^{-1}$, son ligeramente superiores a los reportados por Bryla *et al.* (2003), quienes reportaron un consumo máximo de $5,6 \text{ mm d}^{-1}$ en el tercer año luego de la plantación, para el centro de California. Ayars *et al.* (2003) reportaron valores de consumo mayores, 7 mm d^{-1} para árboles adultos, en la misma zona de California. Sin embargo, Paço *et al.* (2006) reportaron valores de consumo menores, $3,3 \text{ mm d}^{-1}$, para la zona centro de Portugal, con valores de ETo de $2,5\text{-}2,6 \text{ mm d}^{-1}$ y IAF 1,4, también más bajos que los correspondientes a este trabajo y que explicarían esta diferencia. Cuando se comparan valores de consumo es fundamental considerar a qué superficie están referidos, cuál es la demanda atmosférica (ETo) y cuál es el tamaño de los árboles, entre otros.

En la segunda temporada el consumo máximo, $5,6 \text{ mm d}^{-1}$, se registró en la segunda quincena de enero. Durante este período existió un incremento en la evaporación directa desde el suelo como consecuencia de las importantes lluvias ocurridas, 86 mm el día 14 de enero y luego lluvias semanales de entre 10 y 15 mm (Figura 2, página 33), en momentos en que el árbol aún no había alcanzado el máximo IAF de la temporada (Figura 3, página 34). Castel (2000) reportó que la evaporación directa en un monte de citrus, representó entre el 39 y el 16 % de la ETc anual, el mayor valor corresponde a etapas previas a que los árboles alcanzaran el tamaño adulto, con valores sensiblemente mayores, 50 % de la ETc, para los meses con lluvias frecuentes y abundantes. En la Figura 2, página 33, el eje correspondiente a la magnitud de las lluvias llega hasta los 50 mm y no aparece el detalle de las lluvias que superan este valor, sin embargo su magnitud fue considerada en el procedimiento de cálculo.

En la tercera temporada (2006-2007), en que el árbol ya adquirió su tamaño adulto, el consumo máximo, $6,3 \text{ mm d}^{-1}$ se alcanzó más temprano que en la temporada anterior de la misma forma existió un adelanto en los valores de IAF alcanzados por el árbol en esta temporada (Figura 3 página 34).

El valor de $71 \text{ L pl}^{-1} \text{ día}^{-1}$ que corresponde a los $6,3 \text{ mm d}^{-1}$ referidos al marco de plantación, debería ser el parámetro de diseño de los equipos de riego para este cultivo en esta región.

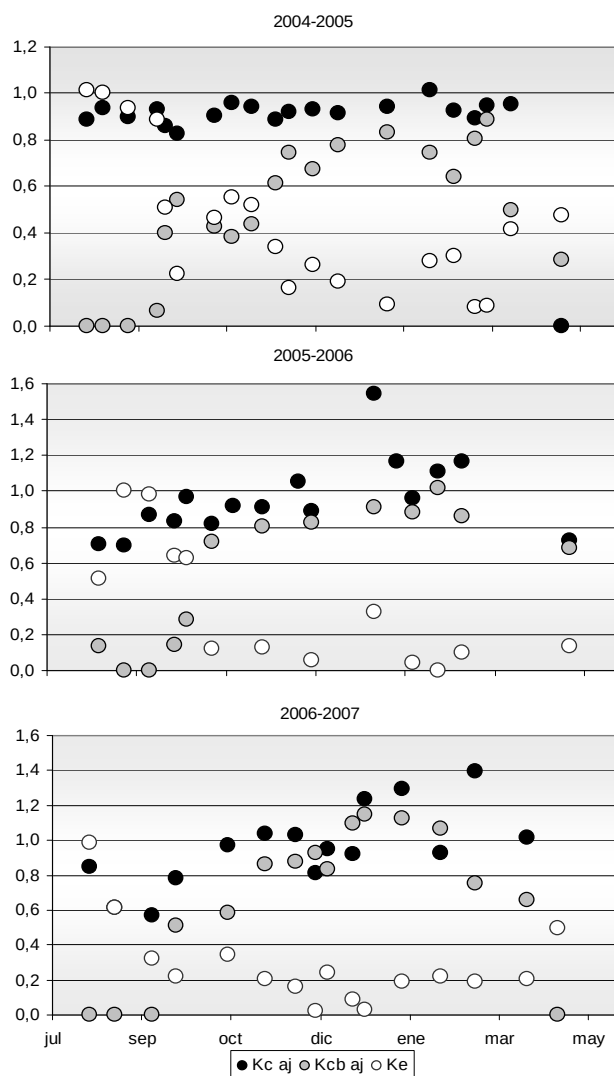


Figura 2. Coeficientes del cultivo ($K_{c\ aj}$), coeficiente de base ($K_{cb\ aj}$) ajustados al marco de plantación 2,5 x 4,5, con entrefilas empastadas en las tres temporadas estudiadas y coeficiente de evaporación (K_e).

Con respecto a los coeficientes de cultivo ($K_{c\ aj}$), cuando la planta tenía sólo un año de edad (temporada 2004-2005), estos tuvieron un valor aproximadamente constante, de 0,9, a lo largo de toda la temporada y no reflejaron las fases de desarrollo del cultivo (Figura 2). En este primer año la mayor parte de la superficie del suelo del

lisímetro estuvo expuesta a la radiación solar, por lo que al humedecerse esa superficie ante cada lluvia, los valores de coeficiente de evaporación (K_e) fueron importantes, resultando en valores altos de $K_{c\ aj}$, aún en los inicios de la temporada de crecimiento, cuando la planta tenía muy poco desarrollo foliar (Figura 2).

En la Figura 2, página 33, del Artículo científico “Determinación del consumo de duraznero por lisimetría”, los coeficientes K_c , K_e y K_{cb} no están corregidos por el marco de plantación. Sin embargo a los K_e no corresponde hacerles esta corrección dado que la superficie del lisímetro que no está sombreada por la planta es la única húmeda y expuesta, del marco de plantación. En dicha figura se observa que en la etapa inicial del desarrollo vegetativo del cultivo existen valores de K_e mayores que los valores al valor del $K_{c\ aj}$ (0,9). Esto, que es un error del punto de vista conceptual, ya que $K_{c\ aj} = K_e + K_{cb\ aj}$, se debe al método usado para determinar los coeficientes: el $K_{c\ aj}$ fue medido directamente en el lisímetro y luego ajustado al marco de plantación mientras que el K_e fue estimado mediante el cálculo teórico ya detallado. Esto podría indicar que el método para calcular K_e sobrestima este coeficiente. Por el contrario Paço *et al.* (2006) reportaron que el K_e estimado con esta metodología, mostró una buena coincidencia con las medidas realizadas en microlisímetros distribuidos en la fila entre dos árboles consecutivos y en la entrefila de un monte de durazneros sobre suelo arenoso.

Para el éxito de esta estimación es fundamental la correcta medida de la canopia del árbol (Jackson y Wallace, 1999) así como la densidad del follaje descripta por el % de intercepción de radiación. En este trabajo ambos parámetros fueron introducidos en el balance hídrico con paso diario para estimar el K_e . Otro punto a tener en cuenta dentro de este balance es la correcta estimación del agua evaporable total (TEW) que interviene en el proceso. En este trabajo la TEW se fijó en 32 mm de acuerdo con la fórmula propuesta por Allen *et al.* (1998) que tiene en cuenta la capacidad de retención de agua del suelo. Jackson y Wallace (1999) midieron valores de TEW de 27 mm para un suelo franco-arcillo-arenoso mediante lisimetría. Si bien parece bastante acertado

haber fijado un valor algo mayor para el suelo del lisímetro que era de textura franco-limosa, puede que la sobrestimación del método para estimar el K_e guarde relación con una sobrestimación en este parámetro.

A medida que el follaje de la planta se fue desarrollando, los valores de K_e fueron decreciendo, para volver a aumentar hacia el final del ciclo del cultivo, coincidiendo con la senescencia del follaje (Figura 2).

La determinación empírica del K_c está fuertemente ligada al régimen de lluvias, método y frecuencia del riego, que influye sobre la evaporación directa, así como al porcentaje de intercepción de radiación por el árbol que influye sobre la transpiración. Como forma de independizarnos de la variación en la evaporación, que es consecuencia del régimen de lluvias muy irregular del Sur de Uruguay, se ajustaron los K_{cb} para las tres temporadas de evaluación y se ajustaron para el marco de plantación ($K_{cb\ aj}$). En la primer temporada de evaluación los valores de $K_{cb\ aj}$ alcanzaron valores máximos de 0,78 (Figura 3).

En la segunda temporada de evaluación, se repitieron los altos valores de K_e al inicio del ciclo del cultivo, que luego se mantuvieron bajos en el resto del ciclo (Figura 2). En la segunda quincena de enero se observaron valores de $K_{c\ aj}$ extremadamente altos, por encima del valor máximo teórico. El valor sería máximo teórico para este coeficiente sería 1,3. El mismo responde a un límite natural en la energía disponible para los procesos de transpiración y evaporación. Sin embargo, cuando se observan la totalidad de valores medidos mediante lisimetría en experimentos realizados en durazneros, presentados gráficamente, se constata la ocurrencia de valores de K_c de 1,4-1,5 (Ayars *et al.*, 2003; Johnson *et al.*, 2000; 2004). Para esta misma temporada el valor del $K_{cb\ aj}$ alcanzó un valor de 0,91, superior al de la primer temporada (Figura 3), aumento que se correspondió con el incremento del tamaño de la planta entre el primer y segundo año luego de la plantación.

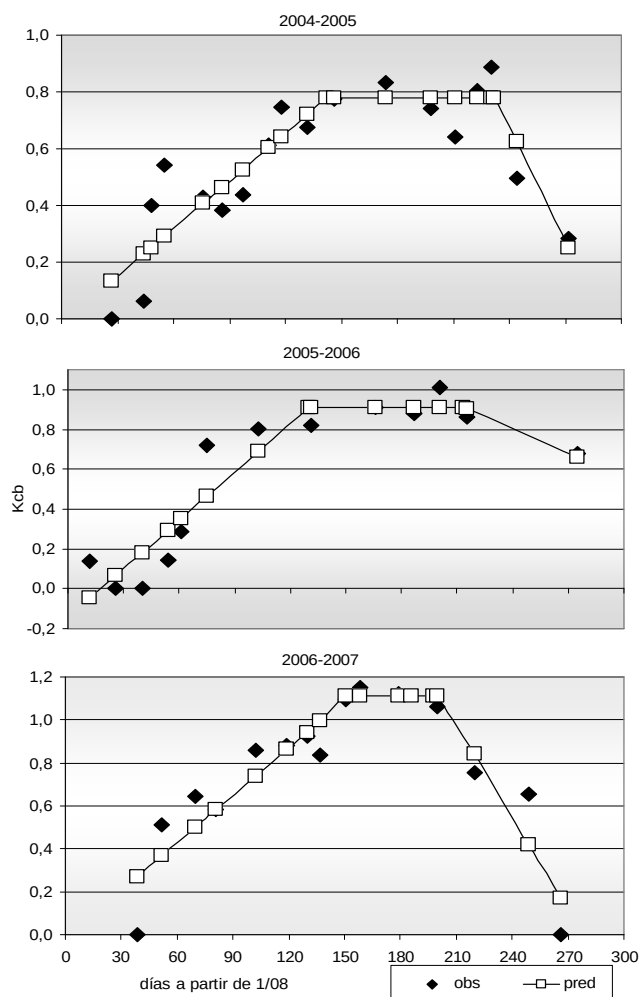


Figura 3. Coeficientes de base (K_{cb}) observados ajustados al marco de plantación y curva de ajuste usando el modelo tri-segmentado lineal-plateau-lineal, en las tres temporadas estudiadas.

En la tercera temporada el valor de $K_{c\ aj}$ alcanzó valores ligeramente superiores a 1 desde noviembre a marzo, con la ocurrencia de valores extremos de 1,2 hasta 1,4 (Figura 2). Para la misma temporada el valor del $K_{cb\ aj}$ fue de 1,1 (Figura 3), igual al propuesto por Allen *et al.*, 1998, para duraznero con entrefila empastada y heladas ligeras.

A pesar que en la segunda y la tercera temporada el índice de área foliar (IAF) máximo alcanzado fue similar (Figura 3 página 34), el $K_{cb\ aj}$ fue mayor en la temporada 2006-2007. Los coeficientes de cultivo son afectados por las condiciones climáticas, aumentando su valor en la medida en que es mayor la velocidad del viento y menor la humedad relativa mínima (Allen *et al.*, 1998). En este sentido, Johnson *et al.* (2004) encontraron que una gran parte de la variabilidad del K_{cb} de duraznero era explicada por la variación del déficit de presión de vapor al mediodía (valores altos de déficit de presión de vapor podían aumentar el K_{cb} en más de un 20 %). En la última temporada, se registraron valores más extremos tanto en la humedad relativa como en la velocidad del viento (datos no presentados), que explicarían este mayor K_{cb} .

En las tres temporadas existió variabilidad en el inicio y finalización de las fases. Con el objetivo de disminuir la variabilidad entre años y determinar el inicio y finalización de cada una de las fases de la curva del K_{cb} a lo largo de la estación de crecimiento, se expresó el K_{cb} como una función de los grados-días en lugar de expresarlo como una función de los días del año, pero no se encontró ventaja con la aplicación de este procedimiento (datos no presentados). Sin embargo Williams *et al.* (2003) encontraron menos variabilidad entre años en la evolución estacional de la ETc cuando la expresaron en función de los grados-días, considerando como tal la sumatoria de grados por encima de 10 °C desde 50 % de brotación.

Con el fin de conseguir un método práctico para estimar las necesidades de riego del duraznero a partir del dato de evaporación de tanque evaporímetro clase “A”, sin perder exactitud en el cálculo, se calibraron localmente los coeficientes de tanque (K_p) a partir de la estimación de la ETo realizada por el método PM-FAO.

Los cuatro métodos evaluados tuvieron diferente desempeño como estimadores de la ETo PM-FAO.

El método 1 sobrestimó la ETo entre un 13 % y 45 %, en todos los meses del año (Cuadro 3, página 49). Sentelhas y Folegatti (2003) también reportaron una sobrestimación, pero sólo del 4 al 12 %, al utilizar el mismo método en la zona de San Pablo, Brasil. López y Dennett (2005) también encontraron que el método sobreestimó la ETo. Estos últimos autores utilizaron el Kp tabulado por Doorenbos y Pruitt (1977), por esta razón parte de la inexactitud del método la atribuyeron al amplio rango previsto en las variables tabuladas. El método 1 evaluado en el presente trabajo es el propuesto por Allen *et al.* (1998).

Cuando se analizó el desempeño del método 1 en el período de riego, octubre-abril, la sobrestimación de la ETo resultó del 18 % en promedio. Esto significaría 1660 m³ de más por cada hectárea regada, si se plantea el riego del duraznero con Kc máximo igual a 1,4, valor medido en este trabajo. El exceso de riego alcanzaría a los 5 millones de m³ si se tienen en cuenta las 2200 hectáreas de producción duraznero en la zona sur del país (DIEA-MGAP, 2006). Los meses con mayor valor de ETo diciembre y enero (Cuadro 3, página 49) resultaron en una sobrestimación del parámetro del 19 y 18%, respectivamente. Esto determinaría que si se parte de este dato para el diseño de los equipos de riego, estos resultarían sobredimensionados en ese mismo porcentaje.

El método 2 no fue un buen estimador del método patrón en la mitad de los meses del año. La ETo resultó sobrestimada en los meses de febrero y noviembre por un 9 y 14%, respectivamente. Mientras que en los meses de marzo, abril, mayo y agosto fue subestimada entre un 4 y 12% (Cuadro 3, página 49). Si se tiene en cuenta que estos meses son de moderada a baja demanda atmosférica, los resultados no coinciden con Allen *et al.* (1998) quienes expresaron que el método de Penman, utilizado para calibrar los Kp Corsi, frecuentemente sobrestima la ETo en condiciones de baja demanda atmosférica. El mejor desempeño del método 2 en comparación al método 1 se puede explicar porque los Kp Corsi fueron calibrados localmente y lograron describir en forma

más exacta la influencia de las características locales del clima sobre la ETo. Dado que este método es un buen estimador de la ETo en los meses de máximo consumo (diciembre y enero), su uso no produciría errores en el diseño de los equipos, pero el riego aplicado sería excesivo en los meses de noviembre y febrero.

El método 3 fue un buen estimador del método patrón. Solo en el mes de abril existió diferencia estadísticamente significativa, con una sobrestimación de la ETo de un 10% (Cuadro 3, página 49). El mejor comportamiento del método se explica por la calibración local de los coeficientes con la ETo PM-FAO calculada a partir de una amplia serie climática.

Dado que en el período entre octubre y abril los coeficientes calibrados presentaron diferencias menores al 5% respecto a su media (Cuadro 2, página 48), se promedió un único coeficiente para esta etapa (K_p , calibrado promedio), su valor fue 0,71. Este valor coincide con el coeficiente único calibrado por Sentelhas y Folegatti (2003) para el sur de Brasil. El coeficiente calibrado por estos investigadores fue determinado mediante la relación de la ETo medida en lisímetro con la Eo.

La ETo estimada con el método 4 (con K_p , calibrado promedio) en función de la ETo PM-FAO (Figura 1, página 51) muestra una leve sobrestimación del método para los valores altos de ETo. Sin embargo cuando se graficaron los errores relativos en función de la ETo PM-FAO este sesgo no se apreció (Figura 2, página 51).

5. CONCLUSIONES GLOBALES

7. El consumo de una planta de duraznero en la zona sur del Uruguay es de 5 mm día⁻¹ en su primer año, 5,6 mm día⁻¹ en su segundo año y de 6, 3 mm día⁻¹ en el tercero, equivalentes a 56, 63 y 71 L día⁻¹, respectivamente.
8. El valor de Kc máximo para la primera temporada fue de 0,9 mientras que en la segunda y tercera temporada alcanzó un valor de 1,2.
9. Los valores de K_{cb} máximo obtenidos en las tres temporadas fueron 0,78; 1,91 y 1,11, respectivamente. Este último valor es igual al propuesto por FAO para árboles adultos.
10. En lisímetros de este tipo, y con este tamaño del macetón, se debe incluir el término ΔH_s en la ecuación de balance hídrico.
11. En condiciones de alta demanda atmosférica y la planta de tamaño adulto, se hace necesario regar para complementar el aporte por ascenso capilar de la napa.
12. Este método permite el ajuste del K_{cb} para intervalos de tiempo mayores a cinco días.
13. El uso de un coeficiente de tanque (Kp) único (0,71) durante toda la estación tuvo un buen comportamiento en la estimación de la ETo PM-FAO para la zona sur del país.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aboukhaled, A. A.; Alfaro, A.; Smith, M. 1981. Los lisímetros. FAO. Paper 39. Roma. 68p.
- Abrisqueta, J. M.; Ruiz, A.; Franco, J. A. 2001. Water balance of apricot trees (*Prunus armeniaca* L. Cv. Búlida) under drip irrigation. *Agricultural Water Management* 50: 211-277.
- Allen, R. G.; Howell, T. A.; Pruitt, W. O.; Walter, I. A.; Jensen, M. E. 1991. Proceedings of the 1991 ASCE Specialty Conference on "Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements", Honolulu, Hawaii, July 23-25, 1991. 444p.
- Allen, R.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper 56, Rome. 300p.
- Allen, R.; Pereira, L. S.; Smith, M.; Raes, D.; Wright, J. 2005. FAO-56 Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 131(1): 2-13.
- Allen, R.; Pereira, L. S.; Smith, M.; Raes, D.; Wright, J. 2005b. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 131(1): 14-23.
- Ayars, J. E.; Johnson, R. S.; Phene, C. J.; Trout, T.J.; Clark, D. A.; Mead, R. M. 2003. Water use by drip-irrigated late-season peaches. *Irrigation Science* 22: 187-194.
- Bertolacci, M.; Megale, P. G. 1991. Automazione degli impianti irrigui con microlisimetri. *Colture Protette*, v.6, p.CCV-CCVIII.
- Boland, A.; Mitchell, P. D.; Jerie, P. H.; Goodwin, I. 1993. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach. *Journal of Horticultural Science* 68(2): 261-274.
- Boland, A.; Jerie, P. H.; Mitchell, P. D.; Goodwin, I. 2000. Long-term effects of restricted root volume and regulated deficit irrigation on peach: II. Productivity and water use. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 125(1): 143-148.
- Bryla, D. R.; Trout, T. J.; Ayars, J. E. 2003. Growth and production of young peach trees irrigated by furrow, microjet, surface drip, or subsurface drip systems. *HortScience* 38(6): 1112-1116.

- Cassaro, F.; Pires, L.; Dos Santos, R.; Giménez, D.; Reichardt, K. 2008. Funil de haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. *Rev. Bras. Cien. Solo* 32: 2555-2562.
- Castel, J. R. 2000. Water use of developing citrus canopies in Valencia, Spain. *Proc. Intl. Soc. Citricult. IX Congr.* 222-226.
- Conceição, M. A. F. 2002. Reference evapotranspiration based on Class A pan evaporation. *Scientia Agricola* 59 (3): 417-420.
- Corsi, W. (1994). Programación del riego con informes de evaporación. En: Manejo de la información agroclimática para apoyo a la toma de decisiones en riego. Serie de actividades de difusión. INIA. LAS BRUJAS N° 26: 1-16.
- Dourado-Neto, D.; Nielsen, D.; Hopmans, J.; Reichardt, K.; Oliveira Santos Bacchi, O. 2000. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Scientia Agricola* 57 (1): 191-192.
- Fereres, E.; Martinich, D.; Aldrich, T.; Castel, J. R.; Holzapfel, E.; Schulbach, H. 1982. Drip irrigation saves money in young almonds orchards. *Calif. Agric.* 36(9-10): 12-13.
- García-Petillo, M.; Puppo, L.; Romero, G.; Baccino, G. 2003. Respuesta al riego de duraznero, manzano y peral en montes comerciales. *Revista Agrociencia* v. VII (2): 49-61.
- García-Petillo, M.; Castel, J. R. 2007. Water balance and crop coefficient (K_c) estimation of a citrus orchard in Uruguay. *Spanish Journal of Agricultural Research* 5(2): 232-243.
- Gee, G.W. and Bauder, J. W. 1986. Particle-size analysis. In: A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. p. 383-411.
- Girona, J.; Mata, M.; Fereres, E.; Goldhamer, D. A.; Cohen, M. 2002. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agricultural Water Management* 54: 107-122.
- Girona, J.; Marsal, J.; Mata, M.; Campo, J. del. 2004. Pear Crop coefficients obtained in a large weighing lysimeter. *Acta Hort.* 664: 277-281.
- Godinho, P.; Sequeira, B.; Paredes, P.; Pereira, L. S. 2007, Simulação das necessidades de água das culturas pela metodologia dos coeficientes culturais duais. Modelo SIMDualKc. In: Taller “modernización de riegos y usos de tecnologías de información”. Redes de Riego CYTED y PROCISUR, La Paz, Bolivia. CD Rom.
- González, R. E. 2005. Miglioramento delle produzione agricole e conservazione delle risorse idriche tramite l'impiego di microlisimetri per una corretta gestione

- dell' irrigazione. Tesis de Dottorato di Ricerca in Scienze agrarie. Scuola Superiore Sant' Anna di Pisa. 112p.
- Goodwin I.; Whitfield D. M.; Connor D. J. 2006. Effects of tree size on water use of peach (*Prunus persica* L. Batsch). *Irrig. Sci.* 24:59-68.
- Jackson, N. A.; Wallace, J. S. 1999. Soil evaporation measurements in a agroforestry system in Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology* 94: 203-215.
- Jong Van Lier, Q. de; Dourado-Neto, D. 1993. Valores extremos de umidades do solo referentes ao modelo de van Genuchten. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 17(3): 325-329.
- Johnson, R. S.; Ayars J. E.; Trout T. J.; Mead R.; Phene C. 2000. Crop coefficients for mature peach trees are well correlated with midday canopy light interception. *Acta Hort. (ISHS)* 537: 455-460.
- Johnson, R. S.; Ayars, J.; Hsiao, T. 2004. Improving a model for predicting peach tree evapotranspiration. *Acta Hort. (ISHS)* 664: 341-346.
- Johnson, R. S.; Williams, L. E.; Ayars, J. E.; Trout, T. J. 2005. Weighing lysimeters aid study of water relations in tree and vine crops. *California Agriculture* 59(2): 133-136.
- Iancu, M. 1997. Plum tree water consumption determined in lysimeter as compared to other methods. *Acta Hort. (ISHS)* 449(1): 107-112.
- Koumanov, K. S.; Hopmans, J. W.; Schwankl, L. J. ; Andreu, L.; Tuli, A. 1997. Application efficiency of micro-sprinkler irrigation of almond trees. *Agricultural Water Management* 34: 247-263.
- López, J.; Dennett, M. 2005. Comparación de dos métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) en una zona semi-árida de Venezuela. *Bioagro* 17(1): 41-46.
- Magnani, G.; Bertolacci, M.; Oggiano, N.; Megale, P. G.; Ceccarelli, E. 1990. Ottimizzazione della tecnica irriga in tunnel coperti con diversi materiali plastici rigidi (PMMA, PVC e PRFV). *Colture Protette* 7:XXV-XXXII.
- Megale, P. G.; Bertolacci, M. 1999. Stima dei coefficienti colturali tramite microlisimetri. Atti Convegno nazionale "L'Agrometeorologia per il monitoraggio dei consumi idrici". Sassari, 3-4 nov., 239-248.
- Paço, T. A.; Ferreira, M.; Conceição, N. 2006. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. *Agricultural Water Management* 85:305-313.
- Pardossi, A.; Bertolacci, M.; Gemignani, S.; Megale, P. G.; Tognoni, F.; Campiotti, C. A. 1993. L'uso di un microlisimetro per l'automazione dell'irrigazione del melone in coltura protetta. *Irrigazione e Drenaggio* 1:14-19.

- Parkes, M.; Jian, W.; Knowles, R. 2005. Peak crop coefficient values for Shaanxi, North-west China. *Agricultural Water Management* 73(2): 149-168.
- Pereira, L. S. 2004. *Necessidades de Água e Métodos de Rega*. Publ. Europa-América, Lisboa, 313p.
- Pereira, A.; Green, S.; Villa Nova, N. 2006. Penman-Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. *Agricultural Water Management* 83: 153-161.
- Reichardt, K. & Timm, L. C. 2004. *Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações*. São Paulo, Manole, 478p.
- Richards, L. A. 1947. Pressure-membrane apparatus construction and use. *Agr. Engin.* 28: 451-454.
- Ruiz Pérez, M. E.; Utset Suástegui, A.; Lau Quang, A.; Herrera Puebla, J.; Llanos, M. A. 1992. Tres modelos para la curva tensión-humedad en algunos tipos de suelos. *Revista Cubana de Física* 12(1): 45-50.
- Ruiz Reverter, B. 2008. *Procesamiento y QC/QA de datos micrometeorológicos*. Tesis de Master en técnicas avanzadas de física. Dpto. de Física aplicada. Universidad de Granada. 58p.
- Snyder, R. L.; Ferreira, M. I.; Shackel, K. A. 2000. A crop coefficient model for trees and vines. *Acta Hort.* 537: 549-556.
- Sentelhas, P.; Folegatti, M. 2003. Class A pan coefficients (K_p) to estimate daily reference evapotranspiration (E_{To}). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 7 (1): 111-115.
- Solinas, I. 2000. Stima comparativa dei fabbisogni irrigui del Ka' a He'e (Stevia Rebaudiana Bertoni, Bert.) in Italia e Paraguay con consideración sul suo contributo allo sviluppo rurale paraguaiano. Tesis de grado. Facolta` di Agraria. Università Degli Studi di Pisa. 113p.
- Stanhill, G. 2002. Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements? *Agricultural and Forest Meteorology* 112: 233-236.
- Stevenson, D. S. 1989. Irrigation subsurface return flows and water use in lysimeter containing apple trees. *Can, J. Soil Sci.* 69: 769-778.
- Strangeways, I. 2001. Back to basics: the "metenclosure". Part 7. Evaporation. *Weather* 56: 419-427.
- Silva, A.; Ponce De León, J.; García, F., Durán, A. 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. *Boletín de Investigación* N° 10, Montevideo. 20p.

- Thakur, B.; Sepia, R. 2007. Prediction of water requirements for peach in mid-hill zone of Himachal Pradesh. *An Asian Journal of Soil Science* 2(2): 23-28.
- Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. DIEA. Encuesta frutícola N° 254. 2006.
- Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. DIEA. Encuesta hortícola sur y litoral norte N° 263. 2006.
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Villalobos, F.; Testi, L.; Moreno-Pérez, M. D. 2009. Evaporation and canopy conductance of citrus orchards. *Agricultural Water Management* 96: 565-573.
- Williams, L.; Phene, C.; Grimes, D.; Trout, T. 2003a. Water use of young Thompson Seedless grapevines in California. *Irrig. Sci.* 22: 1-9.
- Williams, L.; Phene, C.; Grimes, D.; Trout, T. 2003b. Water use of mature Thompson Seedless grapevines in California. *Irrig. Sci.* 22: 11-18.

7. ANEXO

7.1 ESTRUCTURA DEL LISÍMETRO

El lisímetro usado en este trabajo es un lisímetro de drenaje con napa freática constante. Éste fue desarrollado por el Departamento de Agronomía y Gestión del Agroecosistema de la Universidad Pisa y ha sido utilizado hasta el momento para estudios con cultivos hortícolas en invernáculos (Magnani et al., 1990; Bertolacci & Megale, 1991).

Se ubicó en un monte de duraznero regado con riego localizado, de la misma variedad e igual fecha de plantación que el árbol instalado dentro de él. La superficie total del monte fue de 4250 m², conformada por 10 filas de 35 árboles cada una, con un marco de plantación 4,5 x 2,5 m. En cinco filas de árboles se instaló un experimento con cinco tratamientos para evaluar la respuesta a diferentes patrones de humedecimiento, en un diseño de cuadrado latino. En cuatro de los cinco tratamientos se aplicó el mismo caudal por m lineal de tubería, 10 L h⁻¹ m⁻¹, pero con emisores de diferente caudal y distanciamiento. El quinto tratamiento fue de control, sin riego. El lisímetro se ubicó en una parcela con riego, al igual que las parcelas localizadas a sus lados. A su vez, el monte de duraznero cv. Dixiland estaba rodeado por 1,5 ha de otras variedades de duraznero y de manzana también con riego, que contribuyeron a minimizar los fenómenos de advección.

La instalación general del lisímetro (Figura 1) se constituyó como sigue:

- 1) un macetón enterrado relleno hasta el mismo nivel del suelo circundante, en cuyo fondo se mantuvo una napa de agua libre de altura constante para compensar el consumo del árbol por capilaridad,
- 2) un dispensador de agua (gotero de 8 L h^{-1}) con un contador que permitió medir la entrada de agua, mientras que un sistema con flotador cerró el pasaje del agua cada vez que se alcanzó la altura de napa prefijada (12 cm). Esta pequeña máquina fue donada por la Universidad de Pisa,
- 3) un tanque elevado que proporcionó la carga requerida para el funcionamiento del gotero,
- 4) un tanque enterrado por debajo del fondo del macetón para coleccionar el drenaje.

Para adaptarlo a los intereses de este estudio se hicieron algunas modificaciones en la instalación.

Modificación 1: tamaño del macetón. Se utilizó una estructura de dimensiones $2 \times 2 \times 0,8 \text{ m}$ de profundidad para albergar un árbol adulto de duraznero sin limitar su desarrollo (Figura 2). El material utilizado fue un film de PVC de 1 mm de espesor con costuras termofusionadas.

Modificación 2: relleno del macetón. Para asegurar el drenaje en el interior del depósito se realizó el relleno del mismo manteniendo una secuencia granulométrica diferencial desde el fondo hasta la superficie como sigue: 5 cm de pedregullo, 2 cm de arena, 2 cm de una mezcla 75 % arena y 25 % de suelo franco, 2 cm de 50 % arena y 50 % suelo franco, 2 cm de 25 % arena y 75 % suelo franco y el resto hasta la superficie con suelo franco dispuesto en capas de a 2 cm compactadas suavemente con un pisón de madera (Figura 3). Se colocaron dos capas de geotextil por encima y por debajo de la capa de pedregullo para proteger el film de PVC y evitar la colmatación del material grueso con los materiales más finos. Se relleno hasta igualar el nivel del suelo

circundante, dejando por encima un borde de 7 cm aproximadamente, para evitar la entrada o la salida de agua por escurrimiento.

Modificación 3: la carga requerida para el funcionamiento del gotero fue proporcionada por un tanque elevado cuyo fondo se ubicó a 3 m de altura de la entrada del agua (Figura 1). El tanque elevado de 200 L se llenaba con una derivación de la tubería de conducción del equipo de riego que se cerraba mediante un sistema de boya una vez completado su volumen. En esta tubería se instaló un contador volumétrico de agua que permitió un chequeo adicional del volumen consumido por la planta.

Modificación 4: el sistema para coleccionar los excesos. El modelo original del lisímetro tenía previsto un sistema para evacuar los excesos de agua ocasionados por las lluvias a través de un tubo abierto en su parte superior, que permitía la salida del agua cuando el nivel de la napa estaba por encima del prefijado (Figura 2 y Figura 3), pero no permitía su recolección, ni su medida. En este trabajo se colocó un tanque enterrado cuyo fondo se ubicó a 1 m por debajo del fondo del macetón (Figura 4) para coleccionar los excesos evacuados. Se realizó la calibración altura-volumen del tanque previo a su instalación. Los excesos se midieron con regla e inmediatamente se procedió al vaciado del tanque.

Modificación 5: se substituyó el gotero original de 4 L h^{-1} , por otro de 8 L h^{-1} , para asegurar la rápida compensación de la napa en los períodos de máximo consumo con la planta totalmente desarrollada. Se colocó un filtro de malla de $\frac{3}{4}$ " para evitar la obstrucción del gotero.

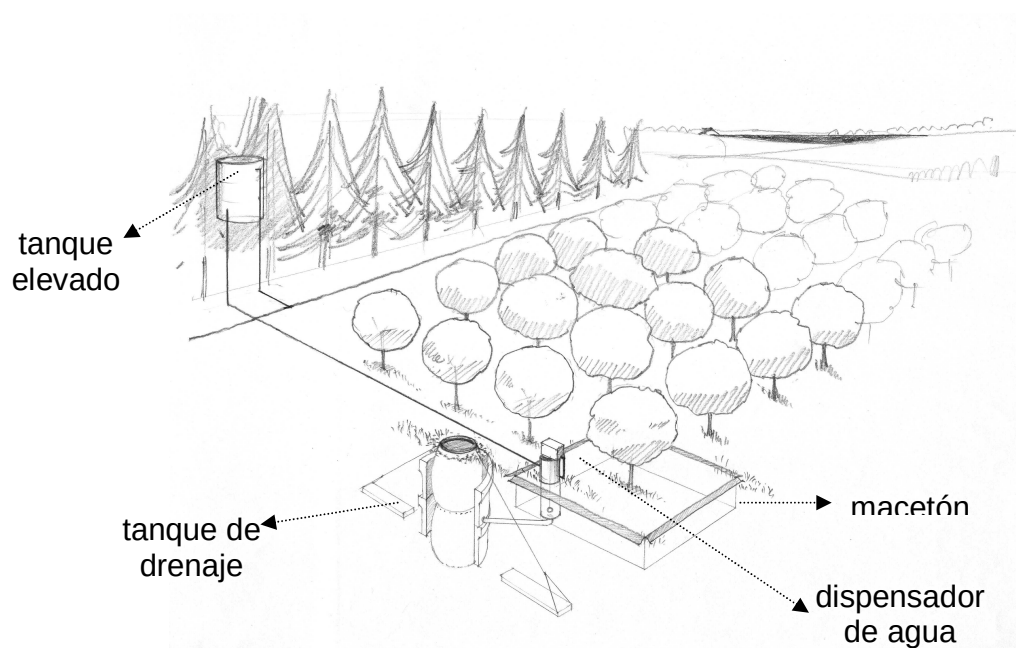


Figura 1. Esquema general de la instalación del lisímetro.

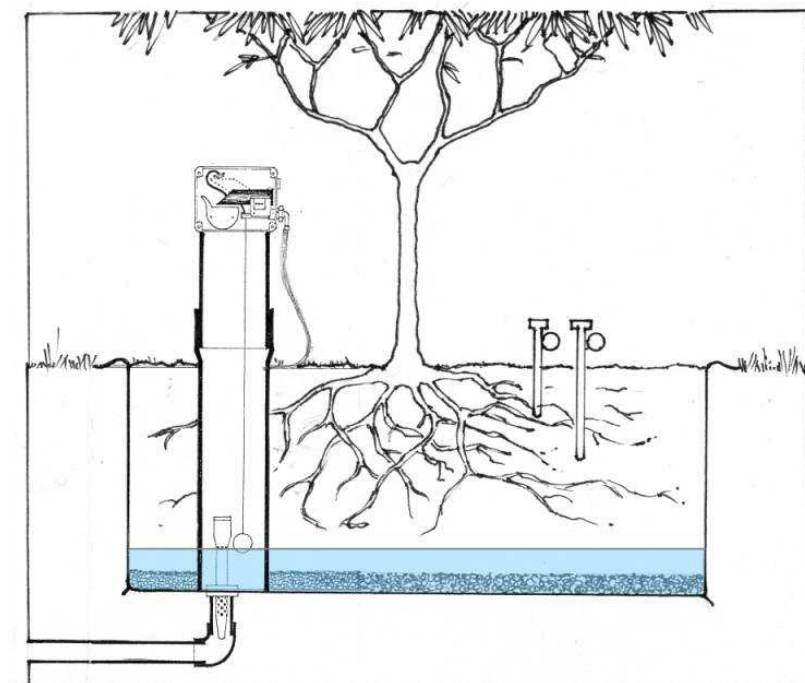


Figura 2. Detalle de la napa freática constante en el fondo del macetón del lisímetro

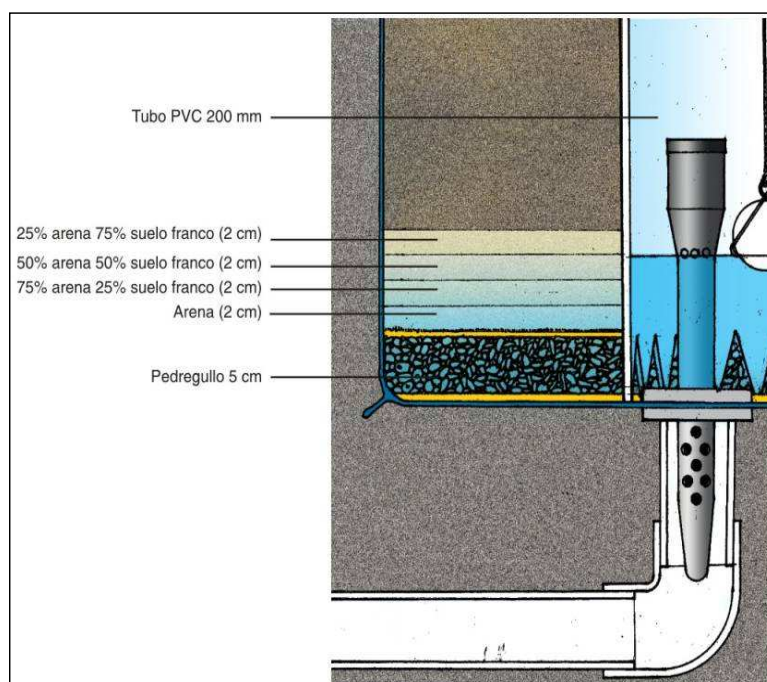


Figura 3. Relleno del macetón del lisímetro y sistema de evacuación de excesos.

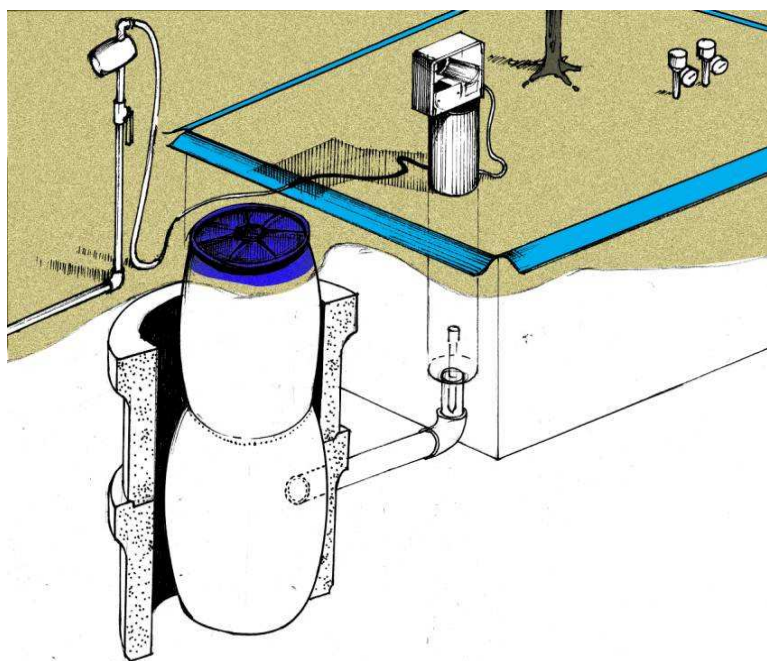


Figura 4. Detalle del drenaje del lisímetro.

7.2 PARÁMETROS HÍDRICOS Y FÍSICOS DEL SUELO DE RELLENO DEL LISÍMETRO

Para caracterizar el suelo de relleno del lisímetro se realizó la curva de retención, el análisis textural y se determinó densidad aparente.

7.2.1 Curva de retención del suelo de relleno del lisímetro

Se realizó la curva de retención del suelo de relleno del lisímetro para poder medir las variaciones de humedad (ΔH) a partir de las lecturas de los tensiómetros instalados a tres profundidades diferentes (15, 30 y 60 cm). La ΔH se introdujo como término en la fórmula de balance de volúmenes para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c).

Dado que el suelo de relleno fue homogéneo en los primeros 60 cm de profundidad se tomaron cuatro muestras superficiales para no perturbar la estructura del suelo del macetón.

Se midió el porcentaje de humedad en volumen a los siguientes valores de tensión: 1, 6, 10, 30, 100 y 300 KPa. Los dos primeros puntos de tensión se realizaron en la mesa de tensión (Reichardt y Timm, 2004; Cassaro et al., 2008), mientras que los puntos restantes se realizaron en la olla de presión (Richards, 1947). La humedad correspondiente a coeficiente de marchitez permanente se estimó con la regresión de Silva et al. (1988) a partir de la humedad correspondiente a capacidad de campo.

Se determinó la función matemática de mejor ajuste (Figura 5) mediante el programa SWRC, versión 2.00 (Dourado-Neto et al., 2000).

La ecuación utilizada en el ajuste fue la de van Genuchten (1980):

$$H = H_{res} + \frac{H_{sat} - H_{res}}{(1 + (\alpha * Ts)^n)^m} * 100$$

Donde:

H - humedad del suelo (%)

Hsat - humedad a saturación ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

Hres - humedad residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

Ts – tensión del agua en el suelo (cm c.a.)

El programa se corrió con las siguientes condiciones: m ($m > 0$) independiente de n; los contenidos de humedad a saturación y humedad residual fueron estimados por el método de extrapolación de Jong Van Lier y Dourado-Neto (1993).

Los valores que tomó la ecuación para el mejor ajuste fueron: Hres= $0,159 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$, Hsat= 0,589, $\alpha = 0,0276$, $m = 0,0537$, $n = 9,385$. El ajuste del modelo fue significativo con $p = 0,0025$ y el coeficiente de determinación $r^2 = 0,952$.

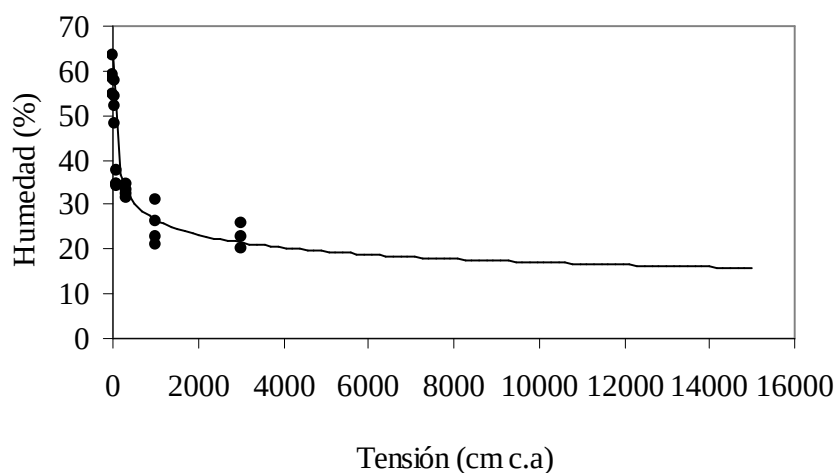


Figura 5. Curva de retención del suelo del lisímetro, los datos medidos se presentan como puntos y el ajuste de van Genuchten como gráfico de línea.

7.2.2 Análisis textural y densidad aparente

Se realizó el análisis textural del suelo de relleno mediante el método de Day modificado (Gee y Bauder, 1986). Los porcentajes de las tres fracciones granulométricas fueron: arcilla 23,6%, arena 11,9% y limo 64,5%. Según el diagrama textural el suelo correspondió a la clase franco-limoso.

Para determinar la densidad aparente se extrajeron cuatro muestras imperturbadas. La media de este parámetro fue $1,22 \text{ g cm}^{-3}$, con un desvío estándar de 0,09.

7.3 CRECIMIENTO VEGETATIVO

Para evaluar el normal crecimiento del árbol instalado dentro del lisímetro, se midieron mensualmente: el volumen de copa, el diámetro de tronco, índice de área foliar (IAF) y la interceptación de radiación. Las dos primeras determinaciones también se realizaron en los árboles regados y sin riego del experimento de respuesta a diferentes patrones de humedecimiento.

7.3.1 Volumen de copa y sección del tronco

El volumen de la copa se estimó con la fórmula de una esfera a partir de las medidas de altura, diámetro longitudinal y diámetro transversal. La sección del tronco se estimó a partir de la circunferencia medida a 5 cm por encima del injerto, con cinta de costurera. Esta última determinación es frecuentemente utilizada para medir respuesta vegetativa (Boland et al., 1993; Bryla et al., 2003).

En las tres temporadas de evaluación, el tamaño del árbol del lisímetro fue igual o mayor a los árboles regados del experimento. El confinamiento del árbol no limitó su crecimiento. Esto coincide con lo reportado por Girona et al. (2002), quienes

concluyeron que los durazneros pueden crecer y desarrollarse normalmente durante años en un lisímetro, siempre que tengan buena disponibilidad de agua.

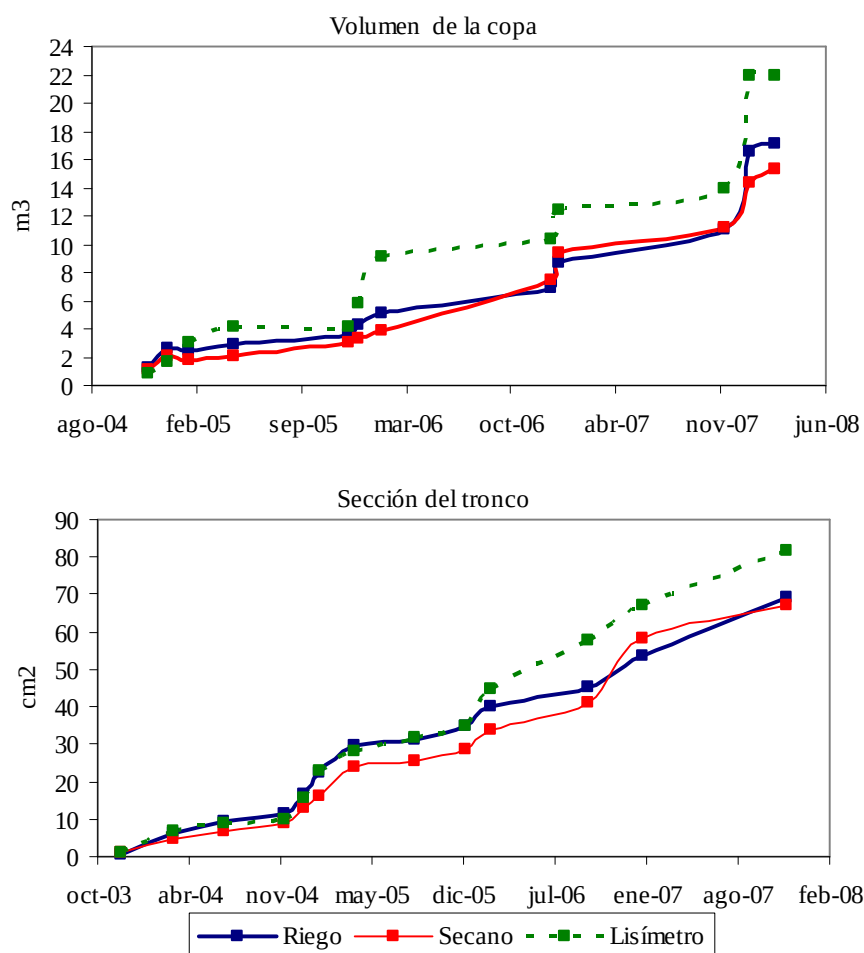


Figura 6. Evolución del volumen de la copa (m^3) y de la sección del tronco (cm^2) del árbol del lisímetro, de la media de los árboles regados y de la media de los árboles sin riego (Secano), en las tres temporadas de evaluación.

7.3.2 Índice de área foliar

Al comienzo de cada temporada de evaluación se marcaron las ramas principales y dentro de ellas se colocaron marcas parciales para permitir el conteo ordenado de la totalidad de hojas del árbol.

En cada fecha se determinó el área de una muestra de 100 hojas en forma indirecta, como sigue: las hojas se fotocopiaron, se recortaron, se pesaron; asimismo se pesó un área conocida del papel utilizado para realizar el fotocopiado, luego se hizo la relación entre el peso del área conocida y el peso de las hojas fotocopiadas estimando el área de la muestra.

El total de área foliar del árbol (AF) se determinó en cada fecha mediante la multiplicación del número de hojas y el área de la muestra. El índice de área foliar se obtuvo mediante la relación AF/marco de plantación.

7.3.3 Fracción de intercepción de radiación por la copa

Las medidas se realizaron al mediodía, en días despejados. La intercepción de radiación fotosintéticamente activa se midió con un ceptómetro PAR Sunfleck. El ceptómetro se mantuvo a nivel del suelo, por debajo de la copa, nivelado, para efectuar una lectura individual. En cada fecha se promediaron 16 lecturas cubriendo totalmente el área debajo de la copa del árbol. Este valor fue dividido por una lectura realizada a pleno sol, en el espacio correspondiente a la entrefila y sustraído de 100 para obtener el porcentaje de intercepción de radiación (R_{int}) por la copa. Similar metodología fue la utilizada por Jonhson et al. (2000).

Se ajustó una ecuación de las medidas realizadas con los días desde el comienzo de la brotación (Figura 7).

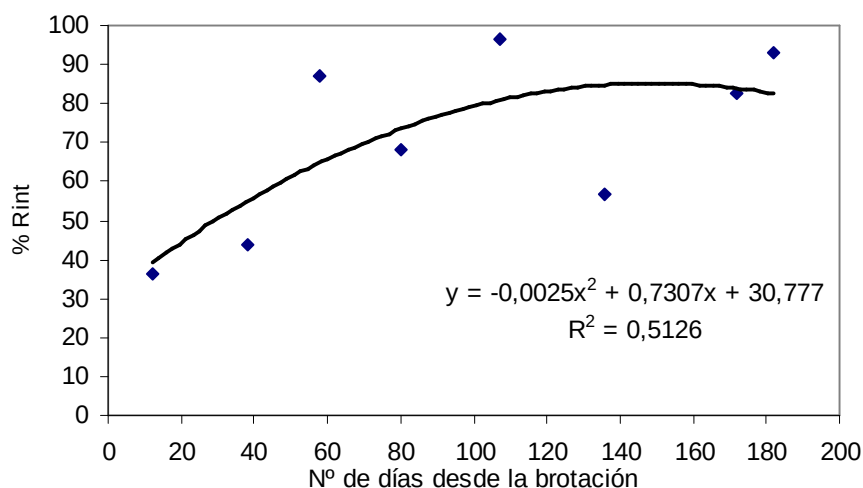


Figura 7. Evolución de la radiación interceptada (Rint) por la copa del árbol.

El porcentaje de radiación dividido 100 se utilizó para estimar la fracción húmeda y expuesta (few), en el cálculo de la evaporación directa del suelo en los 15 cm superiores mediante el balance hídrico con paso diario. La fracción húmeda y expuesta se calculó como:

$$few = 1 - \left(\frac{As * Rint}{Al} \right)$$

Siendo:

As - área del lisímetro sombreada por la copa

Rint - fracción de la radiación interceptada por la copa al mediodía

Al - área del lisímetro

7.4 DATOS ANALIZADOS PARA DETERMINAR EL CONSUMO HÍDRICO DEL ÁRBOL

Se realizó el control de calidad a los datos de consumo para excluir aquellas medidas que no fueran representativas. De los datos medidos se descartaron: 1) aquellos períodos en los que aumentaron las lecturas de los tensiómetros ubicados en el macetón ocasionados por desperfectos en el mecanismo de apertura y cierre de la válvula de alimentación del gotero 2) los períodos con lluvias abundantes, de 40 mm ó más 3) los períodos en los que las medidas de potencial xilemático fueron superiores a -1.2 MPa 4) los períodos en que fue necesario regar superficialmente mediante el agregado de volúmenes medidos de agua luego del desarrollo de la planta en la segunda temporada de evaluación. A partir de la temporada 2008-2009 se colocaron en superficie 4 goteros de 2 L h⁻¹ alrededor de la planta.

Con respecto al control de datos Girona et al. (2004) usaron únicamente aquellos valores donde el componente evaporación estuvo minimizado, descartando los correspondientes a los días de riego o de lluvia. Johnson et al. (2000) informaron que aproximadamente el 10% de los valores de K_c fueron eliminados por distintas causas: “excesivo ruido” en los datos del lisímetro, lluvias importantes, fallas en los instrumentos de la estación meteorológica y ganancias de peso repentinas en el lisímetro. Asimismo Punthakey et al. (1981) citados por Boland et al. (1993) establecen que medidas por debajo de -1.8 MPa podrían afectar la E_{Tc} mientras que medidas por debajo de -3.0 MPa podrían causar la muerte de durazneros.

7.5 AJUSTE DE LOS DATOS DE CONSUMO AL MARCO DE PLANTACIÓN

Los datos de E_{Tc} y los coeficientes K_c y K_{cb} medidos en el lisímetro, se ajustaron luego al marco de plantación. El monte en donde se ubicó el lisímetro se manejó con la entrefila empastada. Entonces para obtener la E_{Tc} ponderada correspondiente al

duraznero, con entrefila empastada y marco de plantación 4,5 x 2,5 m, se aplicó la siguiente relación:

$$ET_{caj} = ET_c * p_{cópia}/marco + E_{To} * 0.9 * (1 - p_{cópia}/marco)$$

Siendo:

ET_c aj - Evapotranspiración del duraznero ajustada al marco

ET_c - Evapotranspiración medida en el lisímetro

$P_{cópia}/marco$ - proporción de la copa en el marco de plantación

El K_c para la cobertura de la entrefila se fijó en 0,9. El mismo valor utilizaron Snyder et al. (2000) en su modelo para estimar la ET_c de montes y viñas con manejo de entrefilas empastadas. Estos autores argumentan que si bien no tienen medidas realizadas es lógico pensar que el consumo en la entrefila se mantendría en valores ligeramente inferiores a la E_{To} debido al sombreado parcial de la entrefila provocado por las ramas y troncos de los árboles mientras se va completando el follaje de estos.

La transpiración directa de la planta (T) se calculó como:

$$T = ET_c \text{ aj} - E_s$$

Siendo:

E_s - Evaporación directa en la superficie del lisímetro

El coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) se calculó como:

$$ET_c \text{ aj} = (ET_c - E_s) / E_{To}$$

7.6 INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES DE LA REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL (AGRIAMBI) CORRESPONDIENTES AL ARTÍCULO CIENTÍFICO

Línguas e áreas de estudo

Os artigos submetidos à Revista AGRIAMBI podem ser elaborados em Português, Inglês ou Espanhol e devem ser produto de pesquisa nas áreas de Manejo de Solo, Água e Planta, Engenharia de Irrigação e Drenagem, Meteorologia e Climatologia Agrícola, Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, Gestão e Controle Ambiental (esta área contempla apenas artigos que descrevam pesquisas sobre a gestão e o controle ambiental no contexto da agropecuária), Construções Rurais e Ambiente, Automação e Instrumentação, Máquinas Agrícolas e, finalmente Energia na Agricultura.

Composição seqüencial do artigo

a) Título: no máximo com 15 palavras, em que apenas a primeira letra da primeira palavra deve ser maiúscula; entretanto, quando o título tiver um subtítulo, ou seja, com dois pontos (:), a primeira letra da primeira palavra do subtítulo (ao lado direito dos dois pontos) deve ser maiúscula.

b) Nome(s) do(s) autor(es):

- Deverá(ao) ser separado(s) por vírgulas, sendo por extenso apenas o primeiro nome e o último sobrenome de cada autor, nos quais somente a primeira letra deve ser maiúscula e o último nome separado por &.
- Colocar referência de nota no final do último sobrenome de cada autor para fornecer, logo abaixo, endereço institucional, incluindo telefone, fax e E-mail. Os autores pertencentes a uma mesma instituição devem ser referenciados por uma única nota; no entanto, em se tratando de Universidades, deverá haver uma nota para cada Departamento: exemplo de nota: DCA/UFCG, Av. Aprígio Veloso 882, Bodocongó, CEP 58109-970, Campina Grande, PB. Fone(s): (83) 3310-1202; 3310-1201. E-mail(s): ; . Colocar C.P. quando existir caixa postal. Não se coloca ponto ao final de cada nota.
- O artigo deverá ter no máximo seis autores.
- Em relação ao que consta na primeira versão do artigo submetida à Revista, não serão permitidas alterações posteriores na seqüência nem nos nomes dos autores.

c) Resumo: no máximo com 15 linhas.

- d) Palavras-chave: no mínimo três e no máximo cinco, não constantes no Título, separadas por vírgula e com todas as letras minúsculas.
- e) Título em inglês: terá a mesma normatização do título em Português ou em Espanhol.
- f) Abstract: no máximo com 15 linhas, devendo ser tradução fiel do Resumo. A casa decimal dos números deve ser indicada por ponto ao invés de vírgula.
- g) Key words: terá a mesma normatização das palavras-chave.
- h) Introdução: destacar a relevância da pesquisa, inclusive através de revisão de literatura, em no máximo 2 páginas. Não devem existir, na Introdução, equações, tabelas, figuras nem texto teórico básico sobre determinado assunto, mas, sim, sobre resultados de pesquisa.
- i) Material e Métodos: deve conter informações imprescindíveis que possibilitem a repetição da pesquisa, por outros pesquisadores.
- j) Resultados e Discussão: os resultados obtidos devem ser discutidos e interpretados à luz da literatura.
- k) Conclusões: devem ser numeradas e escritas de forma sucinta, isto é, sem comentários nem explicações adicionais, baseando-se apenas nos resultados apresentados.
- l) Agradecimentos (facultativo)
- m) Literatura Citada: o artigo deve ter no mínimo 10 citações bibliográficas, sendo a maioria em revistas/periódicos e recentes (últimos 5 anos).

Para os artigos escritos em Inglês, título, resumo e palavras-chave deverão, também, constar em Português e, para os artigos em Espanhol, em Inglês; vindo em ambos os casos primeiro no idioma principal. Outros tipos de contribuição (Revisão de Literatura e Nota Prévia) para a revista poderão ter a sequência adaptada ao assunto.

Edição do texto

- a) Processador: Word for Windows
- b) Texto: fonte Times New Roman, tamanho 12. Não deverão existir no texto palavras em negrito nem em itálico, exceto para o título, itens e subitens, que deverão ser em negrito, e os nomes científicos de espécies vegetais e animais, que deverão ser em itálico. Em equações, tabelas e figuras não deverão existir itálico e negrito. Evitar parágrafos muito longos devendo, preferencialmente, ter no máximo 60 palavras.

- c) Espaçamento: duplo entre o título, nome(s) do(s) autor(es), resumo e abstract; simples entre item e subitem; e no texto, espaço 1,5.
- d) Parágrafo: 0,5 cm.
- e) Página: Papel A4, orientação retrato, margens superior e inferior de 2,54 cm e esquerda e direita de 3,00 cm, no máximo de 20 páginas não numeradas.
- f) Todos os itens em letras maiúsculas, em negrito e centralizados, exceto Resumo, Abstract, Palavras-chave e Key words, que deverão ser alinhados à esquerda e apenas a primeira letra maiúscula. Os subitens deverão ser alinhados à esquerda, em negrito e somente a primeira letra maiúscula.
- g) As grandezas devem ser expressas no SI (Sistema Internacional) e a terminologia científica deve seguir as convenções internacionais de cada área em questão.
- h) Tabelas e Figuras (gráficos, mapas, imagens, fotografias, desenhos)
- As tabelas e figuras devem apresentar largura de 9 ou 18 cm, com texto em fonte Times New Roman, tamanho 9, e ser inseridas logo abaixo do parágrafo onde foram citadas a primeira vez. Exemplos de citações no texto: Figura 1; Tabela 1. Tabelas e figuras que possuem praticamente o mesmo título deverão ser agrupadas em uma única tabela ou figura criando-se, no entanto, um indicador de diferenciação. A letra indicadora de cada sub-figura em uma figura agrupada deve ser maiúscula e com um ponto (exemplo: A.), posicionada ao lado esquerdo superior da figura. As figuras agrupadas devem ser citadas no texto, da seguinte forma: Figura 1A; Figura 1B; Figura 1C. As tabelas e figuras com 18 cm de largura ultrapassarão as margens esquerda e direita de 3 cm, sem nenhum problema.
 - As tabelas não devem ter tracejado vertical e o mínimo de tracejado horizontal. Exemplo do título, o qual deve ficar acima da tabela: Tabela 1. Estações do INMET selecionadas (sem ponto no final). Em tabelas que apresentam a comparação de médias, mediante análise estatística, deverá haver um espaço entre o valor numérico (média) e a letra. As unidades deverão estar entre parêntesis.
 - As figuras não devem ter bordadura e suas curvas (no caso de gráficos) deverão ter espessura de 0,5 pt, podendo ser coloridas, mas sempre possuindo marcadores de legenda diversos. Exemplo do título, o qual deve ficar abaixo da figura: Figura 1. Perda acumulada de solo em função do tempo de aplicação da chuva simulada (sem ponto no final). Para não se tornar redundante, as figuras não devem ter dados constantes em tabelas. Em figuras agrupadas, se o título e a numeração dos eixos x e y forem iguais, deixar só um título centralizado e a numeração em apenas um eixo. Gráficos, diagramas (curvas em geral) devem vir em imagem vetorial. Quando se tratar de figuras bitmap (mapa de bit), a resolução mínima deve ser de 300 bpi. Os autores deverão primar pela qualidade de resolução das figuras, tendo em vista boa compreensão sobre elas. As

unidades nos eixos das figuras devem estar entre parêntesis, mas sem ser separadas do título por vírgula.

Exemplos de citações no texto

a) Quando a citação possuir apenas um autor: Folegatti (1997) ou (Folegatti, 1997).

b) Quando a citação possuir dois autores: Frizzzone & Saad (1997) ou (Frizzzone & Saad, 1997).

c) Quando a citação possuir mais de dois autores: Botrel et al. (1997) ou (Botrel et al., 1997).

Quando a autoria do trabalho for uma instituição/empresa, a citação deverá ser de sua sigla em letras maiúsculas. Exemplo: EMBRAPA (2006).

Literatura citada

As bibliografias citadas no texto deverão ser dispostas na lista em ordem alfabética pelo último sobrenome do primeiro autor e em ordem cronológica crescente, e conter os nomes de todos os autores. Citações de bibliografias no prelo ou de comunicação pessoal não são aceitas na elaboração dos artigos.

A seguir, são apresentados exemplos de formatação:

a) Livros

Nããs, I. de A. . Princípios de conforto térmico na produção animal. 1.ed. São Paulo: Ícone Editora Ltda, 1989. 183p.

b) Capítulo de livros

Almeida, F. de A. C.; Matos, V. P.; Castro, J. R. de; Dutra, A. S. Avaliação da qualidade e conservação de sementes a nível de produtor. In: Hara, T.; Almeida, F. de A. C.; Cavalcanti Mata, M. E. R. M. (eds.). Armazenamento de grãos e sementes nas propriedades rurais. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. cap.3, p.133-188.

c) Revistas

Pereira, G. M.; Soares, A. A.; Alves, A. R.; Ramos, M. M.; Martinez, M. A. Modelo computacional para simulação das perdas de água por evaporação na irrigação por aspersão. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.16, n.3, p.11-26, 1997.

d) Dissertações e teses

Dantas Neto, J. Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta da cultura à água. Botucatu: UNESP, 1994. 125p. Tese Doutorado

e) Trabalhos apresentados em congressos (Anais, Resumos, Proceedings, Disquetes, CD Roms)

Weiss, A.; Santos, S.; Back, N.; Forcellini, F. Diagnóstico da mecanização agrícola existente nas microbacias da região do Tijucas da Madre. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 25, e Congresso Latino-Americano de Ingenieria Agrícola, 2, 1996, Bauru. Resumos ... Bauru: SBEA, 1996. p.130.

f) WWW (World Wide Web) e FTP (File Transfer Protocol)

Burka, L.P. A hipertext history of multi-user dimensions; MUD history.

No caso de CD Rom, o título da publicação continuará sendo Anais, Resumos ou Proceedings mas o número de páginas será substituído pelas palavras CD Rom.

Outras informações sobre normatização de artigos

a) Não colocar ponto no final das palavras-chave, key words e títulos de tabelas e figuras.

b) No texto, quando se diz que um autor citou outro, deve-se usar apud ao invés de: citado por. Exemplo: Walker (2001) apud Azevedo (2005) em vez de Walker (2001) citado por Azevedo (2005).

c) Na descrição dos parâmetros e variáveis de uma equação deverá haver um traço separando o símbolo de sua descrição. A numeração de uma equação deverá estar entre parêntesis e alinhada à direita: exemplo: (1). As equações deverão ser citadas no texto conforme os seguintes exemplos: Eq. 1; Eqs. 3 e 4.

d) Todas as letras de uma sigla devem ser maiúsculas; já o nome por extenso de uma instituição deve ter maiúscula apenas a primeira letra de cada palavra.

e) Nos exemplos seguintes de citações no texto de valores numéricos, o formato correto é o que se encontra no lado direito da igualdade:

10 horas = 10 h; 32 minutos = 32 min; 5 l (litros) = 5 L; 45 ml = 45 mL; l/s = L s⁻¹; 27°C = 27 °C; 0,14 m³/min/m = 0,14 m³ min⁻¹ m⁻¹; 100 g de peso/ave = 100 g de peso por ave; 2 toneladas = 2 t; mm/dia = mm d⁻¹; 2x3 = 2 x 3 (deve ser separado); 45,2 - 61,5 = 45,2-61,5 (deve ser junto).

A % é a única unidade que deve estar junto ao número (45%). Quando no texto existirem valores numéricos seguidos, que possuem a mesma unidade, colocar a unidade somente no último valor (Exemplos: 20 m e 40 m = 20 e 40 m; 56,1%, 82,5% e 90,2% = 56,1, 82,5 e 90,2%).

- f) Quando for pertinente, deixar os valores numéricos no texto, tabelas e figuras com no máximo duas casas decimais.
- g) Os títulos das bibliografias listadas devem ter apenas a primeira letra da primeira palavra maiúscula, com exceção de nomes próprios. O título de eventos deverá ter apenas a 1ª letra de cada palavra maiúscula.

RECOMENDAÇÃO IMPORTANTE: Recomenda-se aos autores a consulta na página da Revista () de artigos publicados, para suprimir outras dúvidas relacionadas à normatização de artigos, por exemplo, formas de como agrupar figuras e tabelas.

LEMBRETE IMPORTANTE: Os artigos que não estiverem integralmente nas normas da Revista serão rejeitados logo por ocasião da submissão.

Esclarecimentos sobre a submissão dos artigos

- a) Os artigos subdivididos em partes I, II etc, devem ser submetidos juntos, pois serão encaminhados aos mesmos consultores.
- b) Caso os autores do artigo já não tenham sido cadastrados anteriormente na página da Revista (www.agriambi.com.br), o autor correspondente deverá fazê-lo através do link , da página principal da Revista e, em seguida, cadastrar o artigo. No cadastro de cada autor devem ser por extenso apenas o primeiro nome e o último sobrenome, existindo ponto em cada abreviatura e um espaço entre elas. No cadastro do artigo, colocar os nomes dos autores na mesma sequência em que aparecem no artigo e separados por ponto e vírgula, porém sem espaço entre os nomes.
- c) Enviar pelos correios a seguinte documentação:
 - Carta de encaminhamento, declarando que o artigo não foi publicado ou submetido para publicação em outro periódico, indicando a área de estudo em que o mesmo se enquadra, contemplada por esta Revista. Nesta carta deverão constar o endereço completo, telefone e email do autor correspondente para contato. Caso o autor correspondente deseje que a Secretaria da Revista lhe envie declaração sobre o recebimento do artigo e/ou fatura referente ao pagamento da taxa de submissão, deverá solicitá-la na carta de encaminhamento, indicando a forma de envio (fax ou endereço).

- Arquivo em disquete ou CD Rom e três cópias impressas do artigo.
- Comprovante de cadastro do artigo na página da Revista.
- Comprovante de depósito (Banco do Brasil, agência 1591-1, C/C 1192-4) ou cheque nominal à ATECEL/RBEAA, referente à taxa de submissão, no valor de R\$80,00 (oitenta reais). Caso o artigo tenha, depois de diagramado, um número de páginas superior a seis, será cobrada a taxa de R\$30,00 (trinta reais) por página excedente.

d) Endereço para encaminhamento

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
Av. Aprígio Veloso 882, Bodocongó, Bloco CM, 1º andar
Caixa Postal 10078, CEP 58109-970, Campina Grande, PB

Objetivando evitar extravio, toda correspondência para a Revista deverá ter a caixa postal.

- e) Caso o comprovante de pagamento da taxa de submissão não tenha sido enviado junto com o artigo, o mesmo só será protocolado e encaminhado para análise após a Secretaria da Revista ter recebido o referido comprovante, podendo ser enviado através do fax (83) 310 1056 ou pelo e-mail .
- f) O pagamento da taxa de submissão não garante a aceitação do artigo para publicação na Revista e, em caso de sua não aceitação, a referida taxa não será devolvida.
- g) O autor correspondente será informado por e-mail sobre o número de protocolo do artigo; a partir daí, ele poderá acompanhar o processo de análise do artigo, através do link da página principal da Revista. Para qualquer informação sobre o andamento do artigo solicitada à Secretaria da Revista, o autor deverá fornecer o número de seu protocolo.

Procedimentos para análise de artigos

- a) Numa primeira etapa, todos os artigos serão submetidos a pré-seleção e aqueles que não se enquadrarem na política de publicação da Revista ou, ainda, que não tragam contribuição científica relevante, serão recusados pela Equipe Editorial, com o auxílio de parecer de um Consultor. Os artigos pré-selecionados poderão, por recomendação do Consultor, ser devolvidos ao(s) autor(es) para reformulação, antes de serem encaminhados para uma análise mais aprofundada, por parte de três Consultores e revisor de idiomas.
- b) Com o auxílio dos pareceres e sugestões de Consultores sobre a primeira versão do artigo, a Equipe Editorial poderá recusá-lo ou solicitar ao(s) autor(es) uma segunda versão, que será novamente avaliada, tanto pelos Consultores como

pela Equipe Editorial. Em sua segunda versão, o artigo poderá ser recusado, aprovado e/ou devolvido ao(s) autor(es) para uma terceira versão.

- c) Salienta-se que, independente dos pareceres dos Consultores, cabe à Equipe Editorial, em qualquer etapa de análise (pré-seleção e seleção - 1ª, 2ª e 3ª versões), a decisão final sobre a aprovação do artigo e o direito de sugerir ou solicitar modificações no texto, julgadas necessárias.
- d) A princípio, as sugestões dos Consultores e da Equipe Editorial ao texto dos artigos deverão ser incorporadas pelo(s) autor(es); entretanto, o(s) mesmo(s) tem(êm) o direito de não acatá-las, mediante justificativa expressa, que será analisada pelo(s) Consultor(es) e pela Equipe Editorial.
- e) No caso de aprovação o artigo é encaminhado para uma nova revisão de idiomas e, antes de sua diagramação, se necessário serão solicitadas, ao autor correspondente, informações complementares. Posteriormente, o artigo lhe é enviado na forma de documento pdf, para revisão final, o qual comunicará à Equipe Editorial sobre eventuais correções e alterações. Após a incorporação, pela Equipe de Diagramação, das correções solicitadas, os arquivos em formato pdf de determinado número serão disponibilizados no site da Revista (www.scielo.br), e posteriormente no site da SciELO em formato html.
- f) Após publicação, quaisquer erros encontrados por parte de autores ou leitores, quando comunicados à Equipe Editorial, serão corrigidos através de errata no próximo número da Revista.

Informações Adicionais

- a) Os assuntos, dados e conceitos emitidos nesta Revista, são de exclusiva responsabilidade dos autores. A eventual citação de produtos e marcas comerciais não significa recomendação de utilização por parte da Revista. A reprodução dos artigos publicados é permitida, desde que seja citada a fonte.
- b) Os prazos máximos de devolução de artigos corrigidos por parte do(s) autor(es) são de trinta dias para a primeira versão e de vinte dias para as segunda e terceira versões, a contar da data da correspondência encaminhada ao(s) autor(es) pelo Editor.

7.7 INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES DE LA REVISTA AGROCIENCIA CORRESPONDIENTE A LA COMUNICACIÓN BREVE

Remisión y categorías de los artículos

Los manuscritos puestos a consideración del Consejo editor de la Revista Agrociencia deben ser inéditos, y se enviarán como archivos electrónicos en MS-Word® a los

Editores responsables: agrocien@fagro.edu.uy, junto a una carta donde se manifieste el interés de publicar el trabajo en esta revista, y se ceden los derechos de autor a la misma. El archivo se designará con el apellido y nombre del primer autor.

Los trabajos pueden corresponder a las siguientes categorías:

- Artículo de investigación: presentan resultados de investigación originales; su estructura consta de cuatro partes. Los artículos de investigación pueden ir bajo la forma de Comunicación breve.
- Revisión: por lo general son solicitadas por el Consejo editor a especialistas, y en temas de interés. La revisión corresponde al análisis y sistematización de resultados de investigaciones sobre un campo en el que el o los autores tienen comprobada trayectoria.
- Nota técnica: incluye los resultados de investigación desde una perspectiva interpretativa y crítica sobre un tema específico, a partir de fuentes originales. Algunos ejemplos pueden ser la descripción de alguna región, una problemática socioeconómica rural o la situación de rubros de producción agropecuaria.

Los trabajos, que se enviarán en formato electrónico, se presentarán en tamaño carta, a doble espacio, con fuente Times New Roman de 12 puntos, con márgenes de 3 cm en la parte superior, 2 cm en la inferior y 2,5 cm en las márgenes laterales.

Las hojas se numerarán en el margen inferior derecho, y los renglones en el margen izquierdo.

El Artículo de investigación no debe exceder las 6.500 palabras, ó 25 páginas, y la Comunicación breve y la Nota técnica las 3.500 palabras, ó 15 páginas. La Revisión puede extenderse hasta 8.500 palabras ó 35 páginas.

Cuadros y figuras

Los cuadros y figuras deben presentarse en formato MS-Excel®, en hojas independientes con numeración consecutiva en Times New Roman y en cuerpo 10 sin negritas ni en el encabezado del cuadro como en el cuerpo del mismo (Cuadro 1, Cuadro n; Figura 1, Figura n, etc.). Figuras, tales como fotos y mapas, se presentarán en formato digital comprimido JPG (JPEG) o GIF con resolución mínima 300 dpi al tamaño definitivo (preferentemente 600 x 600 dpi). Seguido irán los textos correspondientes a

los encabezados de cuadro o pie de figura, por Ej. Cuadro 1., Cuadro n, Figura 1., Figura n., etc., sin salto de página entre cada uno.

Idiomas y unidades

Los idiomas de la revista son el español, portugués e inglés. Los manuscritos se deben ajustar a las normas gramaticales que establece el Diccionario de la Real Academia Española, o a sus equivalentes en otros idiomas. Se utilizará el Sistema Internacional de Unidades (SI) y sus abreviaturas, además de unidades derivadas de éste de uso frecuente en el área en cuestión. Entre la cifra y la abreviatura de la unidad va un espacio (Ej.: 89 kg, 37° C). Entre los sitios de consulta sobre el SI referirse a: www.cem.es

Estructura del manuscrito

Carátula. Figurará el título del trabajo en el idioma original, el apellido y nombre del autor/es, (Ej. Rodríguez Alvaro1;...), el lugar de trabajo de cada uno (identificado con el superíndice) y la dirección postal y el correo electrónico del autor con el que se mantendrá la correspondencia relacionada al manuscrito. No deben figurar títulos académicos ni cargos laborales. Al pie de la carátula debe figurar un Título abreviado del artículo para el encabezamiento de las páginas.

Resumen, summary y palabras clave, key words. El resumen en español o portugués, y el summary, que será la correspondiente traducción al inglés, irán precedidos del título del trabajo en el idioma respectivo, y sucedido de no más de cinco palabras clave y key words, que no hayan sido usadas en el título. La extensión máxima es de 250 palabras.

Estructura del artículo, citas en texto y títulos. El texto del trabajo se organiza en las siguientes secciones: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados, Discusión, Agradecimientos, Bibliografía, Cuadros y Figuras. Se podrán unificar Resultados y Discusión, e incorporar Conclusiones si se considera necesario.

Las citas bibliográficas en el texto se realizarán como [autor(es), año]. Cuando la cita tenga dos autores se usará «y» entre ambos (Ej. Böger, P. y Sandmann, G. 1999). Cuando sean más de dos autores se mencionará el primero seguido de la expresión et al.,. En la sección Bibliografía, se reproducirá el título y autores según el idioma original del trabajo (Ej. Böger, P. and Sandmann, G. 1999). Las comunicaciones personales se citarán de igual forma, seguidas de com. pers. Los títulos, deben ir en minúscula y negrita, los subtítulos de igual manera con un cuerpo de letra más chico, y si hubiera títulos de segundo orden en cursiva sin negrita. En el texto, se debe sugerir el lugar de ubicación de la tabla o figura como: intercalar Cuadro X o Figura X. Cuando el archivo sea mayor a de 500 Kb deberá comprimirse (Winzip).

Agradecimientos. En caso necesario, se agradecerá a especialista/s por las contribuciones al trabajo, colaboradores de campo o laboratorio, a organismos financiadores, entidades oficiales o privadas, etc.

Bibliografía. Las referencias bibliográficas se deben incluir al final del artículo. Los autores se ordenarán por el orden alfabético de sus apellidos, y cuando se cita más de una publicación del mismo autor se ordenarán cronológicamente. Los nombres de las revistas deben ir abreviados según el código internacional para las mismas. En caso de no tenerlo, use su nombre completo. A continuación se detalla la forma de citar distintas fuentes.

Artículos de revistas: Autor (es), año. Título del artículo, nombre de la revista, número, página-página. Ejemplo: Zhang, C., Laurent, S., Sakr, S., Peng, L. and Bédu, S. 2006. Heterocyst differentiation and pattern formation in cyanobacteria: a chorus of signals. *Mol. Microbiol.* 59: 367-375.

Capítulos de libros: Autor (es), año. Título del capítulo. En: título del libro, apellido de los compiladores o editores (Ed/s.), casa editora, páginas consultadas (pp). Ejemplo: Barbulova, A. and Chiurazzi, M. 2005. A procedure for in vitro nodulation studies. En: *Lotus japonicus Handbook*. Ed. Márquez A. Springer, Netherlands. pp. 83-86. Internet. Actualmente no hay una norma universal reconocida en el ámbito científico sobre las citas desde medios electrónicos, pero hay consenso sobre formas en que pueden realizarse, la recomendada es: Autor (es), año. Título del artículo. En: Nombres de la publicación electrónica, del website, portal o página y su URL, páginas consultadas (pp. #) o páginas totales (# p.); fecha de consulta. Ejemplo (Revista Colombiana de Horticultura): Gutiérrez, M. 2007. Siembra de olivos en el desierto palestino. En: *Agricultura Tropical*, <http://agrotropical.edunet.es>. 25 p.; consulta: noviembre 2006.

Corrección para la publicación Las pruebas de imprenta se enviarán por vía electrónica a los autores para su corrección, y deberán ser devueltas dentro del plazo que se indique.