

Parte B

Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar

En esta parte se examina la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c). Las mismas se refieren a la evapotranspiración de un cultivo que se desarrolla libre de enfermedades, con buena fertilización, que crece en un campo extenso bajo condiciones óptimas de humedad en el suelo y el cual alcanza su producción total bajo ciertas condiciones climáticas.

Los efectos de las distintas condiciones del tiempo atmosférico fueron incluidos en la ET_o (Parte A). Los efectos de las características que distinguen la superficie cultivada de la superficie de referencia se integran en el coeficiente del cultivo. Para determinar ET_c se multiplica ET_o por el coeficiente del cultivo.

En esta parte se presentan valores típicos del coeficiente del cultivo, así como los procedimientos de cálculo para ajustar los coeficientes del cultivo y para calcular ET_c . Se presentan dos enfoques de cálculo: los enfoques del coeficiente único y del coeficiente dual del cultivo. En el enfoque del coeficiente único del cultivo, las diferencias entre el cultivo y el pasto de referencia se combinan dentro de un coeficiente sencillo. En el enfoque del coeficiente dual del cultivo, el coeficiente del cultivo se divide en dos factores que describen por separado las diferencias en la evaporación y la transpiración entre el cultivo y el pasto de referencia.

Tal como se presentó en el Capítulo 5 y se resume en el Cuadro 10, se utiliza el procedimiento del coeficiente único del cultivo para la mayoría de las aplicaciones relacionadas con la planificación del riego, diseño y manejo. El procedimiento dual del cultivo es importante en aquellos tipos de cálculos donde se requieran estimaciones detalladas de la evaporación en el suelo, tales como en los calendarios de riego en tiempo real, la aplicación de modelos de calidad del agua y en la investigación en general.

Capítulo 5

Introducción a la Evapotranspiración del Cultivo (ET_c)

En este capítulo se describe «la metodología del coeficiente del cultivo» para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_o). Las condiciones estándar de los cultivos son: que se desarrollen en campos extensos, bajo condiciones agronómicas excelentes y sin limitaciones de humedad en el suelo. La evapotranspiración de un cultivo será diferente a la del cultivo de referencia (ET_o) en la medida en que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto. Los efectos de las características que distinguen al cultivo del pasto están incorporadas en el coeficiente del cultivo (K_c). En la metodología del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando ET_o por K_c .

Las diferencias en evaporación y transpiración entre los cultivos de campo y el pasto de referencia pueden ser integradas en un coeficiente único del cultivo (K_c) o separadas en dos coeficientes: un coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e), por lo que $K_c = K_{cb} + K_e$. El procedimiento a seguir dependerá del propósito de los cálculos, la exactitud requerida y la información disponible.

PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO

Cálculo directo

La evapotranspiración que ocurre en una superficie cultivada puede ser medida directamente a través de los métodos de transferencia de masa o del balance de energía. También se puede obtener la misma a partir de estudios del balance de agua en el suelo en campos cultivados o a través de lisímetros.

Por otra parte, la evapotranspiración de un cultivo puede ser estimada a partir de datos meteorológicos y del cultivo utilizando la ecuación de Penman-Monteith (Ec. 3). Se puede inferir la tasa de evapotranspiración ajustando el valor de albedo y las resistencias aerodinámicas y de la superficie del cultivo, para representar las características de crecimiento del mismo. Sin embargo, los valores de albedo y las resistencias mencionadas son difíciles de estimar con precisión debido a su variabilidad durante la temporada de crecimiento del cultivo.

Debido a la falta de información confiable sobre los valores de resistencia aerodinámica y de resistencia de la vegetación, correspondientes a distintas superficies cultivadas, la ecuación de Penman-Monteith se utiliza en este manual solamente para la estimación de ET_o , es decir la evapotranspiración que ocurre a partir de una superficie hipotética de un cultivo de pastos, bien regada, la cual considera valores fijos de altura del cultivo, albedo y resistencia de la superficie.

Enfoque del coeficiente del cultivo

De acuerdo al enfoque del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo ET_c se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o y el coeficiente del cultivo K_c :

$$ET_c = K_c ET_o \quad (56)$$

donde

ET_c	evapotranspiración del cultivo [mm d^{-1}],
K_c	coeficiente del cultivo [adimensional],
ET_o	evapotranspiración del cultivo de referencia [mm d^{-1}].

La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de ET_o . Por lo tanto, mientras ET_o representa un indicador de la demanda climática, el valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas. Este hecho constituye la razón principal de la aceptación general y utilidad de la metodología del coeficiente del cultivo, así como de los valores de K_c desarrollados en estudios anteriores.

La evapotranspiración del cultivo de referencia ET_o se define y calcula a través de la ecuación de la FAO Penman-Monteith (Capítulo 4). El coeficiente del cultivo es básicamente el cociente entre la evapotranspiración del cultivo ET_c y la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o , representando el efecto integrado de cuatro características principales que diferencian a un cultivo en particular del cultivo del pasto de referencia. Las características mencionadas son las siguientes:

- Altura del cultivo. La altura del cultivo tiene influencia en el valor de la resistencia aerodinámica, r_a , de la ecuación de Penman-Monteith, así como en la transferencia turbulenta del vapor del agua desde el cultivo hacia la atmósfera. El término r_a aparece en dos oportunidades en la versión completa de la ecuación de la FAO Penman-Monteith.
- Albedo (reflectancia) de la superficie del cultivo y suelo. El valor del albedo está afectado por la porción del suelo cubierta por la vegetación, así como por la humedad presente en la superficie del suelo. El albedo de las superficies del cultivo y suelo afectan el valor de la radiación neta de la superficie, R_n , la cual constituye la fuente principal de energía para el proceso de evapotranspiración.
- Resistencia del cultivo. La resistencia del cultivo a la transferencia del vapor de agua es afectada por el área foliar (cantidad de estomas), edad y condición de la hoja, así como por el grado de control estomático. La resistencia de la vegetación tiene influencia en el valor de la resistencia de la superficie, r_s .
- Evaporación que ocurre en el suelo, especialmente en la parte expuesta del mismo.

La humedad presente en la superficie del suelo, así como la fracción del suelo cubierta por la vegetación, tienen influencia sobre el valor de la resistencia de la superficie (r_s). Inmediatamente después de humedecer un suelo, la tasa de transferencia de vapor de agua desde el suelo es alta, especialmente en los casos donde existe una cobertura parcial del suelo por parte de la vegetación. La suma de las resistencias ofrecida por la vegetación y el suelo representan la resistencia de la superficie (r_s). En la ecuación de Penman-Monteith, el término resistencia de la superficie representa la resistencia al flujo del vapor de agua que ofrecen las hojas de las plantas y la superficie del suelo.

El valor de K_c en la Ecuación 56 permite predecir el valor de ET_c bajo condiciones estándar. Este valor representa el límite máximo de evapotranspiración del cultivo cuando no existen obstáculos al crecimiento del mismo debido a limitaciones de agua, densidad del cultivo, enfermedades, malezas, insectos o excesiva salinidad. Cuando sea necesario, el valor de ET_c deberá ser ajustado, en ausencia de las condiciones estándar, $ET_{c,aj}$, en los casos donde existan condiciones ambientales u otras características que puedan impactar o limitar el valor de ET_c . Los factores a considerar para convertir ET_c en $ET_{c,aj}$ se describen en la parte C.

FACTORES QUE DETERMINAN EL COEFICIENTE DEL CULTIVO

El coeficiente del cultivo integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente K_c . Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de K_c .

Tipo de Cultivo

Debido a las diferencias en albedo, altura del cultivo, propiedades aerodinámicas, así como características de los estomas y hojas de las plantas, se presentarán diferencias entre la evapotranspiración de un cultivo bien desarrollado y regado y la de referencia ET_o .

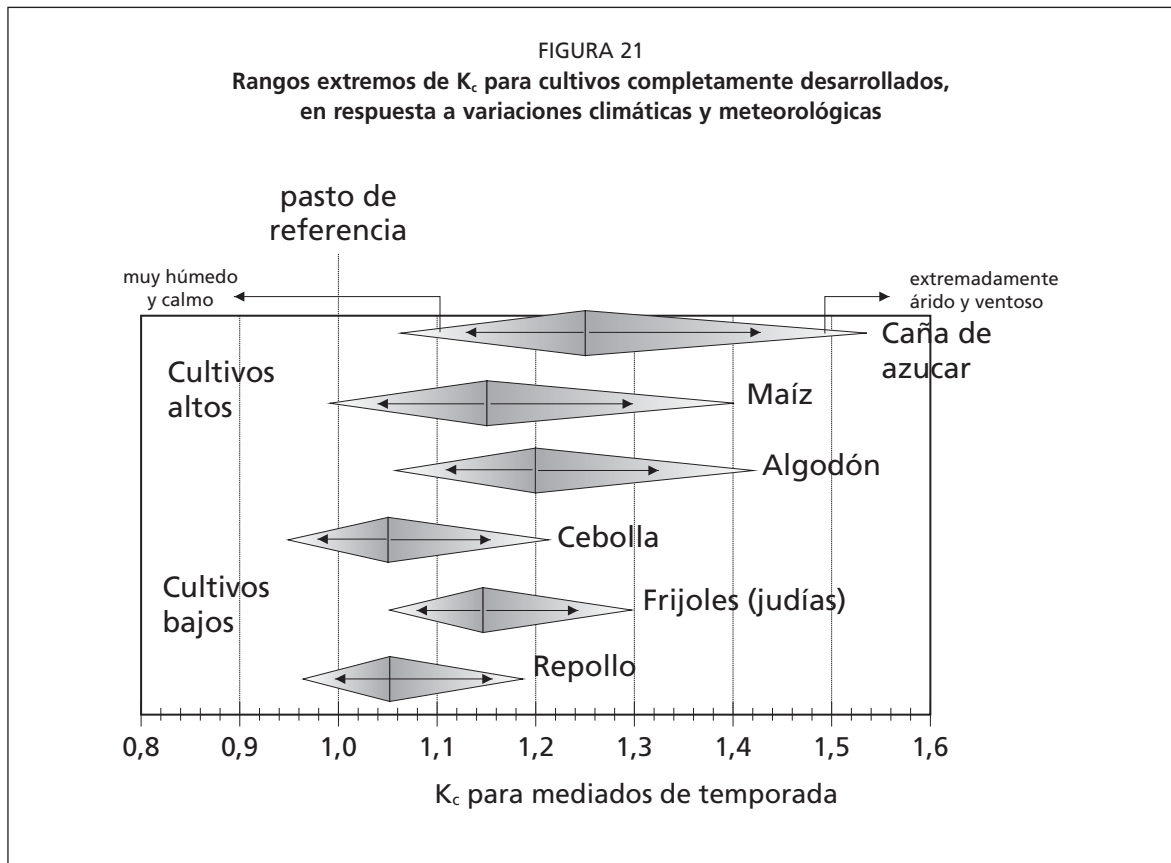
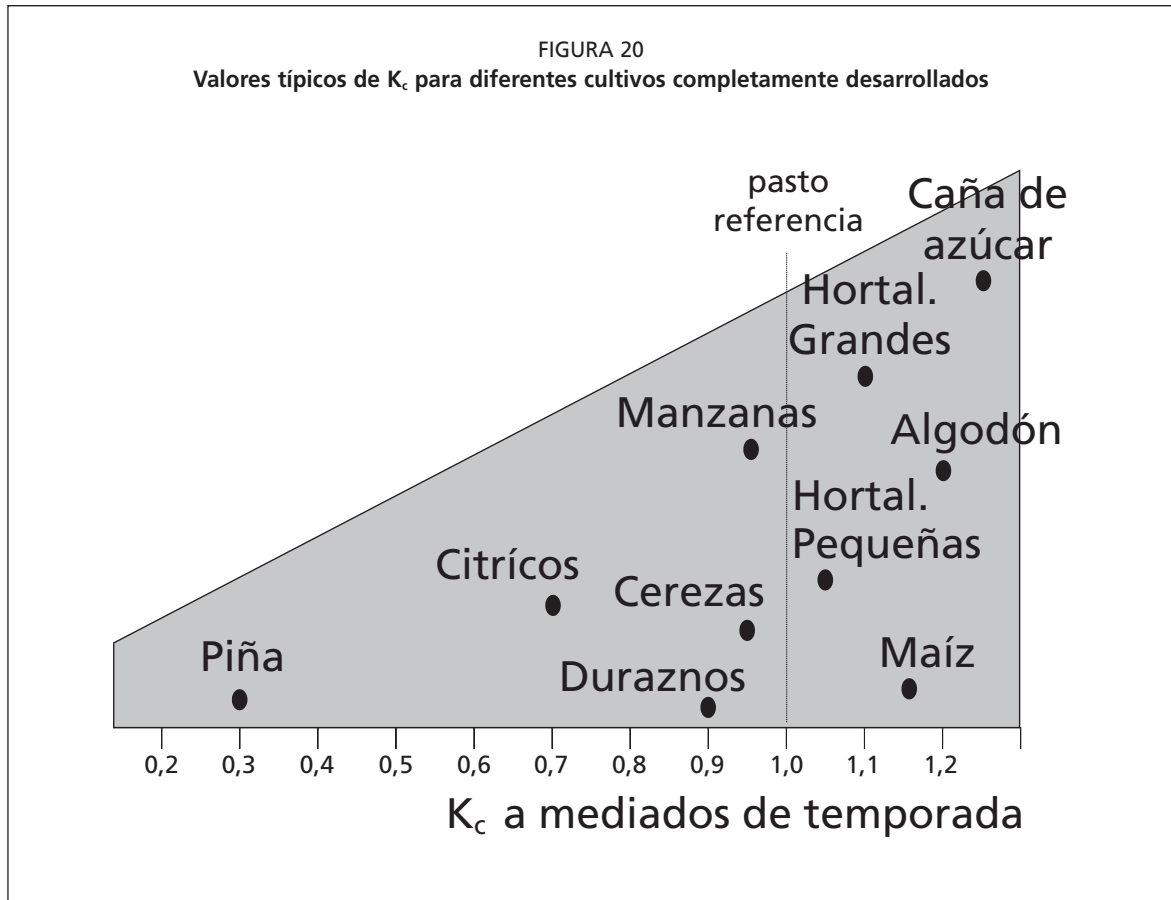
Los espaciamientos estrechos entre plantas, así como la mayor altura y rugosidad de la superficie de una gran cantidad de cultivos agrícolas, producen como consecuencia que esos cultivos presenten coeficientes K_c mayores a 1,0. En esos casos, el factor K_c es con frecuencia de 5 a 10% mayor que el valor de referencia (donde $K_c = 1,0$), pudiendo ser hasta 15-20% mayor para el caso de cultivos altos como el maíz, el sorgo o la caña de azúcar (Figura 20). En el Cuadro 12 se presentan valores típicos del coeficiente del cultivo, correspondientes a cultivos completamente desarrollados ($K_{c\ med}$).

Por otra parte, cultivos como la piña, los cuales pueden cerrar sus estomas durante el día, poseen valores bajos del coeficiente del cultivo. Sin embargo, en la mayoría de las especies, los estomas se abren en respuesta al aumento de la radiación solar. Además de la respuesta de los estomas a las condiciones ambientales, la posición y número de estomas y la resistencia de la cutícula a la transferencia de vapor de agua determinan la pérdida de agua del cultivo. Las especies que presentan estomas solamente en la parte inferior de la hoja y/o que presentan gran resistencia en las hojas, presentarán valores relativamente menores de K_c . Este es el caso de los cítricos y los frutales de hojas caducas. El control a la transpiración y el espaciamiento entre árboles, los cuales cubren un 70% del suelo en el caso de árboles completamente desarrollados, puede causar que el valor de K_c en los mismos sea menor a uno, si son cultivados en ausencia de un cultivo que cubra el suelo (Figura 20).

Clima

Los valores de K_c presentados en el Cuadro 12 son valores medios típicos de K_c que se pueden esperar bajo condiciones climáticas estándar, las cuales son definidas como aquellas correspondientes a climas sub-húmedos, con una humedad relativa mínima diaria (HR_{\min}) $\approx 45\%$ y con velocidades del viento bajas a moderadas, con un promedio de $2\ m\ s^{-1}$.

Las variaciones en la velocidad del viento afectan el valor de la resistencia aerodinámica de los cultivos y por lo tanto los valores del coeficiente del cultivo, especialmente en aquellos cultivos que posean una altura significativamente mayor a la del cultivo hipotético del pasto. La diferencia entre la resistencia aerodinámica del pasto de referencia y la de otros cultivos agrícolas es no sólo específica del tipo de cultivo, sino que depende además de las condiciones climáticas y la altura del cultivo. Debido a que las propiedades aerodinámicas son más pronunciadas en la mayoría de los cultivos agrícolas, al compararse con el pasto de referencia, el cociente entre ET_c y ET_o (ósea K_c), aumenta en la mayoría de los cultivos cuando la velocidad del viento aumenta y cuando la humedad relativa disminuye. En condiciones de una mayor aridez climática y de una mayor velocidad del viento, los valores de K_c aumentan. Por otro lado, en climas húmedos y en condiciones de velocidades del viento bajas, los valores de K_c disminuyen.



El impacto relativo del clima sobre los valores de K_c para cultivos completamente desarrollados se ilustra en la Figura 21. Los límites superiores representan condiciones de extrema aridez y de velocidad del viento fuerte, mientras los límites inferiores son válidos para condiciones de alta humedad y vientos suaves. Los rangos esperables en los valores de K_c , en respuesta a los cambios de las condiciones climáticas y meteorológicas, son menores en el caso de los cultivos de poca altura, siendo mayores en los cultivos más altos. En el Capítulo 6 se describe el procedimiento a seguir para el ajuste de los valores de K_c en función de la altura del cultivo, para diferentes condiciones climáticas.

Bajo condiciones de humedad alta y vientos suaves, el valor de K_c es menos dependiente de las diferencias en los componentes aerodinámicos incluidos en ET_c y ET_o , por lo que los valores de K_c para cultivos agrícolas con cobertura completa no excederán a 1,0 por más de un valor de 0,05. Esto es debido a que tanto los cultivos agrícolas de cobertura completa como el cultivo de referencia del pasto absorben la cantidad máxima posible de radiación de onda corta, la cual es la fuente principal de energía para el proceso de evaporación en condiciones húmedas y de vientos suaves. Además los valores de albedo son similares para una amplia gama de cultivos agrícolas de cobertura completa, incluyendo al cultivo de referencia. Debido a que el déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$) es pequeño en condiciones de humedad alta, las diferencias en ET , causadas por diferencias en resistencia aerodinámica, r_a , entre el cultivo agrícola y el de referencia, también son pequeñas, especialmente con velocidades del viento suaves a moderadas.

Bajo condiciones de aridez los efectos generados por las diferencias en r_a entre el cultivo agrícola y el pasto de referencia en el valor de ET_c serán más pronunciados, debido a que el término ($e_s - e_a$) es relativamente grande. Mientras mayor sea el valor de ($e_s - e_a$), mayor será la diferencia en el componente aerodinámico incluido en el numerador de la ecuación de Penman-Monteith (Ecuación 3), tanto para el cultivo agrícola como para el cultivo de referencia. Por lo tanto el valor de K_c será mayor en condiciones de aridez, en los casos en que el cultivo agrícola posea una mayor área foliar y una mayor rugosidad que el cultivo de referencia.

Debido a que el término $1/r_a$ en el numerador de la ecuación de Penman-Monteith viene multiplicado por el déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$), el valor de ET para cultivos altos se incrementará proporcionalmente en un mayor grado con respecto a ET_o , que en el caso de cultivos de baja altura cuando la humedad relativa es baja. El valor de K_c para cultivos altos, tales como los de 2 a 3 metros de altura, pueden ser hasta un 30% superiores en condiciones de vientos fuertes y climas áridos, que en el caso de climas húmedos y vientos suaves. Este incremento de K_c es debido a la influencia de la mayor rugosidad aerodinámica del cultivo de mayor altura, comparada con la del cultivo de referencia, a la transferencia de vapor de agua desde de la superficie.

Evaporación del suelo

Las diferencias en la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo, que existen entre los cultivos de campo y el cultivo de referencia, están incorporados en el coeficiente del cultivo. El valor del coeficiente K_c para cultivos que cubren completamente el suelo refleja principalmente las diferencias en transpiración, debido a que la evaporación que ocurre en el suelo es relativamente pequeña. Después de un evento de lluvia o riego, el efecto de evaporación es predominante cuando el cultivo es pequeño y sombrea escasamente el suelo. En esas condiciones de poca cobertura, el coeficiente K_c está determinado principalmente por la frecuencia con la cual se humedece la superficie del suelo. Cuando el suelo se encuentra humedecido la mayoría del tiempo debido al riego o la lluvia, la evaporación en el suelo será significativa y el valor de K_c puede exceder a la unidad. Por otro lado si la superficie del suelo está seca, la evaporación será restringida, traduciéndose en un valor de K_c pequeño, pudiendo incluso alcanzar valores tan bajos como 0,1 (Figura 22).

FIGURA 22

El efecto de la evaporación sobre K_c . La línea horizontal representa K_c cuando la superficie del suelo es mantenida constantemente humedecida. La línea curvada corresponde a valores de K_c cuando la superficie del suelo se conserva seca pero el cultivo recibe la cantidad de agua suficiente para mantener su transpiración al máximo.

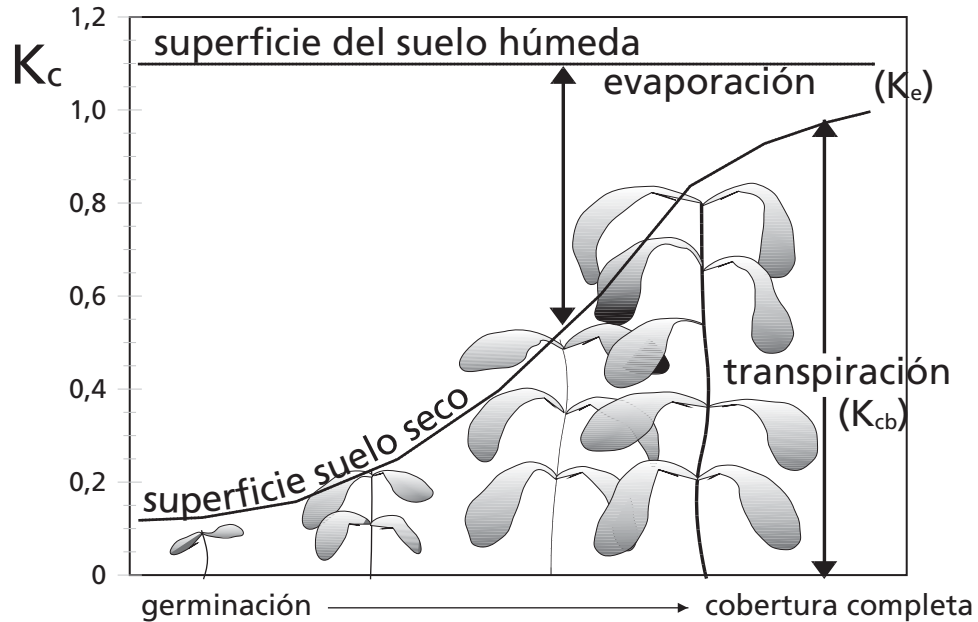
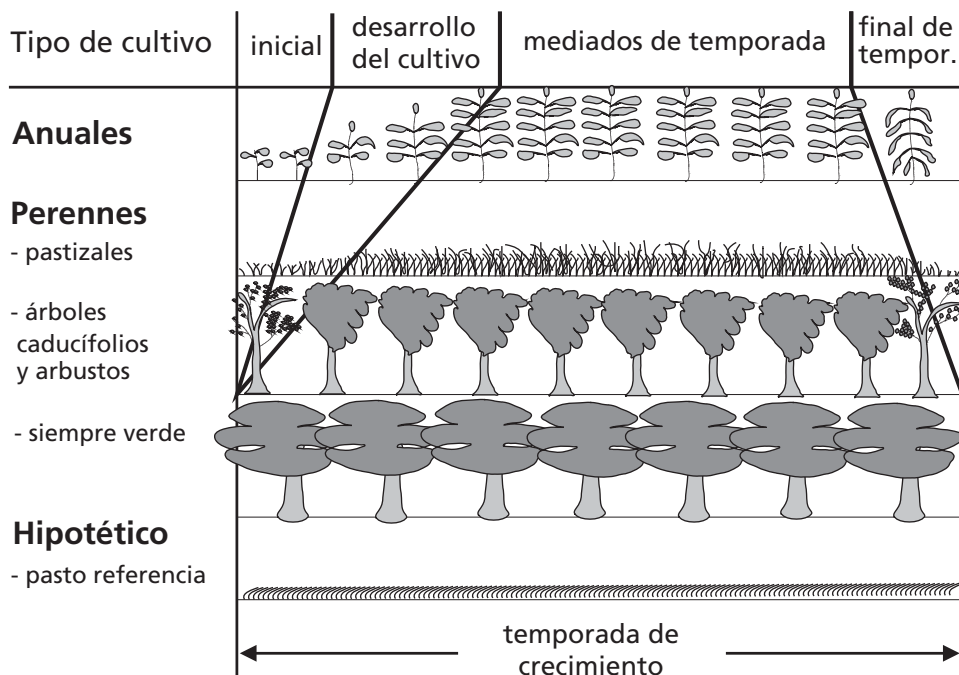


FIGURA 23

Etapas de desarrollo de diferentes cultivos



Las diferencias en la evaporación en el suelo entre el cultivo de campo y la superficie de referencia pueden ser estimadas con mayor precisión utilizando el coeficiente dual del cultivo.

Etapas del crecimiento del cultivo

A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar variarán progresivamente. Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de K_c correspondiente a un cultivo determinado, también variará a lo largo del período de crecimiento del mismo. Este período de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, de mediados de temporada y de final de temporada. En la Figura 23 se ilustra la secuencia general y la proporción de cada una de las etapas de crecimiento mencionadas, correspondiente a diferentes tipos de cultivos.

Etapas inicial

La etapa inicial esta comprendida entre la fecha de siembra y el momento que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo. La longitud de la etapa inicial depende en gran medida del tipo de cultivo, la variedad del mismo, la fecha de siembra y del clima. El final de la etapa inicial ocurre cuando la vegetación verde cubre aproximadamente un 10% de la superficie del suelo. Para cultivos permanentes, la fecha de siembra es reemplazada por el momento en que aparecen las primeras hojas.

Durante el período inicial el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación en el suelo. Por lo tanto, el valor de K_c durante el período inicial ($K_{c\text{ ini}}$) es alto cuando el suelo se encuentra húmedo debido al riego o lluvia, y es bajo cuando la superficie del suelo se encuentra seca. El tiempo que tardará el suelo en secarse dependerá del intervalo de tiempo entre eventos que humedezcan al suelo, del poder evaporante de la atmósfera (ET_o) y de la magnitud del evento de humedecimiento. En el Cuadro 9 se presentan valores generales de $K_{c\text{ ini}}$, estimados en función a la frecuencia entre los eventos de humedecimiento. Los valores incluidos en el Cuadro 9 corresponden a una textura media del suelo. En el Capítulo 6 se presenta el procedimiento para estimar $K_{c\text{ ini}}$.

Etapas de desarrollo del cultivo

La etapa de desarrollo del cultivo esta comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa. Para una gran variedad de cultivos, el estado de cobertura completa ocurre al inicio de la floración. Para cultivos en hileras, donde en las hileras se presenta

CUADRO 9

Valores aproximados de $K_{c\text{ ini}}$ correspondientes a eventos moderados de humedecimiento (10-40 mm) y texturas medias del suelo.

Intervalo entre eventos de humedecimiento	Poder evaporante de la atmósfera (ET_o)			
	bajo 1 – 3 mm día ⁻¹	moderado 3 – 5 mm día ⁻¹	alto 5 – 7 mm día ⁻¹	muy alto > 7 mm día ⁻¹
- menor que semanal				
- semanal	1,2 - 0,8	1,1 - 0,6	1,0 - 0,4	0,9 - 0,3
- mayor que una vez por semana	0,8	0,6	0,4	0,3
	0,7 - 0,4	0,4 - 0,2*	0,3 - 0,2*	0,2* - 0,1*

Valores obtenidos a partir de las Figuras 29 y 30

(*) Nótese que el intervalo entre riegos podría ser demasiado largo para sostener una transpiración completa en algunos cultivos anuales jóvenes.

comúnmente el solape entre las hojas, tales como los frijoles, remolacha azucarera, papas y el maíz, la cobertura efectiva completa puede ser definida como el momento cuando algunas hojas de las plantas en hileras adyacentes comienzan a solaparse, lo que produce un sombreamiento casi completo del suelo, o cuando las plantas casi alcanzan su tamaño máximo, en el caso que no ocurra el solape entre las hojas. Para algunos cultivos, principalmente aquellos de más de 0,5 m. de altura, al inicio de la cobertura efectiva completa la fracción promedio de la superficie del suelo cubierta por la vegetación (f_c) es alrededor 0,7-0,8. Tanto la fracción de suelo expuesta al sol como la fracción sombreada de suelo no variarán significativamente cuando el cultivo tenga un crecimiento mas allá del correspondiente a una $f_c \approx 0,7$ a 0,8. Se sobreentiende que el cultivo o la planta puede continuar su crecimiento, tanto en altura como en área foliar, después de alcanzar el estado de cobertura efectiva completa. Debido a que es difícil determinar visualmente cuando algunos tipos de vegetación densa y diseminada alcanzan la cobertura completa, tal como en los casos de los cereales de invierno y primavera y algunos pastos, se utiliza la etapa de floración como un indicativo más simple para determinar la presencia de la cobertura completa en este tipo de cultivos.

Para pastos densos, la cobertura completa puede ocurrir cuando la altura del cultivo es de alrededor 0,10 a 0,15 m. Para áreas reducidas de pastos (pastizales secos), la altura del pasto puede llegar a 0,3-0,5 m antes de alcanzar la cobertura completa. En el caso de forrajes cultivados densamente, tal como la alfalfa y el clavel, la cobertura completa se alcanza alrededor de los 0,3-0,4 m de altura.

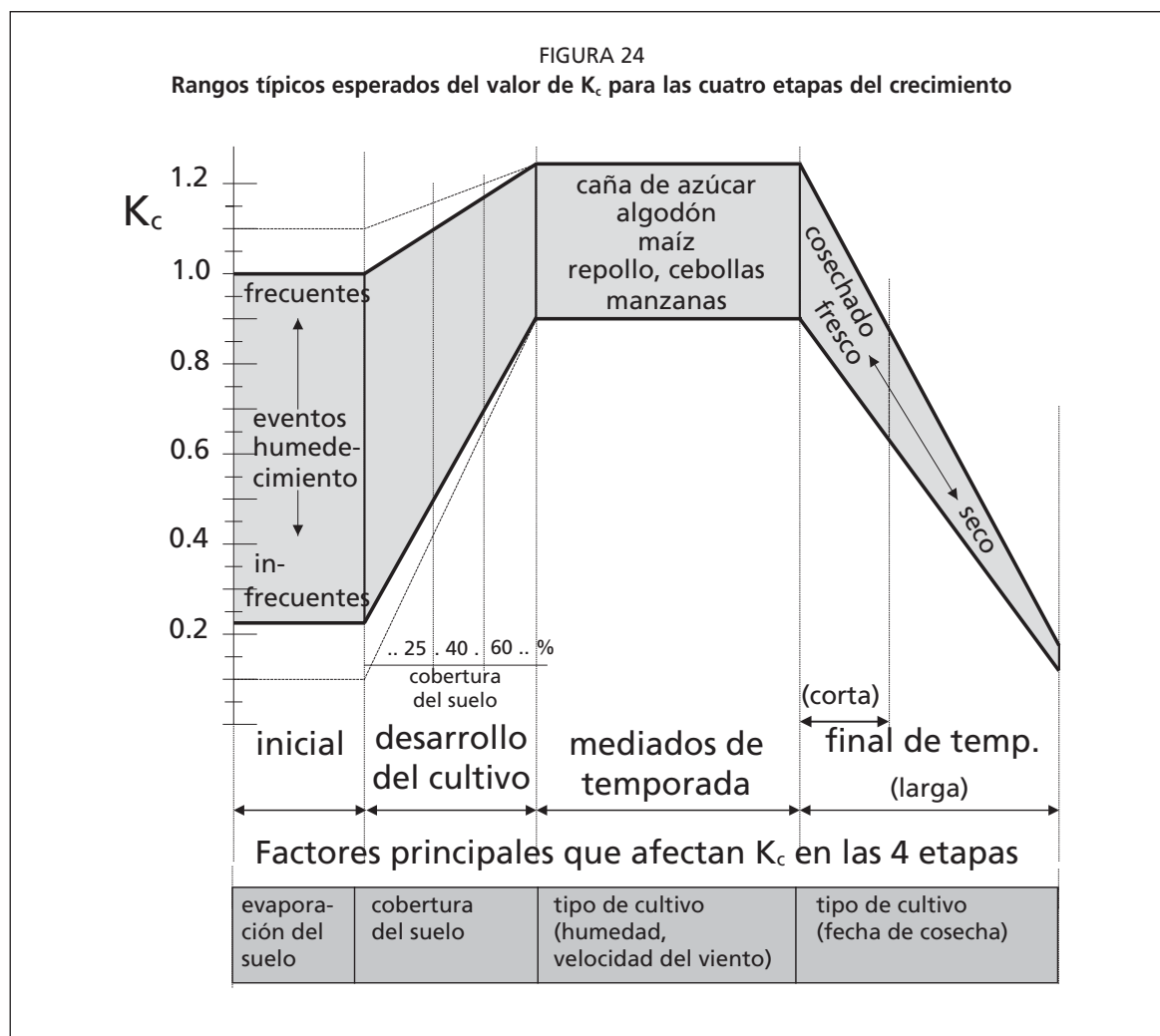
Otra manera de definir la ocurrencia de la cobertura completa es cuando el índice del área foliar (IAF) alcanza un valor de tres. Se define como IAF al promedio de la suma del área total de las hojas (un solo lado), por unidad de área de la superficie del suelo.

A medida que el cultivo se desarrolla y sombrea cada vez mas el suelo, la evaporación se verá cada vez más restringida y la transpiración gradualmente se convertirá en el proceso más importante. Durante la etapa de desarrollo del cultivo, el valor de K_c se corresponderá con la cantidad de la cobertura del suelo y el desarrollo de la planta. En general, si la superficie del suelo se encuentra seca, un valor de $K_c = 0,5$ se corresponderá con un valor de 25-40% de cobertura del suelo debido a los efectos del sombreado y debido al transporte en escala microscópica del calor sensible desde el suelo hacia la vegetación. Un valor de $K_c = 0,7$ generalmente se corresponderá con una cobertura del suelo de alrededor de 40-60%. Estos valores variarán dependiendo del cultivo, la frecuencia del humedecimiento y de si el cultivo utiliza mas agua que el cultivo de referencia del pasto, cuando se encuentra en condiciones de cobertura completa (ósea, dependiendo de la arquitectura de la vegetación y la altura del cultivo en relación con el pasto de referencia).

Etapa de mediados de temporada

La etapa de mediados de temporada comprende el período de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez. El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo de la vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas, o la aparición del color marrón en el fruto, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la ET_0 de referencia. La etapa de mediados de temporada representa la etapa mas larga para los cultivos permanentes y para una gran variedad de cultivos anuales, siendo relativamente corta para los cultivos hortícolas que son cosechados frescos para aprovechar su vegetación verde.

Durante la etapa de mediados de temporada, el coeficiente K_c alcanza su valor máximo. El valor de K_c en esta etapa ($K_{c,med}$) es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales. La diferencias entre el valor de K_c med con respecto al valor de referencia '1', son debidas principalmente a las diferencias en la altura del cultivo y la resistencia, entre la superficie del pasto de referencia y el cultivo agrícola, además de diferencias en las condiciones climáticas.



Etapa de finales de temporada

La etapa final o tardía de crecimiento comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de K_c y ET_c finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas.

Para algunos tipos de vegetación perenne en climas libres de heladas, los cultivos pueden desarrollarse durante todo el año, por lo que podría tomarse la fecha de término de la etapa final como la misma fecha de ‘siembra’.

El valor de K_c al finalizar la etapa final ($K_{c\text{ fin}}$) refleja el efecto de las prácticas de cultivo y el manejo del agua. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha en fresco, el valor de $K_{c\text{ fin}}$ será alto. Si se permite la senescencia y secado del cultivo en el campo antes de la cosecha, el valor de $K_{c\text{ fin}}$ será bajo. El estado de senescencia es generalmente asociado a una conductancia menos eficiente de los estomas debido a los efectos del envejecimiento, lo que causa una reducción en el valor de K_c .

En la Figura 24 se ilustra la variación del valor de K_c para diferentes cultivos, bajo la influencia de factores meteorológicos y de desarrollo del cultivo.

EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET_c)

La evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando ET_o por K_c el cual es un coeficiente que expresa la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la superficie del pasto de referencia. Esta diferencia puede ser combinada dentro de un coeficiente único o integrado del cultivo, o puede ser separada en dos

CUADRO 10

Criterios generales de selección para los procedimientos del coeficiente único y dual del cultivo

	Coeficiente único del cultivo K_c	Coeficiente dual del cultivo $K_{cb} + K_e$
Propósito del cálculo	<ul style="list-style-type: none"> - diseño y planificación del riego - manejo del riego - calendarios básicos de riego - calendarios de riego en tiempo real para aplicaciones no frecuentes de agua (riego por superficie y aspersión) 	<ul style="list-style-type: none"> - investigación - calendarios de riego en tiempo real - calendarios de riego para aplicaciones de agua con alta frecuencia (micro-irrigación y riego por aspersión automatizado) - riego suplementario - estudios detallados de balance de agua en hidrología y suelos
Escala temporal	diaria, 10 días, mensual (cálculos y datos)	diaria (cálculos y datos)
Método de cálculo	gráfico calculadora de bolsillo computadora	computadora

factores que describen por separado las diferencias en evaporación y transpiración entre las dos superficies. La selección del procedimiento a seguir dependerá del propósito del cálculo, la precisión requerida, la disponibilidad de datos climáticos y la escala temporal bajo la cual se realizan los cálculos. En el Cuadro 10 se presentan los criterios generales de selección.

Enfoques de los coeficientes único y dual del cultivo

Coeficiente único del cultivo (K_c)

En el enfoque del coeficiente único del cultivo, los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo son combinados en un coeficiente K_c único. Este coeficiente integra las diferencias en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie del pasto de referencia. Como la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente como resultado de la lluvia o el riego, el coeficiente único del cultivo es solamente una expresión de los efectos promedios en el tiempo (múltiples días), de la evapotranspiración del cultivo.

Debido a que el coeficiente único K_c representa un promedio de la evaporación en el suelo y la transpiración, este procedimiento se utiliza para estimar ET_c para períodos de tiempo semanales o mayores, a pesar de que los cálculos puedan realizarse a nivel diario. El coeficiente único K_c promediado en el tiempo se utiliza para estudios a nivel de planificación y para el diseño de sistemas de riego donde sea razonable y pertinente considerar los efectos promedios del humedecimiento del suelo. Este es el caso de los sistemas de riego por superficie y aspersión donde el intervalo entre riegos sucesivos es de varios días, generalmente de diez o más días. Por lo tanto, para un manejo típico del riego, es válido aplicar el procedimiento del coeficiente único, K_c , promediado temporalmente.

Coeficiente dual del cultivo ($K_{cb} + K_e$)

De acuerdo al enfoque del coeficiente dual del cultivo, se determinan por separado los efectos de la transpiración del cultivo y de la evaporación en el suelo. Se utilizan dos coeficientes: el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) para describir la transpiración de la planta, y el coeficiente de evaporación del agua del suelo (K_e) para describir la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. El coeficiente único K_c es reemplazado por:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (57)$$

donde

- K_{cb} coeficiente basal del cultivo,
- K_e coeficiente de la evaporación del agua del suelo.

El coeficiente basal del cultivo, K_{cb} , es definido como el cociente entre ET_c y ET_o cuando la superficie del suelo se encuentra seca, pero donde el contenido promedio de agua en la zona radicular del suelo es adecuado para mantener totalmente la transpiración de la planta. El K_{cb} representa la línea base potencial del valor de K_c en ausencia de los efectos adicionales introducidos por el humedecimiento del suelo a través del riego o la precipitación. El coeficiente de evaporación en el suelo, K_e , describe el componente de la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. Si el suelo se encuentra húmedo después de una lluvia o riego, el valor de K_e puede ser grande. Sin embargo, en ningún caso, la suma de los coeficientes K_{cb} y K_e podrá exceder un valor máximo, $K_{c\ max}$, el cual es definido por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo para el proceso de evapotranspiración. El valor de K_e se reducirá a medida que se seca la superficie del suelo y será igual a cero cuando no exista agua para la evaporación. La estimación del valor de K_e requiere del cálculo del balance diario del agua en el suelo, para determinar el contenido de humedad remanente en la capa superior del suelo.

El procedimiento del coeficiente dual del cultivo requiere de una mayor cantidad de cálculos numéricos que el procedimiento del coeficiente único, promediado temporalmente, K_c . El procedimiento del coeficiente dual es preferible para los casos de los calendarios de riego en tiempo real, para los cálculos de balance del agua en el suelo, y para los estudios de investigación donde sean importantes tanto los efectos de las variaciones diarias del humedecimiento de la superficie del suelo y su impacto resultante en el valor diario de ET_c , como el patrón de humedecimiento del perfil del suelo y los flujos de percolación profunda. Este será el caso de los riegos de alta frecuencia a través de micro-irrigación o sistemas de movimiento lateral tales como los pivotes centrales o los sistemas de movimiento lineal.

Curva del Coeficiente del Cultivo

Después de la selección del procedimiento de cálculo, la determinación de las longitudes de las etapas de desarrollo y de los coeficientes de cultivos correspondientes, se puede proceder a la elaboración de la curva del coeficiente del cultivo. Esta curva representa los cambios del coeficiente del cultivo a lo largo de la temporada de crecimiento del cultivo. La forma de la curva representa los cambios en la vegetación y el grado de cobertura del suelo durante el desarrollo de la planta y la maduración, los cuales afectan el cociente entre ET_c y ET_o . A partir de esta curva se puede derivar el valor del coeficiente K_c , y en consecuencia el valor de ET_c , para cualquier período de la temporada de crecimiento.

Coeficiente único del cultivo

En la Figura 25 se presenta, en forma generalizada, la curva del coeficiente del cultivo. Poco después de la plantación de cultivos anuales o poco después de la aparición de las hojas nuevas en el caso de los cultivos perennes, el valor de K_c es pequeño, con frecuencia menor a 0,4. El valor de K_c comienza a aumentar, a partir de este valor inicial de K_c , al comenzar el desarrollo rápido de la planta y alcanza su valor máximo, $K_{c\ med}$, al momento del desarrollo máximo, o cercano al máximo, de la planta. Durante la etapa de final de temporada, a medida que las hojas comienzan a envejecer y se produce la senescencia debido a procesos naturales o las prácticas culturales, el valor de K_c comienza a disminuir hasta alcanzar un valor mínimo al final de la temporada de crecimiento igual a $K_{c\ fin}$.

FIGURA 25
 Curva generalizada del coeficiente del cultivo,
 correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo

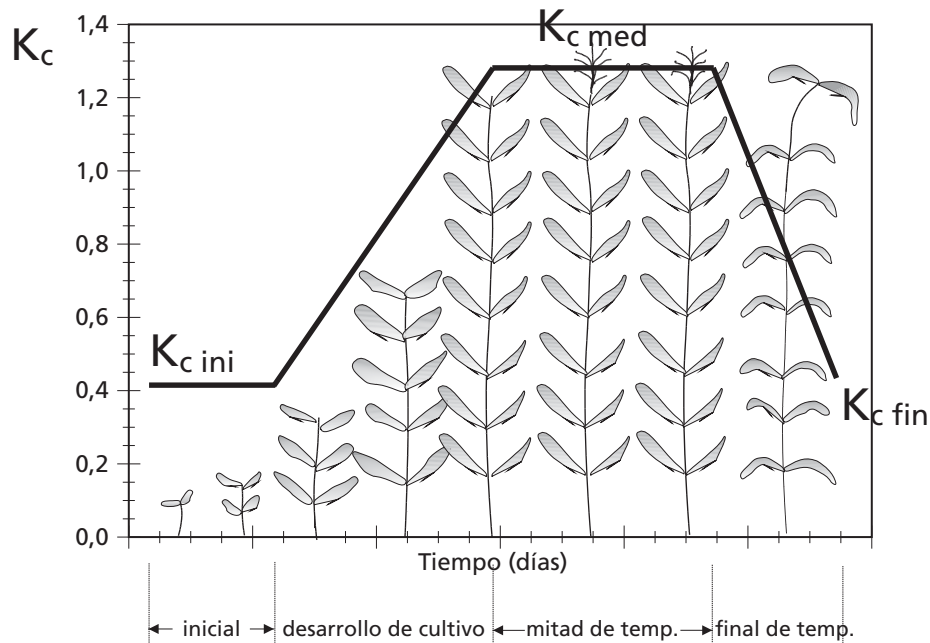
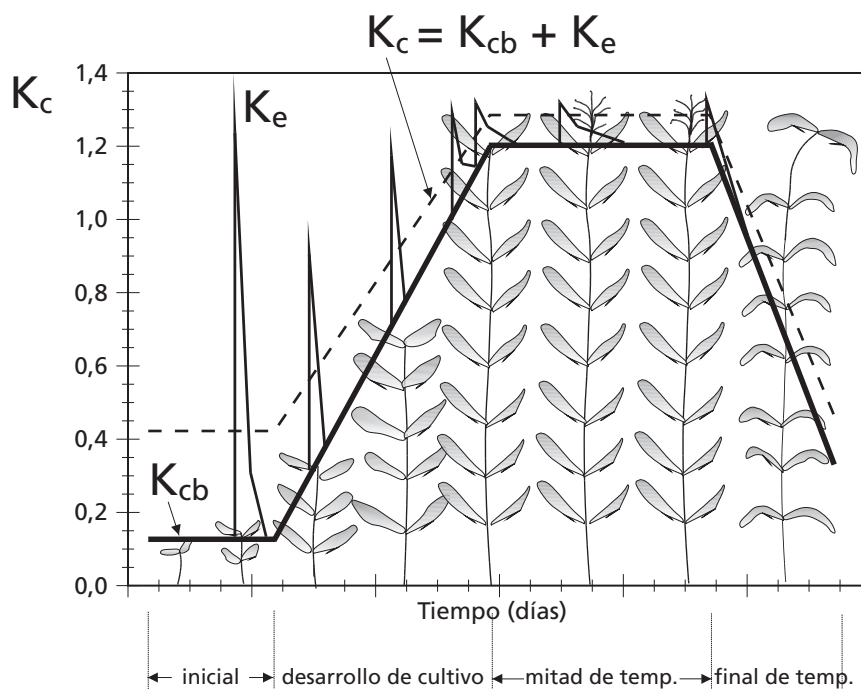


FIGURA 26
 Curvas del coeficiente del cultivo mostrando las curvas de K_{cb} (línea gruesa), de la evaporación en el suelo K_e (línea delgada) y la curva correspondiente de $K_c = K_{cb} + K_e$ (línea punteada)



Coefficiente dual del cultivo

La curva promediada en el tiempo del coeficiente único K_c , presentada en la Figura 25, incorpora los efectos promedios del humedecimiento del suelo en el valor de K_c . El valor de $K_{c\text{ med}}$ es relativamente constante para la mayoría de condiciones de crecimiento y prácticas culturales. Sin embargo, los valores de $K_{c\text{ ini}}$ y $K_{c\text{ fin}}$ pueden variar considerablemente cuando se considera una escala de tiempo diaria, dependiendo de la frecuencia del humedecimiento a través del riego y la lluvia. El procedimiento del coeficiente dual permite calcular el incremento real del valor de K_c , que ocurre en cada día, en función del desarrollo de la planta y del humedecimiento de la superficie del suelo.

Debido a que el coeficiente único K_c considera los efectos promedios de la evaporación del suelo, la curva del coeficiente dual del cultivo, K_{cb} , la cual describe solamente la transpiración de la planta, se situará por debajo del valor de K_c (Figura 26). La mayor diferencia entre los valores de K_c y K_{cb} ocurre en la etapa inicial de crecimiento, donde la evapotranspiración está constituida principalmente por la evaporación del suelo y donde la transpiración del cultivo es relativamente pequeña. Debido a que la cubierta vegetativa será completa o cercana a completa durante la etapa de mediados de temporada del cultivo, la evaporación que ocurre por debajo de la vegetación tendrá un efecto menor en la evapotranspiración del cultivo, por lo que el valor de K_{cb} para la etapa de mediados de temporada será similar al valor de K_c . Dependiendo del grado de cobertura del suelo, el coeficiente basal del cultivo durante la etapa de mediados de temporada podría ser solamente 0,05-0,10 menor al valor de K_c . Asimismo, dependiendo de la frecuencia con la cual se riega el cultivo durante la etapa final de crecimiento, el valor de K_{cb} será similar a (si es regado infrecuentemente) o menor que el valor de K_c .

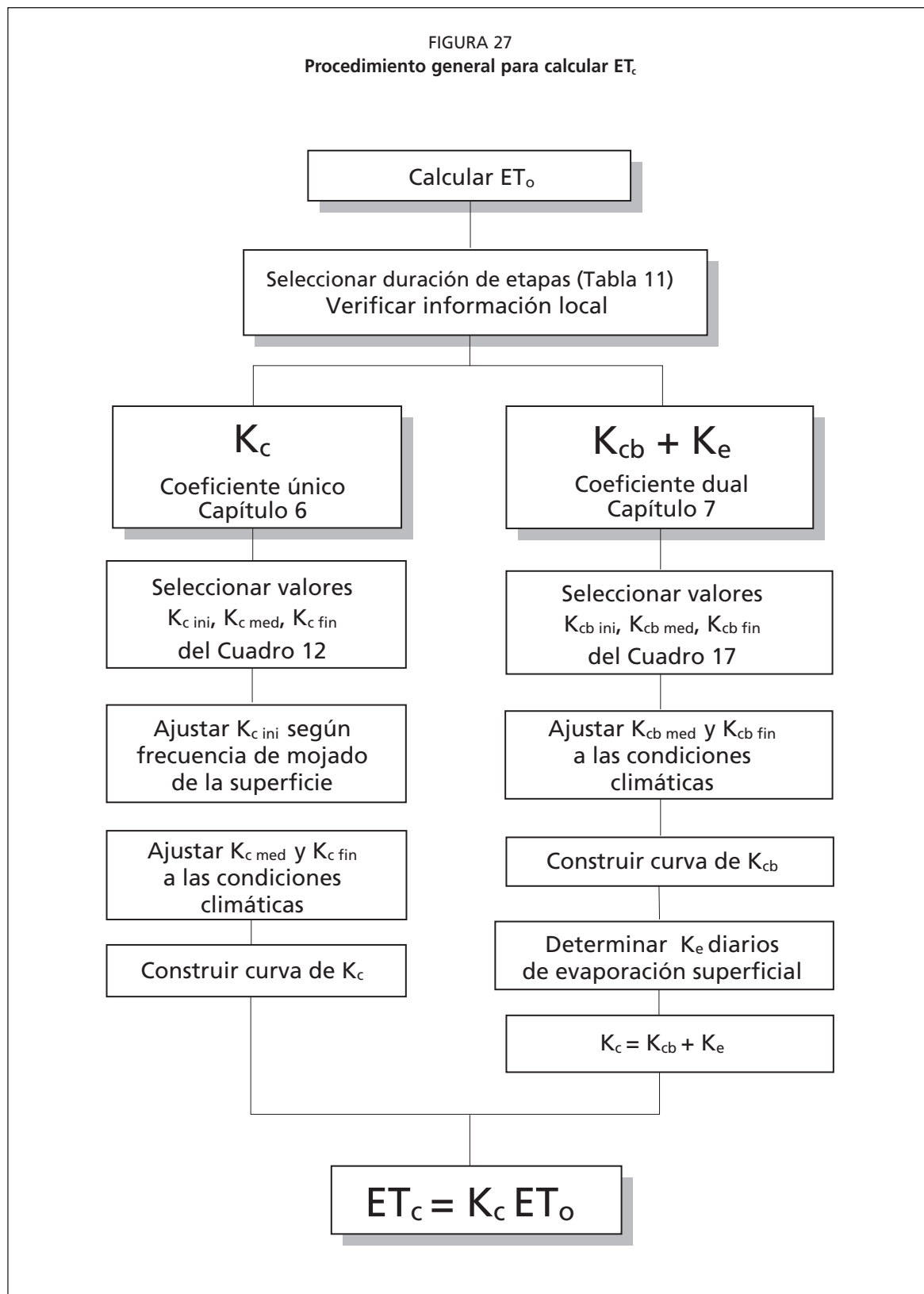
En la Figura 26 se presentan formas típicas de las curvas de K_{cb} , K_c , así como la curva del coeficiente único K_c . La curva de K_{cb} mostrada en la figura representa el valor mínimo de K_c que ocurre cuando existe una adecuada cantidad de agua en el perfil del suelo, pero con una superficie seca del suelo. Los «picos» del valor de K_c que se observan en la figura representan el incremento de la evaporación que ocurre cuando la precipitación o el riego han humedecido la superficie del suelo, lo que produce un aumento temporal del valor de ET_c . Estos valores máximos de evaporación en el suelo humedecido disminuyen a medida que se seca la superficie del suelo. Los valores picos alcanzan generalmente un máximo de 1,0 a 1,2 dependiendo del clima, la magnitud del evento de humedecimiento y la porción humedecida del suelo.

La suma de los valores de K_{cb} y K_c vienen a representar un coeficiente integrado del cultivo, K_c . La curva total de K_c , representada como una línea punteada en la Figura 26, ilustra el efecto de promediar $K_{cb} + K_c$ a través del tiempo, siendo presentada como una curva «suavizada». Es esta curva suavizada la que es elaborada al considerarse el procedimiento de cálculo del coeficiente único del cultivo K_c . La curva de K_c se sitúa por encima de la curva de K_{cb} , encontrándose potencialmente las mayores diferencias durante las etapas inicial y de desarrollo, dependiendo de la frecuencia del humedecimiento del suelo.

DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS CÁLCULOS

Los procedimientos de cálculo requeridos para cada uno de los enfoques del coeficiente del cultivo se presentan en los próximos capítulos. En el Capítulo 6 se utiliza un coeficiente único del cultivo, promediado en el tiempo, para calcular ET_c . Por otra parte, en el Capítulo 7 se describe la metodología que considera dos coeficientes para describir por separado las contribuciones del suelo y del cultivo. En la Figura 27 se presenta en forma general los procedimientos de cálculo respectivos.

FIGURA 27
Procedimiento general para calcular ET_c



Capítulo 6

ET_c – coeficiente único del cultivo (K_c)

Este capítulo trata sobre el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) bajo condiciones estándar. Se considera que no existen limitaciones en el desarrollo del cultivo debido a estrés hídrico o salino, densidad del cultivo, plagas y enfermedades, presencia de malezas o baja fertilidad. El valor de ET_c es calculado a través del enfoque del coeficiente del cultivo, donde los efectos de las condiciones del tiempo atmosférico son incorporados en ET_o y las características del cultivo son incorporadas en el coeficiente K_c:

$$ET_c = K_c ET_o \quad (58)$$

Los efectos combinados de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo se integran en un coeficiente único del cultivo. El coeficiente único K_c incorpora las características del cultivo y los efectos promedios de la evaporación en el suelo. Para la planificación normal del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico, los coeficientes promedios del cultivo son apropiados y más convenientes que los valores de K_c calculados con base diaria usando coeficientes separados de cultivo y suelo (Capítulo 7). Solamente en los casos en que el coeficiente de cultivo sea necesario para períodos diarios, para cultivos específicos y para años específicos, se requerirá de coeficientes separados de transpiración y evaporación (K_{cb} + K_c).

El procedimiento de cálculo de la evapotranspiración del cultivo es el siguiente:

1. identificar las etapas de desarrollo del cultivo, determinando la duración de cada etapa y seleccionando los valores correspondientes de K_c;
2. ajustar los valores de K_c seleccionados según la frecuencia de humedecimiento o las condiciones climáticas durante cada etapa;
3. construir la curva del coeficiente del cultivo (la cual permite la determinación de K_c para cualquier etapa durante el período de desarrollo);
4. calcular ET_c como el producto de ET_o y K_c.

DURACIÓN DE LAS ETAPAS DE CRECIMIENTO

La publicación de la serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 24 incluye duraciones generales para las cuatro etapas de crecimiento de distintos cultivos, así como la duración total de la temporada de crecimiento de cada cultivo, para distintos tipos de clima y diferentes localidades. Esta información ha sido ampliada con otras fuentes y se sintetiza en el Cuadro 11.

En algunos casos, el momento de aparición de la vegetación así como el momento de la cobertura completa pueden ser estimados usando regresiones basadas en la acumulación de grados de temperatura o a través de modelos más sofisticados de crecimiento vegetal. Estos modelos deberán ser verificados y validados para cada área o para la variedad específica del cultivo, usando observaciones locales.

CUADRO 11
Duración de las etapas de crecimiento* del cultivo
para distintos períodos de siembra y regiones climáticas (días)

Cultivo	Inic. (L _{ini})	Des. (L _{des})	Med (L _{med})	Final (L _{fin})	Total	Fecha de Siembra	Región
a. Hortalizas Pequeñas							
Brécol (Brócoli)	35	45	40	15	135	Sept.	Calif. Desierto, EU
Repollo	40	60	50	15	165	Sept.	Calif. Desierto, EU
Zanahoria	20 30 30	30 40 50	50/30 60 90	20 20 30	100 150 200	Oct/Ene. Feb/Mar. Oct.	Clima Árido Mediterráneo Calif. Desierto, EU
Coliflor	35	50	40	15	140	Sept	Calif. Desierto, EU
Apio (Céleri)	25 25 30	40 40 55	95 45 105	20 15 20	180 125 210	Oct. Abril Ene.	(Semi)Árido Mediterráneo (Semi)Árido
Crucíferas ¹	20 25 30	30 35 35	20 25 90	10 10 40	80 95 195	Abril Febrero Oct/Nov.	Mediterráneo Mediterráneo Mediterráneo
Lechuga	20 30 25 35	30 40 35 50	15 25 30 45	10 10 10 10	75 105 100 140	Abril. Nov/Ene. Oct/Nov. Feb.	Mediterráneo Mediterráneo Región Árida Mediterráneo
Cebolla (seca)	15 20	25 35	70 110	40 45	150 210	Abril Oct; Ene.	Mediterráneo Región Árida; Calif.
Cebolla (verde)	25 20 30	30 45 55	10 20 55	5 10 40	70 95 180	Abril/Mayo Octubre Marzo	Mediterráneo Región Árida Calif., EU
Cebolla (semilla)	20	45	165	45	275	Sept.	Calif. Desierto, EU
Espinaca	20 20	20 30	15/25 40	5 10	60/70 100	Abr; Sep/Oct Noviembre	Mediterráneo Región Árida
Rábano	5 10	10 10	15 15	5 5	35 40	Mar/Abr. Invierno	Medit.; Europa Región Árida
b. Hortalizas – Familia de las Solanáceas							
Berenjena	30 30	40 45	40 40	20 25	130\140	Octubre May/Junio	Región Árida Mediterráneo
Pimiento Dulce (campana)	25/30 30	35 40	40 110	20 30	125 210	Abril/Junio Octubre	Europa y Medit. Región Árida
Tomate	30 35 25 35 30	40 40 40 45 40	40 50 60 70 45	25 30 30 30 30	135 155 155 180 145	Enero Abr/Mayo Enero Oct/Nov. Abril/Mayo	Región Árida Calif., EU Calif. Desierto, EU Región Árida Mediterráneo
c. Hortalizas - Familia de las Cucurbitáceas							
Melón	30 10	45 60	35 25	10 25	120 120	Enero Ago.	Calif., EU Calif., EU
Pepino	20 25	30 35	40 50	15 20	105 130	Junio/Ago. Nov; Feb.	Región Árida Región Árida
Calabaza de Invierno	20 25	30 35	30 35	20 25	100 120	Mar, Ago. Junio	Mediterráneo Europa
Calabacín (zucchini)	25 20	35 30	25 25	15 15	100 90	Abr; Dic. May/Junio	Medit.; Reg. Árida Medit.; Europa

* Las duraciones de las etapas de crecimiento presentadas en este Cuadro son indicativas de condiciones generales, pudiendo variar significativamente de región a región, con las condiciones climáticas y de cultivo, y con la variedad del cultivo. Se recomienda al usuario obtener información local apropiada.

¹ Las crucíferas incluyen repollo, coliflor, brócoli y col de Bruselas. El amplio rango de duraciones de la temporada productiva es debido a diferencias en variedades y especies.

CUADRO 11 (continuación)

Cultivo	Inic. (L _{ini})	Des. (L _{des})	Med, (L _{med})	Final (L _{fin})	Total	Fecha de Siembra	Región
Melón Dulce	25	35	40	20	120	Mayo	Mediterráneo
	30	30	50	30	140	Marzo	Calif., EU
	15	40	65	15	135	Ago	Calif. Desierto, EU
	30	45	65	20	160	Dic/Ene.	Región Árida
Sandía	20	30	30	30	110	Abril	Italia
	10	20	20	30	80	May/Ago.	Cercano Este (desierto)
d. Raíces y Tubérculos							
Remolacha, mesa	15	25	20	10	70	Abr/Mayo	Mediterráneo
	25	30	25	10	90	Feb/Mar.	Mediterráneo & Árido
Mandioca o Yuca:							
año 1	20	40	90	60	210	Período	Regiones Tropicales
año 2	150	40	110	60	360	Lluvioso	
Patata o Papa	25	30	30/45	30	115/130	Ene/Nov.	Clima (Semi)Árido
	25	30	45	30	130	Mayo	Clima continental
	30	35	50	30	145	Abril	Europa
	45	30	70	20	165	Abr/Mayo	Idaho, EU
Camote o Batata	20	30	60	40	150	Abril	Mediterráneo
	15	30	50	30	125	Período Lluvioso	Regiones Tropicales
Remolacha azucarera	30	45	90	15	180	Marzo	Calif., EU
	25	30	90	10	155	Junio	Calif., EU
	25	65	100	65	255	Sept.	Calif. Desierto, EU
	50	40	50	40	180	Abril	Idaho, EU
	25	35	50	50	160	Mayo	Mediterráneo
	45	75	80	30	230	Noviembre	Mediterráneo
35	60	70	40	205	Noviembre	Regiones Áridas	
e. Leguminosas (Leguminosae)							
Judías, o Frijoles (verdes)	20	30	30	10	90	Feb/Mar.	Calif., Mediterráneo
	15	25	25	10	75	Ago/Sep.	Calif., Egipto, Líbano
Judías o Frijoles (secos)	20	30	40	20	110	May/Junio	Climas Continentales
	15	25	35	20	95	Junio	Pakistán, Calif.
	25	25	30	20	100	Junio	Idaho, EU
Habas - secas - verdes	15	25	35	15	90	Mayo	Europa
	20	30	35	15	100	Mar/Abr	Mediterráneo
	90	45	40	60	235	Nov.	Europa
Caupís (cowpeas)	90	45	40	0	175	Nov.	Europa
	20	30	30	20	110	Marzo	Mediterráneo
Cacahuete o Maní	25	35	45	25	130	Período seco	Oeste de África
	35	35	35	35	140	Mayo	Latitudes Altas
	35	45	35	25	140	May/Junio	Mediterráneo
Lentejas	20	30	60	40	150	Abril	Europa
	25	35	70	40	170	Oct/Nov.	Región Árida
Guisantes o arveja	15	25	35	15	90	Mayo	Europa
	20	30	35	15	100	Mar/Abr.	Mediterráneo
	35	25	30	20	110	Abril	Idaho, EU
Soya o soja	15	15	40	15	85	Dic.	Trópicos
	20	30/35	60	25	140	Mayo	Centro de EU
	20	25	75	30	150	Junio	Japón

CUADRO 11 (continuación)

Cultivo	Inic. (L _{ini})	Des. (L _{des})	Med (L _{med})	Final (L _{fin})	Total	Fecha de Siembra	Región
f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)							
Alcachofa	40 20	40 25	250 250	30 30	360 325	Abr. (1 ^{er} año) May. (2 ^{do} año)	California (cortada en Mayo)
Espárragos	50 90	30 30	100 200	50 45	230 365	Feb. Feb.	Invierno cálido Mediterráneo
g. Cultivos textiles							
Algodón	30 45 30 30	50 90 50 50	60 45 60 55	55 45 55 45	195 225 195 180	Mar.–Mayo Marzo Sept. Abril	Egipto; Pakistán; Cal. Calif. Desierto, EU Yemen Texas
Lino	25 30	35 40	50 100	40 50	150 220	Abril Octubre	Europa Arizona
h. Cultivos oleaginosos							
Ricino	25 20	40 40	65 50	50 25	180 135	Marzo Nov.	Climas (semi) Áridos Indonesia
Cártamo	20 25 35	35 35 55	45 55 60	25 30 40	125 145 190	Abril Marzo Oct/Nov.	California, EU Latitudes Altas Región Árida
Sésamo	20	30	40	20	110	Junio	China
Girasol	25	35	45	25	130	Abril/Mayo	Medit.; California
i. Cereales							
Cebada/Avena/Trigo	15 20 15 40 40 20	25 25 30 30 60 50	50 60 65 40 60 60	30 30 40 20 40 30	120 135 150 130 200 160	Noviembre Marzo/Abril Julio Abril Noviembre Diciembre	India Central 35–45 °L Este de África
Trigo de invierno	20 ² 30 160	60 ² 140 75	70 40 75	30 30 25	180 240 335	Diciembre Noviembre Octubre	Calif.; EU Mediterráneo Idaho, EU
Granos (pequeños)	20 25	30 35	60 65	40 40	150 165	Abril Oct./Nov.	Mediterráneo Pakistán; Reg. Árida
Maíz (grano)	30 25 20 20 30 30	50 40 35 35 40 40	60 45 40 40 50 50	40 30 30 30 30 50	180 140 125 125 150 170	Abril Dic./Ene. Junio Octubre Abril Abril	Este de África (alt.) Clima Árido Nigeria (húmedo) India (seco, frío) España (prim.ver); Calif. EU Idaho, EU
Maíz (dulce)	20 20 20 30 20	20 25 30 30 40	30 25 50/30 30 70	10 10 10 10 ³ 10	80 80 90 110 140	Marzo May./Junio Oct./Dic. Abril Ene.	Filipinas Mediterráneo Clima Árido Idaho, EU Calif. Desierto, EU
Mijo	15 20	25 30	40 55	25 35	105 140	Junio Abril	Pakistán Centro de EU

² Estos períodos para el trigo de invierno se incrementarán en climas de nieve y heladas de acuerdo a los días de crecimiento potencial nulo y letargo del trigo. Bajo condiciones generales y cuando no se disponga de información local, la siembra del trigo de invierno en otoño puede suponerse que ocurre, en climas templados del norte, cuando el promedio de la temperatura media diaria del aire durante un período de 10 días consecutivos sea igual o inferior a los 17 °C, o en Diciembre 1, cualquiera que se produzca primero. Se puede suponer que la siembra del trigo de primavera ocurre cuando el promedio de la temperatura media diaria del aire durante un período de 10 días consecutivos sea igual o superior a los 5 °C. Se puede asumir que la siembra del maíz-grano en primavera ocurre cuando el promedio de la temperatura media diaria del aire durante un período de 10 días consecutivos sea igual o superior a 13 °C.

³ La etapa final del maíz dulce será alrededor de 35 días si el maíz se deja madurar y secar.

CUADRO 11 (continuación)

Cultivo	Inic. (L_{ini})	Des. (L_{des})	Med, (L_{med})	Final (L_{fin})	Total	Fecha de Siembra	Región
Sorgo	20 20	35 35	40 45	30 30	125 130	Mayo/Jun. Mar/Abril	EU, Pakistán., Med. Región Árida
Arroz	30 30	30 30	60 80	30 40	150 180	Dic; Mayo Mayo	Trópicos; Mediterráneo Trópicos
j. Forrajes							
Alfalfa, temporada completa ⁴	10	30	varía	varía	varía		último -4°C (primavera) hasta primer -4°C (otoño)
Alfalfa ⁴ 1er ciclo de corte	10 10	20 30	20 25	10 10	60 75	Enero Abril (último -4°C)	Calif., EU. Idaho, EU.
Alfalfa ⁴ , otros ciclos de corte	5 5	10 20	10 10	5 10	30 45	Marzo Junio	Calif., EU. Idaho, EU.
Bermuda para Semilla	10	25	35	35	105	Marzo	Calif. Desierto, EU
Bermuda, heno (distintos cortes)	10	15	75	35	135	---	Calif. Desierto, EU
Pastos, Gramas ⁴	10	20	--	--	--		7 días antes del último - 4°C (primavera) hasta 7 días después del primer -4°C (otoño)
Pasto del Sudán, 1er corte	25	25	15	10	75	Abril	Calif. Desierto, EU
Sudán, otros ciclos de corte	3	15	12	7	37	Junio	Calif. Desierto, EU
k. Caña de Azúcar							
Caña de Azúcar, virgen	35 50 75	60 70 105	190 220 330	120 140 210	405 480 720		Latitudes Bajas Trópicos Hawai, EU
Caña de Azúcar, soca	25 30 35	70 50 105	135 180 210	50 60 70	280 320 420		Latitudes Bajas Trópicos Hawai, EU
l. Frutas Tropicales y Árboles							
Banana, 1 ^{er} año	120	90	120	60	390	Marzo	Mediterráneo
Banana, 2 ^{do} año	120	60	180	5	365	Feb.	Mediterráneo
Piña	60	120	600	10	790		Hawai, EU
m. Uvas y Moras							
Uvas	20 20 20 30	40 50 50 60	120 75 90 40	60 60 20 80	240 205 180 210	Abril Marzo Mayo Abril	Latitudes Bajas Calif., EU Latitudes Altas Latitudes Medias (vino)
Lúpulo	25	40	80	10	155	Abril	Idaho, EU
n. Árboles Frutales							
Cítricos	60	90	120	95	365	Ene.	Mediterráneo
Huerto de árboles caducifolios	20 20 30	70 70 50	90 120 130	30 60 30	210 270 240	Marzo Marzo Marzo	Latitudes Altas Latitudes Bajas Calif., EU

⁴ En climas donde ocurre la muerte del cultivo por heladas, las temporadas productivas de la alfalfa y el pasto pueden ser estimadas como:
alfalfa: último día con -4°C en primavera hasta primer día con -4°C en otoño (Everson, D.O., M. Faubion y D.E. Amos 1978. «Freezing temperatures and growing seasons in Idaho.» Univ. Idaho Agric. Exp. Station bulletin 494. 18 p.)

pasto: 7 días antes del último día con -4°C en primavera y 7 días después del último día con -4°C en otoño (Kruse E.G. y Haise, H.R. 1974. «Water use by native grasses in high altitude Colorado meadows.» USDA Agric. Res. Service, Western Region report ARS-W-6-1974. 60 páginas)

CUADRO 11 (continuación)

Cultivo	Inic. (L _{ini})	Des. (L _{des})	Med, (L _{med})	Final (L _{fin})	Total	Fecha de Siembra	Región
Olivos	20	90	60	90	270 ⁵	Marzo	Mediterráneo
Pistachos	20	60	30	40	150	Feb.	Mediterráneo
Nogal (nueces)	20	10	130	30	190	Abril	Utah, EU
o. Humedales – Climas Templados							
Humedales (Anea, Junco)	10 180	30 60	80 90	20 35	140 365	Mayo Noviembre	Utah, EU; heladas Florida, EU
Humedales (veg. baja)	180	60	90	35	365	Noviembre	Clima sin heladas

⁵ Los árboles de olivo obtienen hojas nuevas en Marzo. Vea nota de pie de página 24 del Cuadro 12 para información adicional, donde el Kc continua fuera del «período de crecimiento».

Fuente principal: Publicación de Riego y Drenaje FAO 24 (Doorenbos y Pruitt, 1977), Cuadro 22.

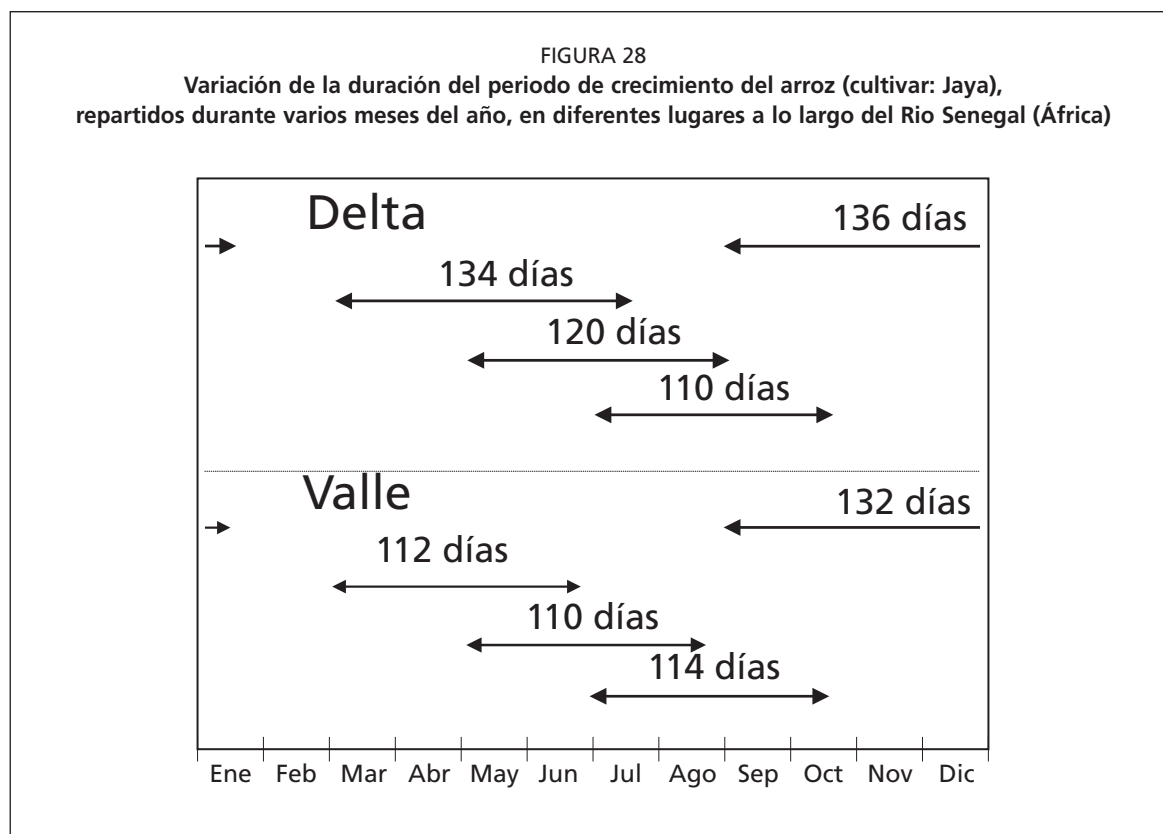
Las duraciones de las etapas inicial y de desarrollo pueden ser relativamente cortas para los árboles de hoja caduca y arbustos, los cuales pueden desarrollar hojas nuevas en la primavera con una gran rapidez (Figura 23).

En general, tanto la tasa de crecimiento a la cual se desarrolla la cobertura vegetal como el tiempo para alcanzar la cobertura completa están afectados por las condiciones climáticas y particularmente por la temperatura diaria del aire. Por lo tanto, el período de tiempo entre la siembra y la cobertura completa variará con el clima, latitud, altitud y fecha de siembra. Este período también cambiará con la variedad del cultivo. Generalmente, una vez alcanzada la completa cobertura vegetal, la tasa adicional de desarrollo fenológico (floración, desarrollo de la semilla, madurez y senescencia) es más dependiente del genotipo de la planta que de las condiciones climáticas. Por ejemplo en la Figura 28 se presenta la variación de la duración del período de crecimiento para una variedad de arroz en una región particular y para diferentes fechas de siembra.

El final de la etapa de mediados de temporada y el inicio de la etapa final es caracterizado por la senescencia de las hojas, la cual comienza con las hojas más bajas de las plantas. La duración de la etapa final puede ser relativamente corta (menor de diez días) para vegetación que muere por heladas (por ej. maíz de altura y en latitudes > 40°N) o para cultivos agrícolas que son cosechados frescos (por ejemplo, remolacha de mesa y hortalizas pequeñas).

Las temperaturas altas pueden acelerar la madurez y la senescencia de los cultivos. Asimismo, el mantenimiento de temperaturas altas (> 35°C) por períodos largos de tiempo pueden causar letargo en cultivos tales como la grama. Si se combinan temperaturas del aire extremadamente altas con situaciones de estrés hídrico, la condición de letargo en la grama puede ser permanente para el resto de la etapa de crecimiento. En general el estrés hídrico, así como otros tipos de estrés originados por las condiciones ambientales, aceleran la tasa de maduración del cultivo así como pueden acortar las etapas de mediados del período y final de estación.

Los valores presentados en el Cuadro 11 son útiles solamente como una guía general y para propósitos comparativos. Las duraciones de las etapas de desarrollo presentadas en el cuadro mencionado representan duraciones promedio para regiones y períodos específicos y su intención es de servir de ejemplo. Cuando sea posible se deberá utilizar información local acerca de las duraciones de cada etapa de crecimiento, con el objeto de incorporar los efectos de la variedad del cultivo, el clima y las prácticas agrícolas. La información local puede ser obtenida a través de entrevistas a los productores del campo, extensionistas agrícolas e investigadores de la localidad, así como la recopilación de información o usando información generada a través de la teledetección. En la determinación de las fechas de cada etapa, pueden ser de utilidad las guías y descripciones visuales obtenidas en la localidad.



COEFICIENTES DEL CULTIVO

Durante el período de crecimiento del cultivo, la variación del coeficiente del cultivo K_c expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo. Esta variación del coeficiente K_c a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo. Para describir y construir la curva del coeficiente del cultivo se necesitan solamente tres valores de K_c : los correspondientes a la etapa inicial ($K_{c\ ini}$), la etapa de mediados de temporada ($K_{c\ med}$) y la etapa final ($K_{c\ fin}$).

Valores tabulados de K_c

En el Cuadro 12 se incluyen valores típicos de $K_{c\ ini}$, $K_{c\ med}$ y $K_{c\ fin}$ correspondientes a distintos cultivos. Los coeficientes presentados son organizados en grupos (ej. hortalizas pequeñas, leguminosas, cereales, etc.) con la finalidad de facilitar la localización del cultivo en el cuadro y para ayudar a comparar cultivos pertenecientes a un mismo grupo. Generalmente, los coeficientes para los miembros de un mismo grupo son parecidos, debido a la similitud de la altura de los cultivos, área foliar, grado de cobertura del suelo y manejo del agua.

Los coeficientes presentados en el Cuadro 12 integran los efectos de la transpiración y la evaporación en el tiempo. El efecto de esta integración en el tiempo representa una frecuencia de humedecimiento promedio para un cultivo «estándar» bajo condiciones típicas de desarrollo bajo riego. Los valores de K_c durante la etapa inicial y de desarrollo del cultivo dependerán de la gran diversidad de frecuencias de humedecimiento del suelo, por lo que se requerirá de ajustes al valor de $K_{c\ ini}$ considerado. Para condiciones de humedecimiento frecuente tal como en los casos de riego por aspersión de alta frecuencia o lluvias, los valores de $K_{c\ ini}$ pudieran ser incrementados sustancialmente.

CUADRO 12

Valores del coeficiente único (promedio temporal) del cultivo, K_c y alturas medias máximas de las plantas para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ($HR_{\min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$) para usar en la fórmula de la FAO Penman-Monteith ET_o .

Cultivo	$K_{c\text{ini}}^1$	$K_{c\text{med}}$	$K_{c\text{fin}}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
a. Hortalizas Pequeñas	0,7	1,05	0,95	
Brécol (Brócoli)		1,05	0,95	0,3
Col de Bruselas		1,05	0,95	0,4
Repollo		1,05	0,95	0,4
Zanahoria		1,05	0,95	0,3
Coliflor		1,05	0,95	0,4
Apio (Céleri)		1,05	1,00	0,6
Ajo		1,00	0,70	0,3
Lechuga		1,00	0,95	0,3
Cebolla – seca		1,05	0,75	0,4
– verde		1,00	1,00	0,3
– semilla		1,05	0,80	0,5
Espinaca		1,00	0,95	0,3
Rábano		0,90	0,85	0,3
b. Hortalizas– Familia de la Solanáceas	0,6	1,15	0,80	
Berenjena		1,05	0,90	0,8
Pimiento Dulce (campana)		1,05 ²	0,90	0,7
Tomate		1,15 ²	0,70–0,90	0,6
c. Hortalizas– Familia de las Cucurbitáceas	0,5	1,00	0,80	
Melón	0,5	0,85	0,60	0,3
Pepino – Cosechado Fresco	0,6	1,00 ²	0,75	0,3
– Cosechado a Máquina	0,5	1,00	0,90	0,3
Calabaza de Invierno		1,00	0,80	0,4
Calabacín (zucchini)		0,95	0,75	0,3
Melón dulce		1,05	0,75	0,4
Sandía	0,4	1,00	0,75	0,4
d. Raíces y Tubérculos	0,5	1,10	0,95	
Remolacha, mesa		1,05	0,95	0,4
Yuca o Mandioca – año 1	0,3	0,80 ³	0,30	1,0
– año 2	0,3	1,10	0,50	1,5
Chirivía	0,5	1,05	0,95	0,4
Patata o Papa		1,15	0,75 ⁴	0,6
Camote o Batata		1,15	0,65	0,4
Nabos (Rutabaga)		1,10	0,95	0,6
Remolacha Azucarera	0,35	1,20	0,70 ⁵	0,5

¹ Estos son valores generales de $K_{c\text{ini}}$ considerando un manejo típico del riego y humedecimiento del suelo. Para humedecimientos frecuentes, tal como en el caso de riego por aspersión de alta frecuencia o lluvia diaria, estos valores pueden aumentar sustancialmente pudiendo acercarse a 1,0 a 1,2. El valor de $K_{c\text{ini}}$ es una función del intervalo de humedecimiento y la tasa potencial de evaporación durante las etapas inicial y de desarrollo del cultivo, siendo estimado con mayor exactitud a través de las Figuras 29 y 30, o la Ecuación 7-3 del Anexo 7, o usando el coeficiente dual $K_{c\text{cb}\text{ini}} + K_e$. Utilice el valor de $K_{c\text{ini}}$ para el grupo cuando no aparece un valor de $K_{c\text{ini}}$ para el cultivo.

² En algunas oportunidades, los Frijoles o judías, Guisantes, Leguminosas, Tomates, Pimientos y Pepinos son cultivados utilizando empalizadas que alcanzan los 1,5 a 2 metros de altura. En estos casos es necesario incrementar los valores de K_c . Para frijoles o judías verdes, pimentones y pepinos se puede asumir un valor de 1,15 y en el caso de los tomates, frijoles secos y los guisantes, de 1,20. Bajo esas condiciones también debe aumentarse el valor de h.

³ Los valores correspondientes a la etapa de mediados de temporada para la mandioca, asumen condiciones de no-estrés durante o después de la temporada lluviosa. Los valores de $K_{c\text{fin}}$ toman en cuenta el letargo durante la estación seca.

⁴ El valor de $K_{c\text{fin}}$ para papas o patatas de ciclo largo con rotura de los estolones es alrededor de 0,40.

⁵ El valor de $K_{c\text{fin}}$ corresponde a condiciones sin riego durante el último mes de la temporada productiva. El valor de $K_{c\text{fin}}$ para la remolacha azucarera es mayor, hasta 1,0, cuando ocurra riego o lluvias significativas durante el último mes.

CUADRO 12 (continuación)

Cultivo	$K_{c\text{ini}}^1$	$K_{c\text{med}}$	$K_{c\text{fin}}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
e. Leguminosas (Leguminosae)	0,4	1,15	0,55	
Frijoles o judías, verdes	0,5	1,05 ²	0,90	0,4
Frijoles o judías, secos y frescos	0,4	1,15 ²	0,35	0,4
Garbanzo (chick pea)		1,00	0,35	0,4
Habas – Fresco	0,5	1,15 ²	1,10	0,8
– Seco/Semilla	0,5	1,15 ²	0,30	0,8
Garbanzo hindú	0,4	1,15	0,35	0,8
Caupís (cowpeas)		1,05	0,60-0,35 ⁶	0,4
Maní		1,15	0,60	0,4
Lentejas		1,10	0,30	0,5
Guisantes o arveja – Frescos	0,5	1,15 ²	1,10	0,5
– Secos/Semilla		1,15	0,30	0,5
Soya		1,15	0,50	0,5-1,0
f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)	0,5	1,00	0,80	
Alcachofa	0,5	1,00	0,95	0,7
Espárragos	0,5	0,95 ⁷	0,30	0,2-0,8
Menta	0,60	1,15	1,10	0,6-0,8
Fresas	0,40	0,85	0,75	0,2
g. Cultivos Textiles	0,35			
Algodón		1,15-1,20	0,70-0,50	1,2-1,5
Lino		1,10	0,25	1,2
Sisal ⁸		0,4-0,7	0,4-0,7	1,5
h. Cultivos Oleaginosos	0,35	1,15	0,35	
Ricino		1,15	0,55	0,3
Canola (colza)		1,0-1,15 ⁹	0,35	0,6
Cártamo		1,0-1,15 ⁹	0,25	0,8
Sésamo (ajonjolí)		1,10	0,25	1,0
Girasol		1,0-1,15 ⁹	0,35	2,0
i. Cereales	0,3	1,15	0,4	
Cebada		1,15	0,25	1
Avena		1,15	0,25	1
Trigo de Primavera		1,15	0,25-0,4 ¹⁰	1
Trigo de Invierno – con suelos congelados	0,4	1,15	0,25-0,4 ¹⁰	1
– con suelos no-congelados	0,7	1,15	0,25-0,4 ¹⁰	
Maíz, (grano)		1,20	0,60,0,35 ¹¹	2
Maíz, (dulce)		1,15	1,05 ¹²	1,5
Mijo		1,00	0,30	1,5
Sorgo – grano		1,00-1,10	0,55	1-2
– dulce		1,20	1,05	2-4
Arroz	1,05	1,20	0,90-0,60	1

⁶ EL primer valor de $K_{c\text{fin}}$ es cuando se cosecha fresco. El segundo valor es cuando se cosecha seco.

⁷ El valor de K_c para los espárragos permanece como $K_{c\text{ini}}$ durante la cosecha de los vástagos, debido a las condiciones de poca cobertura vegetal. El valor de $K_{c\text{med}}$ es para después del re-crecimiento de la vegetación, después de terminada la cosecha de los vástagos.

⁸ El valor de K_c para sisal depende de la densidad de siembra y el manejo del agua (ósea, del estrés hídrico intencional).

⁹ Los valores menores son para cultivos de secano los cuales tienen una menor densidad de población vegetal.

¹⁰ El valor mayor es para cultivos cosechados a mano.

¹¹ El primer valor de $K_{c\text{fin}}$ corresponde a los casos donde el cultivo se cosecharon gran humedad en el grano. El segundo valor de $K_{c\text{fin}}$ es para cuando se cosecha después de un secado completo del grano en el campo (hasta alrededor de 18% de humedad, basado en materia húmeda).

¹² Si se cosecha en fresco para consumo humano. Usar el valor de $K_{c\text{fin}}$ para maíz de campo si el maíz dulce es dejado madurar y secar en el campo.

CUADRO 12 (continuación)

Cultivo	$K_{c\text{ ini}}^1$	$K_{c\text{ med}}$	$K_{c\text{ fin}}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
j. Forrajes				
Alfalfa (heno) – efecto promedio de los cortes – períodos individuales de corte – para semilla	0,40	0,95 ¹³	0,90	0,7
	0,40 ¹⁴	1,20 ¹⁴	1,15 ¹⁴	0,7
	0,40	0,50	0,50	0,7
Bermuda (heno) – efecto promedio de los cortes – cultivo para semilla (primavera)	0,55	1,00 ¹³	0,85	0,35
	0,35	0,90	0,65	0,4
Trébol heno, Bersím – efecto promedio de los cortes – períodos individuales de corte	0,40	0,90 ¹³	0,85	0,6
	0,40 ¹⁴	1,15 ¹⁴	1,10 ¹⁴	0,6
Rye Grass (heno) – efecto promedio de los cortes	0,95	1,05	1,00	0,3
Pasto del Sudán (anual) – efecto promedio de los cortes – período individual de corte	0,50	0,90 ¹⁴	0,85	1,2
	0,50 ¹⁴	1,15 ¹⁴	1,10 ¹⁴	1,2
Pastos de Pastoreo – pastos de rotación – pastoreo extensivo	0,40	0,85-1,05	0,85	0,15-0,30
	0,30	0,75	0,75	0,10
Pastos (césped, turfgrass) – época fría ¹⁵ – época caliente ¹⁵	0,90	0,95	0,95	0,10
	0,80	0,85	0,85	0,10
k. Caña de azúcar	0,40	1,25	0,75	3
l. Frutas Tropicales y Árboles				
Banana – 1 ^{er} año – 2 ^{do} año	0,50	1,10	1,00	3
	1,00	1,20	1,10	4
Cacao	1,00	1,05	1,05	3
Café – suelo sin cobertura – con malezas	0,90	0,95	0,95	2-3
	1,05	1,10	1,10	2-3
Palma Datilera	0,90	0,95	0,95	8
Palmas	0,95	1,00	1,00	8
Piña ¹⁶ – suelo sin cobertura – con cobertura de gramíneas	0,50	0,30	0,30	0,6-1,2
	0,50	0,50	0,50	0,6-1,2
Árbol del Caucho	0,95	1,00	1,00	10
Té – no sombreado – sombreado ¹⁷	0,95	1,00	1,00	1,5
	1,10	1,15	1,15	2
m. Uvas y Moras				
Moras (arbusto)	0,30	1,05	0,50	1,5
Uvas – Mesa o secas (pasas) – Vino	0,30	0,85	0,45	2
	0,30	0,70	0,45	1,5-2
Lúpulo	0,3	1,05	0,85	5

¹³ Los valores de $K_{c\text{ med}}$ para cultivos destinados a heno son un promedio general que incluyen valores promedios de K_c para antes y después de los cortes. Este se aplica para el lapso que sigue al período de desarrollo inicial hasta el inicio de la etapa final de la temporada de crecimiento.

¹⁴ Estos valores del coeficiente K_c para cultivos de heno se aplican inmediatamente después del corte; en cobertura completa; e inmediatamente antes del corte, respectivamente. La temporada de crecimiento se define como una serie de períodos individuales de corte (Figura 35).

¹⁵ Variedades de pastos de temporada fría incluyen sitios cultivados densamente con bluegrass, ryegrass y fescue. Variedades de temporada cálida incluyen pastos tipo bermuda y St. Agostine. El valor de 0,95 para pastos de época fría representa un 0,06 a 0,08 m de altura de corte, bajo condiciones normales de césped. Cuando se practica un manejo cuidadoso del agua y no se requiere de un crecimiento rápido, se puede reducir los valores de K_c para césped a 0,10.

¹⁶ La planta de piña posee una muy baja transpiración debido a que la misma cierra sus estomas durante el día y los abre durante la noche. Por lo tanto la mayor parte de la ET_c en la piña esta constituida por la evaporación que ocurre en el suelo. El valor de $K_{c\text{ med}} < K_{c\text{ ini}}$ debido a que $K_{c\text{ med}}$ ocurre en condiciones de completa cobertura del suelo, por lo que la evaporación en el suelo será menor. Los valores indicados asumen que un 50% de la superficie del suelo se encuentra cubierta por una cobertura de plástico negro y que el cultivo es regado a través de riego por aspersión. En el caso de riego por goteo por debajo de la cubierta plástica, los valores de K_c pueden ser reducidos a 0,10.

¹⁷ Incluye el requerimiento de agua de los árboles bajo sombra.

CUADRO 12 (continuación)

Cultivo	$K_{c\text{ ini}}^1$	$K_{c\text{ med}}$	$K_{c\text{ fin}}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
n. Árboles Frutales				
Almendras, sin cobertura del suelo	0,40	0,90	0,65 ¹⁸	5
Manzanas, Cerezas, Peras ¹⁹				
– sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,45	0,95	0,70 ¹⁸	4
– sin cobertura del suelo, sin heladas	0,60	0,95	0,75 ¹⁸	4
– cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,50	1,20	0,95 ¹⁸	4
– cobertura activa del suelo, sin heladas	0,80	1,20	0,85 ¹⁸	4
Albaricoque, Melocotón o Durazno, Drupas ^{19, 20}				
– sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,45	0,90	0,65 ¹⁸	3
– sin cobertura del suelo, sin heladas	0,55	0,90	0,65 ¹⁸	3
– cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,50	1,15	0,90 ¹⁸	3
– cobertura activa del suelo, sin heladas	0,80	1,15	0,85 ¹⁸	3
Aguacate, sin cobertura del suelo	0,60	0,85	0,75	3
Cítricos, sin cobertura del suelo ²¹				
– 70% cubierta vegetativa	0,70	0,65	0,70	4
– 50% cubierta vegetativa	0,65	0,60	0,65	3
– 20% cubierta vegetativa	0,50	0,45	0,55	2
Cítricos, con cobertura activa del suelo o malezas ²²				
– 70% cubierta vegetativa	0,75	0,70	0,70	4
– 50% cubierta vegetativa	0,80	0,80	0,80	3
– 20% cubierta vegetativa	0,85	0,85	0,85	2
Coníferas ²³	1,00	1,00	1,00	10
Kiwi	0,40	1,05	1,05	3
Olivos (40 a 60% de cobertura del suelo por el dosel) ²⁴	0,65	0,70	0,70	3-5
Pistachos, sin cobertura del suelo	0,40	1,10	0,45	3-5
Huerto de Nogal ¹⁹	0,50	1,10	0,65 ¹⁸	4-5

¹⁸Estos valores de $K_{c\text{ fin}}$ son representativos del K_c antes de la caída de las hojas. Después de la caída de las hojas, $K_{c\text{ fin}} \approx 0,20$ para suelo descubierto y seco, o para cobertura muerta del suelo y $K_{c\text{ fin}} \approx 0,50$ a $0,80$ para cobertura activa y en desarrollo (consultar el Capítulo 11).

¹⁹Referirse a la Ec. 94, 97 o 98 y notas de pie de página 21 y 22, para estimar K_c para sitios con cultivos inmaduros.

²⁰La categoría de las drupas es aplicable a los melocotones o duraznos, albaricoques, peras, ciruelas y pacanas.

²¹Estos valores de K_c pueden ser calculados a partir de la Ec. 98 para $K_{c\text{ min}} = 0,15$ y $K_{c\text{ full}} = 0,75, 0,70$ y $0,75$ para las etapas inicial, mediados de temporada y final de la temporada, y $f_{c\text{ eff}} = f_c$ donde f_c = fracción del suelo cubierto por el dosel del árbol (se asume que el sol se encuentra directamente por encima). Los valores tabulados corresponden a los indicados por Doorenbos y Pruitt (1977) y los obtenidos en mediciones recientes. El valor correspondiente a la etapa de mediados de temporada es menor que los correspondientes a las etapas inicial y final debido a los efectos del cierre estomático durante los períodos de máxima ET. Para climas húmedos y semi- húmedos, donde existe un menor control estomático por parte de los cítricos, se pueden incrementar los valores de $K_{c\text{ ini}}$, $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$ a $0,1 - 0,2$, según Rogers *et al.* (1983).

²²Estos valores de K_c pueden ser calculados como $K_c = f_c K_{c\text{ nes}} + (1 - f_c) K_c$ cobertura donde $K_{c\text{ nes}}$ es el valor de K_c de los cítricos que no poseen cobertura activa del suelo (calculado según la nota a pie de página 21); K_c cobertura es el valor de K_c para la cobertura activa del suelo (0,95) y f_c es definido en la nota a pie de página 21. Los valores tabulados corresponden con los indicados por Doorenbos y Pruitt (1977) y con mediciones mas recientes. Alternativamente, el valor de K_c para los cítricos con cobertura activa del suelo puede ser estimado directamente a través de la Ec. 98 considerando $K_{c\text{ min}} = K_c$ cobertura. Para climas húmedos y semi húmedos donde existe un menor control estomático por parte de los cítricos, se pueden incrementar los valores de $K_{c\text{ ini}}$, $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$ en un $0,1 - 0,2$, según Rogers *et al.* (1983).

Para cobertura inactiva o moderadamente activa del suelo (cobertura activa del suelo implica cobertura verde y en crecimiento, con un valor de IAF > 2 a 3 aproximadamente), el valor de K_c deberá ser ponderado entre el valor de K_c correspondiente a la ausencia de cobertura del suelo y el valor de K_c para la cubierta activa del suelo, basando la ponderación en el grado de «verdosidad» y el área foliar aproximada de la cubierta del suelo.

²³Las coníferas presentan un control estomático significativo debido a su reducida resistencia aerodinámica. Los valores de K_c pueden ser fácilmente inferiores a los presentados, los cuales representan condiciones óptimas de humedecimiento en bosques extensos.

CUADRO 12 (continuación)

Cultivo	$K_{c\text{ ini}}^1$	$K_{c\text{ med}}$	$K_{c\text{ fin}}$	Altura Máx. Cultivo (h) (m)
o. Humedales – clima templado				
Anea (Typha), Junco (Scirpus), muerte por heladas	0,30	1,20	0,30	2
Anea, Junco, sin heladas	0,60	1,20	0,60	2
Vegetación pequeña, sin heladas	1,05	1,10	1,10	0,3
Carrizo (Phragmites), con agua sobre el suelo	1,00	1,20	1,00	1-3
Carrizo, suelo húmedo	0,90	1,20	0,70	1-3
p. Especial				
Agua libre, < 2 m de profundidad o en climas sub-húmedos o trópicos		1,05	1,05	
Agua libre, > 5 m de profundidad, sin turbidez, clima templado		0,65 ²⁵	1,25 ²⁵	

²⁴Estos coeficientes son representativos de una cobertura del suelo entre 40 a 60%. Referirse a la Ec. 98 y notas a pie de página 21 y 22 para estimar el valor de K_c en sitios con vegetación inmadura. En España, Pastor y Orgaz (1994) encontraron los siguientes valores de K_c para huertos de olivos con un 60% de cobertura del suelo: 0,50, 0,50, 0,65, 0,60, 0,55, 0,50, 0,45, 0,45, 0,55, 0,60, 0,65, 0,50 para los meses Enero a Diciembre. Se pueden obtener estos coeficientes utilizando $K_{c\text{ ini}} = 0,65$, $K_{c\text{ med}} = 0,45$, y $K_{c\text{ fin}} = 0,65$, considerando una duración de las etapas inicial, desarrollo, mediados de temporada y final de = 30, 90, 60 y 90 días respectivamente, y utilizando un valor de K_c durante el Invierno («fuera de temporada») desde Diciembre a Febrero = 0,50.

²⁵Estos valores de K_c corresponden a aguas profundas en latitudes templadas donde se presentan cambios importantes de temperatura en el cuerpo de agua a través del año y donde tanto la evaporación inicial como la máxima son reducidas debido a la absorción de la energía radiante dentro del cuerpo de agua profunda. Durante los períodos de otoño e invierno ($K_{c\text{ fin}}$), el calor es liberado por el cuerpo de agua, lo que genera una evaporación por encima de la evapotranspiración de referencia. Por lo tanto el valor de $K_{c\text{ med}}$ corresponde al período donde el cuerpo de agua esta ganando energía térmica y el valor de $K_{c\text{ fin}}$ se produce durante la liberación de energía térmica. Se deberá utilizar estos valores de K_c con suma precaución.

Fuentes principales: $K_{c\text{ ini}}$: Doorenbos y Kassam (1979); $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$: Doorenbos y Pruitt (1977); Pruitt (1986); Wright (1981, 1982), Snyder et al., (1989)

Los valores de $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$ incluidos en el Cuadro 12 son representativos de climas sub-húmedos con una humedad relativa mínima promedio (HR_{min}) de alrededor 45 % y con velocidades del viento suaves a moderadas, promediando 2 m s^{-1} . Para condiciones de mayor humedad o condiciones áridas, los coeficientes K_c correspondientes a la etapa de mediados de temporada y final deberán ser modificados como se describe en este capítulo.

Los valores de K_c presentados en el Cuadro 12 son valores correspondientes a cultivos no estresados por falta de agua, cultivados bajo excelentes condiciones agronómicas y de manejo del agua y que alcanzan su máxima productividad (condiciones estándar). En los casos donde la densidad entre las plantas, altura o área foliar sean menores a las obtenidas bajo tales condiciones, el valor de $K_{c\text{ med}}$ y, para la mayoría de cultivos, el valor de $K_{c\text{ fin}}$ necesitarán de correcciones adicionales (Parte C, Capítulos 8, 9 y 10).

Coefficiente del cultivo para la etapa inicial ($K_{c\text{ ini}}$)

Procedimiento de cálculo

Los valores de $K_{c\text{ ini}}$ presentados en el Cuadro 12 son solamente aproximaciones, debiendo ser usados para estimar ET_c solamente durante estudios preliminares o de planificación. Con frecuencia se presenta un sólo valor de $K_{c\text{ ini}}$ para distintos grupos de cultivos, el cual se considera como representativo del grupo completo bajo un manejo típico del agua de riego. Estimaciones más precisas del valor de $K_{c\text{ ini}}$ pueden ser obtenidas considerando lo siguiente:

Intervalo de tiempo entre eventos de humedecimiento

La evapotranspiración que ocurre durante la etapa inicial en cultivos anuales se presenta principalmente en la forma de evaporación. Por lo tanto, para realizar estimaciones precisas del valor de $K_{c\text{ ini}}$ se deberá considerar la frecuencia con que la superficie del suelo es humedecida durante la etapa inicial. En los casos donde el suelo sea humedecido frecuentemente a través del riego o la lluvia, la evaporación que ocurre en la superficie del suelo puede ser significativa, por lo que el valor de $K_{c\text{ ini}}$ será elevado. Por otro lado,

cuando la superficie del suelo se mantiene seca, la evaporación será restringida y el valor de $K_{c\text{ ini}}$ será pequeño (Cuadro 9).

Poder evaporante de la atmósfera

El valor de $K_{c\text{ ini}}$ resulta afectado por el poder evaporante de la atmósfera, representado por ET_0 . Mientras mayor sea el poder evaporante de la atmósfera, el suelo se secará más rápidamente entre aplicaciones de agua y menor será el valor promedio temporal de K_c para un período dado.

Magnitud del evento de humedecimiento

Debido a que la cantidad de agua disponible en la parte superior del suelo, y por lo tanto el tiempo que tardará el suelo en secarse, es una función de la magnitud del evento de humedecimiento, el valor de $K_{c\text{ ini}}$ será menor para eventos de humedecimiento ligeros que para humedecimientos mayores.

Dependiendo del intervalo de tiempo entre eventos de humedecimiento, la magnitud del evento de humedecimiento y el poder evaporante de la atmósfera, el valor de $K_{c\text{ ini}}$ puede variar entre 0,1 y 1,15. Un procedimiento numérico para calcular $K_{c\text{ ini}}$ se presenta en el Anexo 7.

Intervalo de tiempo entre eventos de humedecimiento

En general, el intervalo promedio entre eventos de humedecimiento se estima contando todos los eventos de lluvia y riego mayores a unos pocos milímetros que ocurren durante la etapa inicial. Cuando los eventos de humedecimiento ocurran en días sucesivos, estos serán contados como un sólo evento. El intervalo promedio de humedecimiento se estimará dividiendo la duración de la etapa inicial entre el número de eventos.

Cuando solamente se disponga de valores de precipitación a nivel mensual, sin información acerca del número de días con lluvia, se puede estimar el número de eventos dividiendo el valor de precipitación mensual entre la lámina de lluvia que ocurriría en un evento típico de lluvia. Esta lámina típica, de existir, puede variar ampliamente de clima en clima, de región a región y de temporada a temporada. En el Cuadro 13 se presenta información relativa a los rangos de las láminas de lluvia. Después de decidir que lluvia puede ser considerada como típica de una región y momento del año, se puede estimar el número de días lluviosos y el intervalo promedio entre humedecimientos.

Cuando las lluvias sean insuficientes, se necesitará del riego para proporcionar al cultivo el agua requerida. Aún en los casos donde el riego no ha sido establecido, se deberá estimar el intervalo de tiempo entre los riegos futuros para determinar la frecuencia necesaria para mantener al cultivo libre de estrés. El intervalo puede ser tan corto como unos pocos días para las hortalizas pequeñas y tan largo como una semana o más para el caso de los cereales, dependiendo de las condiciones climáticas. Cuando no se puedan hacer estimaciones del intervalo de tiempo, el usuario podría utilizar los valores de $K_{c\text{ ini}}$ incluidos en el Cuadro 12.

CUADRO 13

Clasificación de las láminas de precipitación

Evento de lluvia	Lámina
Muy ligero	≤ 3 mm
Ligero	5 mm
Medio	≥ 10 mm
Fuerte (tormentas)	≥ 40 mm

EJEMPLO 23**Estimación del intervalo entre eventos de humedecimiento**

Estimar, a partir de los valores promedios mensuales de precipitación, el intervalo entre lluvias durante la época lluviosa para una estación localizada en un clima templado (Paris, Francia: 50 mm/mes), clima seco (Gafsa, Túnez: 20 mm/mes) y clima tropical (Calcuta, India: 300 mm/mes).

Estación	Precipitación mensual (mm mes ⁻¹)	Lluvia típica (mm)	Número de días lluviosos	Intervalo entre lluvias
Paris	50	3	17	~ 2 días
Gafsa	20	5	4	semanal
Calcuta	300	20	15	~ 2 días

Determinación del valor de $K_{c\text{ ini}}$

El valor del coeficiente del cultivo para la etapa inicial de crecimiento puede ser determinado a partir de las Figuras 29 y 30, las cuales presentan estimaciones del valor de $K_{c\text{ ini}}$ en función del intervalo promedio entre los eventos de humedecimiento, el poder evaporante ET_0 y la magnitud del evento de humedecimiento.

Eventos ligeros de humedecimiento (láminas infiltradas menores o iguales a 10 mm): lluvias y sistemas de riego de alta frecuencia

La Figura 29 puede ser utilizada para cualquier tipo de suelo cuando los eventos de humedecimientos sean ligeros. Cuando el humedecimiento durante la etapa inicial sea producto únicamente de la lluvia, se utilizará la Figura 29 para determinar el valor de $K_{c\text{ ini}}$. También se puede utilizar el gráfico cuando se riegue a través de sistemas de alta frecuencia tales como micro-irrigación y pivote central y en los casos de aplicaciones ligeras de agua de alrededor a 10 mm o menos por cada evento de humedecimiento.

Eventos fuertes de humedecimiento (láminas de infiltración mayores o iguales a 40 mm): riego por superficie y aspersion

Se utiliza la Figura 30 para eventos fuertes de humedecimiento donde las láminas de infiltración superan los 40 mm, como ocurre cuando el humedecimiento es producido principalmente por riego periódico, tal como en los casos de riego por aspersion o superficie. Después de ocurrir el evento de humedecimiento, la cantidad de agua disponible para evaporación en la parte superior del suelo es considerable por lo que se incrementa significativamente el tiempo que el suelo tardará en secarse. En consecuencia, el valor promedio de K_c será mayor que el correspondiente a eventos ligeros de humedecimiento. Como el tiempo que tardará el suelo en secarse no es sólo función del poder evaporante y la frecuencia del humedecimiento, sino que está determinado también por la capacidad de almacenamiento de humedad en la capa superior del suelo, se hace una distinción entre los diferentes tipos de suelos.

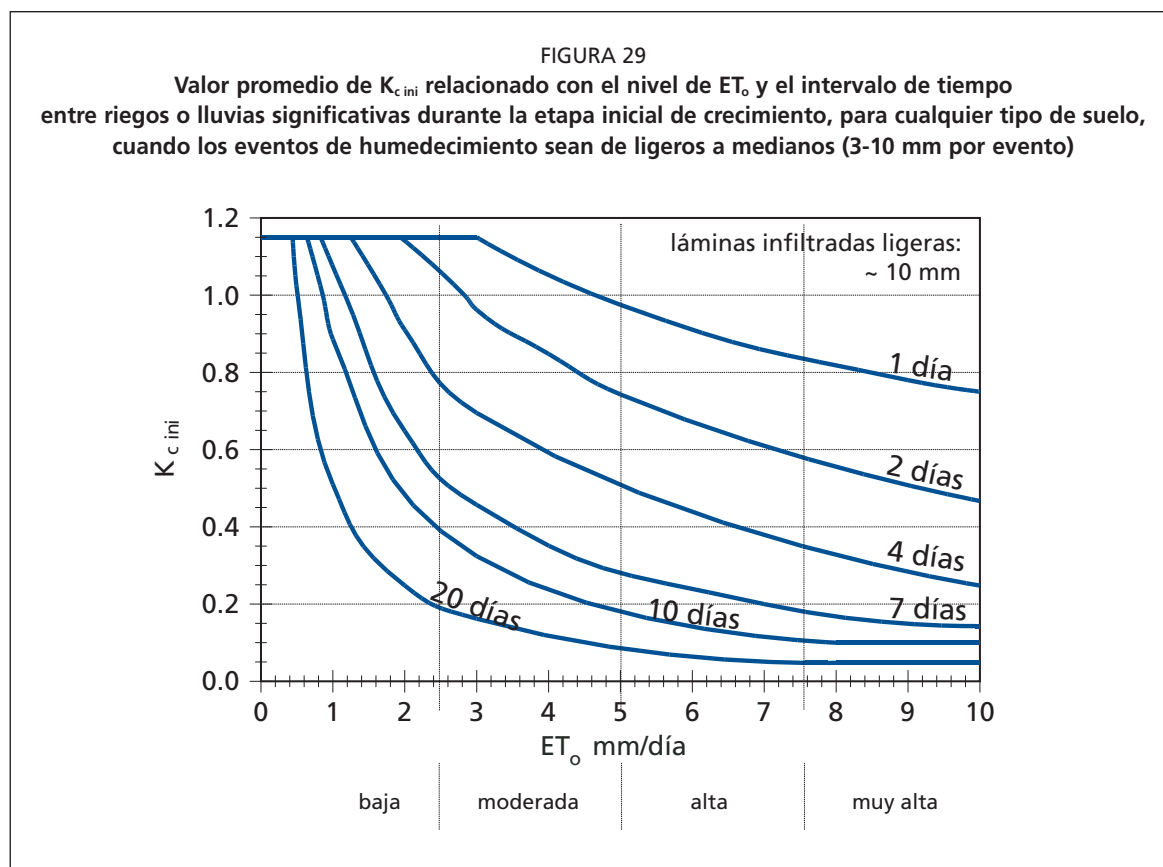
La Figura 30a es usada para suelos de textura gruesa y la Figura 30b es utilizada para suelos de textura fina y media. Los suelos de textura ligera incluyen las arenas y

EJEMPLO 24**Determinación gráfica del valor de $K_{c\text{ ini}}$**

Un suelo franco arcilloso se riega cada dos días durante la etapa inicial a través de un sistema de pivote central. La lámina promedio aplicada por el sistema es de aproximadamente 12 mm por evento y el valor promedio de ET_0 durante la etapa inicial es de 4 mm día⁻¹. Estimar la evapotranspiración del cultivo durante esta etapa.

A partir de la Fig. 29 utilizando la curva de intervalo de 2-días:	$K_{c\text{ ini}} =$	0,85	-
-	$ET_c = K_c ET_0 = 0,85 (4,0) =$	3,4	mm día ⁻¹

La evapotranspiración promedio del cultivo durante la etapa inicial es de 3,4 mm día⁻¹



los suelos de textura arenosa franca. Los suelos de textura media incluyen los suelos de textura franca arenosa, franca, franca limosa y limosa. Los suelos de textura fina incluyen los suelos de textura franca limo-arcillosa, limo-arcillosa y arcillosa.

Eventos promedios de humedecimiento (láminas de infiltración entre los 10 y 40 mm)

Cuando las láminas promedio de infiltración se encuentren entre los 10 y 40 mm, el valor de $K_{c,ini}$ puede ser estimado a partir de las Figuras 29 y 30:

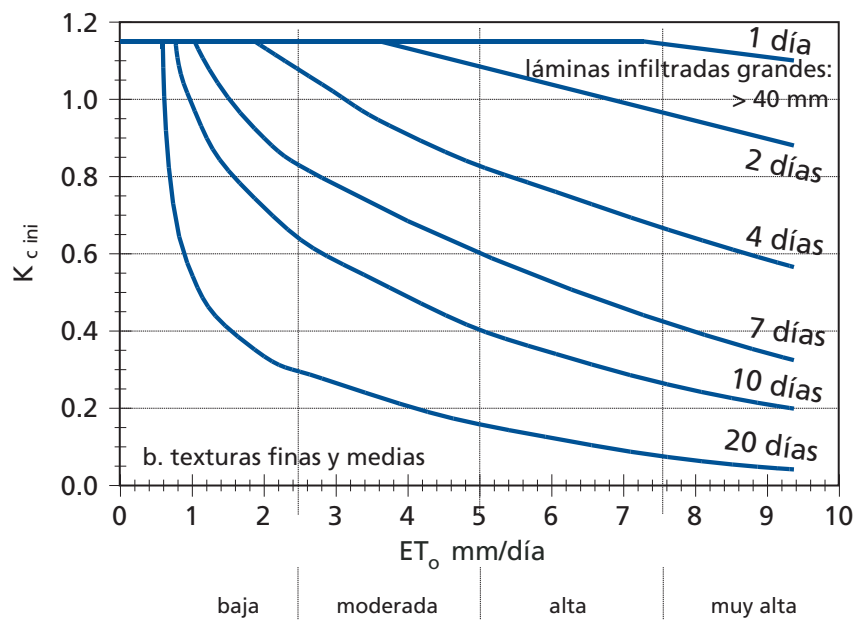
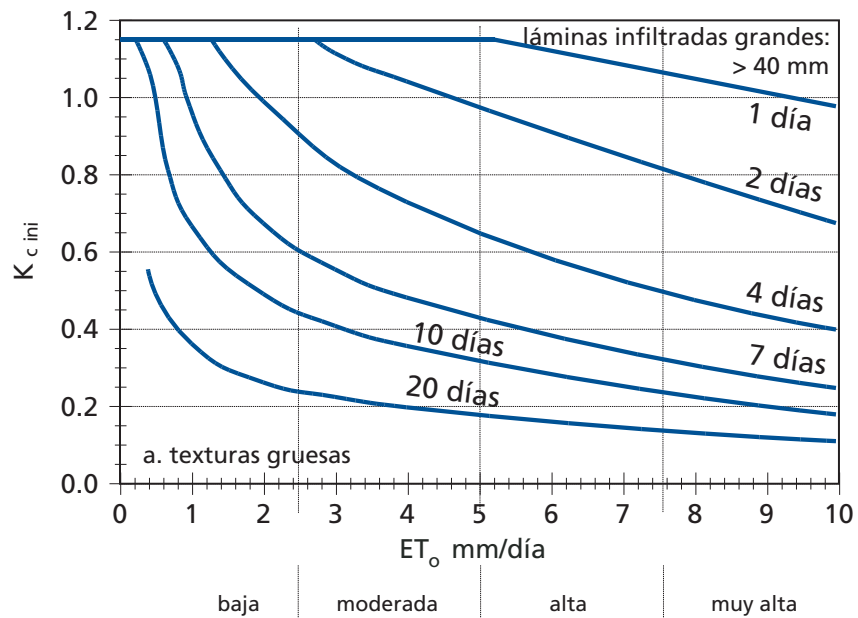
$$K_{c,ini} = K_{c,ini}(\text{Fig. 29}) + \frac{(I-10)}{(40-10)} [K_{c,ini}(\text{Fig. 30}) - K_{c,ini}(\text{Fig. 29})] \quad (59)$$

donde

- $K_{c,ini}(\text{Fig.29})$ valor de $K_{c,ini}$ correspondiente a la Figura 29,
- $K_{c,ini}(\text{Fig.30})$ valor de $K_{c,ini}$ correspondiente a la Figura 30,
- I lámina infiltrada promedio [mm].

Los valores 10 y 40 que aparecen en la Ecuación 59 son las láminas promedio de infiltración (milímetros) utilizadas en la definición de las Figuras 29 y 30.

FIGURA 30
 Valor promedio de $K_{c,ini}$ relacionado con el nivel de ET_0 y el intervalo entre riegos para eventos de humedecimiento mayores o iguales a 40 mm durante la etapa inicial para
 a) suelos de textura gruesa; b) suelos de textura media y fina



EJEMPLO 25

Interpolación entre eventos de humedecimiento ligeros y pesados

Las hortalizas pequeñas cultivadas en una región seca y en un suelo de textura gruesa reciben 20 mm de agua dos veces a la semana a través de un sistema de riego por aspersión. El valor promedio de ET_o durante la etapa inicial es de 5 mm día⁻¹. Estimar la evapotranspiración del cultivo durante la etapa mencionada.

Para:	$7/2 =$ $ET_o =$ y considerando un suelo de textura gruesa	3,5 5	días(intervalo) mm día ⁻¹
Usando Fig. 29:	$K_{c\ ini}(Fig. 29) \approx$	0,55	-
Usando Fig. 30a:	$K_{c\ ini}(Fig. 30a) \approx$	0,7	-
Para:	$I =$	20	mm
Usando Ec. 59:	$K_{c\ ini} = 0,55 + [(20-10)/(40-10)] (0,7-0,55)$ $= 0,55+0,33(0,15)=$	0,60	-
Usando Ec. 58:	$ET_c = 0,60 (5) =$	3,0	mm día ⁻¹
La evapotranspiración promedio del cultivo de vegetales pequeños durante la etapa inicial es de 3,0 mm día ⁻¹ .			

Ajuste por humedecimiento parcial del riego

Algunos sistemas de riego humedecen solamente una fracción de la superficie del suelo. Por ejemplo, para un sistema de riego por goteo la fracción de humedecimiento, f_h , podría ser tan pequeña como 0,4. Para sistemas de riego por surcos, la fracción de la superficie del suelo que se humedece puede variar entre 0,3 y 0,8. Los valores comunes de la fracción humedecida del suelo a través del riego o lluvia se presentan en el Cuadro 20. Cuando solamente se humedece una fracción de la superficie del suelo, el valor de $K_{c\ ini}$ obtenido a partir del Cuadro 12, o a partir de las Figuras 29 y 30, deberá ser multiplicado por la fracción de la superficie humedecida, para hacer un ajuste por el humedecimiento parcial del suelo:

$$K_{c\ ini} = f_w K_{c\ ini}(Cua, Fig) \tag{60}$$

donde

- f_h fracción de la superficie del suelo humedecida por el riego o la lluvia [0 - 1],
- $K_{c\ ini} (Cua, Fig)$ valor de $K_{c\ ini}$ obtenido del Cuadro 12 o las Figuras 29 ó 30.

Por otra parte, al momento de seleccionar la figura a utilizar (ósea, Figura 29 ó 30), la lámina infiltrada promedio, expresada en milímetros sobre la superficie total del campo, deberá ser dividida entre f_h con el objeto de representar la lámina infiltrada verdadera en la porción de la superficie humedecida (Figura 31):

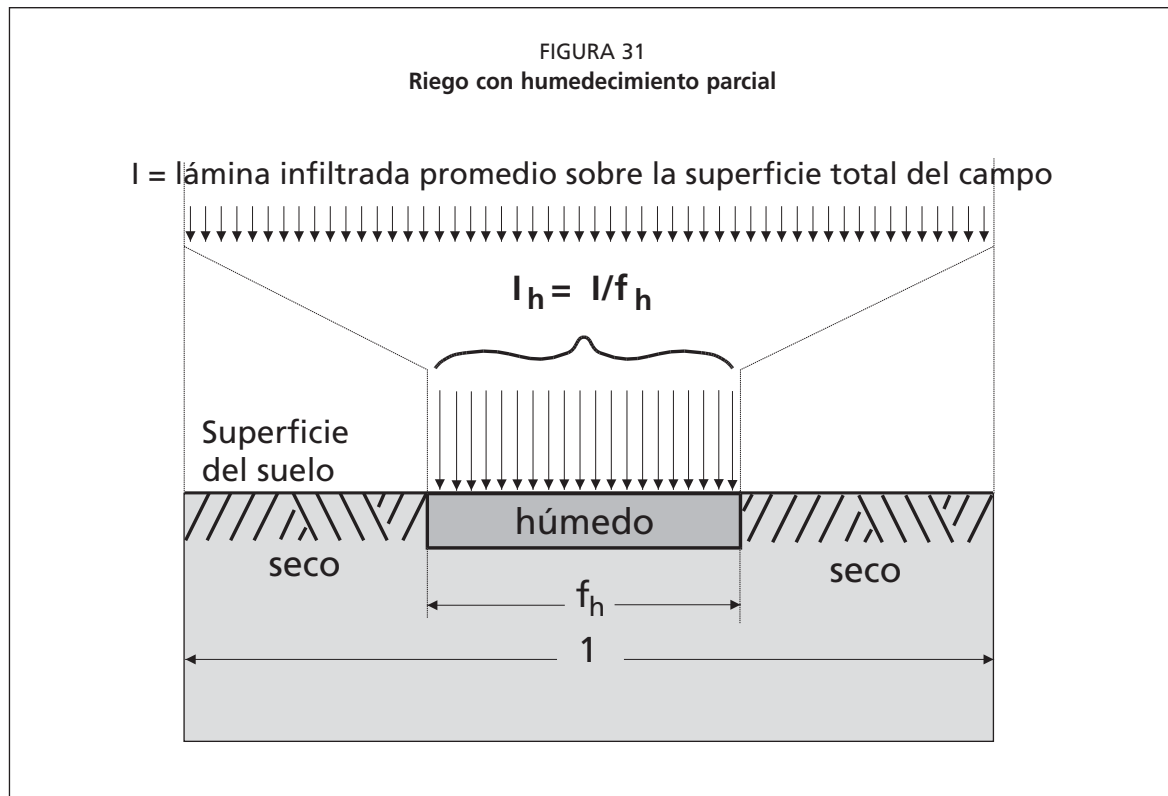
$$I_h = \frac{I}{f_h} \tag{61}$$

donde

- I_h lámina de riego correspondiente a la porción del suelo humedecida [mm],
- f_h fracción de la superficie del suelo humedecida por el sistema de riego,
- I lámina promedio de riego en el campo [mm].

Cuando se produzca simultáneamente riego de una porción de la superficie del suelo y lluvia sobre la superficie total del campo durante la etapa inicial, el valor de f_h deberá representar el valor promedio de f_h correspondiente a cada tipo de humedecimiento, ponderado de acuerdo a la lámina total infiltrada producida por cada tipo de humedecimiento.

FIGURA 31
Riego con humedecimiento parcial



EJEMPLO 26

Determinación del valor de $K_{c\text{ ini}}$ para humedecimiento parcial de la superficie del suelo

Determinar la evapotranspiración del cultivo del Ejemplo 24 si el mismo ha sido regado cada dos días a través de un sistema de riego por goteo (con una aplicación de agua de 12 mm, expresada como lámina equivalente sobre el área total del campo cultivado), donde la fracción promedio de humedecimiento es de 0,4 y donde no se produjeron precipitaciones significativas durante la etapa inicial

La lámina promedio infiltrada por evento en la fracción humedecida de la superficie del suelo:

Utilizando Ec. 61:	$I_h = I / f_h = 12 \text{ mm} / 0,4 =$	30	mm
--------------------	---	----	----

Por lo tanto se debe interpolar entre la Fig. 29, la cual representa eventos ligeros de humedecimiento (~10 mm por evento) y Fig. 30.b, la cual representa suelos de textura media y eventos pesados de humedecimiento (~40 mm por evento).

Para:	$ET_o = 4 \text{ mm día}^{-1}$	4	mm día ⁻¹
y:	con un intervalo de humedecimiento de 2 días:	-	-
Utilizando Fig. 29 :	$K_{c\text{ ini}} = 0,85$	0,85	-
Utilizando Fig. 30.b:	$K_{c\text{ ini}} = 1,15$	1,15	-
Utilizando Ec. 59:	$K_{c\text{ ini}} = 0,85 + [(30 - 10)/(40 - 10)] (1,15 - 0,85) =$	1,05	-

Debido a que la fracción del suelo humedecida por el sistema de goteo es de 0,4, el valor real de $K_{c\text{ ini}}$ para el riego por goteo es calculado como:

Utilizando Ec. 60:	$K_{c\text{ ini}} = f_h K_{c\text{ ini}} \text{ Fig} = 0,4 (1,05) =$ Este valor (0,42) representa el valor de $K_{c\text{ ini}}$ aplicado sobre el área total del campo.	0,42	-
-	$ETc = K_{c\text{ ini}} ET_o = 0,42 (4) =$	1,7	mm día ⁻¹

El valor promedio de evapotranspiración del cultivo durante la etapa inicial de crecimiento, para este cultivado regado con riego por goteo, es de 1,7 mm día⁻¹.

CUADRO 14

 $K_{c\text{ ini}}$ para arroz y varias condiciones climáticas

Humedad	Velocidad del Viento		
	Ligero	Moderado	Fuerte
árido - semi-árido	1,10	1,15	1,20
sub-húmedo - húmedo	1,05	1,10	1,15
muy húmedo	1,00	1,05	1,10

 $K_{c\text{ ini}}$ para árboles y arbustos

El valor de $K_{c\text{ ini}}$ para el caso de árboles y arbustos deberá reflejar las condiciones del terreno antes de la aparición o brote de las hojas para el caso de árboles de hojas caducas, así como la condición del terreno durante el período de letargo o baja actividad, para árboles de hojas siempre verdes y arbustos. El valor de $K_{c\text{ ini}}$ dependerá de la cantidad de cobertura de gramíneas o malezas, la frecuencia del humedecimiento del suelo, la densidad de los árboles y la densidad del mantillo. Para un huerto de árboles de hojas caducas en climas libres de heladas, el valor de $K_{c\text{ ini}}$ puede ser tan alto como 0,8 o 0,9, en los casos donde exista grama cubriendo el suelo y tan bajo como 0,3 o 0,4, cuando la superficie del suelo se mantiene limpia y el humedecimiento es infrecuente. El valor de $K_{c\text{ ini}}$ para un huerto de árboles siempre verdes (sin ocurrencia de caída de hojas) con un período de letargo presentará una menor variación a partir de la ocurrencia del valor de $K_{c\text{ med}}$, tal como se puede observar en el Cuadro 12 y en las observaciones a pie de página 21 y 22 para el caso de los cítricos. Cuando exista una cobertura vegetal de 50% o menos, el valor de $K_{c\text{ ini}}$ reflejará asimismo las condiciones de la cobertura del suelo (suelo desnudo, mantillo o gramíneas activas, o cobertura de malezas).

 $K_{c\text{ ini}}$ para arroz inundado

Para el caso del arroz que se desarrolla en campos inundados con una lámina de agua de 0,10-0,20 m, el valor de ET_c durante la etapa inicial consistirá principalmente de la evaporación que ocurre de la superficie del agua. El valor de $K_{c\text{ ini}}$ incluido en el Cuadro 12 es de 1,05 para un clima sub-húmedo con vientos ligeros a moderados. El valor de $K_{c\text{ ini}}$ deberá ser ajustado de acuerdo al clima de la localidad, tal como se indica en el Cuadro 14.

Coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada ($K_{c\text{ med}}$)***Ilustración del efecto del clima***

En el Cuadro 12 se presentan valores típicos del coeficiente del cultivo para la etapa de mediados de temporada, $K_{c\text{ med}}$, para diferentes cultivos.

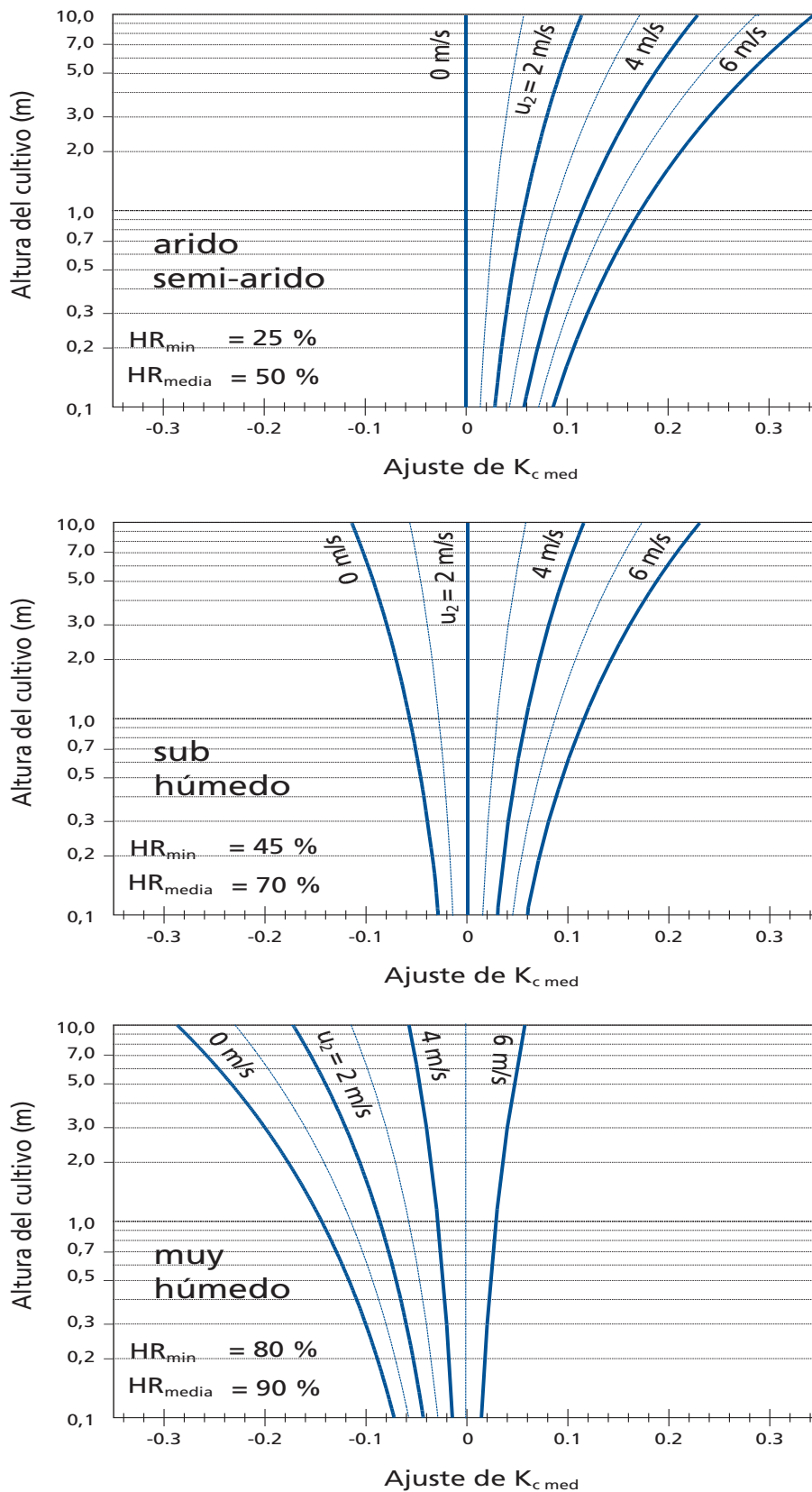
Como se discutió en el Capítulo 5, las diferencias en las propiedades aerodinámicas entre la superficie de referencia del pasto y los cultivos agrícolas no son solamente específicas de cada cultivo sino que además varían con las condiciones climáticas y la altura del cultivo (Figura 21). Climas de mayor aridez y con condiciones de mayores velocidades del viento se traducirán en valores mayores de $K_{c\text{ med}}$. Por otro lado, climas de mayor humedad y condiciones de velocidades menores del viento se traducen en valores menores de $K_{c\text{ med}}$.

El impacto relativo del clima en el valor de $K_{c\text{ med}}$ se ilustra en la Figura 32, donde se incluyen los ajustes a los valores del Cuadro 12 para varios tipos de clima, valores promedios diarios de la velocidad del viento y diferentes alturas del cultivo. A manera de ejemplo, en el Recuadro 14 se presenta la variación esperada del valor de $K_{c\text{ med}}$ para el caso del trigo en respuesta a las condiciones climáticas de la región.

Determinación de $K_{c\text{ med}}$

Para realizar las correcciones específicas para el caso de climas donde el valor de HR_{min} difiera de 45% o donde el valor de u_2 sea mayor o menor a $2,0\text{ m s}^{-1}$, los valores de $K_{c\text{ med}}$ deberán ser ajustados de acuerdo a la fórmula:

FIGURA 32
 Ajuste (aditivo) al valor de $K_{c\text{ med}}$ de el Cuadro 12 para diferentes alturas del cultivo y valor promedio diario de la velocidad del viento (u_2) para diferentes condiciones de humedad



$$K_{c \text{ med}} = K_{c \text{ med (Cua)}} + [0,04 (u_2 - 2) - 0,004 (HR_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \quad (62)$$

donde

$K_{c \text{ med (Cua)}}$	valor de $K_{c \text{ med}}$ obtenido del Cuadro 12,
u_2	valor medio diario de la velocidad del viento a 2 m de altura sobre pasto para la etapa de mediados de temporada [$m \text{ s}^{-1}$], con $1 \text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 6 \text{ m s}^{-1}$,
HR_{\min}	valor medio diario de humedad relativa mínima durante la etapa de mediados de temporada [%], para $20\% \leq HR_{\min} \leq 80\%$,
h	altura media de las plantas durante la etapa de mediados de temporada [m] para $0,1 \text{ m} < h < 10 \text{ m}$.

Los valores de $K_{c \text{ med}}$ determinados a través de las ecuaciones 62 y 65 representan ajustes promedios para las etapas de mediados de temporada y final. Los valores de los parámetros u_2 y HR_{\min} deberán ser considerados como valores promedios para los períodos mencionados (ver ejemplo, Anexo 8). Los límites impuestos a los parámetros u_2 , HR_{\min} y h deberán ser verificados.

Cuando el usuario no disponga de una calculadora con función exponencial, la solución del término $(h/3)^{0,3}$ puede ser aproximada como $[(h/3)^{0,5}]^{0,5}$, donde se utiliza la tecla de la raíz cuadrada.

El valor de HR_{\min} es utilizado en lugar de HR_{med} debido a que es más fácil aproximar HR_{\min} a partir de T_{\max} cuando no se tengan datos de humedad relativa. Además, considerando que en condiciones normales T_{\min} se aproxima a $T_{\text{rocío}}$ (o sea, $HR_{\max} \approx 100\%$), el valor del déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$), con e_s obtenido con la Ecuación

RECUADRO 14

Demostración del efecto del clima en el valor de $K_{c \text{ med}}$ para el cultivo de trigo desarrollado bajo condiciones de campo

Del Cuadro 12 para el trigo: $K_{c \text{ med}} = 1,15$ y $h = 1,0 \text{ m}$

Para condiciones semi-áridas a áridas

- para vientos fuertes (4 m s^{-1})	$K_{c \text{ med}} = 1,15 + 0,10 = 1,25$
- para vientos moderados (2 m s^{-1})	$K_{c \text{ med}} = 1,15 + 0,05 = 1,20$
- para vientos ligeros (1 m s^{-1})	$K_{c \text{ med}} = 1,15 + 0,00 = 1,17$

Para condiciones sub-húmedas

- para vientos fuertes (4 m s^{-1})	$K_{c \text{ med}} = 1,15 + 0,05 = 1,20$
- para vientos moderados (2 m s^{-1})	$K_{c \text{ med}} = 1,15 + 0,00 = 1,15$
- para vientos ligeros (1 m s^{-1})	$K_{c \text{ med}} = 1,15 - 0,05 = 1,12$

Para condiciones húmedas y muy húmedas

- para vientos fuertes (4 m s^{-1})	$K_{c \text{ med}} = 1,15 - 0,05 = 1,10$
- para vientos moderados (2 m s^{-1})	$K_{c \text{ med}} = 1,15 - 0,10 = 1,05$
- para vientos ligeros (1 m s^{-1})	$K_{c \text{ med}} = 1,15 - 0,15 = 1,02$

Dependiendo de la aridez del clima y las condiciones del viento, el coeficiente del cultivo del trigo durante la etapa de mediados de temporada oscilará entre 1,02 (condiciones húmedas y vientos ligeros) a 1,25 (condiciones áridas y vientos fuertes)

12 y e_a obtenido con la Ecuación 17, se transforma en $[(100-HR_{\min})/200] e^{\circ}(T_{\max})$, donde $e^{\circ}(T_{\max})$ es la presión de vapor a saturación correspondiente a la temperatura máxima diaria del aire. Esto es un indicativo que HR_{\min} refleja mas acertadamente el impacto del déficit de presión de vapor en el valor de Kc que HR_{med} .

Se puede calcular el valor de HR_{\min} para intervalos de tiempo diario o mensuales como:

$$HR_{\min} = \frac{e^{\circ}(T_{\text{rocío}})}{e^{\circ}(T_{\max})} 100 \quad (63)$$

donde $T_{\text{rocío}}$ es la temperatura del punto de rocío y T_{\max} es la temperatura máxima media diaria durante la etapa de mediados de temporada.

Cuando no se disponga de datos de temperatura de punto de rocío o de información higrométrica, o los mismos sean de dudosa calidad, HR_{\min} puede ser estimada substituyendo la temperatura mínima media diaria T_{\min} por $T_{\text{rocío}}$ ¹. Por consiguiente:

$$HR_{\min} = \frac{e^{\circ}(T_{\min})}{e^{\circ}(T_{\max})} 100 \quad (64)$$

Se necesita solamente una aproximación de los valores de u_2 y HR_{\min} para la etapa de mediados de temporada. Esto es debido a que la Ecuación 62 no es altamente sensitiva a esos valores, variando en 0,04 por cada variación de 1 m s^{-1} de u_2 y 10% de variación en HR_{\min} para un cultivo de 3 m de altura. En el Capítulo 3 se presentan procedimientos de medición, cálculo y estimación de datos faltantes de viento y humedad relativa. Las mediciones de la velocidad del viento efectuadas a alturas diferentes a 2 m deberán ser ajustadas con el objeto de representar los valores de velocidad del viento a 2 m de altura sobre pasto, usando la Ecuación 47. En los casos donde no se cuente con datos de u_2 o HR_{\min} , se puede recurrir a las clasificaciones generales de velocidad del viento y humedad presentadas en los Cuadros 15 y 16.

La Ecuación 62 es válida para alturas medias de las plantas de hasta 10 m. Para plantas menores a 0,1 m, la vegetación tendrá un comportamiento aerodinámico

CUADRO 15

Estimaciones empíricas de datos mensuales de velocidad del viento

descripción	Velocidad del viento media mensual a 2 m
viento ligero	$\dots \leq 1,0 \text{ m s}^{-1}$
viento ligero a moderado	$2,0 \text{ m s}^{-1}$
viento moderado a fuerte	$4,0 \text{ m s}^{-1}$
viento fuerte	$\dots \geq 5,0 \text{ m s}^{-1}$
condiciones globales generales	2 m s^{-1}

CUADRO 16

Valores típicos de HR_{\min} , comparados con HR_{med} para clasificaciones climáticas generales

Clasificación climática	HR_{\min} (%)	HR_{med} (%)
Árido	20	45
Semi-Árido	30	55
Sub-Húmedo	45	70
Húmedo	70	85
Muy Húmedo	80	90

¹ En el caso de climas áridos o semi-áridos, el valor de T_{\min} en Ecuación (64) deberá ser ajustado como se indica en el Anexo 6 (Ecuación 6-6), sustrayendo 2°C del valor promedio de T_{\min} para una mejor aproximación de $T_{\text{rocío}}$.

EJEMPLO 27**Determinación de $K_{c\ med}$**

Calcular el valor de $K_{c\ med}$ para un cultivo de maíz cerca de Taipei, Taiwán y cerca de Mocha, Yemen. La velocidad media diaria del viento (u_z) durante la etapa de mediados de temporada es de alrededor $1,3\ m\ s^{-1}$ y la humedad relativa mínima (HR_{min}) durante esta etapa es de 75%. El valor promedio de u_z durante la etapa de mediados de temporada es de $4,6\ m\ s^{-1}$ y la HR_{min} promedio durante esta etapa es de 44%.

A partir del Cuadro 12, el valor de $K_{c\ med}$ es de 1,20 para el maíz. El valor de h en el Cuadro 12 es de 2 m. Usando la Ecuación 62:

Para Taipei (clima húmedo):

$$K_{c\ med} = 1,20 + [0,04(1,3 - 2) - 0,004(75 - 45)] \left(\frac{2}{3}\right)^{0,3} = 1,07$$

Para Mocha (clima árido):

$$K_{c\ med} = 1,20 + [0,04(4,6 - 2) - 0,004(44 - 45)] \left(\frac{2}{3}\right)^{0,3} = 1,30$$

El valor promedio del coeficiente del cultivo estimado para la etapa de mediados de temporada es de 1,07 para Taipei y de 1,30 para Mocha.

similar al pasto de referencia, por lo que no deberá aplicar la Ecuación 62. Ejemplos de valores de h para diferentes cultivos se presentan en el Cuadro 12. Sin embargo, el valor promedio de la altura de las plantas variará sustancialmente con la variedad del cultivo y las prácticas culturales. Por lo tanto en los casos donde sea posible, h deberá ser obtenida a través de observaciones de campo. Por otro lado, la presencia del exponente 0,3 en la Ecuación 6.2 hace a estas ecuaciones relativamente insensitivas a errores pequeños en el valor de h utilizado. Generalmente, se utiliza un valor único de h para representar la etapa de mediados de temporada.

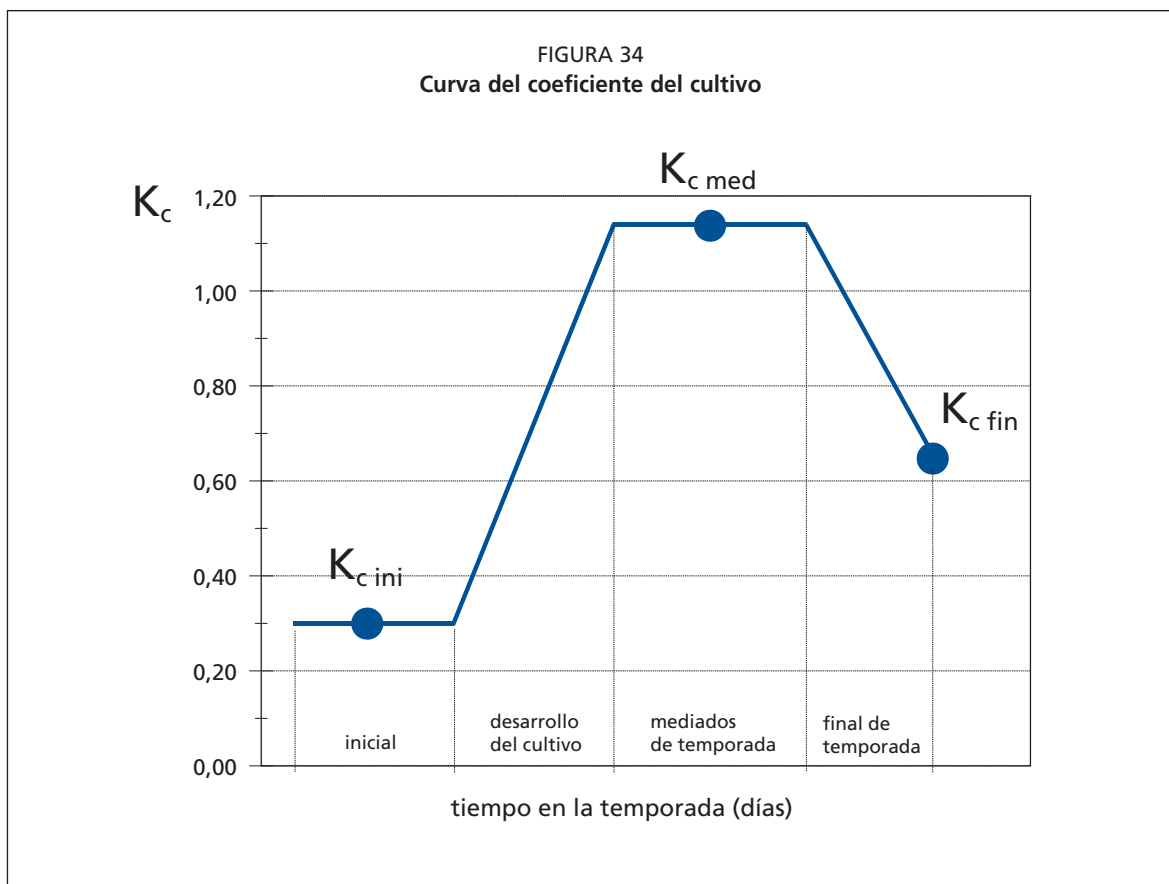
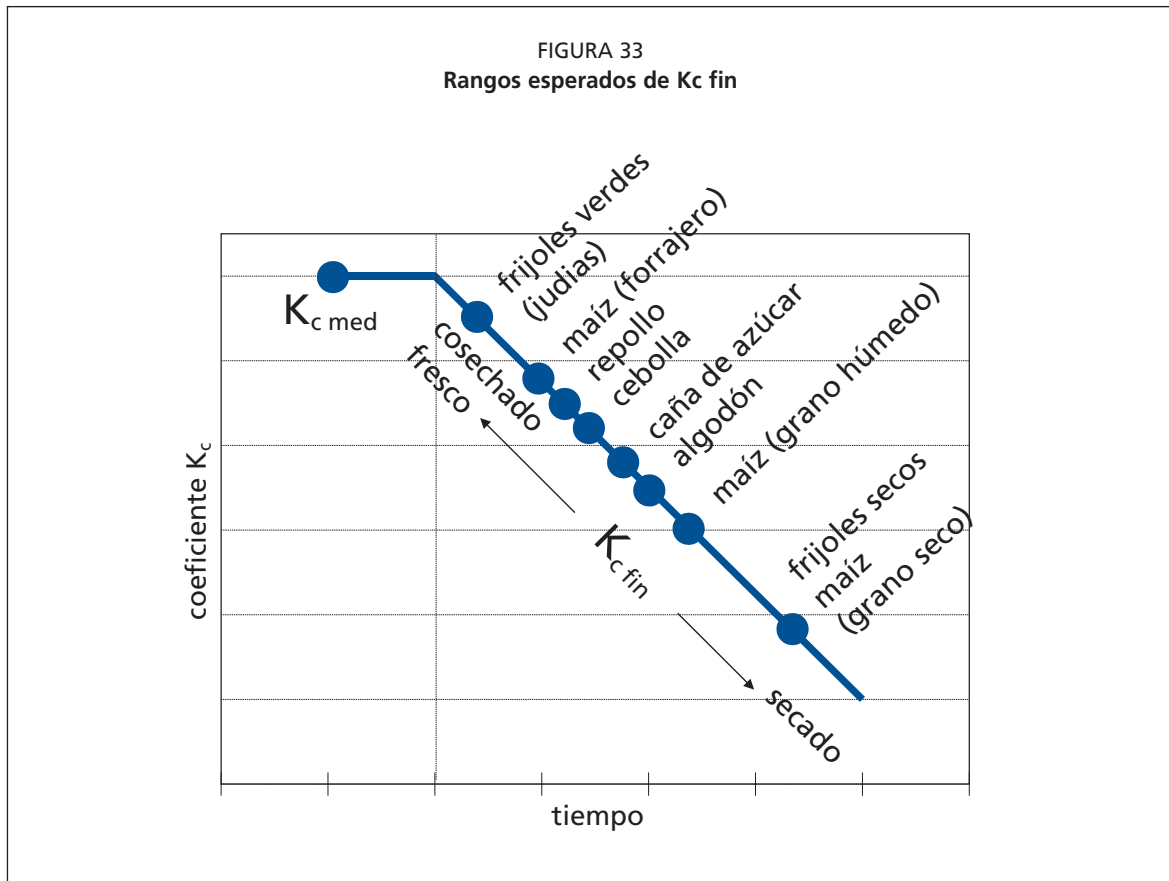
Ajuste por la frecuencia de humedecimiento

El valor de $K_{c\ med}$ resulta menos afectado por la frecuencia de humedecimiento que el valor de $K_{c\ ini}$, debido a que la vegetación en esta etapa se encuentra generalmente en condiciones de cobertura completa, por lo que se reducen los efectos de la evaporación en la superficie del suelo en el valor de K_c . Para condiciones de cultivos regados frecuentemente (frecuencia mayor a 3 días) y donde el valor de $K_{c\ med}$ del Cuadro 12 sea menor a 1,0, este valor puede ser aproximado a 1,1-1,3 para tomar en cuenta el efecto combinado del suelo continuamente humedecido, la evaporación que ocurre por intercepción (riego por aspersión) y la rugosidad de la vegetación; especialmente en los casos donde el sistema de riego humedece una fracción importante de la superficie del suelo ($f_h > 0,3$).

Coeficiente del cultivo para el término de la etapa final ($K_{c\ fin}$)

En el Cuadro 12 se presentan valores típicos del coeficiente del cultivo, correspondientes al final de la etapa final de crecimiento, $K_{c\ fin}$, para varios cultivos agrícolas. Los valores de $K_{c\ fin}$ reflejan las prácticas de manejo del cultivo y del agua que son particulares de cada cultivo. Si el cultivo se riega frecuentemente hasta que se cosecha fresco, la capa superficial del suelo permanecerá húmeda y el valor de $K_{c\ fin}$ será relativamente alto. Por otro lado, en los casos de los cultivos que se dejan morir y secar antes de ser cosechados, los mismos reciben riegos menos frecuentes o no reciben riego durante la etapa final de desarrollo. Consecuentemente, tanto la superficie del suelo como la vegetación permanecerán secas y el valor de $K_{c\ fin}$ será relativamente bajo.

En los casos donde el manejo del agua y las prácticas de cosecha sean diferentes a las relacionadas con los valores típicos presentados en el Cuadro 13, el usuario deberá realizar ajustes a los valores de $K_{c\ fin}$. En el Capítulo 7 se presentan algunas guías para realizar los ajustes del valor de K_c en función de la frecuencia del humedecimiento del suelo. En los casos de cosechas prematuras, el usuario puede construir la curva de K_c utilizando el valor de $K_{c\ fin}$ incluido en el Cuadro 12 y considerar una duración típica de



la etapa final de desarrollo correspondiente a una fecha normal de cosecha; sin embargo el usuario deberá finalizar mas temprano la aplicación de la curva, es decir, para el tiempo correspondiente a la cosecha prematura.

Los valores de $K_{c\text{ fin}}$ incluidos en el Cuadro 12 representan valores típicos esperados de $K_{c\text{ fin}}$ bajo condiciones climáticas estándar. En climas de mayor aridez y condiciones de velocidades de viento mayores se presentarán valores más altos de $K_{c\text{ fin}}$. Por otra parte, climas más húmedos y velocidades de viento menores resultarán en valores menores de $K_{c\text{ fin}}$. Para realizar los ajustes pertinentes para climas donde la HR_{min} sea diferente de 45% y donde u_2 sea mayor o menor a $2,0\text{ m s}^{-1}$ se puede utilizar la Ecuación 65:

$$K_{c\text{ fin}} = K_{c\text{ fin (Cua)}} + [0,04 (u_2 - 2) - 0,004 (HR_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (65)$$

donde

$K_{c\text{ fin (Cua)}}$	valor de $K_{c\text{ fin}}$ obtenido del Cuadro 12,
u_2	valor promedio de la velocidad diaria del viento a 2 m de altura sobre el pasto durante la etapa final de crecimiento [m s^{-1}], para $1\text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 6\text{ m s}^{-1}$,
HR_{min}	valor promedio de humedad relativa mínima diaria durante la etapa final [%], para $20\% \leq HR_{\text{min}} \leq 80\%$,
h	altura promedio de la planta durante la etapa final [m], para $0,1\text{ m} \leq h \leq 10\text{ m}$.

La Ecuación 65 es aplicable solamente en los casos donde los valores tabulados de $K_{c\text{ fin}}$ sean mayores a 0,45. Según esta ecuación, los valores de $K_{c\text{ fin}}$ disminuyen cuando el valor de HR_{min} aumenta. Esta reducción del valor de $K_{c\text{ fin}}$ es característica de cultivos que son cosechados «verdes» o antes de morir y secarse por completo (ósea, $K_{c\text{ fin}} \geq 0,45$).

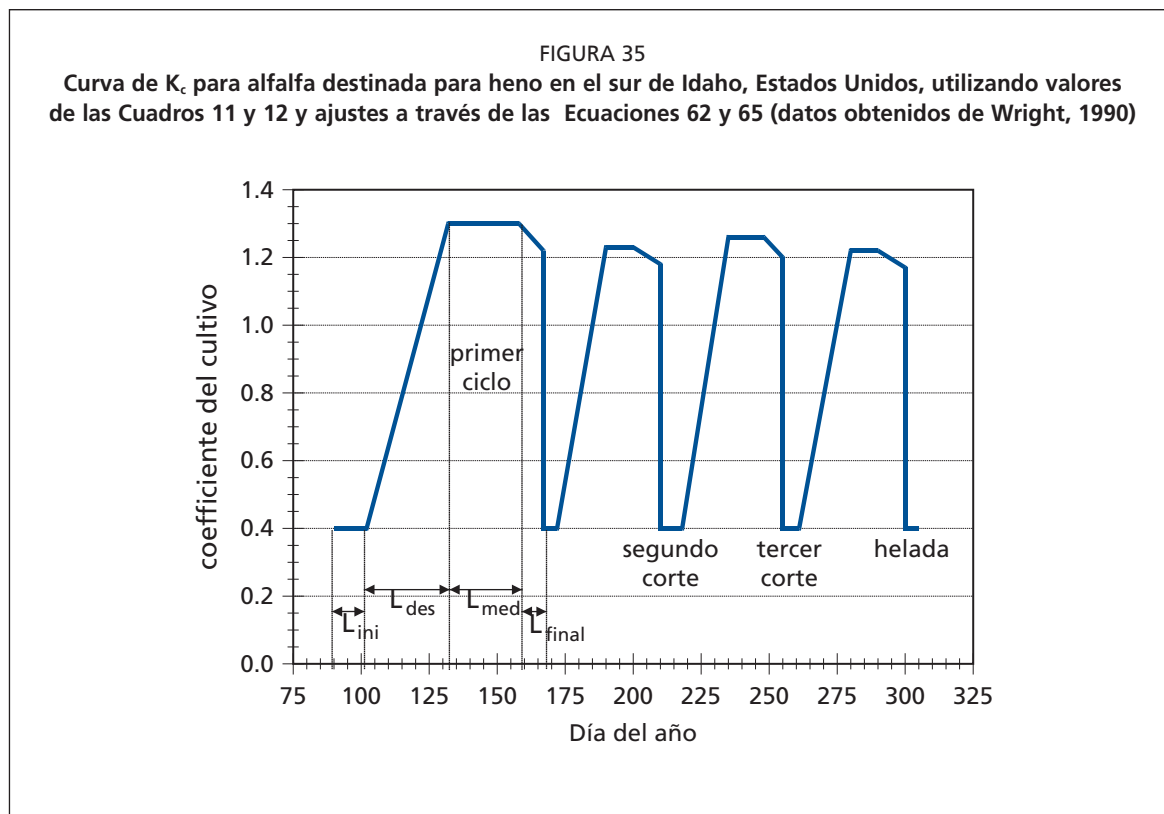
No se necesitan ajustes para los casos donde $K_{c\text{ fin (Cua)}} < 0,45$ (ósea, se toma $K_{c\text{ fin}} = K_{c\text{ fin (Cua)}}$). En los casos donde los cultivos se dejan entrar en senescencia y secar en el campo (como se evidencia cuando $K_{c\text{ fin}} < 0,45$), los valores de u_2 y HR_{min} tendrán un efecto menor en $K_{c\text{ fin}}$ por lo que no se requerirá de ajustes. En realidad $K_{c\text{ fin}}$ podría disminuir a medida que HR_{min} disminuye para cultivos que se encuentran maduros y secos para el momento de la cosecha, debido a que la menor humedad relativa acelera el proceso de secado.

ELABORACIÓN DE LA CURVA DE K_c

Cultivos anuales

Solamente se requiere de tres valores de K_c para la descripción y elaboración de la curva del K_c . Esta curva, tal como se muestra en la Figura 34, se construye a través de los pasos siguientes:

1. Dividir el período de crecimiento en las cuatro etapas generales que describen la fenología o desarrollo del cultivo (inicial, desarrollo del cultivo, mediados de temporada y final); determinar las duraciones de las cuatro etapas de crecimiento e identificar los tres valores de K_c que corresponden a $K_{c\text{ ini}}$, $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$ a partir del Cuadro 12.
2. Ajustar los valores de K_c según la frecuencia del humedecimiento o las condiciones climáticas de las etapas de crecimiento, tal como se explicó en la sección anterior.
3. Construir una curva uniendo segmentos de línea recta a través de cada una de las etapas de crecimiento. Se deberán trazar líneas horizontales a través de $K_{c\text{ ini}}$ en la etapa inicial y a través de $K_{c\text{ med}}$ en la etapa de mediados de temporada. Se deberán trazar líneas diagonales desde $K_{c\text{ ini}}$ hasta $K_{c\text{ med}}$ durante la etapa de desarrollo del cultivo y desde $K_{c\text{ med}}$ hasta $K_{c\text{ fin}}$ durante la etapa final.



Curva de K_c para cultivos forrajeros

Muchos cultivos que son utilizados para forraje o heno son cosechados en varias ocasiones durante la temporada de crecimiento. En esencia cada cosecha finaliza una «sub» temporada de crecimiento y por ende una curva de K_c asociada a la misma. La curva de K_c resultante para la temporada será compuesta por una serie de curvas de K_c asociadas con cada sub-ciclo. En la Figura 35 se presenta una curva de K_c para la totalidad de la temporada de crecimiento, construida para un cultivo de alfalfa destinada a la producción de heno en el sur de Idaho.

En el clima del sur de Idaho, la aparición de las hojas ocurre en la primavera alrededor del día 90 del año. El cultivo se cosecha (corta) generalmente para la producción de heno tres o cuatro veces durante la temporada de crecimiento. Por lo tanto en la Figura 35 se muestran cuatro cortes o sub-ciclos de K_c : el sub-ciclo 1 que empieza con la aparición de la primera cubierta verde en la primavera y tres sub-ciclos adicionales que siguen a cada corte. El ciclo de corte 1 es de mayor duración que los ciclos 2, 3 y 4 debido a las menores temperaturas del aire y del suelo durante este período, las cuales reducen la tasa de crecimiento. La duración del ciclo de corte 1 se definió utilizando el primer valor correspondiente a la alfalfa («1^{er} ciclo de corte») en el Cuadro 11 para Idaho, Estados Unidos (10/30/25/10). Las duraciones de los ciclos de corte 2, 3 y 4 fueron tomadas de los valores para alfalfa presentados en el Cuadro 11, correspondientes a «ciclos individuales de corte» para Idaho, Estados Unidos (5/20/10/10). Estas duraciones están basadas en observaciones de campo. En el clima del sur de Idaho, la presencia de heladas determina el final de la temporada productiva en algún momento del Otoño, generalmente alrededor de los días 280-290 del año (comienzo o mitad de Octubre).

La magnitud del valor de K_c durante la etapa de mediados de temporada de cada ciclo de corte mostrado en la Figura 35, varía de ciclo a ciclo debido al efecto del ajuste de los valores de K_{c_med} y K_{c_fin} para cada ciclo de corte, utilizando las ecuaciones 62 y 65. Para la aplicación de las dos ecuaciones de ajuste mencionadas, los valores de u_2

y HR_{\min} fueron promediados para la etapa de mediados de temporada y la etapa final dentro de cada ciclo de corte. Curvas del coeficiente basal del cultivo K_{cb} similares a la mostrada en la Figura 35 pueden ser elaboradas para cultivos forrajeros o destinados a la producción de heno, siguiendo los procedimientos presentados en el Capítulo 7.

Valor de $K_{c\ med}$ cuando se promedian los efectos de períodos individuales de corte

En ciertas situaciones el usuario puede preferir promediar los efectos de los cortes de un cultivo forrajero a lo largo de la temporada productiva. Cuando se promedia el efecto de los cortes, se requerirá de un valor único de $K_{c\ med}$ y se elaborará una curva única de K_c para toda la temporada productiva. En este caso, una curva «normal» de K_c se elabora tal como se muestra en la Figura 25, donde solamente un período intermedio se presenta para el cultivo forrajero.

El valor de $K_{c\ med}$ para este período intermedio total deberá promediar los efectos de los varios cortes y cosechas. Por lo tanto, el valor utilizado de $K_{c\ med}$ representa un promedio de la curva de K_c para el lapso de tiempo que comienza con la primera obtención de la completa cobertura y que termina con la última etapa final cerca del período de letargo o heladas. El valor de $K_{c\ med}$ bajo estas condiciones promedios podría representar solamente un 80% del valor de K_c para condiciones de cobertura completa. Estos valores promedios de $K_{c\ med}$, correspondientes a la temporada completa, están presentados en el Cuadro 12. Por ejemplo, para el caso de alfalfa para heno, el valor promedio de $K_{c\ med}$ para la temporada completa es de 1,05, mientras el valor de $K_{c\ med}$ que corresponde a un período individual de corte es de 1,20.

Árboles frutales

Los valores del coeficiente del cultivo para las etapas de mediados y final de temporada se incluyen en el Cuadro 12. Como se mencionó anteriormente, los valores de K_c tabulados son valores típicos correspondientes a condiciones climáticas estándar, por lo que necesitan ser ajustados a través de la Ecuaciones 62 y 65 en los casos donde sean distintos los valores de HR_{\min} o u_2 . Debido a que en el caso de los árboles de hoja caduca las etapas de mediados de temporada y final son relativamente largas, el ajuste específico de K_c según los valores de HR_{\min} y u_2 deberá tomar en consideración la variación de las condiciones climáticas durante la temporada productiva. Por lo tanto, con frecuencia se requieren de diversos ajustes del valor de K_c en los casos donde las etapas de mediados de temporada y final se produzcan durante diferentes estaciones climáticas, por ejemplo primavera, verano y otoño; o temporadas secas y lluviosas. Generalmente no serán distintos los valores de $K_{c\ ini}$ y $K_{c\ fin}$ para el caso de árboles de hojas siempre verdes y sin período de letargo, cuando las condiciones climáticas no varíen significativamente, como ocurre en los climas tropicales. Bajo esas condiciones, el ajuste temporal por clima podría ser innecesario debido a que las variaciones en ET_c dependen principalmente de las variaciones en ET_o .

CÁLCULO DE LA ET_c

A partir de la curva del coeficiente del cultivo se puede determinar el valor de K_c para cualquier período en forma gráfica o numérica. Una vez determinados los valores de K_c , la evapotranspiración del cultivo ET_c puede ser calculada multiplicando los valores de K_c por los valores correspondientes de ET_o .

Determinación gráfica del valor de K_c

Valores semanales, de diez días, o mensuales de K_c son necesarios cuando los cálculos de ET_c son realizados para intervalos de tiempo semanales, de diez días, o mensuales. Un procedimiento general consiste en construir la curva de K_c , superponer a ella las duraciones de las semanas, períodos de diez días o meses, y determinar gráficamente a partir de la curva de K_c el valor de K_c correspondiente al período considerado

RECUADRO 15

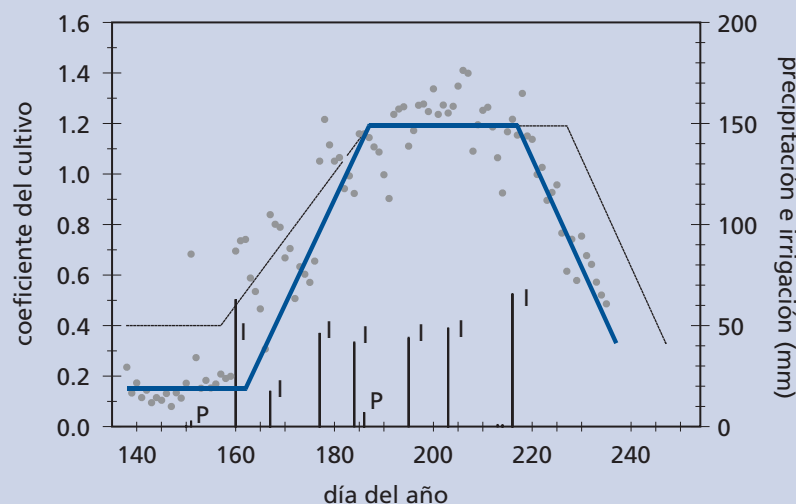
Caso de estudio: cultivo de frijol (Judia) seco en Kimberly, Idaho, Estados Unidos (coeficiente único del cultivo)

Se presenta aquí un ejemplo de la aplicación del procedimiento del K_c bajo condiciones promedias de humedad en el suelo para un cultivo de frijol seco (judía seca) plantado el 23 de Mayo de 1974 en Kimberly, Idaho, Estados Unidos (latitud = 42,4°N). Las duraciones de las etapas inicial, de desarrollo, de mediados de temporada y final, fueron determinadas a partir del Cuadro 11, considerando un clima continental, como de 20, 30, 40 y 20 días respectivamente (las duraciones tabuladas para el Sur de Idaho no fueron usadas en este ejemplo con el fin de demostrar la relativa validez de los valores incluidos en el Cuadro 11, para los casos donde no se disponga de información específica de la localidad). Los valores de $K_{c\text{ ini}}$, $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$ seleccionados inicialmente del Cuadro 11 son 0,4, 1,15 y 0,35 respectivamente.

Los valores de HR_{min} y u_2 durante las etapas de mediados de temporada y final, fueron de 30 % y $2,2 \text{ m s}^{-1}$. La máxima altura del cultivo sugerida en el Cuadro 12 para el fríjol seco es de 0,4 m. Por lo tanto se ajusta el valor de $K_{c\text{ med}}$, utilizando la Ec. 62, como:

$$K_{c\text{ med}} = 1,15 + [0,04(2,2-2) - 0,004(30-45)] \left(\frac{0,4}{3} \right)^{0,3} = 1,19$$

Como el valor de $K_{c\text{ fin}} = 0,35$ es menor a 0,45, no se requieren ajustes al valor de $K_{c\text{ fin}}$. El valor de $K_{c\text{ med}}$ no es significativamente diferente al valor presentado en el Cuadro 12, debido a que el valor de $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$, el valor de HR_{min} es solamente 15% menor que el de 45% considerado en el Cuadro 12 y la altura de los frijoles es relativamente pequeña. La curva inicial de K_c para el cultivo de frijoles secos en Idaho puede ser elaborada, para propósitos de planificación inicial, tal como se muestra en el grafico (línea punteada), donde los valores de $K_{c\text{ ini}}$, $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$ son de 0,4, 1,19, y 0,35 y las cuatro duraciones de las etapas de desarrollo son 20, 30, 40 y 20 días. Nótese que el valor de $K_{c\text{ ini}} = 0,4$ tomado del Cuadro 12 sirve solamente como un valor inicial, aproximado de $K_{c\text{ ini}}$.



Curvas de K_c elaboradas utilizando directamente los valores incluidos en los Cuadros 11 y 12 (línea punteada) y modificados utilizando valores de $K_{c\text{ ini}}$ de la Fig. 29 y $L_{\text{ini}} = 25$, $L_{\text{des}} = 25$, $L_{\text{med}} = 30$, y $L_{\text{fin}} = 20$ días (línea gruesa) para frijoles secos en Kimberly, Idaho. También se muestran valores diarios medidos de K_c (datos de lisímetros obtenidos de Wright, 1990).

El valor de $K_{c\text{ini}}$ puede ser estimado con una mayor exactitud utilizando el procedimiento descrito en este capítulo. El valor promedio de ET_o durante la etapa inicial en Kimberly (final de Mayo – comienzos de Junio, 1974) fue de $5,3 \text{ mm día}^{-1}$ y el intervalo de humedecimiento durante este período fue de aproximadamente 14 días (ocurrieron 2 eventos de lluvia que promediaron 5 mm por evento). Debido a que los eventos de lluvia fueron ligeros ($< 10 \text{ mm}$ cada uno), se utiliza la Fig. 29. La textura del suelo en Kimberly, Idaho es franco limosa. A partir de la Fig. 29, el valor de $K_{c\text{ini}}$ para un intervalo de humedecimiento de 14 días y un valor de $ET_o = 5,3 \text{ mm día}^{-1}$ es de 0,15 aproximadamente. Este valor es significativamente menor que el valor general de 0,4 sugerido en el Cuadro 12, lo cual enfatiza la necesidad de utilizar valores reales de precipitación y riego de la localidad para la determinación del valor de $K_{c\text{ini}}$.

Comparación entre las curvas elaboradas y las mediciones

Debido a que los datos de ET_c para el cultivo de frijol seco en Kimberly, Idaho, fueron medidos a través de un sistema de lisímetro de precisión durante 1974 por Wright (1990), los valores reales de K_c pueden ser comparados con las curvas elaboradas de K_c , donde los valores reales de K_c fueron calculados dividiendo las mediciones diarias de ET_c , obtenidas con el lisímetro, entre los valores diarios de ET_o estimados a través de la ecuación de FAO Penman-Monteith.

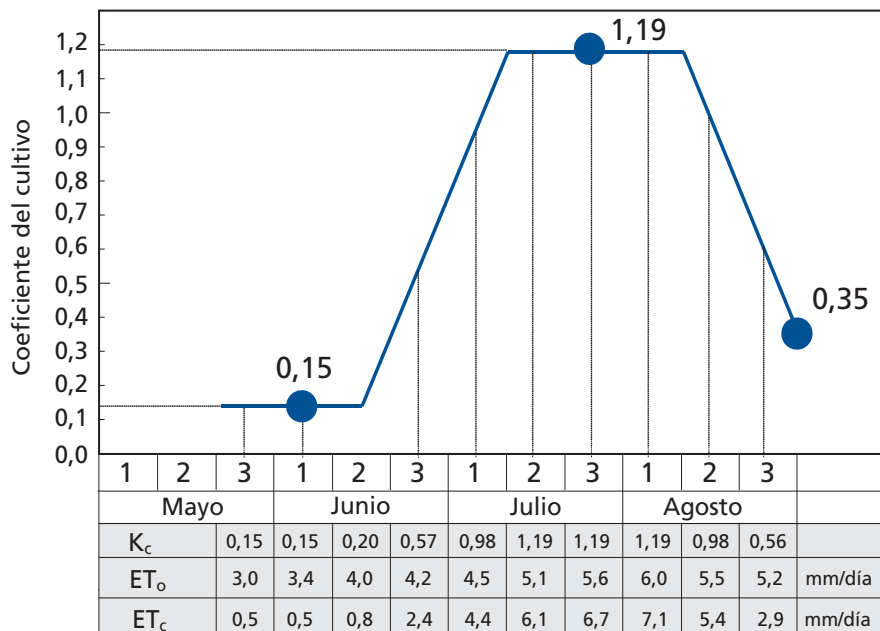
Tal como se ilustra en el gráfico, la duración de la etapa de mediados de temporada, tomada del Cuadro 11 considerando un clima continental general, sobreestima la duración real de la etapa de mediados de temporada para el cultivo de frijol seco (judía seca) en el sur de Idaho, la cual es en promedio de sólo 30 días en vez de los 40 días sugeridos en el Cuadro 11. Esto ilustra la importancia de utilizar la observación local de 30 días para la etapa de mediados de temporada en lugar del valor general incluido en el Cuadro 11.

La curva final y que representa la mejor estimación de K_c para el frijol seco en el sur de Idaho fue elaborada (curva inferior del gráfico) utilizando los valores de K_c de 0,15, 1,19, y 0,35, así como las duraciones reales observadas de las etapas de crecimiento de 25, 25, 30 y 20 días. Nótese el impacto que el error en la estimación de la duración de la etapa de mediados de temporada tiene en el área bajo la curva de K_c . Esto señala la necesidad de obtener observaciones locales de las fechas y duraciones de las etapas de crecimiento.

El valor calculado de $K_{c\text{med}}$ (1,19) parece haber subestimado el valor medido de K_c durante ciertas partes de la etapa de mediados de temporada en Kimberly. Una de las razones para esto es el efecto del incremento de la evaporación del agua en suelo, después de los cuatro eventos de riego ocurridos durante la etapa de mediados de temporada de 1974, lo cual incrementó el valor efectivo de K_c . Esto se ilustra en el Recuadro 16, donde se presenta y demuestra el enfoque del $K_{cb} + K_e$ para este mismo ejemplo.

El valor de 0,15 calculado para $K_{c\text{ini}}$ utilizando la Fig. 29, concuerda considerablemente con el valor de K_c medido durante la etapa inicial. Los valores medidos de K_c durante la etapa de desarrollo superan la curva final de K_c durante los días en que ocurrieron, o siguen a eventos de humedecimiento. La variación día a día de los valores de K_c medidos es normal, producto de la variación día a día del tiempo atmosférico, de la dirección del viento, en errores en la predicción de R_n y ET_o , así como debido a algunos errores aleatorios en las mediciones del lisímetro o mediciones del tiempo atmosférico.

FIGURA 36
Curva de K_c y valores decadiarios de K_c y ET_c derivados del gráfico, para el cultivo de frijol (judías) seco del ejemplo (Recuadro 15)



(Figura 36). El asumir que todas las décadas tienen una duración de 10 días facilita la determinación de K_c e introduce poco error dentro del cálculo de ET_c .

La curva de K_c incluida en el Recuadro 15 fue utilizada en la construcción de la curva mostrada en la Figura 36. Esta curva ha sido superpuesta a las duraciones de cada década. Se utilizaron los valores de K_c de 0,15, 1,19 y 0,35 y las duraciones reales de las etapas de desarrollo iguales a 25, 25, 30 y 20. El cultivo fue plantado al comienzo de la última década de Mayo y fue cosechado 100 días después, al final de Agosto.

Para todas las décadas, los valores de K_c pueden ser determinados directamente de la curva. El valor correspondiente a la mitad de una década representa el valor promedio de K_c para ese período de 10 días. Solamente la segunda década del mes de Junio, donde el valor de K_c cambia abruptamente, requiere cálculos adicionales. Durante los primeros cinco días de esa década, $K_c = 0,15$, mientras durante la segunda parte de la década K_c oscila entre 0,15 y 0,36 al final del día 10. Por lo tanto, el valor de K_c para esa década es de: $5/10 (0,15) + 5/10 (0,15+0,36)/2 = 0,20$.

Determinación numérica del valor de K_c

Se puede determinar el valor del coeficiente K_c , para un período determinado de la temporada de crecimiento, considerando que el valor de K_c durante la etapa inicial y la etapa de mediados de temporada es constante e igual al valor de K_c durante la etapa considerada. Durante las etapas de desarrollo y final, el valor de K_c varía en forma lineal entre el valor de K_c correspondiente a la etapa previa ($K_{c_{prev}}$) y el valor de K_c al comienzo de la próxima etapa ($K_{c_{prox}}$), el cual corresponde al $K_{c_{fin}}$ en el caso de la etapa final:

$$K_{c_i} = K_{c_{prev}} + \left[\frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{etapa}} \right] (K_{c_{prox}} - K_{c_{prev}}) \quad (66)$$

EJEMPLO 28

Determinación numérica de K_c

Determine el valor de K_c para los días 20, 40, 70 y 95 para el cultivo de frijol seco (judía seca)(Figura 36).

Etapa de desarrollo del cultivo		Duración (días)	K_c	
inicial		25	$K_{c\ ini} = 0,15$	
desarrollo del cultivo		25	0,15 ... 1,19	
mediados de temporada		30	$K_{c\ med} = 1,19$	
final de temporada		20	1,19 .. $K_{c\ fin} = 0,35$	
para $i = 20$:	Etapa inicial, $K_c = K_{c\ ini} =$		0,15	-
para $i = 40$	Etapa de desarrollo del cultivo,			
para:	$\Sigma(L_{prev}) = L_{ini} =$		25	días
y:	$L_{etapa} = L_{des} =$		25	días
de la Ec. 66:	$K_c = 0,15 + [(40-25)/25](1,19-0,15) =$		0,77	-
para $i = 70$:	Etapa de mediados de temporada, $K_c = K_{c\ med} =$		1,19	-
para $i = 95$	Etapa final,			
para:	$\Sigma(L_{prev}) = L_{ini} + L_{des} + L_{med} = (25+25+30) =$		80	días
y:	$L_{etapa} = L_{final} =$		20	días
de la Ec. 66:	$K_c = 1,19 + [(95-80)/20](0,35-1,19) =$		0,56	-

Los valores de K_c para los días 20, 40, 70 y 95 para el cultivo de frijol seco son de 0,15, 0,77, 1,19 y 0,56 respectivamente.

donde

- i número del día dentro de la temporada de crecimiento [1 .. duración de la temporada de crecimiento],
- $K_{c\ i}$ coeficiente del cultivo para el día i ,
- L_{etapa} duración de la etapa considerada [días],
- $\Sigma(L_{prev})$ suma de las duraciones de las etapas previas [días].

La Ecuación 66 es aplicable para cada una de las etapas de desarrollo.

COEFICIENTES DEL CULTIVO BASADOS EN LA ALFALFA COMO REFERENCIA

Debido a que se usan dos cultivos de referencia (pasto y alfalfa) en el mundo, se han desarrollado dos familias de curvas de K_c para los cultivos agrícolas. Estas son las curvas de K_c basadas en la alfalfa, desarrolladas por Wright (1981; 1982) y las basadas en el pasto desarrolladas por Pruitt (Doorenbos y Pruitt 1977; Jensen *et al.* 1990), así como las reportadas en este trabajo. El usuario deberá tomar precauciones para no mezclar valores de K_c basados en pasto con valores de ET para la alfalfa de referencia y viceversa. Generalmente, un valor de K_c basado en la alfalfa de referencia puede ser «transformado» para ser utilizado con pasto de referencia, multiplicando el mismo por un factor que varía entre 1,0 y 1,3, el cual depende del clima (1,05 para condiciones húmedas y de vientos ligeros, 1,2 para condiciones semi-áridas y de vientos moderados, y 1,35 para condiciones áridas y de vientos fuertes):

$$K_{c\ (pasto)} = K_{factor} K_{c\ (alfalfa)} \tag{67}$$

donde

- $K_{c\ (pasto)}$ K_c basado en el pasto de referencia (usado en este manual),
- $K_{c\ (alfalfa)}$ K_c basado en la alfalfa como referencia
- K_{factor} factor de conversión (1,0 ... 1,3).

Un factor de conversión del cultivo de referencia puede ser establecido para cualquier tipo de clima usando el valor de $K_{c\ med} = 1,20$ indicado para la alfalfa en el Cuadro 12

y luego ajustando por el clima a través de la Ecuación 62. Por ejemplo, en Kimberly, Idaho, Estados Unidos, donde para los meses de verano se presentan valores promedio de $HR_{\min} = 30\%$ y $u_2 = 2,2 \text{ m s}^{-1}$, un radio de conversión de referencia entre la alfalfa y el pasto, utilizando la Ecuación 62, es de aproximadamente:

$$K_{\text{factor}} = 1,2 + [0,04 (2,2 - 2) - 0,004 (30 - 45)] \left(\frac{0,5}{3} \right)^{0,3} = 1,24 \quad (68)$$

donde

$h = 0,5 \text{ m}$ es la altura estándar de la alfalfa de referencia.

EXTRAPOLACIÓN DE VALORES PREVIOS DE K_c

Los valores de $K_{c \text{ med}}$ y $K_{c \text{ fin}}$ presentados en el Cuadro 12 están basados en su mayoría en los valores originales presentados en las publicaciones de la serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 24 y 33 (FAO-24 y FAO-33), con algunos ajustes y revisiones para reflejar descubrimientos recientes. Ajustes similares en el valor de $K_{c \text{ med}}$ para compensar las diferencias en rugosidad aerodinámica y área foliar, tal como se considera con la Ecuación 62, son derivados de los valores de K_c asociados a distintas condiciones de viento y HR_{\min} (en el cuadro correspondiente de la FAO-24), con algunos ajustes para reflejar mejor el incremento de los valores de ET del cultivo bajo condiciones de vientos fuertes y baja HR_{\min} , cuando estos se aplican utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith.

Los valores de K_c indicados en la publicación FAO-24 fueron basados principalmente en un cultivo vivo de pasto de referencia. La ecuación de FAO Penman-Monteith que se presenta en esta publicación considera esencialmente el mismo pasto de referencia. Por esta razón los valores de K_c reportados en las dos publicaciones son en general bastante parecidos, exceptuando las situaciones de vientos fuertes y baja HR_{\min} .

Se ha encontrado que la ecuación modificada de Penman, presentada en la publicación de la FAO-24, sobreestima frecuentemente los valores de ET_0 hasta en un 25% bajo condiciones de vientos fuertes y condiciones de baja evaporación, además de requerir calibración local (ver Capítulo 2). Por lo tanto no se pueden utilizar los valores de K_c obtenidos de estudios de uso de agua de los cultivos que utilizan la ecuación modificada de Penman de la FAO-24, necesitando ser ajustados utilizando valores de ET_0 estimados a través de la ecuación de FAO Penman-Monteith. De la misma forma, las estimaciones de las demandas de agua de los cultivos realizadas a través de la ecuación modificada de Penman de la FAO-24 necesitan ser recalculadas debido a las marcadas diferencias entre la ecuación de la FAO-24 Penman y la ecuación de la FAO Penman-Monteith.

Capítulo 7

ET_c – coeficiente dual del cultivo (K_c = K_{cb} + K_e)

Al igual que el Capítulo 6, este capítulo trata sobre el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) bajo condiciones estándar, es decir cuando no existen limitaciones al crecimiento del cultivo o la evapotranspiración. En este capítulo se presenta el procedimiento a seguir para predecir los efectos generados por los eventos individuales de humedecimiento del suelo en el valor del coeficiente del cultivo K_c. La solución consiste en dividir K_c en dos coeficientes: uno para la transpiración del cultivo, denominado coeficiente basal del cultivo (K_{cb}), y otro para la evaporación del suelo (K_e):

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o \quad (69)$$

El procedimiento del coeficiente dual del cultivo es más complicado y requiere de más cálculos que el procedimiento del coeficiente único del cultivo (K_c), desarrollado en el Capítulo 6. El procedimiento se aplica con datos diarios y es particularmente adecuado para el cálculo mediante el uso de computadoras. Se recomienda el uso de este procedimiento cuando se requieran estimaciones más precisas del valor de K_c, por ejemplo cuando se determina el calendario de riego diario de campos individuales.

El procedimiento de cálculo de la evapotranspiración del cultivo, ET_c, consiste en:

1. identificar las duraciones de las etapas de desarrollo del cultivo y seleccionar los valores de K_{cb} correspondientes;
2. ajustar los valores de los coeficientes K_{cb} seleccionados de acuerdo a las condiciones climáticas en cada etapa;
3. construir la curva del coeficiente basal del cultivo (lo que permite determinar los valores de K_{cb} para cualquier período durante la temporada de crecimiento);
4. determinar los valores diarios de K_e para la evaporación en la superficie del suelo; y
5. calcular ET_c como el producto de ET_o y (K_{cb} + K_e).

COMPONENTE DE LA TRANSPIRACION (K_{CB} ET_O)

Coeficiente Basal del Cultivo (K_{cb})

El coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) se define como la relación entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia (ET_c/ET_o) cuando la superficie del suelo se encuentra seca pero la transpiración mantiene su tasa potencial, es decir donde la transpiración no está limitada por la ausencia del agua (Figura 22). Por lo tanto, «K_{cb} E_{to}» representa esencialmente el componente de la transpiración en el valor de ET_c. El término K_{cb} ET_o incluye además la evaporación residual producida por la difusión del agua del suelo que se encuentra por debajo de la superficie seca del terreno.

Debido a que el valor de K_c del Capítulo 6 incluye los efectos de la evaporación de la superficie del suelo, el valor de K_{cb} será menor al valor de K_c, tal como se ilustra en la Figura 26, por lo que se requiere de un cuadro diferente con los valores de K_{cb}. En el Cuadro 17 se presentan los valores recomendados de K_{cb} para los mismos cultivos incluidos en el Cuadro 12. Al igual que en el Cuadro 12, los valores tabulados de K_{cb} representan valores de K_{cb} asociados a climas sub-húmedos y velocidades de viento moderadas. En climas

donde se requieran ajustes, es decir donde el valor de HR_{\min} sea diferente a 45% o donde la velocidad del viento sea mayor o menor 2 m/s los valores de $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$ que sean mayores a 0,45 deberán ajustarse utilizando la siguiente Ecuación:

$$K_{cb} = K_{cb\ (Tab)} + \left[0,04 (u_2 - 2) - 0,004 (HR_{\min} - 45) \right] \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \quad (70)$$

donde

- $K_{cb\ (Tab)}$ valor de $K_{cb\ med}$ o $K_{cb\ fin}$ (si es $\geq 0,45$) tomado del Cuadro 17,
- u_2 valor promedio de la velocidad del viento diaria a 2 m de altura sobre el pasto durante las etapas de mediados o final de temporada [$m\ s^{-1}$], para $1\ m\ s^{-1} \leq u_2 \leq 6\ m\ s^{-1}$,
- HR_{\min} valor promedio de la humedad relativa mínima diaria durante las etapas de mediados o final de la temporada [%], para $20\% \leq HR_{\min} \leq 80\%$,
- h altura promedio de las plantas durante las etapas de mediados o final de temporada [m] (del Cuadro 12), para $20\% \leq HR_{\min} \leq 80\%$.

Para una discusión detallada del impacto de esta corrección climática, así como de la determinación numérica de $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$, se recomienda al usuario revisar los comentarios sobre $K_{c\ med}$ y $K_{c\ fin}$ incluidos en el Capítulo 6.

En el Cuadro 18 se sintetizan los criterios generales que fueron considerados para derivar los valores de K_{cb} a partir de los valores de K_c incluidos en el Cuadro 17. En los casos donde exista información proveniente de investigaciones locales, los valores de K_{cb} presentados en el Cuadro 17 pueden ser modificados para reflejar los efectos que las condiciones locales, prácticas culturales o variedades del cultivo tienen sobre el valor de K_{cb} . Sin embargo, se espera que los valores locales de K_{cb} no difieran en más de 0,2 con respecto a los valores del Cuadro 17. La presencia de una diferencia mayor a 0,2 podría tomarse como un indicativo de la necesidad de investigar o evaluar la técnica de investigación aplicada en la localidad, el equipo utilizado y las prácticas culturales. Cuando se utilicen valores locales de K_{cb} no se requerirá del ajuste climático que se realiza utilizando la Ecuación 70.

EJEMPLO 29

Selección y ajuste del coeficiente basal del cultivo, K_{cb}

Seleccionar los valores de $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$ para el cultivo de frijoles (judías) secos del Recuadro 15.

Los valores de $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$ pueden ser seleccionados directamente del Cuadro 17 para el cultivo de frijol (judías) seco como 0,15, 1,10 y 0,25. Realizando el ajuste climático a través de la Ec. 70:

$$K_{cb\ ini} = 0,15$$

$$K_{cb\ med} = 1,10 + (0,04 (2,2-2) - 0,004 (30-45)) (0,4/3)^{0,3} = 1,14$$

$$K_{cb\ fin} = 0,25 \quad (\text{como } K_{cb} < 0,45)$$

La altura de los frijoles (judías) fue tomada del Cuadro 12 e igual a 0,4 m.

La curva correspondiente de K_{cb} se presenta en la Figura 37.

CUADRO 17

Coeficiente basal del cultivo K_{cb} para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ($HR_{min} \approx 45\%$, $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$) para ser usados con la E_c FAO Penman-Monteith ET_o .

Cultivo	$K_{cb \text{ ini}}^1$	$K_{cb \text{ med}}^1$	$K_{cb \text{ fin}}^1$
a. Hortalizas Pequeñas	0,15	0,95	0,85
Brócoli		0,95	0,85
Col de Bruselas		0,95	0,85
Repollo		0,95	0,85
Zanahoria		0,95	0,85
Coliflor		0,95	0,85
Apio (Céleri)		0,95	0,90
Ajo		0,90	0,60
Lechuga		0,90	0,90
Cebolla - seca		0,95	0,65
- verde		0,90	0,90
- semilla		1,05	0,70
Espinaca		0,90	0,85
Rábano		0,85	0,75
b. Hortalizas – Familia de la Solanáceas	0,15	1,10	0,70
Berenjena		1,00	0,80
Pimiento Dulce (campana)		1,00 ²	0,80
Tomate		1,10 ²	0,60-0,80
c. Hortalizas – Familia de las Cucurbitáceas	0,15	0,95	0,70
Melón		0,75	0,50
Pepino – Cosechado Fresco		0,95 ²	0,70
– Cosechado a Máquina		0,95	0,80
Calabaza de Invierno		0,95	0,70
Calabacín (zucchini)		0,90	0,70
Melón dulce		1,00	0,70
Sandia		0,95	0,70
d. Raíces y Tubérculos	0,15	1,00	0,85
Remolacha, mesa		0,95	0,85
Yuca o Mandioca – año 1		0,70 ³	0,20
– año 2		1,00	0,45
Chirivía		0,95	0,85
Papa o patata		1,10	0,65 ⁴
Camote o Batata		1,10	0,55
Nabos (Rutabaga)		1,00	0,85
Remolacha Azucarera		1,15	0,50 ⁵

¹ Estos son valores de K_{cb} que representan condiciones estándar con una superficie seca del suelo. Estos valores deberán ser utilizados únicamente para la metodología del coeficiente dual $K_{cb} + K_e$. Los valores de la altura máxima del cultivo, para el ajuste climático de K_{cb} , están incluidos en el Cuadro 12.

² En algunas oportunidades, los frijoles (judías), guisantes, leguminosas, tomates, pimientos y pepinos se cultivan utilizando empalizadas que alcanzan los 1,5 a 2 metros de altura. En estos casos es necesario incrementar los valores de K_{cb} . Para frijoles (judías) verdes, pimentones y pepinos se puede asumir un valor de 1,10 y en el caso de los tomates, frijoles (judías) secos y los guisantes, de 1,15. Bajo esas condiciones también debe aumentarse el valor de h.

³ Los valores correspondientes a la etapa de mediados de temporada para la mandioca, asumen condiciones de no-estrés durante o después de la temporada lluviosa. Los valores de $K_{cb \text{ fin}}$ toman en cuenta la dormancia (letargo) durante la estación seca.

⁴ El valor de $K_{cb \text{ fin}}$ para las papas (patatas) es de alrededor 0,35 para papas (patatas) de ciclo largo con rotura de los estolones.

⁵ El valor de $K_{cb \text{ fin}}$ corresponde a condiciones sin riego durante el último mes de la temporada productiva. El valor de $K_{cb \text{ fin}}$ para al remolacha azucarera será mayor, hasta 0,9, cuando ocurra riego o lluvias significativas durante el último mes.

CUADRO 17 (continuación)

Cultivo	$K_{cb\ ini}^1$	$K_{cb\ med}^1$	$K_{cb\ fin}^1$
e. Leguminosas (Leguminosae)	0,15	1,10	0,50
Frijoles o judías verdes		1,00 ²	0,80
Frijoles o judías, secos y frescos		1,10 ²	0,25
Garbanzo (Chick Pea)		0,95	0,25
Habas – Frescas		1,10 ²	1,05
– Seco/Semilla		1,10 ²	0,20
Garbanzo		1,05	0,25
Caupís (cowpeas)		1,00	0,55-0,25 ⁶
Maní o cacahuete		1,10	0,50
Lentejas		1,05	0,20
Guisantes – Frescos		1,10 ²	1,05
– Secos/Semilla		1,10	0,20
Soya o soja		1,10	0,30
f. Hortalizas perennes (con letargo invernal y suelo inicialmente desnudo o con mantillo)			
Alcachofa	0,15	0,95	0,90
Espárragos	0,15	0,90 ⁷	0,20
Menta	0,40	1,10	1,05
Fresas	0,30	0,80	0,70
g. Cultivos Textiles	0,15		
Algodón		1,10-1,15	0,50-0,40
Lino		1,05	0,20
Sisal ⁸		0,4-0,7	0,4-0,7
h. Cultivos Oleaginosos	0,15	1,10	0,25
Ricino		1,10	0,45
Canola (colza)		0,95-1,10 ⁹	0,25
Cártamo		0,95-1,10 ⁹	0,20
Sésamo (ajonjolí)		1,05	0,20
Girasol		0,95-1,10 ⁹	0,25
i. Cereales	0,15	1,10	0,25
Cebada		1,10	0,15
Avena		1,10	0,15
Trigo de Primavera		1,10	0,15-0,3 ¹⁰
Trigo de Invierno	0,15-0,5 ¹¹	1,10	0,15-0,3 ¹⁰
Maíz – grano	0,15	1,15	0,50, 0,15 ¹²
– dulce		1,10	1,00 ¹³
Mijo		0,95	0,20
Sorgo – grano		0,95-1,05	0,35
– dulce		1,15	1,00
Arroz	1,00	1,15	0,70-0,45

⁶ EL primer valor de $K_{cb\ fin}$ es para cuando se cosecha fresco. El segundo valor es para cuando es cosecha seco.

⁷ El valor de K_c para los espárragos permanece como $K_{cb\ ini}$ durante la cosecha de los vástagos, debido a las condiciones de poca cobertura vegetal. El valor de $K_{cb\ med}$ corresponde a después del re-crecimiento de la vegetación, después de terminada la cosecha de los vástagos.

⁸ El valor de K_{cb} para el sisal depende de la densidad de siembra y del manejo del agua (es decir del estrés hídrico intencional).

⁹ Los valores menores son para cultivos de secano con una menor densidad de población.

¹⁰ El valor mayor es para cultivos cosechados a mano.

¹¹ Los dos valores de $K_{cb\ ini}$ para el trigo de primavera corresponden a una cobertura del suelo menor al 10% y para durante el período de letargo invernal, si la vegetación cubre completamente el suelo pero el suelo no está congelado

¹² El primer valor de $K_{cb\ fin}$ es para cuando el cultivo se cosecha con gran humedad en el grano. El segundo valor de $K_{cb\ fin}$ es para cuando se cosecha después del secado completo del grano en el campo (hasta alrededor de 18% de humedad, basado en materia húmeda).

¹³ Si se cosecha en fresco para consumo humano. Usar el valor de $K_{cb\ fin}$ para maíz de campo si el maíz dulce se deja madurar y secar en el campo.

CUADRO 17 (continuación)

Cultivo	$K_{cb\ ini}^1$	$K_{cb\ med}^1$	$K_{cb\ fin}^1$
j. Forrajes			
Alfalfa (heno) – períodos individuales de corte	0,30 ¹⁴	1,15 ¹⁴	1,10 ¹⁴
– para semilla	0,30	0,45	0,45
Bermuda (heno) – efecto promedio de los cortes	0,50	0,95 ¹⁵	0,80
– cultivo para semilla (primavera)	0,15	0,85	0,60
Trébol (heno), Bersím – períodos individuales de corte	0,30 ¹⁴	1,10 ¹⁴	1,05 ¹⁴
Rye Grass (heno) – efecto promedio de los cortes	0,85	1,00 ¹⁵	0,95
Sudán heno (anual) – períodos individuales de corte	0,30 ¹⁴	1,10 ¹⁴	1,05 ¹⁴
Pastos de Pastoreo – Pastos de Rotación	0,30	0,80-1,00	0,80
– Pastoreo Extensivo	0,30	0,70	0,70
Césped (turfgrass) – época fría ¹⁶	0,85	0,90	0,90
– época caliente ¹⁶	0,75	0,80	0,80
k. Caña de Azúcar	0,15	1,20	0,70
l. Frutas Tropicales y Árboles			
Banana o plátano – 1 ^{er} año	0,15	1,05	0,90
– 2 ^{do} año	0,60	1,10	1,05
Cacao	0,90	1,00	1,00
Café – suelo sin cobertura	0,80	0,90	0,90
– con malezas	1,00	1,05	1,05
Palma Datilera	0,80	0,85	0,85
Palmas	0,85	0,90	0,90
Piña ¹⁷ – suelo sin cobertura	0,15	0,25	0,25
– con cobertura de gramíneas	0,30	0,45	0,45
Árbol de Caucho	0,85	0,90	0,90
Té – no sombreado	0,90	0,95	0,90
– sombreado ¹⁸	1,00	1,10	1,05
m. Uvas y Moras			
Moras (matorrales)	0,20	1,00	0,40
Uvas – de mesa o pasas	0,15	0,80	0,40
– vino	0,15	0,65	0,40
Lúpulo	0,15	1,00	0,80

¹⁴Estos valores del coeficiente K_{cb} para cultivos de heno corresponden a la situación inmediatamente después del corte; en cobertura completa; e inmediatamente antes del corte, respectivamente. La temporada de crecimiento se define como una serie de períodos individuales de corte.

¹⁵Estos valores de $K_{cb\ med}$ para los pastos bermuda y ryegrass destinados a heno son un promedio general considerando los valores de K_{cb} para antes y después de los cortes. Estos se aplican para el período que siguen al desarrollo inicial hasta el inicio de la etapa final de la temporada.

¹⁶Variedades de pastos de temporada fría incluyen los sitios cultivados densamente con bluegrass, ryegrass, y fescue. Variedades de temporada cálida incluyen pastos tipo bermuda y St. Agostine. El valor de 0,90 para el pasto de época fría corresponde a un 0,06 a 0,08 m de altura de corte, bajo condiciones normales de césped. Cuando se practica un manejo cuidadoso del agua y no se requiere de un crecimiento rápido, se puede reducir los valores de K_{cb} para césped en 0,10.

¹⁷La planta de piña posee una transpiración muy baja debido a que la misma cierra sus estomas durante el día y los abre durante la noche. Por lo tanto, la mayor parte de la ET_c en la piña esta constituida por la evaporación que ocurre en el suelo.

¹⁸Incluye el requerimiento de agua de los árboles bajo sombra.

CUADRO 17 (continuación)

Cultivo	$K_{cb\ ini}^1$	$K_{cb\ med}^1$	$K_{cb\ fin}^1$
n. Árboles Frutales			
Almendras, sin cobertura del suelo	0,20	0,85	0,60 ¹⁹
Manzanas, Cerezas, Peras ²⁰			
- sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,35	0,90	0,65 ¹⁹
- sin cobertura del suelo, sin heladas	0,50	0,90	0,70 ¹⁹
- cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,45	1,15	0,90 ¹⁹
- cobertura activa del suelo, sin heladas	0,75	1,15	0,80 ¹⁹
Albaricoque, Durazno o Melocotonero, Drupas (frutales de hueso) ^{20, 21}			
- sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,35	0,85	0,60 ¹⁹
- sin cobertura del suelo, sin heladas	0,45	0,85	0,60 ¹⁹
- cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,45	1,10	0,85 ¹⁹
- cobertura activa del suelo, sin por heladas	0,75	1,10	0,80 ¹⁹
Aguacate, sin cobertura del suelo	0,50	0,80	0,70
Cítricos, sin cobertura del suelo ²²			
- 70% cubierta vegetativa	0,65	0,60	0,65
- 50% cubierta vegetativa	0,60	0,55	0,60
- 20% cubierta vegetativa	0,45	0,40	0,50
Cítricos, con cobertura activa del suelo o malezas ²³			
- 70% cubierta vegetativa	0,75	0,70	0,75
- 50% cubierta vegetativa	0,75	0,75	0,75
- 20% cubierta vegetativa	0,80	0,80	0,85
Coníferas ²⁴	0,95	0,95	0,95
Kiwi	0,20	1,00	1,00
Olivos (40 a 60% de cobertura del suelo por el dosel) ²⁵	0,55	0,65	0,65
Pistachos, sin cobertura del suelo	0,20	1,05	0,40
Huerto de Nogal ¹⁹	0,40	1,05	0,60 ¹⁹

¹⁹ Estos valores de $K_{cb\ fin}$ son representativos del K_{cb} antes de la caída de las hojas. Después de la caída de las hojas, $K_{cb\ fin} \approx 0,15$ para suelo descubierto y seco, o para cobertura muerta del suelo; $K_{cb\ fin} \approx 0,50$ a $0,80$ para cobertura activa y en desarrollo (consultar el Capítulo 11).

²⁰ Referirse a la Ec. 94, 97 o 98 y notas de pie de página 22 y 23 para estimar K_{cb} para sitios con cultivos inmaduros.

²¹ La categoría de las drupas es aplicable a los duraznos, albaricoques, peras, ciruelas y pecanas.

²² Estos valores de K_{cb} pueden ser calculados a partir de la Ec. 98 para $K_{cb\ min} = 0,15$ y $K_{cb\ full} = 0,70$, $0,65$ y $0,70$ para las etapas inicial, mediados y final de la temporada, y $f_{e\ eff} = f_c$ donde f_c = fracción del suelo cubierto por el dosel del árbol (se asume que el sol se encuentra directamente por encima). El valor correspondiente a la etapa de mediados de temporada es menor que los correspondientes a las etapas inicial y final debido a los efectos del cierre estomático durante períodos de máxima ET. Para climas húmedos y sub-húmedos, donde existe un menor control estomático por parte de los cítricos, se pueden aumentar los valores de $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$ en un $0,1 - 0,2$, según Rogers *et al.* (1983).

²³ Estos valores de K_{cb} pueden ser calculados como $K_{cb} = f_c K_{c\ ncs} + (1 - f_c) K_{cb\ cobertura}$ donde $K_{c\ ncs}$ es el valor de K_c de los cítricos que no poseen cobertura activa del suelo (calculado según la nota a pie de página 22); $K_{cb\ cobertura}$ es el valor de K_{cb} para la cobertura activa del suelo ($0,90$) y f_c se define en la nota a pie de página 22. Alternativamente, el valor de K_{cb} para los cítricos con cobertura activa del suelo puede ser estimado directamente a través de la Ec. 98 considerando $K_{cb\ min} = K_{cb\ cobertura}$. Para climas húmedos y semi-húmedos, donde existe un menor control estomático por parte de los cítricos, se pueden incrementar los valores de $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$ en un $0,1 - 0,2$, según Rogers *et al.* (1983).

Para cobertura inactiva o moderadamente activa del suelo (cobertura activa del suelo implica cobertura verde y en crecimiento con un valor del IAF > 2 a 3, aproximadamente), el valor de K_c deberá ser ponderado entre el valor de K_c correspondiente a la ausencia de cobertura del suelo y el valor de K_c para la cubierta activa del suelo, basando la ponderación en el grado de «verdosidad» y el área foliar aproximada de la cubierta del suelo.

²⁴ Las coníferas presentan un control estomático significativo debido a su reducida resistencia aerodinámica. Los valores de K_c pueden ser fácilmente inferiores a los presentados, los cuales representan condiciones de humedecimiento óptimo en bosques extensos.

²⁵ Estos coeficientes representan un 40 a 60% de cobertura del suelo. Referirse a la Ec. 98, ejemplo 43 y notas a pie de página 22 y 23, para estimar K_{cb} para cultivos inmaduros.

Fuentes Principales: $K_{cb\ ini}$: Doorenbos y Kassam (1979); $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$: Doorenbos y Pruitt (1977); Pruitt (1986); Wright (1981, 1982), Snyder *et al.* (1989)

CUADRO 18

Guías generales para la derivación de K_{cb} a partir de los valores de K_c incluidos en el Cuadro 12

Etapa de Desarrollo	Condición del suelo, riego y practica cultural	K_{cb}	Ajustes adicionales
Inicial	Cultivo anual - superficie del suelo (casi) desnuda	0,15	-
	Cultivo perenne-superficie del suelo (casi) desnuda	0,15 - 0,20	-
	Pastos, arbustos y árboles – con heladas fuertes	0,30 - 0,40	-
	Cultivo perenne - alguna cobertura del suelo o cobertura foliar		-
	- riego infrecuentemente (olivos, palmas, árboles frutales, ...)	$K_{c\text{ ini(Cuadro12)}} - 0,1$	-
	- riego frecuente (Hortalizas tipo jardín, ...)	$K_{c\text{ ini(Cuadro12)}} - 0,2$	
Mediados de temporada	Cobertura del suelo mayor a 80%	$K_{c\text{ med (Cuadro12)}} - 0,05$	Clima (Ec. 70)
	Cobertura del suelo menor a 80% (Hortalizas)	$K_{c\text{ med (Cuadro12)}} - 0,10$	Clima (Ec. 70)
Final	Regado o humedecido infrecuentemente durante la etapa final	$\sim K_{c\text{ fin}} - 0,05$	-
	Regado o humedecido frecuentemente durante la etapa final	$K_{c\text{ fin}} - 0,1$	Clima (Ec. 70)

Clima: el ajuste por clima se realiza utilizando la Ec. 70 cuando $K_{cb} > 0,45$ **Determinación de los valores diarios de K_{cb}**

Como se describió en el Capítulo 6, se requieren solamente tres valores para describir y elaborar la curva del coeficiente del cultivo. Después de dividir el período de crecimiento en las cuatro etapas generales y seleccionar y ajustar los valores de K_{cb} correspondientes a la etapa inicial ($K_{cb\text{ ini}}$), de mediados de temporada ($K_{cb\text{ med}}$) y final ($K_{cb\text{ fin}}$), se puede elaborar la curva del coeficiente del cultivo (Figura 37) y determinar los coeficientes K_{cb} (Ejemplo 30).

COMPONENTE DE LA EVAPORACION (K_e ET_o)

El coeficiente de la evaporación K_e representa al componente de la evaporación en el valor de ET_c . Cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda, después del riego o la lluvia, el valor de K_e será máximo. Cuando la superficie del suelo se encuentra seca, K_e será pequeño o incluso cero cuando no exista agua remanente en la superficie del suelo para ser evaporada.

EJEMPLO 30**Determinación de los valores diarios de K_{cb}**

Calcular el coeficiente basal del cultivo de frijoles (judías) secos (Ejemplo 29, Figura 37) para la mitad de cada una de las cuatro etapas de desarrollo.

Etapa Inicial ($L_{ini} = 25$ días), para el día 12 del período de crecimiento:

$$K_{cb} = K_{cb\text{ ini}} = 0,15$$

Etapa de desarrollo del Cultivo ($L_{des} = 25$ días), para el día $(25+25/2=)$ 37 del período de crecimiento, usando Ec. 66:

$$K_{cb} = 0,15 + [(37 - 25)/25] (1,14 - 0,15) = 0,63$$

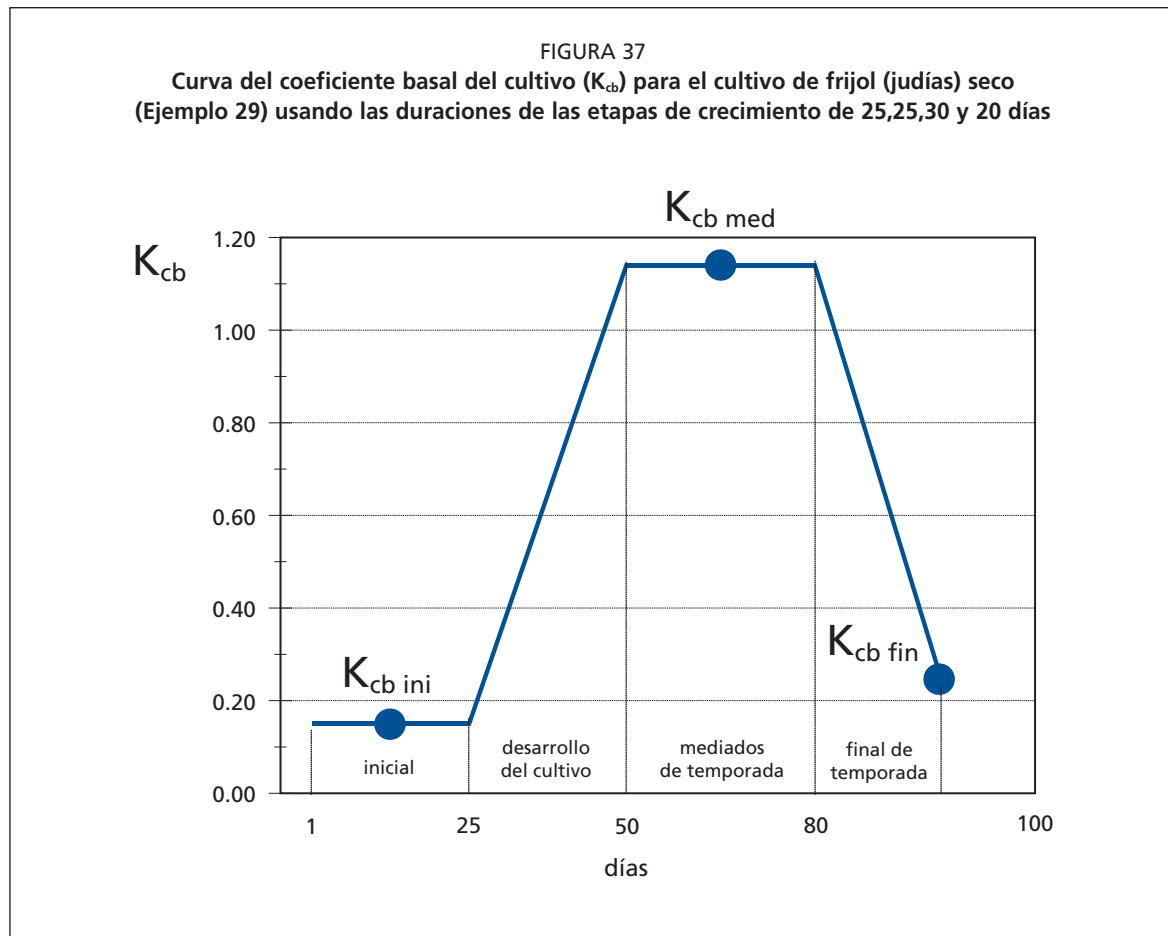
Etapa de mediados de temporada ($L_{med} = 30$ días), para el día $(25+25+30/2=)$ 65 del período de crecimiento:

$$K_{cb} = K_{cb\text{ med}} = 1,14$$

Etapa Final ($L_{fin} = 20$ días), para el día $(25+25+30+20/2=)$ 90 del período de crecimiento, Ec. 66:

$$K_{cb} = 1,14 + [(90 - (25+25+30))/20] (0,25 - 1,14) = 0,70$$

El coeficiente basal del cultivo, K_{cb} , para los días 12, 37, 65 y 90 del período de crecimiento son 0,15, 0,63, 1,14 y 0,70 respectivamente.



Procedimiento de cálculo

Cuando el suelo se encuentra húmedo, la evaporación en el suelo ocurre a una tasa máxima. Sin embargo, el valor del coeficiente del cultivo ($K_e = K_{cb} + K_e$) no puede exceder a un valor máximo, $K_{c\ max}$. Este valor estará determinado por la cantidad de energía disponible para el proceso de evaporación en la superficie del suelo ($K_{cb} + K_e \leq K_{c\ max}$), o $K_e \leq (K_{c\ max} - K_{cb})$.

A medida que la superficie del suelo se va secando una menor cantidad de humedad estará disponible para la evaporación, por lo que la evaporación comenzará a reducirse en función de la cantidad de agua remanente en la capa superficial del suelo, es decir:

$$K_e = K_r (K_{c\ max} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c\ max} \quad (71)$$

donde

- K_e coeficiente de la evaporación en el suelo,
- K_{cb} coeficiente basal del cultivo,
- $K_{c\ max}$ valor máximo de K_c después del riego o lluvia,
- K_r coeficiente adimensional de reducción de la evaporación, dependiente de la lámina acumulada de agua agotada (evaporada) de la capa superficial del suelo,
- f_{ew} fracción del suelo que se encuentra simultáneamente expuesto y humedecido, es decir la fracción de la superficie del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación.

En los términos utilizados en programación, la Ecuación 71 se expresa como $K_e = \min(K_r (K_{c \max} - K_{cb}), f_{ew} K_{c \max})$.

Después de la lluvia o el riego el valor de K_r será igual a 1 y la evaporación estará limitada solamente por la cantidad de energía disponible para el proceso de evaporación. A medida que la superficie del suelo se seca, el valor de K_r será menor que la unidad y la evaporación se verá reducida. El valor de K_r será igual a cero cuando no exista agua para ser evaporada en la capa superficial del suelo.

La evaporación ocurre principalmente en la fracción del suelo que se encuentra expuesta. Por lo tanto la evaporación será restringida, en un momento dado, por la cantidad de energía disponible en la fracción expuesta del suelo, es decir K_e no puede exceder a $f_{ew} K_{c \max}$, donde f_{ew} es la fracción del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación o, en otras palabras, la fracción del suelo que no se encuentra cubierta por la vegetación y que al mismo tiempo se encuentra humedecida por el riego o la lluvia.

El procedimiento de cálculo consiste en determinar:

- el límite superior $K_{c \max}$;
- el coeficiente de reducción de la evaporación en el suelo; y
- la fracción expuesta y humedecida del suelo f_{ew} .

La estimación del valor de K_r requiere del cálculo de un balance diario de humedad en la capa superficial del suelo.

Límite superior $K_{c \max}$

El valor de $K_{c \max}$ representa el límite superior de la evaporación y la transpiración que puede ocurrir en una superficie cultivada, valor que es impuesto para reflejar los límites naturales definidos por la cantidad de energía disponible representados en la diferencia del balance de energía $R_n - G - H$ (Ecuación 1). El valor de $K_{c \max}$ tiene un rango que oscila alrededor 1,05 a 1,30, cuando se utiliza la evapotranspiración del pasto de referencia ET_o :

$$K_{c \max} = \max \left\{ \left[1,2 + [0,04(u_2 - 2) - 0,004 (HR_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \right], \{K_{cb} + 0,05\} \right\} \quad (72)$$

donde

- h altura máxima promedio de las plantas durante el período de cálculo considerado (etapa inicial, desarrollo, mediados de temporada o final) [m],
- K_{cb} coeficiente basal del cultivo,
- $\max ()$ valor máximo de los parámetros entre los paréntesis { } que están separados por comas.

La Ecuación 72 asegura que el valor de $K_{c \max}$ sea siempre mayor o igual a la suma de $K_{cb} + 0,05$. Esto significa que la presencia de una superficie húmeda aumentará el valor de K_{cb} en 0,05 después de un humedecimiento completo de la superficie del suelo, aún durante situaciones de completa cobertura vegetal. Se utiliza un valor de 1,2 en lugar de 1, para el cálculo de $K_{c \max}$ en la Ecuación 72, debido al efecto del incremento de la rugosidad aerodinámica de los cultivos circundantes durante las etapas de desarrollo, mediados y final de la temporada de crecimiento, lo cual incrementa la transferencia del vapor por turbulencia a partir de la fracción expuesta del suelo. El coeficiente «1,2» también refleja el impacto de la reducción del albedo en un suelo húmedo, así como la contribución del calor almacenado en el suelo seco antes del evento de humedecimiento. Todos estos factores pueden contribuir al incremento de la evaporación, con relación a la de referencia.

El coeficiente «1,2» en la Ecuación 72 representa el efecto de los intervalos de humedecimiento que son mayores de 3 ó 4 días. Si los eventos de riego o lluvia son más frecuentes, por ejemplo diarios o cada dos días, el suelo tendrá menos oportunidad de absorber calor entre eventos sucesivos, por lo que el valor del coeficiente «1,2» de la Ecuación 72 podrá ser reducido aproximadamente a 1,1. El intervalo de tiempo para el cálculo de $K_{c\max}$ puede variar entre diario a mensual.

Coeficiente de reducción de la evaporación del suelo (K_r)

Se puede asumir que la evaporación que se presenta en la parte expuesta del suelo ocurre en dos etapas: una etapa limitada por la cantidad de energía disponible y una etapa donde la tasa de evaporación se reduce gradualmente. Cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda, el valor de K_r es igual a 1. Cuando el contenido de agua en la parte superior del suelo empieza a ser limitante, el valor de K_r disminuye, llegando a cero cuando se agota la totalidad de agua.

Cantidad máxima de agua evaporable

En este procedimiento sencillo de simulación de la evaporación, se asume que el contenido de agua en la capa evaporable corresponde a la capacidad de campo, θ_{FC} , poco tiempo después de un evento importante de humedecimiento y que el suelo puede secarse hasta un contenido de humedad intermedio entre secado al horno (sin agua remanente) y el punto de marchitez permanente, θ_{WP} . Por lo tanto, la cantidad de agua que puede ser agotada mediante evaporación durante un ciclo completo se estima como:

$$AET = 1000 (\theta_{FC} - 0,5 \theta_{WP}) Z_e \quad (73)$$

donde

- AET agua evaporable total = lámina máxima de agua que puede ser evaporada en el suelo, cuando la capa superficial del mismo ha sido inicialmente humedecida por completo [mm],
- θ_{FC} contenido de humedad en el suelo a capacidad de campo [$m^3 m^{-3}$],
- θ_{WP} contenido de humedad en el punto de marchitez permanente [$m^3 m^{-3}$],
- Z_e profundidad de la capa del suelo que es sujeta al secado a través de la evaporación [0,10-0,15 m].

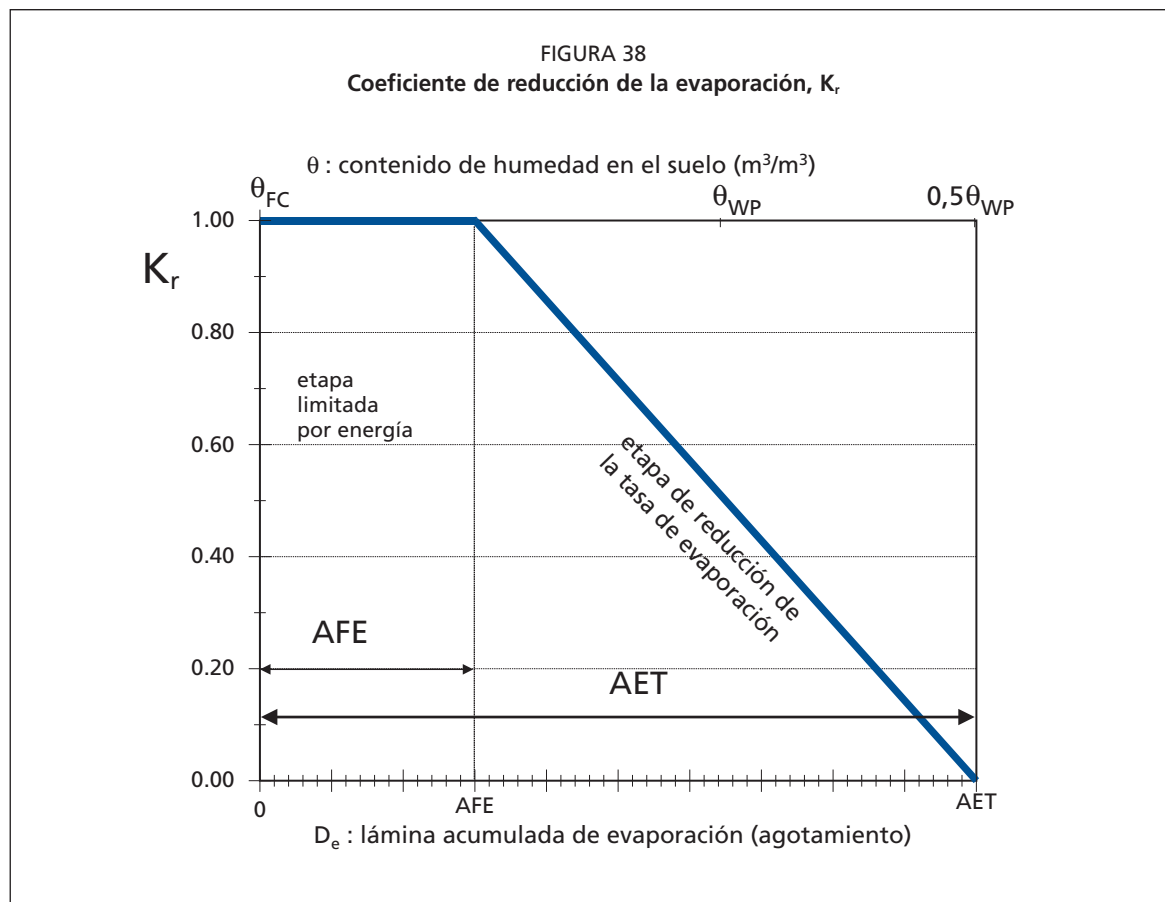
Cuando no se disponga de información apropiada, se recomienda asumir un valor de profundidad efectiva de la capa evaporante del suelo de alrededor 0,10 a 0,15 m. En el Cuadro 19 se presentan valores típicos de θ_{FC} , θ_{WP} y AET.

CUADRO 19

Características típicas de la humedad del suelo para diferentes tipos de suelo

Tipo de Suelo (Clasificación de la textura del Suelo del USDA)	Características de la humedad del suelo			Parámetros de Evaporación	
	θ_{FC}	θ_{WP}	$(\theta_{FC} - \theta_{WP})$	Cantidad de agua que puede ser agotada a través de la evaporación	
	m^3/m^3	m^3/m^3	m^3/m^3	Etapa 1 AFE mm	Etapa 1 y 2 AET* ($Z_e = 0,10$ m) mm
Arenoso	0,07 - 0,17	0,02 - 0,07	0,05 - 0,11	2 - 7	6 - 12
Arenoso Franco	0,11 - 0,19	0,03 - 0,10	0,06 - 0,12	4 - 8	9 - 14
Franco Arenoso	0,18 - 0,28	0,06 - 0,16	0,11 - 0,15	6 - 10	15 - 20
Franco	0,20 - 0,30	0,07 - 0,17	0,13 - 0,18	8 - 10	16 - 22
Franco Limoso	0,22 - 0,36	0,09 - 0,21	0,13 - 0,19	8 - 11	18 - 25
Limoso	0,28 - 0,36	0,12 - 0,22	0,16 - 0,20	8 - 11	22 - 26
Franco Arcilloso Limoso	0,30 - 0,37	0,17 - 0,24	0,13 - 0,18	8 - 11	22 - 27
Arcilloso Limoso	0,30 - 0,42	0,17 - 0,29	0,13 - 0,19	8 - 12	22 - 28
Arcilloso	0,32 - 0,40	0,20 - 0,24	0,12 - 0,20	8 - 12	22 - 29

*AET = $(\theta_{FC} - 0,5 \theta_{WP}) Z_e$



Etapa 1: etapa limitada por la energía disponible

Al comienzo de un ciclo de secado, después de un evento importante de lluvia o riego, el contenido de humedad en la capa superficial del suelo corresponderá a capacidad de campo y la cantidad de agua agotada por evaporación, D_e , será igual a cero. Durante la etapa 1 del proceso de secado la superficie del suelo permanecerá húmeda y se asume que la evaporación en la superficie expuesta del suelo ocurrirá a una tasa máxima, la cual será limitada solamente por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo. Esta etapa se mantiene hasta que la lámina acumulada de evaporación, D_e , aumente hasta un punto donde las propiedades hidráulicas de la parte superior del suelo comiencen a ser limitantes y la humedad no pueda ser transportada a la superficie del suelo a una tasa que pueda satisfacer la demanda potencial de la evaporación. Durante la etapa 1 de secado, $K_r = 1$.

La lámina acumulada de evaporación, D_e , al final de la etapa 1 de secado será igual a AFE (agua fácilmente evaporable), la cual representa la lámina máxima de agua que puede ser evaporada sin restricciones de la capa superficial del suelo durante la etapa 1. Esta lámina oscila normalmente entre los 5 a 12 mm, siendo en general mayor para suelos de textura media y fina. En el Cuadro 19 se presentan valores típicos de AFE.

Etapa 2: etapa de reducción de la tasa de evaporación

La segunda etapa (donde la tasa de evaporación se va reduciendo paulatinamente) es denominada «etapa de reducción de la tasa de evaporación», la cual se inicia cuando el valor de D_e supera a la AFE. En este punto, la superficie del suelo se encontrará visiblemente seca y la evaporación a partir de la porción expuesta del suelo se reducirá en proporción a la cantidad de agua remanente en la capa superficial del suelo:

$$K_r = \frac{AET - D_{e,i-1}}{AET - AFE} \quad \text{para } D_{e,i-1} > AFE \quad (74)$$

donde

- K_r coeficiente adimensional de reducción de la evaporación, dependiente del agotamiento de la humedad (lámina acumulada de evaporación), en la parte superior del suelo ($K_r = 1$ cuando $D_{e,i-1} \leq AFE$),
- $D_{e,i-1}$ lámina acumulada de evaporación (agotamiento) en la capa superficial del suelo al final del día_{i-1} (el día anterior) [mm],
- AET lámina acumulada máxima de evaporación (agotamiento) en la capa superficial del suelo cuando $K_r = 0$ (AET = agua evaporable total) [mm],
- AFE lámina acumulada de evaporación al final de la etapa 1 (AFE = agua fácilmente evaporable) [mm].

EJEMPLO 31

Determinación de la evapotranspiración en un suelo descubierto

Determinar la evapotranspiración que ocurre en la superficie de un suelo sin cobertura, de textura franca ($K_{cb} \approx 0,15$), durante diez días consecutivos, después de la ocurrencia de una lluvia fuerte. El valor promedio de la evapotranspiración de referencia durante el período de secado del suelo es $ET_o = 4,5 \text{ mm día}^{-1}$, siendo el clima subhúmedo y con vientos ligeros.

Del Cuadro 19
Para lluvia en suelo desnudo
Utilizando la Ec. 72

Para suelo franco: AET $\approx 20 \text{ mm}$ y AFE $\approx 9 \text{ mm}$
 $f_{ew} = 1$
 $K_{c \max} = 1,20$

(1) día	(2) D_e inicial mm	(3) Etapa	(4) K_r	(5) K_e	(6) $K_e ET_o$ mm día ⁻¹	(7) D_e final mm	(8) ET_c mm día ⁻¹
1	0,00	1	1	1,05	4,73	4,73	5,4
2	4,73	1	1	1,05	4,73	9,45	5,4
3	9,45	2	$(20-9,45)/(20-9)=0,96$	1,01	4,53	13,98	5,2
4	13,98	2	$(20-13,98)/(20-9)=0,55$	0,57	2,59	16,57	3,3
5	16,57	2	$(20-16,57)/(20-9)=0,31$	0,33	1,47	18,04	2,1
6	18,04	2	$(20-18,04)/(20-9)=0,18$	0,19	0,84	18,88	1,5
7	18,88	2	$(20-18,88)/(20-9)=0,10$	0,11	0,48	19,36	1,2
8	19,36	2	$(20-19,36)/(20-9)=0,06$	0,06	0,27	19,64	0,9
9	19,64	2	$(20-19,64)/(20-9)=0,03$	0,03	0,16	19,79	0,8
10	19,79	2	$(20-19,79)/(20-9)=0,02$	0,02	0,09	19,88	0,8

(1) Número del día.

(2) Agotamiento al inicio del día (= agotamiento al final del día anterior).

(3) Etapa de evaporación del suelo (la etapa 2 comienza cuando $D_e > AFE = 9 \text{ mm}$).

(4) K_r ($K_r = 1$ para la etapa 1. Use Ec. 74 para la etapa 2).

(5) Utilizando la Ec. 21: $K_e = K_r (K_{c \max} - K_{cb}) = K_r (1,20 - 0,15) = 1,05$, $K_r \leq 1,20$.

(6) Componente de la evaporación: $K_e ET_o = K_e (4,5 \text{ mm día}^{-1})$.

(7) Agotamiento al final del día = (2) - (6).

(8) $ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o = (0,15 + K_e) ET_o = (0,15 + K_e) 4,5 \text{ mm día}^{-1}$,

donde $K_{cb} ET_o = (0,15 ET_o) \approx 0,7 \text{ mm día}^{-1}$ es la evaporación basal o «difusa» en el suelo, que ocurre posiblemente por debajo de la profundidad Z_e ($\sim 0,10$ a $0,15 \text{ m}$). Debido a que el suelo en este ejemplo se encuentra descubierto, es posible asumir un valor de K_{cb} igual a cero, por lo que el valor máximo de K_e sería $K_{c \max} = 1,20$. En este caso toda la evaporación sería descontada de la capa superficial del suelo.

Este ejemplo demuestra que para la estimación de K_r se requiere del cálculo del balance diario de humedad del suelo. Este aspecto es desarrollado en mayor profundidad en la sección que trata sobre el cálculo diario de K_e .

Fracción expuesta y humedecida del suelo (f_{ew})

f_{ew} : procedimiento de cálculo

En cultivos que cubren parcialmente la superficie del suelo, la evaporación del agua en el suelo no ocurre uniformemente a lo largo de la totalidad de la superficie, sino que es mayor en la superficie no cubierta por las plantas, donde será mayor la exposición a luz solar y donde se presenta la mayor ventilación del aire, el cual transportará el vapor de agua desde la superficie del suelo hacia arriba de la vegetación. Este hecho es de especial importancia en los casos donde solo una porción del suelo es humedecida a través del riego.

Se reconoce que tanto la ubicación como la fracción del suelo expuesto a la luz solar cambia en cierta medida de acuerdo al momento del día y a la orientación de las hileras del cultivo. El procedimiento que se presenta en esta parte asume una fracción general promedio de la superficie del suelo a partir de la cual ocurrirá la mayor parte de la evaporación. Se asume que la parte de la evaporación que ocurre por difusión, a partir del suelo que se encuentra por debajo de la vegetación, está incluida principalmente en el coeficiente basal K_{cb} .

Cuando toda la superficie del suelo se humedece, como ocurre en los casos de lluvia o riego por aspersión, la fracción de la superficie del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación, f_{ew} , estará definida esencialmente como $(1 - f_c)$; donde f_c es la fracción promedio de la superficie del suelo que está cubierta por la vegetación y $(1 - f_c)$ será la fracción aproximada de la superficie del suelo que se encuentra expuesta. Sin embargo, en los casos de los sistemas de riego que humedecen solo una fracción de la superficie del suelo, f_{ew} deberá limitarse a f_w , la cual representa la fracción de la superficie del suelo que se humedece a través del riego (Figura 39). Por lo tanto f_{ew} se calcula como:

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (75)$$

donde

- $1 - f_c$ fracción expuesta promedio del suelo, la cual no se encuentra cubierta (o sombreada) por la vegetación [0,01 - 1],
- f_w fracción promedio de la superficie del suelo humedecida por el riego o la lluvia [0,01 - 1].

La función ‘min()’ selecciona el valor menor entre ‘ $1 - f_c$ ’ y ‘ f_w ’. En la Figura 39 se ilustra la relación entre f_{ew} , $(1 - f_c)$ y f_w .

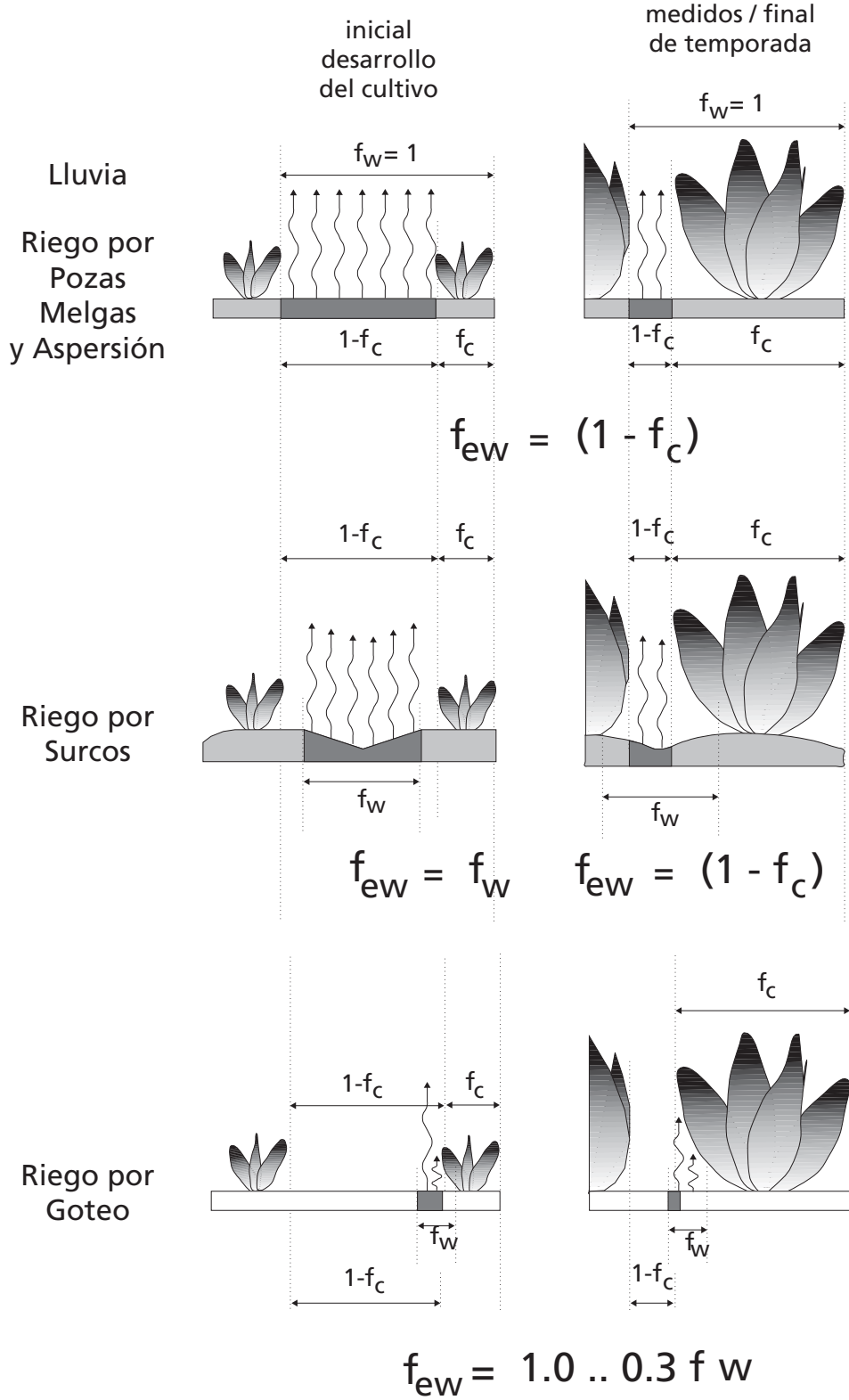
La condición impuesta a través de la Ecuación 75 asume que la fracción del suelo humedecido por el riego se encuentra dentro de la fracción del suelo que esta expuesta a la luz solar y la ventilación del aire. Esto representa el caso general, exceptuando quizás el caso de riego por goteo. (Figura 39)

En el caso del riego por goteo, donde la mayor parte del suelo humedecido por el riego pudiera encontrarse por debajo de la vegetación y estar por lo tanto sombreado por la misma, se requerirán de modelos mas complicados de la superficie del suelo y de los patrones de humedecimiento para la estimación precisa de la evaporación total que ocurre en el suelo. En este caso el valor de f_w pudiera ser reducido aproximadamente de la mitad a un tercio de los valores reportados en el Cuadro 20, para incluir los efectos del sombreado de los emisores por parte de la vegetación en la tasa de evaporación del suelo humedecido (Ejemplo 34). Un procedimiento general podría consistir en multiplicar f_w por $[1 - (2/3) f_c]$ para riego por goteo.

f_w : fracción de la superficie del suelo humedecida por el riego o la lluvia

En el Cuadro 20 se presentan valores típicos de f_w . Cuando se presente una combinación de riego y lluvia dentro del mismo ciclo de secado o en el mismo día, el valor de f_w deberá consistir en un promedio ponderado del valor de f_w correspondiente a la precipitación ($f_w = 1$) y el valor de f_w para el sistema de riego. La ponderación deberá ser proporcional a las láminas infiltradas producidas por cada fuente de humedecimiento.

FIGURA 39
 Determinación de la variable f_{ew} (áreas con flechas), en función de la fracción de cobertura de la superficie del suelo (f_c) y de la fracción humedecida de la superficie (f_w)



CUADRO 20

Valores comunes de la fracción f_w de la superficie humedecida del suelo por riego o lluvia

Evento de humedecimiento	f_w
Precipitación	1,0
Riego por aspersión	1,0
Riego por pozas	1,0
Riego por melgas	1,0
Riego por surcos (cada surco), camas estrechas	0,6 ... 1,0
Riego por surcos (cada surco), camas anchas	0,4 ... 0,6
Riego por surcos (surcos alternados)	0,3 ... 0,5
Riego por goteo	0,3 ... 0,4

Como alternativa para cada día de aplicación del agua considerado, se pueden usar las siguientes reglas para determinar f_w para un día determinado y los días siguientes de una manera más simple:

- Si la superficie es humedecida por riego y lluvia insignificante (< 3 a 4 mm): f_w es igual al f_w para el sistema de riego;
- Si la superficie es humedecida por riego y lluvia significativa (> 3 a 4 mm): f_w es igual a 1 (precipitación);
- Si la superficie es humedecida por riego: f_w es igual al f_w del sistema de riego;
- Si la superficie es humedecida por una lluvia significativa (es decir > 3 a 4 mm), sin la presencia de riego: $f_w = 1$;
- Cuando no existe ni riego ni lluvia significativa: f_w es igual al f_w del día anterior.

1- f_c : fracción expuesta del suelo

La fracción del suelo cubierta por la vegetación se denomina f_c . Por lo tanto el término $(1 - f_c)$ representa la fracción del suelo que se encuentra expuesta a la luz solar y la ventilación del aire, la cual viene a representar el sitio donde ocurre la mayor parte de la evaporación en el suelo humedecido. El valor de f_c debe ser inferior a 0,99. El usuario deberá asumir valores apropiados de f_c para cada una de las etapas de crecimiento. En el Cuadro 21 se presentan valores típicos de f_c y $(1 - f_c)$.

Cuando no se dispone de mediciones del valor de la fracción de cobertura, f_c , se puede estimar f_c de la siguiente forma:

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{c \min}}{K_{c \max} - K_{c \min}} \right)^{(1+0,5h)} \quad (76)$$

donde

- f_c fracción efectiva de la superficie del suelo que se encuentra cubierta por la vegetación [0-0,99],
- K_{cb} valor del coeficiente basal del cultivo para un día o período particular,
- $K_{c \min}$ valor mínimo de K_c para suelo sin cobertura y seco [$\approx 0,15 - 0,20$],
- $K_{c \max}$ valor máximo de K_c inmediatamente después del humedecimiento (Ecuación 72),
- h altura promedio de la planta [m].

CUADRO 21

Valores comunes de la fracción del suelo cubierta por la vegetación (f_c) y de la expuesta a la luz del sol ($1-f_c$)

Etapas de crecimiento del cultivo	f_c	$1-f_c$
Etapas inicial	0,0 - 0,1	1,0 - 0,9
Etapas de desarrollo del cultivo	0,1 - 0,8	0,9 - 0,2
Etapas de mediados de temporada	0,8 - 1,0	0,2 - 0,0
Etapas de final de temporada	0,8 - 0,2	0,2 - 0,8

Se debe utilizar con precaución la Ecuación 76 y validarla a través de observaciones de campo. El valor de $K_{c\ min}$ representa el valor mínimo del coeficiente del cultivo para suelo seco y desnudo, cuando la transpiración y la evaporación en el suelo son cercanas a sus niveles basales (difusivos). Se recomienda un valor de $K_{c\ min} \approx 0,15 - 0,20$. El valor de $K_{c\ min}$ constituye una parte integral de todos los coeficientes K_{cb} . Generalmente $K_{c\ min}$ tiene el mismo valor que el de $K_{cb\ ini}$ utilizado para cultivos anuales que se encuentran en condiciones de suelo casi descubierto (0,15 - 0,20).

En la Ecuación 76 se asume que el valor de K_{cb} resulta afectado significativamente por la fracción del suelo cubierta por la vegetación. Esta consideración es acertada para la mayoría de condiciones y tipo de vegetación. El exponente '1+0,5h' presente en la ecuación, viene a representar el efecto de la altura de la planta en el sombreado de la superficie del suelo, así como el incremento del valor de K_{cb} para un valor determinado de f_c . El usuario deberá limitar la diferencia $K_{cb} - K_{c\ min}$ a $\geq 0,01$ para mantener la estabilidad numérica. El valor de f_c variará diariamente a medida que cambia el valor de K_{cb} . Por lo tanto la ecuación anterior se aplica diariamente.

La aplicación de la Ecuación 76 predice la reducción del valor de f_c durante la etapa final en proporción al valor de K_{cb} , a pesar de que el suelo pueda permanecer cubierto por la vegetación senescente. Esta predicción ayuda a tomar en cuenta el transporte local de calor sensible desde las hojas senescentes hacia la superficie del suelo que se encuentra por debajo de las mismas.

EJEMPLO 32

Cálculo del coeficiente del cultivo ($K_{cb} + K_e$) bajo riego por aspersión

Un campo de algodón ha sido recientemente regado por aspersión. El valor de K_{cb} para un día determinado (durante la etapa de desarrollo) ha sido calculado utilizando el Cuadro 17 y la Ec. 70 y luego interpolado a partir de la curva de K_{cb} , obteniéndose un valor de 0,9. Se conocen los valores de $ET_0 = 7\text{ mm día}^{-1}$, $u_2 = 3\text{ m s}^{-1}$ y la $HR_{\min} = 20\%$. Estimar el valor del coeficiente del cultivo ($K_{cb} + K_e$).

Asumiendo $h = 1\text{ m}$ y utilizando la Ec. 72, el valor de $K_{c\ max}$ para este clima árido es:

$$K_{c\ max} = \max \left(\left\{ 1,2 + [0,04(3-2) - 0,004(20-45)] \left(\frac{1}{3} \right)^{0,3} \right\}, \{0,9 + 0,05\} \right) = 1,30$$

Utilizando la Ec. 76, donde $K_{c\ min} = 0,15$:

$$\begin{aligned} f_c &= [(K_{cb} - K_{c\ min}) / (K_{c\ max} - K_{c\ min})] (1 + 0,5h) \\ &= [(0,9 - 0,15) / (1,3 - 0,15)] (1 + 0,5(1)) = 0,53. \end{aligned}$$

Como el campo fue regado por riego por aspersión, $f_w = 1,0$ y a través de la Ec. 75:

$$\begin{aligned} f_{ew} &= \min(1 - f_c, f_w) \\ &= \min(1 - 0,53, 1,0) = 0,47. \end{aligned}$$

Asumiendo que el riego fue suficiente para llevar la capa evaporante del suelo a capacidad de campo, por lo que: $K_r = 1$, la evaporación corresponde a la etapa 1.

Usando la Ec. 71: $K_e = 1,00 (1,30 - 0,90) = 0,40$

Este valor debe ser comparado con el límite superior representado por $f_{ew} K_{c\ max}$ para asegurar que es inferior al mismo:

$f_{ew} K_{c\ max} = 0,47 (1,30) = 0,61$, el cual es mayor que el valor de K_e . Por lo tanto, se puede utilizar el valor de K_e sin ninguna restricción.

El valor total de K_c para el campo cultivado, asumiendo que no existe estrés hídrico debido a una ausencia de humedad en el perfil del suelo, es:

$$\begin{aligned} K_c &= K_{cb} + K_e \\ &= 0,9 + 0,40 = 1,30. \end{aligned}$$

Este valor es bastante grande debido a la presencia de una gran humedad en la superficie del suelo, el hecho de que el cultivo es relativamente alto y rugoso, al compararse con el pasto de referencia, así como la aridez del clima ($u_2 = 3\text{ m s}^{-1}$ y $HR_{\min} = 20\%$). En esta situación, el valor de K_c iguala al valor de $K_{c\ max}$ debido a que el campo fue recién humedecido a través del riego por aspersión.

EJEMPLO 33**Cálculo del coeficiente del cultivo ($K_{cb} + K_e$) bajo riego por surcos**

El campo de algodón citado en el ejemplo anterior (Ej. 32) ha sido regado a través de riego por surcos en hileras alternadas en lugar de riego por aspersión, siendo la fracción humedecida del campo a través del riego igual a 0,3.

El valor de f_{ew} es calculado en este caso a través de la Ec. 75:

$$f_{ew} = \min(1-f_c, f_w) = \min(1 - 0,53, 0,3) = 0,3.$$

Asumiendo que el riego fue suficiente para llevar la porción f_{ew} de la capa evaporante a capacidad de campo, por lo que $K_r = 1$ y la evaporación se encuentra en la etapa 1.

Utilizando la Ec. 71:

$$K_e = 1,00 (1,30 - 0,9) = 0,40$$

Se compara este valor con el límite superior representado por $f_{ew} K_{c,max}$ el cual es $0,30 (1,30) = 0,39$. Debido a que $0,40 > 0,39$, el K_e calculado con el área superficial f_{ew} deberá ser restringido a 0,39.

El valor total de K_c para el campo regado por riego por surcos, asumiendo la ausencia de estrés hídrico debido al suelo seco, es $K_c = K_{cb} + K_e = 0,9 + 0,39 = 1,29$. Este valor es esencialmente igual al obtenido en el ejemplo anterior (Ej. 32), debido a que la metodología asume que el suelo entre las hileras alternas representa la porción humedecida a través del riego, por lo que la mayoría de la superficie del suelo tiene cobertura vegetativa o suelo humedecido.

EJEMPLO 34**Cálculo del coeficiente del cultivo ($K_{cb} + K_e$) bajo riego por goteo**

El campo de algodón mencionado en el ejemplo anterior (Ej. 32) ha sido regado a través de riego por goteo, donde los emisores son colocados por debajo de la parte vegetativa del algodón. La fracción humedecida de la superficie del suelo por el sistema de riego es de 0,3.

En este caso el valor de f_{ew} es calculado a través de la Ec. 75 como $f_{ew} = \min(1-f_c, f_w)$. Debido a que los emisores están localizados por debajo de la vegetación, por que existirá una menor cantidad de energía disponible para la evaporación, se reduce el valor de f_w multiplicándolo por $1 - (2/3)f_c$, por lo que:

$$f_{ew} = \min[(1-f_c), (1 - 0,67 f_c) f_w] = \min[(1-0,53), (1 - 0,67(0,53))(0,3)] = 0,19$$

Asumiendo que el riego fue suficiente para llevar la porción f_{ew} de la capa evaporante a capacidad de campo, por lo que $K_r = 1$ y la evaporación se encuentra en la etapa 1.

Utilizando la Ec. 71:

$$K_e = 1,00 (1,30-0,90) = 0,40.$$

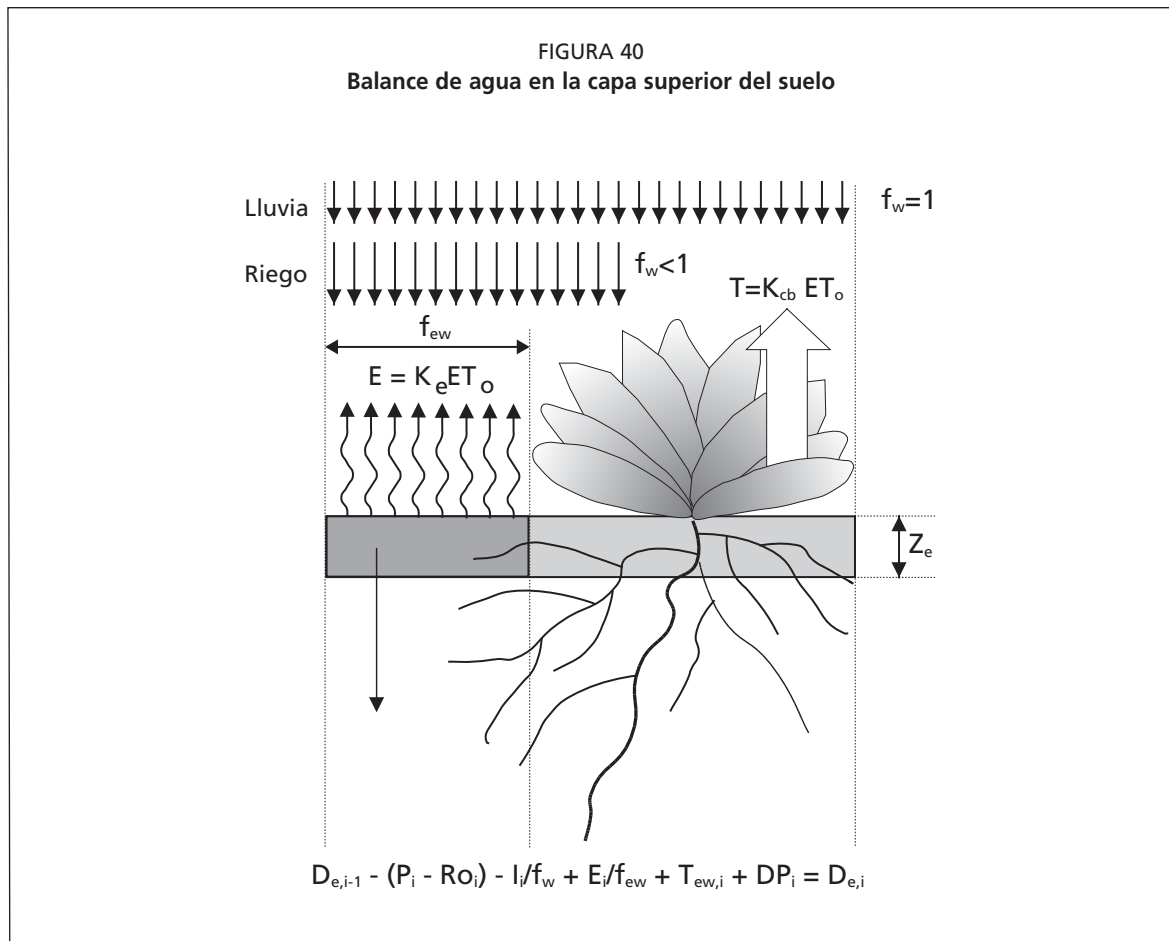
Se compara este valor con el límite superior $f_{ew} K_{c,max} = 0,19 (1,30) = 0,25$. Como $0,25 < 0,40$, el valor de K_e obtenido de la fracción f_w del área superficial estará restringido por la cantidad de energía disponible. Por lo tanto, $K_e = 0,25$.

El valor total de K_c para el campo regado por riego por goteo, asumiendo la ausencia de estrés hídrico debido a la falta de humedad en el suelo, es: $K_c = K_{cb} + K_e = 0,9 + 0,25 = 1,15$. Este valor de K_c es menor que el obtenido para riego por aspersión y para riego por surco (Ejemplos 32 y 33).

Cálculo diario del valor de K_e ***Balance diario de la humedad del suelo***

Para la estimación del valor de K_e se requiere del cálculo de un balance diario del agua presente en la capa superficial del suelo con el objeto de determinar la lámina acumulada de evaporación o agotamiento. La Ecuación para el balance del agua en el suelo, correspondiente a la fracción expuesta y humedecida del mismo, f_{ew} , es la siguiente (Figura 40):

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (77)$$



donde

- $D_{e,i-1}$ lámina acumulada de evaporación (agotamiento), después de un humedecimiento completo, originada a partir de la fracción expuesta y humedecida de la porción superior del suelo, al final del día $i-1$ [mm],
- $D_{e,i}$ lámina acumulada de evaporación (agotamiento) después de un humedecimiento completo al final del día i [mm],
- P_i precipitación en el día i [mm],
- RO_i escurrimiento del agua precipitada en la superficie del suelo en el día i [mm],
- I_i lámina de riego en el día i que infiltra en el suelo [mm],
- E_i evaporación en el día i (ósea, $E_i = K_e ET_o$) [mm],
- $T_{ew,i}$ lámina de transpiración que ocurre en la fracción expuesta y humedecida de la capa superficial del suelo en el día i [mm],
- $D_{pe,i}$ pérdidas por percolación profunda que ocurren a partir de la capa superficial del suelo en el día i , cuando el contenido de humedad en el suelo excede la capacidad de campo [mm],
- f_w fracción de la superficie del suelo humedecida a través del riego [0,01 - 1],
- f_{ew} fracción expuesta y humedecida del suelo [0,01 - 1].

Límites del valor de $D_{e,i}$

Al asumir que la capa superficial del suelo se encuentra a capacidad de campo, después de una lluvia pesada o riego, se asume que el valor mínimo del agotamiento $D_{e,i}$ es igual a cero. A medida que se seca la superficie del suelo aumenta el valor de $D_{e,i}$ y en ausencia de algún evento de humedecimiento, $D_{e,i}$ alcanzará progresivamente su valor

máximo AET (Ecuación 73). En ese momento no existirá agua en la capa superficial del suelo disponible para la evaporación, K_r será igual a cero, y el valor de $D_{e,i}$ se mantendrá igual a AET hasta que la parte superior del suelo sea humedecida nuevamente. En consecuencia, los límites impuestos al valor de $D_{e,i}$ son:

$$0 \leq D_{e,i} \leq AET \quad (78)$$

Agotamiento inicial

Para iniciar el balance de agua en la capa evaporante del suelo, el usuario puede asumir que la capa superficial del suelo se encuentra cerca de capacidad de campo después de una lluvia pesada o riego, es decir, $D_{e,i-1} = 0$. En el caso que haya transcurrido un período largo de tiempo desde el último humedecimiento, el usuario puede asumir que se ha agotado toda el agua evaporable de la capa superficial del suelo al comenzar los cálculos, ósea $D_{e,i-1} = AET = 1000(\theta_{FC} - 0,5 \theta_{WP}) Z_c$.

Precipitación y escurrimiento superficial

El término P_i representa la precipitación ocurrida en un día determinado. En el caso de que la precipitación del día ocurra en láminas menores de alrededor $0,2 ET_o$, se asume que la misma es normalmente evaporada en su totalidad, por lo que puede ser ignorada en el cálculo de K_c y en el balance del agua en el suelo. La cantidad de agua precipitada que se pierde por escurrimiento superficial depende de: la intensidad de la lluvia; la pendiente del terreno; el tipo de suelo, sus condiciones hidráulicas y el contenido de humedad antecedente; y el uso de la tierra y tipo de cobertura. Para situaciones generales, puede asumirse un valor de RO_i igual a cero o el mismo puede ser estimado considerando solamente cierto porcentaje de P_i . En especial esta consideración es válida cuando se considera el balance de agua en la capa superior del suelo, debido a que la mayoría de los eventos de precipitación que tengan intensidades o láminas lo suficientemente grandes como para causar escurrimiento superficial, también llevarán el contenido de humedad en la capa superior del suelo a capacidad de campo. Por lo tanto se podría ignorar el impacto del componente de escurrimiento superficial. Por otra parte, en general los eventos ligeros de precipitación no producirán cantidades apreciables de escurrimiento superficial.

Riego

En general, la lámina de riego I_i se expresa como una lámina de agua que es equivalente a la lámina infiltrada media de riego distribuida sobre la totalidad del campo. Por lo tanto el valor I_i/f_w se utiliza para describir la concentración real del volumen de riego sobre la fracción del suelo que se humedece (Figura 31).

Evaporación

Se asume que la evaporación que ocurre por debajo de la cubierta vegetativa está incluida en el valor de K_{cb} , por lo que no es cuantificada de manera explícita. El cálculo de la evaporación se concentra totalmente en la porción expuesta y humedecida de la capa superficial del suelo. El componente de evaporación E_i se define por el producto $K_e ET_o$. El cociente E_i/f_{ew} representa la concentración real de la evaporación que ocurre sobre la fracción del suelo que se encuentra tanto expuesto como humedecido.

Transpiración

Exceptuando el caso de los cultivos de raíces poco profundas (es decir, donde la profundidad máxima de la zona radicular es $< 0,5$ a $0,6$ m), la cantidad de transpiración que ocurre en la capa evaporante del suelo es pequeña y puede ser ignorada (es decir, $T_{ew} = 0$). Por otra parte, en el caso de cultivos sembrados en hileras, la mayor parte del agua extraída por las raíces de las plantas es extraída por debajo de la cobertura vegetativa. Por lo tanto, se puede asumir que la lámina T_{ew} , que ocurre en la fracción few de la superficie del suelo, es igual a cero en estos casos.

EJEMPLO 35

Estimación de la evapotranspiración del cultivo a través del procedimiento del coeficiente dual del cultivo

Estimar la evapotranspiración del cultivo, ET_c , para diez días consecutivos. Se asume que:

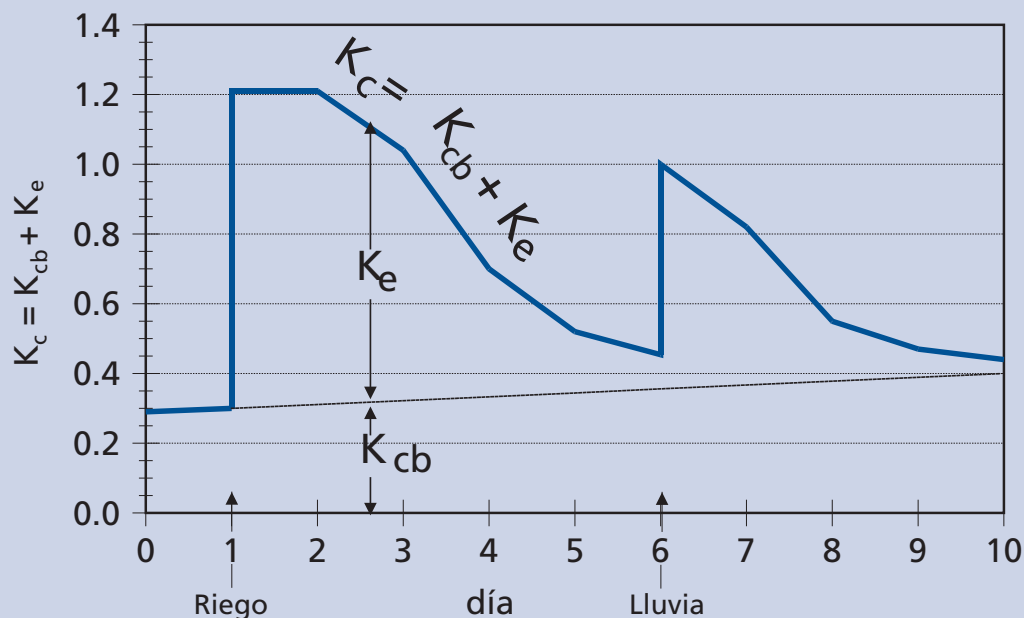
- El suelo es franco arenoso, caracterizado por $\theta_{FC} = 0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $\theta_{WP} = 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$,
- la profundidad de la capa superficial del suelo que está sujeta al proceso de secado a través de la evaporación, Z_e , es de 0,1 m,
- durante el período considerado, la altura de la vegetación es de $h = 0,30 \text{ m}$, la velocidad promedio del viento es de $u_2 = 1,6 \text{ m s}^{-1}$ y la $HR_{\min} = 35\%$,
- el valor de K_{cb} en el día 1 es de 0,30 y se incrementa a 0,40 para el día 10,
- la fracción expuesta del suelo, $(1-f_s)$, disminuye de 0,92 en el día 1 a 0,86 en el día 10,
- toda el agua evaporable en la capa superficial del suelo ha sido agotada para el momento del inicio de los cálculos ($D_{e,i-1} = AET$),
- el riego se produce al inicio del día 1 ($I = 40 \text{ mm}$), siendo la fracción de la superficie del suelo humedecida por el riego, $f_w = 0,8$,
- una lluvia de 6 mm ocurre al inicio del día 6.

de el Cuadro 19 $AFE \approx 8 \text{ mm}$

usando Ec. 73 $AET = 1\,000 (0,23 - 0,5(0,10)) 0,1 = 18 \text{ mm}$

usando Ec. 72 $K_{c_{\max}} = 1,2 + [0,04(1,6-2) - 0,004(35-45)] (0,3/3)^{0,3} = 1,21$

Se asume que se ha agotado la totalidad del agua evaporable para el inicio de los cálculos, por lo que $D_{e,i-1} = AET = 18 \text{ mm}$



(1) Día	(2) ET _o mm/d	(3) P-RO mm	(4) I/f _w mm	(5) 1-f _c	(6) f _w	(7) f _{ew}	(8) K _{cb}	(9) D _{e,i} inicio mm
inicio	-	-	-	-	-	-	-	-
1	4,5	0	50	0,92	0,8	0,80	0,30	0
2	5,0	0	0	0,91	0,8	0,80	0,31	5
3	3,9	0	0	0,91	0,8	0,80	0,32	11
4	4,2	0	0	0,90	0,8	0,80	0,33	14
5	4,8	0	0	0,89	0,8	0,80	0,34	16
6	2,7	6	0	0,89	1	0,89	0,36	11
7	5,8	0	0	0,88	1	0,88	0,37	13
8	5,1	0	0	0,87	1	0,87	0,38	16
9	4,7	0	0	0,87	1	0,87	0,39	17
10	5,2	0	0	0,86	1	0,86	0,40	17
(10) K _r	(11) K _e	(12) E/f _{ew} mm	(13) DP _e mm	(14) D _{e,i} fin mm	(15) E mm/d	(16) K _c	(17) ET _c mm/d	
-	-	-	-	18	-	-	-	
1,00	0,91	5,1	32	5	4,1	1,21	5,5	
1,00	0,90	5,6	0	11	4,5	1,21	6,1	
0,72	0,64	3,1	0	14	2,5	0,97	3,8	
0,41	0,36	1,9	0	16	1,5	0,69	2,9	
0,22	0,19	1,1	0	17	0,9	0,54	2,6	
0,71	0,60	1,8	0	13	1,6	0,96	2,6	
0,52	0,44	2,9	0	16	2,6	0,81	4,7	
0,23	0,19	1,1	0	17	1,0	0,57	2,9	
0,12	0,10	0,5	0	17	0,5	0,49	2,3	
0,07	0,05	0,3	0	18	0,3	0,45	2,4	

- (1) Número del día.
- (2) ET_o es un dato. Nótese que los valores de ET_o serán valores estimados para calendarios de riego en tiempo real, pero serán valores conocidos después de finalizado el día, cuando se estén actualizando los cálculos.
- (3) (P-RO) son valores conocidos después de finalizado el día, cuando se actualicen los cálculos.
- (4) Lámina neta de riego para la parte del suelo que es humedecida por el riego.
- (5) (1-f_c) es un dato conocido (interpolado entre 0,92 m en el día 1 y 0,86 m en el día 10).
- (6) con lluvia significativa: f_{w,i} = 1,0 (Cuadro 20)
con riego: f_{w,i} = 0,8 (valor dado),
de otra forma: f_{w,i} = f_{w,i-1}.
- (7) Ec. 75. Fracción de la superficie del suelo donde ocurre la mayor parte de la evaporación.
- (8) K_{cb} es un valor dado (interpolado entre 0,30 en el día 1 y 0,40 en el día 10).
- (9) D_{e,i inicio} (agotamiento al comienzo del día)
Si la precipitación y el riego ocurren temprano en el día, entonces se deberá actualizar el estado del agotamiento (al comienzo del día) en la capa superficial del suelo:
= Max(D_{e,i-1} - I_n/f_{wi} - (P-RO)_i, o 0). donde D_{e,i-1} se obtiene de la columna 14 del día anterior.
Si la precipitación y el riego ocurren tarde en el día, entonces se debe igualar la columna 6 al valor de D_{e,i-1} (columna 14 del día anterior).
- (10) Si D_{e,i} ≤ AFE K_r = 1 Si D_{e,i} > AFE K_r = Ec. 74.
- (11) Ec. 71 donde K_e = K_r (K_{c max} - K_{cb}) ≤ f_{ew} K_{c max}. (ósea, K_e = min(K_r (K_{c max} - K_{cb}), f_{ew} K_{c max}).
- (12) Evaporación que ocurre en la fracción expuesta y húmeda de la superficie del suelo = (K_e ET_o)/f_{ew}.
- (13) Ec. 79 donde DP_e ≥ 0. (Representa la percolación profunda de la capa evaporante).
- (14) D_{e,i} (agotamiento al final del día) calculado con la Ec. 77, donde D_{e,i-1} es el valor en la columna 14 para el día anterior.
- (15) Evaporación media expresada como lámina distribuida sobre la totalidad de la superficie del suelo = K_e ET_o.
- (16) K_c = K_{cb} + K_e.
- (17) Ec. 69.

El cálculo del balance diario de humedad en la capa superficial del suelo, incluso para el caso de cultivos de raíces poco profundas, es en general insensible al valor de T_{ew} , debido a que T_{ew} representa una parte pequeña del flujo que ocurre en la capa Z_e durante los primeros 3-5 días después de un evento de humedecimiento. Por lo tanto se puede, en general, ignorar el valor de T_{ew} . Alternativamente, una forma de considerar los efectos de la reducción del contenido de humedad en la capa evaporante del suelo debido a T_{ew} , cuando se ha asumido que $T_{ew} = 0$, es mediante la reducción del valor de Z_e , por ejemplo de 0,15 a 0,12 m o de 0,10 a 0,08 m.

Percolación profunda

Después de la ocurrencia de una lluvia intensa o riego, el contenido de humedad en la capa superficial del suelo (capa Z_e) podría exceder al valor de capacidad de campo. Sin embargo, según este procedimiento simple, se asume que el contenido de humedad del suelo será igual a θ_{FC} inmediatamente después de la ocurrencia del evento completo de humedecimiento, por lo que el valor del agotamiento $D_{e,i}$ en la Ecuación 77 será igual a cero. El drenaje (percolación) del agua que se produce a partir de la capa superficial del suelo se calcula de la siguiente forma:

$$DP_{e,i} = (P_i - RO_i) + \frac{I_i}{f_w} - D_{e,i-1} \geq 0 \quad (79)$$

Mientras el contenido de humedad en la capa evaporante del suelo se encuentre por debajo de la capacidad de campo (es decir, $D_{e,i} > 0$), no se habrá drenaje de agua en la capa superficial del suelo y $DP_{e,i} = 0$.

Orden de los cálculos

Cuando se realicen los cálculos correspondientes al procedimiento del $K_{cb} + K_e$, por ejemplo cuando se aplique a través de una hoja de cálculo, los cálculos deberán seguir el siguiente orden: K_{cb} , h , $K_{c\ max}$, f_c , f_w , f_{ew} , K_r , K_e , E , DP_e , D_e , I , K_c y ET_c .

CÁLCULO DE ET_c

El procedimiento de cálculo requiere del uso del computador, bien sea en la forma de una hoja de cálculo electrónica (Ejemplo 35) o en la forma de un programa estructurado de programación. El procedimiento de cálculo consiste en determinar lo siguiente:

a. Evaporación de referencia, ET_o :

Estimar ET_o : el procedimiento de cálculo se describe en el Capítulo 4.

b. Etapas de crecimiento:

Determinar las duraciones de las cuatro etapas de desarrollo, ajustadas según la localidad (para información general consultar el Cuadro 11):

- Etapa inicial de crecimiento: L_{ini} ,
- Etapa de desarrollo del cultivo: L_{des} ,
- Etapa de mediados de temporada: L_{med} ,
- Etapa de final de temporada: L_{fin} .

c. Coeficiente basal del cultivo, K_{cb} :

Calcular el coeficiente basal del cultivo para cada día de la temporada de crecimiento:

- seleccionar $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$ del Cuadro 17;
- ajustar $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$ de acuerdo a las condiciones locales del clima (Ecuación 70);
- determinar los valores diarios de K_{cb}

- etapa inicial de crecimiento: $K_{cb} = K_{cb\ ini}$
- etapa de desarrollo del cultivo: desde $K_{cb\ ini}$ hasta $K_{cb\ med}$ (Ecuación 66),
- etapa de mediados de temporada: $K_{cb} = K_{cb\ med}$
- etapa de final de temporada: desde $K_{cb\ med}$ hasta $K_{cb\ fin}$ (Ecuación 66).

d. Coeficiente de evaporación, K_e :

Calcular el valor máximo de K_e , es decir el límite superior $K_{e\ max}$ (Ecuación 72), y determinar para cada día durante la temporada de crecimiento:

- la fracción del suelo cubierta por la vegetación, f_c (Cuadro 21 o Ecuación 76),
- la fracción del suelo humedecida por el riego o la precipitación, f_w (Cuadro 20),
- la fracción de la superficie del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación, f_{ew} (Ecuación 75),
- el agotamiento acumulado en la capa evaporante del suelo, D_e , determinado a través del balance diario del agua presente en la capa superficial del suelo (Ecuación 77),
- el correspondiente coeficiente de reducción de la evaporación, K_r (Ecuación 74), y
- el coeficiente de evaporación del suelo, K_e (Ecuación 71).

e. Evapotranspiración del cultivo, ET_c :

Calcular $ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o$ (Ecuación 69).

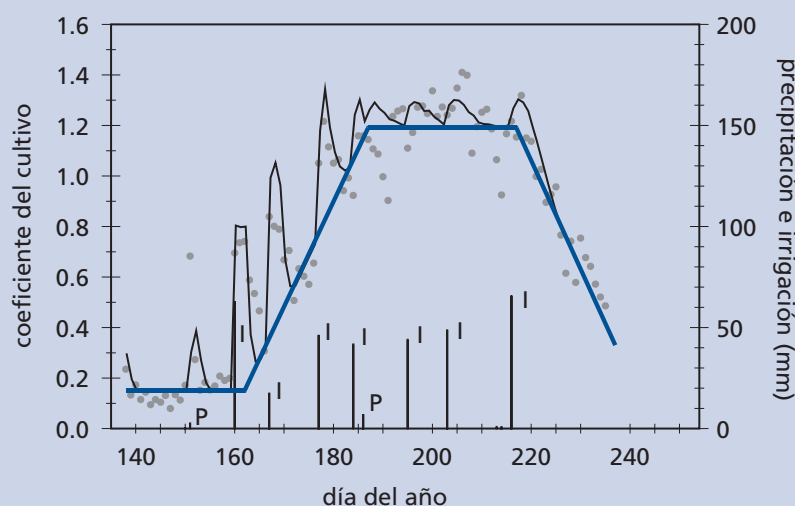
RECUADRO 16

**Caso de estudio de un cultivo de frijol (judías) seco en
Kimberly, Idaho, Estados Unidos (coeficiente dual del cultivo)**

En la figura mostrada abajo se presentan los resultados obtenidos al aplicar el procedimiento de $K_{cb} + K_e$ para un cultivo de frijol (judías) seco cosechado como semilla seca. En este ejemplo se utiliza la misma serie de datos utilizada en el caso de estudio presentado en el Recuadro 15. Los valores de ET_c fueron medidos utilizando un sistema de lisímetro de precisión ubicado en Kimberly, Idaho. Los valores de $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ med}$, y $K_{cb\ fin}$ fueron calculados en el Ejemplo 29 como 0,15, 1,14, y 0,25. Las duraciones de las etapas de crecimiento fueron de 25, 25, 30, y 20 días. En la Fig. 37 se presentan los valores calculados de K_{cb} . El valor promedio de $K_{c\ max}$ calculado a través de la Ec. 72 para la etapa de mediados de temporada fue de 1,24, basado en $u_2 = 2,2\ m\ s^{-1}$ y $HR_{min} = 30\%$ para Kimberly. El suelo de Kimberly presenta una textura franco limosa. Asumiendo que la profundidad de la capa evaporante, Z_e , fue de 0,1 m, se obtuvieron los valores de $AET = 22\ mm$ y $AFE = 9\ mm$, basados en la Ec. 73 y utilizando los datos de suelos del Cuadro 19.

En la figura mostrada abajo se puede observar la ocurrencia y la magnitud de los eventos individuales de humedecimiento. Casi todos los eventos de humedecimiento fueron producto del riego. Debido a que el riego fue aplicado a través de un sistema de riego por surcos con hileras alternas, se considero un valor de f_w de 0,5. Los eventos de humedecimiento ocurrieron alrededor del mediodía o temprano en la tarde.

La concordancia entre los valores diarios estimados de $K_{cb}+K_e$ (línea delgada continua) y las mediciones reales efectuadas cada 24-horas (símbolos) es relativamente buena. Tanto los valores medidos como estimados de $K_{cb}+K_e$ son altos después de la lluvia o el riego, como era de esperarse. Los dos 'picos' de evaporación del suelo húmedo que ocurren tarde en el período inicial y temprano en el período de desarrollo (entre los días 160 y 180) fueron menores que el valor de $K_{c\ max}$, debido a que esta evaporación fue producto del humedecimiento a través del riego por surcos donde $f_w = 0,5$. El valor de f_{cw} fue restringido a f_w según la Ec. 75 durante estos dos eventos, debido a que durante este período, $f_w < 1-f_e$. Por lo tanto, menos que la totalidad de toda la 'energía potencial' fue convertida en evaporación, debido a la limitación de la máxima evaporación por unidad de superficie que es impuesta por la Ec. 71.



Valores medidos (símbolos) y estimados (línea delgada) de los coeficientes diarios ($K_{cb}+K_e$) y la curva basal del cultivo (línea gruesa) para un cultivo de frijol (judías) seco en Kimberly, Idaho. La letra P en la figura señala la presencia de un evento de precipitación y la letra I indica la presencia de un riego (datos suministrados por Wright, 1990).