

Capítulo 8

Consumo y eficiencia en el uso de agua

Laura Echarte

María Elena Otegui

8. Consumo y eficiencia en el uso de agua

Laura Echarte y María Elena Otegui

8.1. Introducción

Dentro de los ambientes que permiten el cultivo de maíz, definidos por un amplio rango de temperaturas y períodos libres de heladas (Capítulo 12), la disponibilidad de agua para el cultivo es el principal factor que limita su producción (Andrade y Satorre, 2015; Aramburu Merlos et al., 2015), principalmente en condiciones de siembra temprana. El aporte adicional de agua por medio de riego permitiría incrementar considerablemente el rendimiento en grano (RG) de maíz a nivel mundial, con variaciones entre regiones atribuidas principalmente al aporte de agua por precipitación (Wang et al., 2021). Meng et al. (2016) estimaron una disminución de $0,17\% \text{ mm}^{-1}$ en el rendimiento relativo (i.e., $\text{RG seco}/\text{RG riego}$) cuando la precipitación durante la estación de crecimiento disminuyó por debajo de 462 mm en el cinturón maicero chino. El rendimiento fue nulo en ambientes con precipitaciones anuales menores o iguales a 240 mm en esa región. Para el Sudeste de Buenos Aires, Calviño et al. (2003) destacaron que bajas precipitaciones durante el período crítico de determinación del número de granos promovían fuertes reducciones del rendimiento. La alta sensibilidad del rendimiento del maíz ante las deficiencias hídricas destaca la importancia de comprender la influencia del recurso agua en la determinación del rendimiento (Shaw, 1988). En este capítulo se abordarán los aspectos determinantes del consumo de agua y de la eficiencia en el uso de la misma, con especial atención a la influencia de prácticas de manejo en ambientes contrastantes en disponibilidad hídrica.

8.2. Consumo de agua y factores que lo afectan

El consumo de agua o evapotranspiración del cultivo (ETc) es la suma de dos procesos de transferencia de agua desde una superficie cultivada hacia la atmósfera: por un lado, la evaporación directa desde el horizonte superficial del suelo y la superficie de las plantas (Es), y por otro la transpiración (T) a través de los tejidos vegetales. Tanto desde el suelo como a través de las plantas, el movimiento de agua es inversamente proporcional a las resistencias al flujo y directamente proporcional a la diferencia de potencial agua entre la matriz del suelo (potencial agua más alto) y la atmósfera (potencial más bajo). En la planta, el flujo de agua ocurre en fase líquida hasta la cavidad subestomática y luego como flujo de vapor de agua a través de los estomas. La Es es una pérdida de agua generalmente descrita como 'improductiva' pues no se asocia con la generación de biomasa, mientras que el agua consumida por T se encuentra estrechamente relacionada con dicho proceso (Pasioura y Angus, 2010). Esta relación se puede describir según criterios de captura

y uso de recursos similares a los utilizados para el aprovechamiento de la radiación solar (Capítulo 3) y que se discutirán más adelante en este capítulo.

El consumo de agua es principalmente afectado por la demanda evaporativa del ambiente (Allen et al., 1998), por características del cultivo asociadas en particular a su cobertura (Al-Kaisi et al., 1989; Villalobos y Fereres, 1990; Rhoads y Bennett, 1990) y por la disponibilidad de agua en el suelo (Allen et al., 1998). Cuando no existen restricciones hídrico-nutricionales y la E_{Tc} corresponde a la máxima que puede alcanzar el cultivo, se han determinado para maíz valores que varían entre 450 y 900 mm para toda la estación de crecimiento (Brouwer y Heibloem, 1986; Howell et al., 1997; Heatherly y Ray, 2007; Facchi et al., 2013; Nagore et al., 2014; Hernández et al., 2015; Curín et al., 2020; Marek et al., 2020). Esta gran variación se encuentra determinada, principalmente, por el ambiente como modulador de la demanda y oferta hídrica. En cuanto a la demanda, la radiación solar es la principal fuente de energía para que se produzca el pasaje de líquido a vapor en el proceso de evaporación, y en menor grado la temperatura del aire. La fuerza motriz del proceso es la diferencia entre la presión de vapor en la superficie evaporante y la presión de vapor del aire que la rodea o déficit de presión de vapor (DPV). A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y el proceso se vuelve cada vez más lento, hasta detenerse si el aire saturado no se remueve. La remoción del aire saturado y su reemplazo por aire más seco depende de la velocidad del viento (Allen et al., 1998). Entonces, la demanda evaporativa del ambiente o evapotranspiración potencial (ETP) combina el efecto de la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. La ETP puede ser caracterizada a través de la evapotranspiración de referencia (E_{To}), que representa el consumo de agua de una pastura de 12 cm, en activo crecimiento, que cubre completamente el suelo y sin limitaciones hídricas ni nutricionales (Allen et al., 1998). Generalmente se carece de esta información y el dato de ETP se obtiene a partir de fórmulas (e.g. Penman-Monteith, Priestley-Taylor) que permiten estimar la E_{To} (Dardanelli et al., 2003). Así, por ejemplo, la ETP media del mes de diciembre, promedio de los últimos 30 años (1990-2019), es mayor en Pergamino (5,5 mm d⁻¹; menor latitud) que en Balcarce (4,8 mm d⁻¹; mayor latitud). En coincidencia, bajas demandas evaporativas usualmente corresponden a ambientes húmedos y frescos de altas latitudes, típicamente representados por países europeos (Facchi et al., 2013) y el centro-norte de EEUU (e.g. Minnesota). La demanda atmosférica a lo largo del ciclo también puede variar entre localidades con radiación neta similar pero diferente DPV (e.g. aumentando de este a oeste a una misma latitud en la región Pampeana) o por efecto de prácticas de manejo como la fecha de siembra (Figura 8.1A).

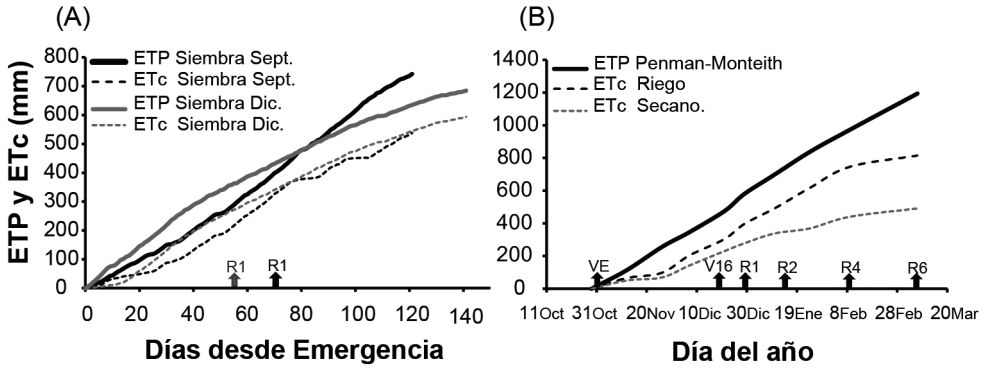


Figura 8.1. Evolución de los valores acumulados de evapotranspiración potencial (ETP) y evapotranspiración de un cultivo de maíz (ETc) para el período entre emergencia (VE) y madurez fisiológica (R6). Los datos corresponden a la localidad de Pergamino para (A) dos épocas de siembra contrastantes y (B) dos condiciones de disponibilidad hídrica (riego y secano). En ambos casos la densidad fue de 8 plantas m⁻² y el suelo un Argiudol típico. Los datos en (A) se obtuvieron por simulación para la campaña 2013-2014 (fase neutra del fenómeno ENOS) con el modelo CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986) y una profundidad de suelo de 1,85 m. Los datos en (B) se obtuvieron mediante balance hídrico a partir de seguimiento de humedad edáfica hasta 1,80 m para una siembra del 20 de octubre durante la campaña 2021-2022 (fase *La Niña* del fenómeno ENOS; Otegui, datos no publicados).

La ETc máxima también varía por características del cultivo como el área foliar y la altura de planta, que definen la ‘rugosidad’ del canopeo y las resistencias al flujo de agua (Allen et al., 1998). Los efectos de las características del cultivo que lo distinguen de la ETo se integran en el coeficiente del cultivo ($Kc = ETc \text{ máxima} / ETP$; Figura 8.2). La tasa de evapotranspiración desde la siembra hasta aproximadamente cuando el cultivo alcanza el 10% de cobertura es afectada por los factores que controlan la evaporación desde el suelo (i.e., radiación solar incidente y humedad del horizonte superficial; Allen et al., 1998; Jensen y Allen, 2016). En esta etapa el Kc toma siempre valores menores a 1 (Figura 8.2). A medida que avanza el ciclo del cultivo el consumo de agua se incrementa en proporción al aumento en área foliar hasta un valor de $IAF \approx 3$, en que el cultivo alcanza $\approx 75\text{-}80\%$ de cobertura (Brun et al., 1972; Al-Kaisi et al., 1989; Villalobos y Fereres, 1990; Suyker y Verma, 2008; Pereira et al., 2020). En la etapa de máxima cobertura ($IAF \geq IAFc$; Capítulo 3) el Kc alcanza su valor máximo (Allen et al., 1998; Howell et al., 1997; Della Maggiora et al., 2003; Figura 8.2), para volver a decrecer a valores menores de 1 cuando el cultivo comienza a senescer (Steduto y Hsiao, 1998; Della Maggiora et al., 2003; Jensen y Allen, 2016; Figura 8.2). Si bien el patrón general es bastante constante, los valores estimados de Kc pueden variar entre ambientes y dentro de un mismo ambiente (Figura 8.2). Estas variaciones están fuertemente asociadas con la aproximación utilizada para estimar la ETP, pues distintas fórmulas difieren en las variables incluidas en el cálculo. Por un lado, la elección de la fórmula puede ser

particularmente crítica en algunos ambientes (e.g. utilizar aquellas que soslayan el contenido de humedad del aire en ambientes áridos). Por otro lado, la fuerte variación nos alerta sobre el mayor riesgo de incurrir en errores de estimación de la ETC al utilizar valores de K_c obtenidos en ambientes muy contrastantes del ambiente objetivo, más aún si desconocemos la aproximación utilizada para estimar la ETP. En general, los valores máximos de K_c para maíz derivados de calcular la ETP por Penman-Monteith oscilan entre 1,1 y 1,4 para los ambientes de la región Pampeana húmeda (Figura 8.2)

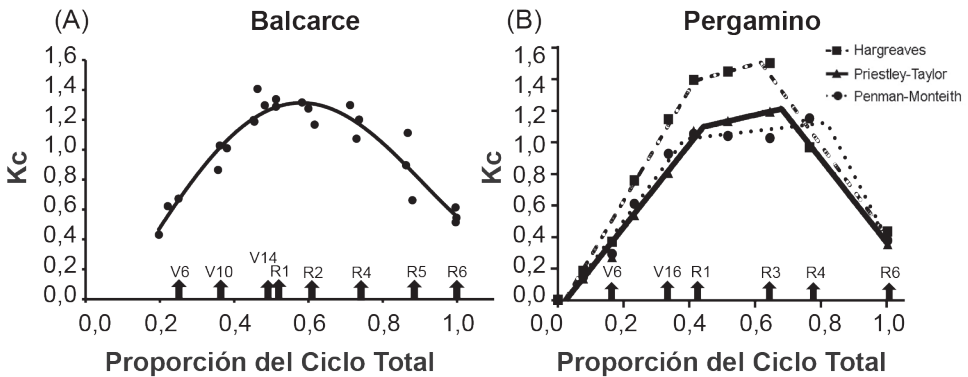


Figura 8.2. Evolución a lo largo del ciclo de la relación entre la ETC de maíz creciendo sin restricciones hídrico-nutricionales y la ETP ($K_c = ETC / ETP$). Los datos corresponden a dos ambientes (Balcarce y Pergamino). La duración del ciclo está expresada como proporción del ciclo total (estimado en tiempo térmico) y las flechas indican los estados fenológicos. Cada punto representa el valor medio de 3 repeticiones. Para Balcarce se combinaron datos de tres campañas agrícolas y la ETP se estimó por Penman-Monteith (Della Maggiora et al., 2003). Para Pergamino los datos son de una campaña y la ETP fue estimada por tres métodos (Otegui, datos no publicados). Para todos los modelos, $R^2 \geq 0,91$ ($P < 0,05$).

La ETC también se asocia fuertemente con la oferta de agua (Figura 8.1B). Cuando el agua disponible en el suelo para las plantas (ADP: porción contenida entre capacidad de campo y punto de marchitez) se encuentra por encima de un umbral crítico, el consumo de agua puede alcanzar sus valores máximos de acuerdo a la cobertura del cultivo y a la demanda evaporativa del ambiente. Disminuciones del ADP por debajo del umbral crítico (ADPu), resultan en deficiencias de agua que promueven reducciones en la ETC. Allen et al. (1998) indican para maíz que la ETC puede disminuir a partir de un ADPu de 0,55. Valores similares fueron encontrados por Ray y Sinclair (1997), quienes además determinaron diferencias entre híbridos en los umbrales de fracción de agua disponible por debajo de los cuales se limita la transpiración (Figura 8.3A). Sin embargo, se ha establecido un rango amplio (0,07 a 0,85) de ADPu (Grant et al., 1989; Sadras y Milroy, 1996; Ray y Sinclair, 1997), atribuible a las diferentes aproximaciones utilizadas en su determinación (e.g. diferentes estados fenológicos, condiciones de demanda evaporativa, tipo de suelo, profundidad de medición de agua en el suelo, macetas o campo).

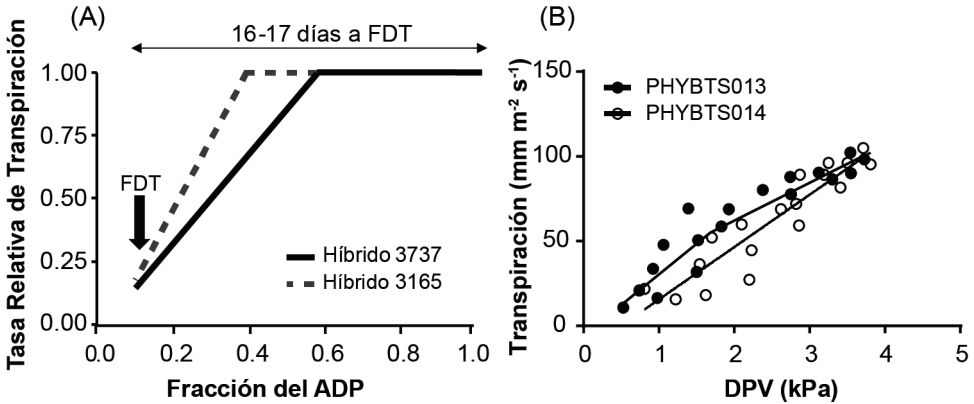


Figura 8.3. Diferencias genotípicas en la respuesta de (A) la tasa de transpiración relativa a la fracción de agua disponible para las plantas (ADP)(Adaptado de Ray y Sinclair, 1997), y (B) la tasa de transpiración al déficit de presión de vapor (DPV)(Adaptado de Gholipoor et al., 2013). FDT: fin del tratamiento de restricción hídrica, cuando ADP= 0,12.

Las deficiencias de agua en el suelo provocan fluctuaciones en el continuo de potenciales agua suelo-hoja, que reducen la turgencia celular, la conductividad hidráulica de la planta y el movimiento estomático. Los procesos de expansión de tejidos (e.g. elongación foliar, elongación de entrenudos) son más sensibles a deficiencias hídricas de igual intensidad, duración y momento de ocurrencia que aquellos dependientes del intercambio gaseoso (e.g. transpiración y fotosíntesis (e.g. transpiración y fotosíntesis, Capítulo 3), por lo que $ADP_{expansión} > ADP_{transpiración}$ (Boyer, 1970; Sadras y Milroy, 1996). No obstante, las respuestas relativas entre reducción de interceptación asociada con una caída del IAF y reducción de transpiración a causa de una menor conductancia del canopeo (g_c) pueden variar al integrar todo el ciclo de cultivo, determinando que la proporción de radiación incidente interceptada debido a reducciones del IAF se vea menos afectada que la transpiración (Hernández et al., 2020, 2021) y la producción de biomasa (Muchow, 1989).

El maíz es una especie isohídrica (Tardieu y Simmoneau, 1998), es decir que mantiene altos potenciales agua en la hoja a través del control estomático, el cual involucra señales hidráulicas y no hidráulicas. Las hidráulicas se dan en respuesta directa a la reducción de turgencia provocada por el déficit hídrico, lo cual provoca la síntesis local de la fitohormona ácido abscísico (ABA). Estas señales permiten explicar reacciones rápidas como la reducción de la fotosíntesis alrededor del mediodía en suelos bien provistos de agua (Salah y Tardieu, 1997; Christmann et al., 2013). Las no hidráulicas son mediadas principalmente por ABA derivado de síntesis en raíces expuestas a suelos sujetos a un proceso de desecación (Barhun et al., 2002, Tardieu et al., 2010). Suelos secándose aumentan la concentración de ABA en el

xilema y en las hojas (Tardieu et al., 1992); este aumento de concentración de ABA en el xilema reduce la expansión foliar (Cramer y Quarrie, 2002) y promueve el cierre estomático. Esto resulta en disminuciones de g_c , que reducen la transpiración y evitan caídas pronunciadas en el potencial agua. A su vez, los efectos del ABA en el mantenimiento del estado hídrico estarían parcialmente mediados por la actividad de acuaporinas (i.e., proteínas mediadoras del pasaje de agua a través de las membranas celulares; Parent et al., 2009). En este sentido se ha demostrado, para el cultivo de maíz, que las acuaporinas influyen sobre la conductividad hidráulica de las raíces y promueven cambios en la turgencia celular y elongación de las hojas (Ehlert et al., 2009). Por otro lado, limitaciones a la transpiración, además de ser mediadas por una baja disponibilidad de agua en el suelo, pueden ocurrir ante incrementos en el DPV (Lambers et al., 2008). En este sentido, Gholipoor et al. (2013) demostraron que algunos genotipos de maíz presentan un umbral de DPV por encima del cual se limita la tasa de transpiración. (Figura 8.3B).

8.2.1. El sistema radical y la captación de agua

La capacidad del sistema radical de captar agua y abastecer la demanda atmosférica instalada sobre el canopeo determina el estado hídrico del cultivo (van Oosterom et al., 2016). La captación de agua se encuentra estrechamente relacionada con la arquitectura del sistema radical, es decir con su configuración espacial o despliegue geométrico (Lynch, 1995). El sistema radical se desarrolla principalmente entre la siembra y R2 (McCully, 1999), que es cuando alcanza su máxima profundidad (Figura 8.4; Capítulo 3). Para suelos sin limitaciones al crecimiento de raíces, la evolución de la profundización del enraizamiento sigue un patrón sigmoideo temporalmente similar al de generación del área foliar. Suelos con mayor densidad aparente (suelos francoarcilloso-limosos de la región Pampeana argentina respecto a los francos de Iowa, EEUU) y menores temperaturas (e.g., altas latitudes comparadas con bajas latitudes, siembras tempranas respecto a tardías) pueden retrasar el crecimiento de las raíces (Figura 8.4.) y modificar su velocidad de profundización (VPR). Las estimaciones de máxima VPR se encuentran en un rango entre 2,4 y 3,4 cm d^{-1} y son alcanzadas entre 43 y 56 días desde la siembra en ambientes templados (Otegui et al., 2021). La máxima profundidad de raíces y la abundancia de raíces en cada capa de suelo varían con las condiciones ambientales. Por ejemplo, en un Argiudol típico con buena humedad, el 90% del agua extraída por las raíces se concentró en los primeros 0,8 m hasta la fase V10, progresando a 1,0 m en R1 y a 1,2 m en R6 (Gardiol et al., 1997). Similarmente, otros autores también han reportado que la mayor proporción de agua extraída ocurre hasta 1 m de profundidad (Roth et al., 2013; Hao et al., 2019), pero con alta concentración en el primer horizonte franco (30-50 cm) si el subyacente es fuertemente arcilloso, como en el caso del Bt de los argiudoles (Otegui et al., 1995). La profundidad del enraizamiento se incrementa en la medida que disminuye el agua disponible en el suelo (Dwyer et al., 1988). En este sentido, la profundidad de enraizamiento puede alcanzar 2,25 m

en suelos francos (Haplustoles típicos) cuando son expuestos a sequías terminales en un ambiente de latitudes medias (Dardanelli et al., 1997). Si bien la capacidad de extracción de agua disminuye en profundidad y con el aumento de la texturalidad, el segundo metro de profundidad puede representar una contribución muy importante al consumo total aún en Argiudoles típicos de la región Pampeana Central (Figura 8.4). Las raíces pueden atravesar capas densas cuando están húmedas o traspasarlas a través de grietas cuando los suelos se secan (Dardanelli et al., 2004). Sin embargo, capas con una alta densidad aparente pueden evitar la proliferación de raíces y afectar la extracción de agua en esa capa (Dardanelli et al., 2004) y subyacentes (Carretero et al., 2014), como ocurre en respuesta a largos períodos de agricultura continua (Cárcova et al., 2000) o a la labranza (Díaz-Zorita et al., 2002; Taboada y Alvarez, 2008).

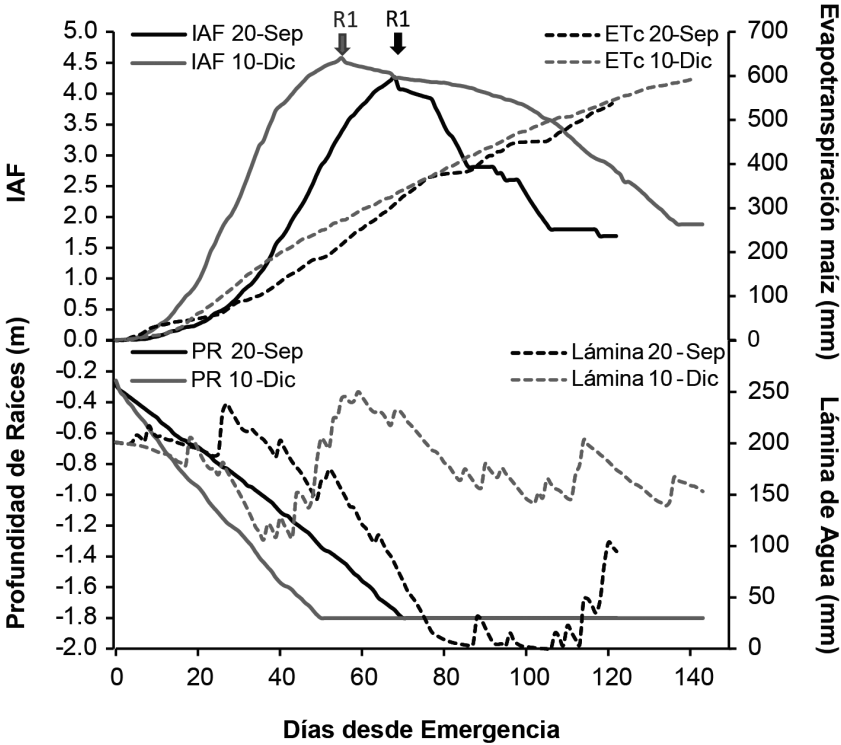


Figura 8.4. Evolución estimada de la profundidad de enraizamiento (PR) y generación de área foliar (IAF) de cultivos de maíz creciendo en secano bajo dos fechas de siembra contrastantes (20-Septiembre y 10-Diciembre) sobre un suelo Argiudol típico de Pergamino durante 2013-2014 (fase neutra del fenómeno ENOS). Se indica la evolución de la lámina de agua hasta 1,8 m de profundidad de suelo y la evapotranspiración del cultivo (ETc). Las estimaciones se realizaron con el modelo CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986).

8.2.2. Influencia del mejoramiento sobre la ET y la captación de agua

Híbridos actuales de maíz presentaron un consumo de agua similar al de híbridos antiguos, tanto en condiciones de secano como en condiciones sin limitación de agua en el suelo (Nagore et al., 2014; Curin et al., 2020). En concordancia, el requerimiento hídrico no se incrementó en híbridos liberados en EEUU en los últimos 50 años (Reyes et al., 2015; Marek et al., 2020).

El sistema radical de maíz se modificó a través del tiempo (Messina et al., 2021); los híbridos dobles (antiguos) presentaron mayor longitud radical y un sistema radical más expandido lateralmente en las capas superficiales que los híbridos simples (modernos). Sin embargo, estos cambios en la arquitectura del sistema radical no afectaron la capacidad de extracción de agua del suelo. Por otro lado, demostraron que los genotipos de maíz presentan diferencias en la proporción de aerénquima cortical en las raíces (i.e., tejido con grandes espacios intercelulares) y que una mayor proporción de este tipo de tejidos en las raíces reduce los costos metabólicos de exploración del suelo, por lo que puede ser considerado un carácter de utilidad para el mejoramiento de maíz para una mayor tolerancia al estrés hídrico.

8.3. Eficiencia en el uso del agua

Existe un consenso general respecto a utilizar una aproximación basada en el uso de recursos para interpretar la determinación del RG. Cuando no existen restricciones hídricas ni nutricionales para la determinación del rendimiento, el mismo depende de la eficiencia de captura y uso de la radiación para producir biomasa y de la proporción de la misma que es asignada a producir granos (Capítulo 3). Cuando se trabaja en condiciones de secano, con un correcto manejo sanitario y nutricional, se explora el denominado rendimiento alcanzable limitado por agua. En estos casos, para maximizar el rendimiento en grano es necesario combinar el mayor consumo de agua posible con una alta eficiencia en el uso del agua (EUA). Utilizando este criterio, el rendimiento en grano se puede expresar como el producto entre el consumo de agua durante la estación de crecimiento y la eficiencia con la que el agua consumida es utilizada para producir grano (Viets, 1962; Howell, 2001). Así, se pueden establecer diferentes aproximaciones (Ecuaciones 8.1-8.3) según la información disponible y el objetivo del análisis (Sinclair et al., 1984).

$$RG = ET_c \times EUA_{B,ETc} \times IC \quad (8.1)$$

$$RG = T \times EUA_{B,T} \times IC \quad (8.2)$$

$$RG = ET_c \times EUA_{G,ETc} \quad (8.3)$$

La EUA puede referirse entonces a la capacidad para producir biomasa (EUA_B) o directamente grano (EUA_G) por cada unidad de agua consumida, pudiendo a su vez estar basada en la ET_c ($EUA_{B,ETc}$ y $EUA_{G,ETc}$) o en la transpiración de las plantas ($EUA_{B,T}$). La producción de biomasa está más estrechamente asociada con T que

con ET_c ya que la segunda incluye una cantidad de agua 'improductiva' de magnitud variable (la E_s). Por otro lado, la EUA_G presenta generalmente mayor variabilidad que la EUA_B debido a que el IC es inestable en maíz en condiciones de secano. Estos aspectos se discuten a continuación.

8.3.1. Factores que afectan la EUA

Los factores que influyen a la $EUA_{G,ET}$ son (i) la proporción de transpiración respecto a la ET_c , (ii) la capacidad de producir biomasa por unidad de agua transpirada ($EUA_{B,T}$) o eficiencia de transpiración, y (iii) la partición de biomasa a estructuras reproductivas.

Proporción de transpiración y evaporación respecto a ET_c (E_s/ET_c y T/ET_c)

Como se indicó en secciones previas, la transpiración es el proceso del consumo de agua que se asocia estrechamente con la producción de biomasa (Passioura y Angus, 2010). En cambio, la evaporación implica una pérdida no productiva de agua, principalmente, desde la superficie del suelo, por lo que una menor proporción de E_s/ET_c se ha asociado con incrementos en la EUA_{G,ET_c} (Rattalino-Edreira et al., 2018). Diversos trabajos indican que la contribución de la evaporación al consumo total de agua durante el ciclo del cultivo de maíz es del orden del 30% (Liu et al., 2002; Kang et al., 2003; Alberto et al., 2014). La evaporación es afectada por la disponibilidad de agua en las capas superficiales de suelo y por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo (Ritchie, 1972). Así, en ambientes con baja frecuencia de precipitaciones, hay una limitación a la evaporación (Van Dook et al., 2010) que contribuye a una mayor proporción T/ET_c . A su vez, a medida que avanza el ciclo del cultivo e incrementa el índice de área foliar (IAF) disminuye la radiación solar incidente sobre el suelo y, en consecuencia, se reduce E_s/ET_c respecto a T/ET_c (Allen et al., 1998; Liu et al., 2002; Alberto et al., 2014; Jensen y Allen, 2016).

Eficiencia de transpiración ($EUA_{B,T}$)

Este término se refiere a la cantidad de biomasa producida relativa a la cantidad de agua perdida exclusivamente a través de la transpiración (Sinclair et al., 1984). Para maíz se han reportado valores máximos de $EUA_{B,T}$ entre $54,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Grassini et al., 2009) y $82 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Otegui et al., 1995) que conllevarían a pérdidas mínimas por E_s durante el ciclo del cultivo (entre 25 mm y 123 mm). La transpiración es principalmente afectada por la conductancia estomática (g_s) (que determina, entre otras variables, la conductancia del canopeo) y el gradiente de concentración de vapor de agua entre el interior y el exterior de la hoja (DPV). Así, altos DPV implican usualmente un aumento de la transpiración (Figura 8.3B) sin cambio en la fijación de carbono, con la consecuente disminución de la $EUA_{B,T}$. Por el contrario, la disminución en la conductancia estomática en respuesta a una

disminución en el contenido hídrico del suelo afecta proporcionalmente más a la transpiración (sólo una de las dos resistencias involucradas en el flujo de agua desde el mesófilo hacia la atmósfera) que a la fijación de carbono (sólo una de las tres resistencias involucradas en la fijación de CO_2 desde la atmósfera) mejorando la $\text{EUA}_{\text{B,T}}$ (Lambers et al., 2008). Las deficiencias hídricas pueden reducir la $\text{EUA}_{\text{B,T}}$ por factores no estomáticos (Capítulo 3).

Partición de biomasa a estructuras reproductivas (IC)

El rendimiento del cultivo de maíz es altamente sensible a deficiencias hídricas, particularmente cuando éstas ocurren en el período cercano a la floración (Figuras 8.5A,B). Como se ha analizado previamente (Capítulo 4), la partición de biomasa a estructuras reproductivas es afectada primeramente por la capacidad del cultivo de crecer durante el período crítico de determinación del número de granos (NG). El NG es el componente numérico que se asocia en mayor medida con las variaciones en el rendimiento del cultivo de maíz en respuesta a déficits hídricos que tienen lugar alrededor de la floración (Hall et al., 1981), y este componente responde de manera curvilínea ante incrementos en la tasa de crecimiento del cultivo en el período crítico (TCCpc) (Tollenaar et al., 1992; Andrade et al., 1999; Capítulo 4). Por lo tanto, cambios en la disponibilidad hídrica que causen variaciones en la TCCpc afectan directa o indirectamente el NG y, consecuentemente, el rendimiento (Capítulo 4; Andrade et al., 2002; Echarte y Tollenaar, 2006)(Figura 8.5C). No obstante este patrón general de respuesta del rendimiento a deficiencias hídricas durante el período crítico a través de cambios en el NG, en este período también se establece el tamaño potencial del grano (Capítulo 5). Así, un estrés en esta etapa también puede afectar el rendimiento a través de reducciones del PG final aún si las condiciones hídricas son favorables durante el llenado activo del grano. Adicionalmente, deficiencias hídricas que afecten el crecimiento durante el llenado del grano producirán una reducción proporcionalmente equivalente en el PG (Borrás et al., 2004; Capítulos 5 y 6).

8.3.2. Influencia del mejoramiento sobre la $\text{EUA}_{\text{G,ET}}$

La $\text{EUA}_{\text{G,ET}}$ de híbridos modernos de maíz es mayor que la de híbridos antiguos liberados en la década del 80 (Nagore et al., 2017; Curín et al., 2020). Curín et al (2020) informaron aumentos de $\text{EUA}_{\text{G,ET}}$ del 0,5% por año para híbridos liberados en Argentina entre 1980 y 2012. Así, híbridos liberados en Argentina en la década de 2000 y 2010, sin limitaciones de agua ni deficiencias de nutrientes, presentaron $\text{EUA}_{\text{G,ET}}$ del orden del 21 al 26,4 $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ mientras que la $\text{EUA}_{\text{G,ET}}$ de híbridos liberados en la década de 1980 fue del orden de 18 a 21 kg ha mm^{-1} en ambientes no limitados por agua. La mayor ventaja en $\text{EUA}_{\text{G,ET}}$ de los híbridos modernos respecto de los antiguos fue en ambientes limitados por agua (Nagore et al., 2017), principalmente asociado a una mayor capacidad de fijar granos ante similares consumos de agua en el período crítico.

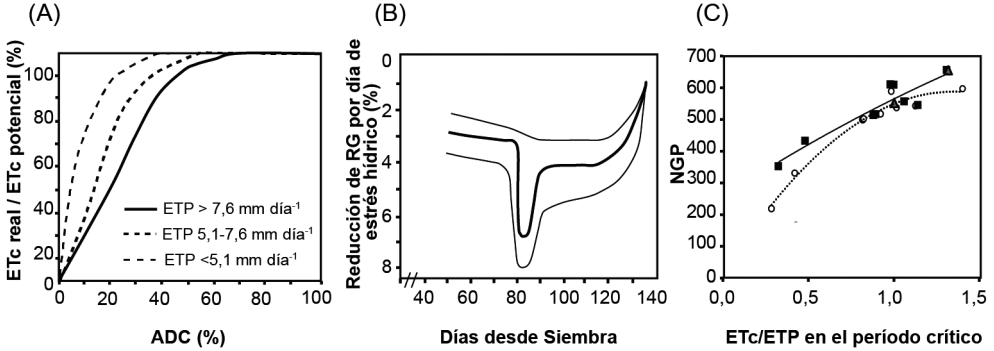


Figura 8.5. (A) Respuesta de la tasa relativa de evapotranspiración del cultivo ($ETc\ real/ETc\ potencial$) para diferentes niveles de agua disponible (ADC) y demanda atmosférica previa a la floración. La demanda está caracterizada por la evapotranspiración potencial (ETP). (B) Reducción porcentual del rendimiento en grano (RG) en respuesta a la ocurrencia de un día de estrés hídrico según el estado ontogénico del cultivo. El cómputo de día de estrés deriva de (A) y se obtiene como $[Índice\ de\ Estrés = 1 - ETc\ real/ETc\ potencial]$. La línea central gruesa representa el valor promedio y las adyacentes finas los valores extremos. (C) Número de granos por planta (NGP) en función de la evapotranspiración diaria media del cultivo (ETc) en el período crítico de determinación del NG, estandarizada por la ETP del mismo período, para dos híbridos modernos (cuadrados negros) y un híbrido antiguo (cuadrados blancos), en condiciones contrastantes de agua en el suelo durante cuatro campañas en Balcarce. (A) y (B) adaptados de Shaw (1988). (C) adaptado de Nagore et al. (2017).

8.4. Recomendaciones para maximizar el rendimiento en función del recurso agua

A lo largo de este capítulo se han analizado los principales procesos que determinan el consumo y uso del agua para producir biomasa y grano por parte de un cultivo de maíz. Los mismos se sintetizan en el diagrama de la Figura 8.6. A continuación se discutirán brevemente algunas pautas de manejo del cultivo para maximizar el rendimiento en grano según el nivel de oferta hídrica. En otros capítulos se evaluarán en más profundidad los aspectos relativos al mejoramiento genético orientado a ambientes proclives a estrés hídrico.

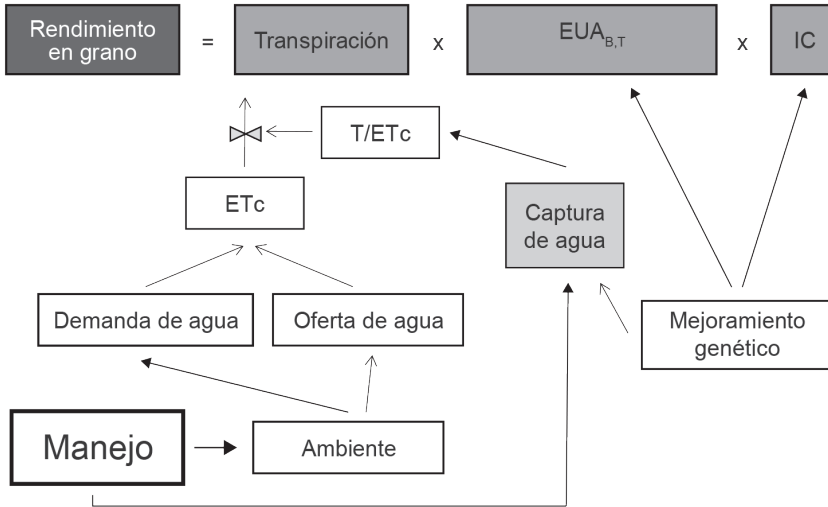


Figura 8.6: Síntesis de la determinación del rendimiento en grano de maíz a través de los procesos modulados por el consumo de agua. ET_c: evapotranspiración del cultivo; EUA_{B,T}: eficiencia en el uso del agua transpirada para producir biomasa; IC: índice de cosecha; T: transpiración.

8.4.1. Manejo del cultivo en condiciones sin limitaciones de agua

De lo expuesto anteriormente, resulta evidente que en ambientes sin limitaciones hídricas, el mayor rendimiento en grano se obtendrá a partir de la maximización del consumo de agua y de la EUA_{G,ETc}. Así, prácticas de manejo que incrementen la cobertura del cultivo y la intercepción de radiación, aumentan el consumo de agua (Xu et al., 2018; Hernández et al., 2015; 2020). En este sentido, varios trabajos destacaron que el suministro de nitrógeno (N) (Pandey et al., 2000; Ogola et al., 2002; Adamtey et al., 2010) o el aumento en la densidad de plantas (Tambascio et al., 2002; Jiang et al., 2014; Hernández et al., 2020) incrementaron el consumo de agua en maíz. En Balcarce se registraron aumentos en el consumo de agua del orden del 3 al 8% que se asociaron estrechamente con el incremento en intercepción de radiación logrado por el suministro de N (Hernández, et al., 2015). Asimismo, ante aumentos en la densidad de plantas que representaron cambios significativos en la intercepción de radiación por el cultivo (por ejemplo, ante incrementos de 4 a 8 plantas m⁻²) se registraron aumentos del consumo de agua del orden del 8% (Hernández et al., 2020). Por su parte, híbridos de mayor largo de ciclo de crecimiento presentaron mayores consumos de agua que híbridos de menor duración, asociado principalmente con una mayor duración del área foliar verde y no con mayores máximos de tasas de consumo de agua diaria (Howell et al., 1997).

Dada la alta sensibilidad del rendimiento en grano de maíz a la disponibilidad hídrica, prácticas de manejo del cultivo que incrementen la cobertura del suelo tienen el potencial de reducir el componente evaporación y aumentar la proporción de transpiración en la ETC, mejorando así uno de los tres procesos que influyen a la $EUA_{G,ETc}$. Prácticas de manejo que mantienen residuos en superficie (Greb, 1966; Adams et al., 1976) disminuyen la cantidad de radiación solar directa que llega al suelo y pueden disminuir la evaporación respecto de suelos descubiertos (Steiner, 1989). En particular, el efecto de la cobertura del suelo sobre la reducción de la evaporación es mayor en ambientes con alta frecuencia de eventos de mojado (Van Dock et al., 2010; Monzón et al., 2006). También, varios trabajos destacaron que el uso de cubiertas plásticas en el suelo mejora la $EUA_{G,ETc}$ (e.g. Zhang et al., 2017; Yu et al., 2018). Por otra parte, prácticas de manejo como la fertilización con N o el incremento en la densidad de plantas, que resultan en un aumento en la intercepción de radiación solar por el cultivo, mejoran la proporción de transpiración en ETC (Hernández et al., 2015, 2020; Figura 8.7A) y contribuyen al aumento de $EUA_{G,ETc}$ (Al-Kaisi y Yin, 2003; Lamm et al., 2008; Ritchie y Basso, 2008; Hernández et al., 2015; 2020).

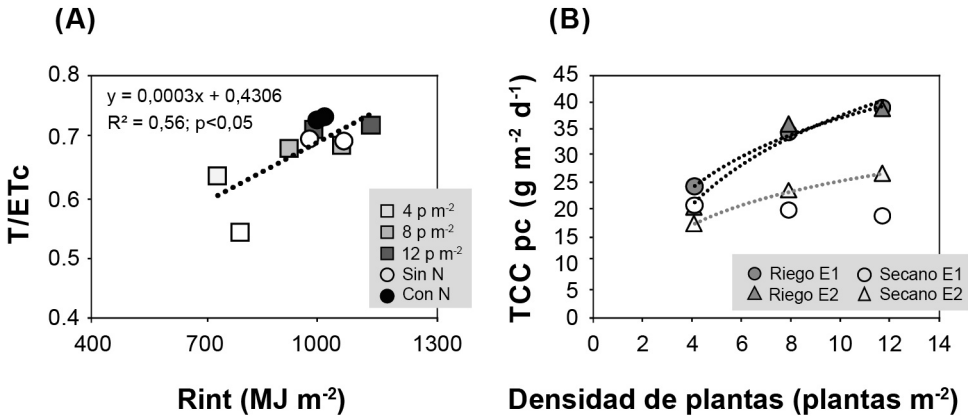


Figura 8.7. (A) Proporción de transpiración respecto al consumo total del cultivo (T/ETc) en función de la radiación fotosintéticamente activa interceptada acumulada (Rint) durante el ciclo de cultivos de maíz creciendo en Balcarce sin limitantes de agua en (i) diferente nivel de provisión de N y una densidad de 8 plantas m⁻² durante dos campañas de cultivo, o (ii) tres densidades de plantas sin deficiencias de N (4, 8 y 12 plantas m⁻²) durante dos campañas de cultivo. Los valores de Rint fueron corregidos según Charles Edwards y Lawn (1984). Adaptado de Hernández et al. (2015; 2020). (B) Tasa de crecimiento del cultivo en el periodo crítico en función de la densidad de plantas, para híbridos de maíz creciendo bajo riego o seco durante dos estaciones de crecimiento (Hernández et al., 2020).

Algunos estudios han demostrado que prácticas de manejo como la fertilización con N (Adamtey et al., 2010; Teixeira et al., 2014; Hernández et al., 2021) o el aumento en la densidad de plantas (Hernández et al., 2021) incrementaron la eficiencia de transpiración ($EUA_{B,T}$). En este sentido, se demostró que los aumentos en

eficiencia de transpiración se asociaron con incrementos en la eficiencia en el uso de la radiación cuando se fertilizó con N, mientras que se asociaron con reducciones en la conductancia foliar y del canopeo en su conjunto cuando se aumentó la densidad de plantas (Hernández et al., 2021). También, en condiciones sin limitaciones de agua, prácticas de manejo como incrementos en la densidad de plantas (Andrade et al., 2002) o la fertilización nitrogenada (Uhart y Andrade, 1995), que aumentan la tasa de crecimiento del cultivo en el período crítico de definición del número de granos, tienen el potencial de mejorar la fijación de granos y contribuir a un incremento en la $EUA_{G,ETc}$ (Hernández et al., 2020). En Balcarce, los incrementos en $EUA_{G,ET}$ por aumentar la densidad de plantas de 4 a 8 plantas m^{-2} fueron del orden del 10 al 22% (Hernández et al., 2020).

8.4.2. Manejo del cultivo en ambientes limitados por agua

La alta sensibilidad del rendimiento de maíz a la disminución de recursos durante el período crítico (Capítulo 4) denota la importancia de ajustar el manejo a los recursos disponibles en el ambiente. En este sentido, en condiciones de deficiencias de agua que limitan la ETc (Figura 8.1B) cobra especial importancia maximizar la $EUA_{G,ETc}$ para evitar reducciones drásticas del rendimiento (Ecuación 8.3).

En ambientes con una alta probabilidad de deficiencias de agua en el período crítico, se sugiere un manejo conservador que disminuya el consumo de agua en etapas vegetativas y transfiera parte del recurso al período reproductivo (Sinclair, 2017; Hao et al., 2019). En este sentido, prácticas que promueven una cobertura acelerada del suelo por parte del canopeo no serían aconsejables, dado que en condiciones de deficiencia de agua es esperable que (i) el componente E_s de la ETc se limite rápidamente, ya que sólo involucra a los primeros ≈ 30 cm de suelo, y (ii) aumente el riesgo de disminuir la disponibilidad de agua en el período reproductivo. Por ejemplo, se comprobó que la reducción del espaciamiento entre hileras en maíz (de 70 a 35 cm) promovió un mayor consumo de agua en etapas vegetativas y una menor disponibilidad de agua en el suelo al inicio del período crítico (Barbieri et al., 2012). Asimismo, Hernández et al. (2020) demostraron que deficiencias de agua en el período crítico limitaron las tasas de crecimiento del cultivo en alta densidad, reduciéndolas a valores similares a los obtenidos en baja densidad de plantas (Figura 8.7B). Por lo que reducciones en la densidad de plantas, no sólo son convenientes para conservar el agua y transferirla a períodos reproductivos, sino que además promueven una mayor disponibilidad de agua para cada planta en el momento crítico (Capítulo 4). Por otro lado, se ha recomendado el retraso en la fecha de siembra para disminuir las deficiencias de agua en el período crítico (Maddoni, 2012; Mercau y Otegui, 2015; Rotili et al., 2019) en tanto el deterioro en el ambiente fototérmico y las heladas tempranas (Bonelli et al., 2016; Maddoni, 2012) no penalicen excesivamente el rendimiento en grano. Asimismo, la capacidad de algunos genotipos de limitar la transpiración ante altos DPV en estados iniciales del ciclo (Figura 8.3B) permitiría conservar más agua en el suelo para ser utilizada en

momentos más críticos de la estación de crecimiento, contribuyendo a incrementar la $EUA_{G,ETc}$ (Sinclair, 2017).

Los conceptos de manejo de cultivos en ambientes limitados por agua se amplían en los capítulos 9, 10, 12 y 13.

8.5. Principales conceptos prácticos

- El consumo de agua es mayor cuanto mayor es la demanda evaporativa del ambiente, la cobertura del cultivo y la disponibilidad de agua en el suelo.
- Los factores directamente relacionados con la eficiencia de uso de agua ($EUA_{G,ETc}$) son (i) la proporción de transpiración respecto a la ETc , (ii) la capacidad de producir biomasa por unidad de agua transpirada ($EUA_{B,T}$) o eficiencia de transpiración), y (iii) la partición de biomasa a estructuras reproductivas.
- Los procesos de expansión de tejidos son más sensibles a deficiencias hídricas de igual intensidad, duración y momento de ocurrencia que aquellos dependientes del intercambio gaseoso (e.g. transpiración y fotosíntesis).
- El rendimiento del cultivo de maíz es altamente sensible a deficiencias hídricas, particularmente cuando estas ocurren en el período alrededor de la floración. Cambios en la disponibilidad hídrica que determinen variaciones en la tasa de crecimiento del cultivo en este período crítico determinan cambios en el número de granos y en el peso potencial del grano y, consecuentemente, en el rendimiento.
- En ambientes sin limitaciones hídricas, el mayor rendimiento en grano se logra a partir de la maximización del consumo de agua y de la $EUA_{G,ETc}$.
- En condiciones de deficiencias de agua que limitan el consumo cobra especial importancia maximizar la $EUA_{G,ETc}$ para evitar drásticas reducciones en el rendimiento en grano.

8.6. Referencias

- Adams J. E., G. Arkin y J. Ritchie. 1976. Influence of Row Spacing and Straw Mulch on First Stage Drying 1. *Soil Science Society of America Journal* 40(3): 436-442.
- Adamtey N., O. Cofie, K. Ofori-Budu, J. Ofori-Anim, K. Laryea y D. Forster. 2010. Effect of N-enriched co-compost on transpiration efficiency and water-use efficiency of maize (*Zea mays* L.) under controlled irrigation. *Agric. Water Manag.* 97: 995–1005.
- Adamtey N., C. Olufunke, K. Ofori-Budu, J. Ofori-Anim, K. Laryea y F. Dionys. 2010. Effect of enriched co-compost on transpiration efficiency and water-use efficiency of maize (*Zea mays* L.) under controlled irrigation. *Agric. Water Manag.* 97: 995–1005.
- Alberto M.C.R., J. Quilty, R. Buresh, R. Wassmann, S. Haidar, T. Correa Jr. y J. Sandro. 2014. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dryseeded rice and hybrid

- maize grown with overhead sprinkler irrigation. *Agricultural Water Management* 136: 1–12.
- Al-kaisi M., L. Brun y J. Enz. 1989. Transpiration and evapotranspiration from maize as related to leaf area index.
- Al-Kaisi M.M. y X. Yin. 2003. Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. *Agron. J.* 95: 1475–1482.
- Allen R.G., L. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome, 300(9).
- Andrade F. H., L. Echarte, R. Rizzalli, A. Della Maggiora y M. Casanovas. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Science*, 42(4): 1173-1179.
- Andrade F. H., C. Vega, S. Uhart, A. Cirilo, M. Cantarero y O. Valentinuz. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science*, 39(2): 453-459.
- Andrade J.F. y E. Satorre. 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Res.* 177: 137–147.
- Aramburu Merlos F., JP Monzon, JL. Mercau, M. Taboada, FH. Andrade, AJ. Hall, E. Jobbagy, KG. Cassman y P. Grassini. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184: 145–154.
- Bahrún A., C. Jensen, F. Asch y V. Mogensen. 2002. Drought-induced changes in xylem pH, ionic composition, and ABA concentration act as early signals in field-grown maize (*Zea mays* L.). *J. Exp. Bot.* 53: 251–263.
- Barbieri P.A., L. Echarte, A. della Maggiora, V. Sadras, H. Echeverría y F. Andrade. 2012. Maize evapotranspiration and water-use efficiency in response to row spacing. *Agron. J.* 104: 939–944.
- Bonelli L.E., J. Monzon, A. Cerrudo, R. Rizzalli y F. Andrade. 2016. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date. *F. Crop. Res.* 198: 215–225.
- Boyer J.S. 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiol.* 46: 233–235.
- Borrás L., G. Slafer y M. Otegui. 2004. Seed dry weight response to source–sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *F. Crop. Res.* 86(2–3): 131–146. doi: 10.1016/j.fcr.2003.08.002.
- Brouwer C. y M. Heibloem. 1986. *Irrigation water management. Training manual no. 3* FAO.
- Brun L.J., E. Kanemasu y W. Powers. 1972. Evapotranspiration from soybean and sorghum fields. *Agron. J.* 64: 145-148.
- Calviño P. A., F. Andrade y V. Sadras. (2003). Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agronomy journal*, 95(2): 275-281.
- Carcova J., G. Maddonni y C. Ghera. 2000. Long-term cropping effects on maize: Crop evapotranspiration and grain yield. *Agronomy Journal*, 92: 1256 – 1265.
- Carretero R., F. Bert y G. Podestá. 2014. Maize root architecture and water stress tolerance: an approximation from crop models. *Agron. J.* 106: 2287–2295. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0214>
- Charles-Edwards D.A. y R. Lawn. 1984. Light interception by grain legume crops. *Plant Cell Environ.* 7: 247–251.
- Christmann A., E. Grill y J. Huang. 2013. Hydraulic signals in long-distance signaling. *Curr. Opin. Plant Biol.* 16(3): 293–300. doi: 10.1016/j.pbi.2013.02.011.
- Cramer G.R. y S. Quarrie. 2002. Abscisic acid is correlated with the leaf growth inhibition of

- four genotypes of maize differing in their response to salinity. *Funct. Plant Biol.* 29: 111.
- Curin F., A. Severini, F. González y M. Otegui. 2020. Water and radiation use efficiencies in maize: breeding effects on single-cross Argentine hybrids released between 1980 and 2012. *Field Crop. Res.* 246. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107683>
- Dardanelli J.L., D. Collino, M.E. Otegui y V. Sadras. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en cultivos de granos. En : Producción de granos, bases funcionales para su manejo (Eds. Satorre et al.). Facultad de Agronomía.
- Dardanelli J.L., O. Bachmeier, R. Sereno y R. Gil. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam haplustoll. *Field Crop. Res.* 54: 29–38. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00017-8)
- Dardanelli J.L., J. Ritchie, M. Calmon, J. Andriani y D. Collino. 2004. An empirical model for root water uptake. *F. Crop. Res.* 87: 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.008>.
- Della Maggiora A., A. Irigoyen y J. Gardiol. 2002. Coeficientes de cultivo de maíz basados en la evapotranspiración de referencia Penman-Monteith. Conference: XIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia At: Santa María, Brazil Volume: 1.
- Díaz-Zorita M., G. Duarte y J. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the sub-humid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 65: 1–18.
- Dwyer L.M., D.W. Stewart y D. Balchun. 1988. Rooting characteristics of corn, soybeans and barley as a function of available water and soil physical characteristics. *Can. J. Soil Sci.* 68:121–132.
- Echarte L. y M. Tollenaar, M. 2006. Kernel set in maize hybrids and their inbred lines exposed to stress. *Crop Science* 46(2): 870-878.
- Ehlert C., C. Maurel, F. Tardieu y T. Simonneau. 2009. Aquaporin mediated reduction in maize root hydraulic conductivity impacts cell turgor and leaf elongation even without changing transpiration. *Plant Physiology* 150: 1093–1104.
- Facchi A., O. Gharsallah, C. Corbari, D. Masseroni, M. Mancini y C. Gandolfi. 2013. Determination of maize crop coefficients in humid climate regime using the eddy covariance technique. *Agricultural Water Management* 130: 131-141.
- Gardiol J.M. , A.I. Irigoyen, A.I. Della Maggiora y V. Silva. 1997. Patrón de extracción de agua de cultivos de maíz y soja en Balcarce. *Revista de la Facultad de Agronomía. UBA.* 17, pp. 137-142.
- Gholipour M. S. Choudhary, T. R. Sinclair C. D. Messina y M. Cooper. 2013. Transpiration Response of Maize Hybrids to Atmospheric Vapour Pressure Deficit *J Agro Crop Sci* 199 (2013) 155–160
- Grant R. F., B. Jackson, J. Kiniry y G. F. Arkin. 1989. Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agronomy Journal.* 81: 61-65.
- Grassini P., H. Yang y K. Cassman. 2009. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. *Agric. For. Meteorol.* 149(8): 1254–1265. [doi:10.1016/j.agrformet.2009.02.012](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.02.012).
- Greb B. W. 1966. Effect of Surface-Applied Wheat Straw on Soil Water Losses by Solar Distillation 1. *Soil Science Society of America Journal*, 30(6): 786-788.
- Hall A.J., J. Lemcoff y N. Trápani. 1981. Water Stress Before and During Flowering in Maize and Its Effects on Yield, its Components and their Determinants. *Maydica XXVI:* 19–38.
- Hao B., Q. Xue, T. Marek, K. Jessup, J. Becker, X. Hou, W. Xu, E. Bynum, B. Bean, P. Colaizzi y T. Howell. 2019. Grain yield, evapotranspiration, and water-use efficiency of maize

- hybrids differing in drought tolerance. *Irrig. Sci.* 37: 25–34.
- Heatherly L.G. y J. Ray. 2007. Soybean and Corn. En: *Irrigation of Agricultural Crops*, Volume 30, Second Edition Editor(s): R.J. Lascano, R.E. Sojka. *Agronomy Monographs* DOI:10.2134/agronmonogr30.2ed
- Hernández M., L. Echarte, A. Della Maggiora, M. Cambareri, P. Barbieri y D. Cerrudo. 2015. Maize water use efficiency and evapotranspiration response to N supply under contrasting soil water availability. *Field Crops Res.* 178: 8–15.
- Hernández M.D., C. Alfonso, A. Cerrudo, M. Cambareri, A. Della Maggiora, P. Barbieri, M. Echarte y L. Echarte. 2020. Eco-physiological processes underlying maize water use efficiency response to plant density under contrasting water regimes. *Field Crops Res.* 254: 107844.
- Hernández M.D., C. Alfonso, M.M. Echarte, A. Cerrudo, L. Echarte. 2021. Maize transpiration efficiency increases with N supply or higher plant densities, *Agricultural Water Management*, 250, 106816, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106816>.
- Howell T.A., J. Steiner, A. Schneider, S. Evett y J. Tolk. 1997. Seasonal and maximum daily evapotranspiration of irrigated winter wheat, sorghum, and corn: Southern High Plains. *Transaction of the ASAE* 40: 623–634.
- Howell T.A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.* 93 (2): 281–289.
- Jensen M.E. y R. Allen (Eds.). 2016. *Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation. Water Requirements*, second ed. ASCE Manual 70, ASCE, Reston, VI, p. 744.
- Jiang Xuelian J. et al. 2014. Crop coefficient and evapotranspiration of grain maize modified by planting density in an arid region of northwest China. *Agricultural Water Management*, 142, 135-143.
- Jones C.A. y J. Kiniry. 1986. *CERES-Maize. A simulation model of maize growth and development*. Texas A&M University Pres, College Station, TX.
- Kang S.Z., B. Gu, T. Du y J. Zhang. 2003. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agric. Water Manage.* 59: 239–254.
- Lambers H., et al. 2008. *Plant Physiological Ecology*. Springer Science+Business Media, LLC.
- Lamm F. R., R.M. Aiken y A.A. Abou Kheira. 2008. Corn Yield And Water Use Characteristics As Affected By Tillage, Plant Density, And Irrigation. *Transactions Of The Asabe*. Vol. 52(1): 133-143.
- Liu C., X. Zhang y Z. Zhang. 2002. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural and Forest Meteorology* 111: 109-120.
- Lynch, J. 1995. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiol.* 109: 7-13.
- Maddonni G.A., 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.* 107: 325–345.
- Marek G.W., T.H. Marek, S.R. Evett, J.M. Bell, P.D. Colaizzi, D.K. Brauer y T.A. Howell. 2020. Comparison of Lysimeter-Derived Crop Coefficients for Legacy and Modern Drought-Tolerant Maize Hybrids in the Texas High Plains. *Transactions of the ASABE*. 63(5): 1243-1257. (doi: 10.13031/trans.13924)
- Marek G.W., T. Marek, S. Evett, J. Bell, P. Colaizzi, D. Brauer y T. Howell. 2020. Comparison of lysimeter-derived crop coefficients for legacy and modern drought-tolerant maize hybrids in the Texas High Plains. *Transactions of the ASABE*. 63(5): 1243-1257.
- McCully M.E., 1999. Roots in soil: unearthing the complexities of roots and their rhizospheres. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50: 695–718. <https://doi.org/10.1146/an>

- nurev.arplant.50.1.695.
- Meng Q., X. Chen, D. Lobell, Z. Cui, Y. Zhang, H. Yang y F. Zhang. 2016. Growing sensitivity of maize to water scarcity under climate change. *Sci. Rep.* 6. <https://doi.org/10.1038/srep19605>.
- Mercau J.L. y M.E. Otegui. 2015. A modeling approach to explore water management strategies for late-sown maize and double-cropped wheat-maize in the rainfed pampas region of Argentina. In: Ahuja, L.R., Ma, L., Lascano, R.J. (Eds.), *Advances in Agricultural Systems Modeling*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, pp. 351–373.
- Messina C., D. McDonald, H. Poffenbarger, R. Clark, A. Salinas, Y. Fang, C. Ghossein, T. Tang, G. Graham, G. Hammer y M. Cooper. 2021. Reproductive resilience but not root architecture underpins yield improvement under drought in maize. *Journal of Experimental Botany*. 72: 5235–5245.
- Monzón J. P., V. Sadras y F. Andrade. 2006. Fallow soil evaporation and water storage as affected by stubble in sub-humid (Argentina) and semi-arid (Australia) environments. *Field Crops Research*, 98(2-3): 83-90.
- Muchow R.C. 1989. Comparative productivity of maize, sorghum and pearl millet in a semi-arid tropical environment II. Effect of water deficits. *F. Crop. Res.* 20: 207–21.
- Nagore M.L., L. Echarte, F.H. Andrade y A. Della Maggiora. 2014. Crop evapotranspiration in Argentinean maize hybrids released in different decades. *F. Crop. Res.* 155: 23–29. doi: 10.1016/j.fcr.2013.09.026.
- Nagore M.L., A. Della Maggiora, F.H. Andrade y L. Echarte. 2017. Water use efficiency for grain yield in an old and two more recent maize hybrids. *F. Crop. Res.* 214: 185–193. doi: 10.1016/j.fcr.2017.09.013.
- Ogola J.B.O., T. Wheeler y P. Harris. 2002. Effects of nitrogen and irrigation on water use of maize crops. *Field Crops Res.* 78: 105–117.
- Otegui M.E., F. Andrade y E. Suero. 1995a. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *F. Crop. Res.* 40: 87–94.
- Otegui M.E., A.G. Cirilo, S.A. Uhart y F.H. Andrade. 2021. Maize. In: Sadras, V.O. and Calderini, D.F., Editors, *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*. 1st ed. Academic Press. 716 pp.
- Pandey R.K., J. Maranville y A. Admou. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effectson maize in a Sahelian environment. I. Grain yield and yield components. *Agric.Water Manag.* 46: 1–13.
- Parent B., C. Hachez, E. Redondo, T. Simonneau, F. Chaumont y F. Tardieu. 2009. Drought and abscisic acid effects on aquaporin content translate into changes in hydraulic conductivity and leaf growth rate: a trans-scale approach. *Plant Physiol.* 149: 2000–2012.
- Passioura J.B. y J. Angus. 2010. *Improving Productivity of Crops in Water-Limited Environments*, Editor(s): Donald L. Sparks, *Advances in Agronomy*, Academic Press 106: 37-75.
- Pereira L.S., P. Paredes, F. Melton, T. Wang, L. Johnson, R. López-Urrea, J. Cancela y R. Allen. 2020. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data. *Agricult. Water Manag.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106197>.
- Rattalino Edreira J.I., N. Guilpart, V. Sadras, K. Cassman, M. van Ittersum, R. Schiis y P. Grassini. 2018. Water productivity of rainfed maize and wheat: a local to global perspective. *Agric. For. Meteorol.* 259: 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.019>.
- Ray J.D. y T.R. Sinclair. 1997. Stomatal conductance of maize hybrids in response to drying

- soil. *Crop Sci.* 37: 803–807.
- Reyes A., C. Messina, G. Hammer, L. Liu, E. van Oosterom, R. Lafitte y M. Cooper. 2015. Soil water capture trends over 50 years of single-cross maize (*Zea mays* L.) breeding in the US corn-belt. *J. Exp. Bot.* 66: 7339–7346.
- Rhoads F.M. y J.M. Bennet. 1990. Corn. Pp. 589-596. En: B.A. Stewart y D.R. Nielsen (Eds.) *Irrigation of agricultural crops*. Agronomy 30. ASA, CSSA, SSSA, Wisconsin, USA.
- Ritchie J. T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water resources research*, 8(5): 1204-1213.
- Ritchie J. T. y B. Basso. 2008. Water use efficiency is not constant when crop water supply is adequate or fixed: The role of agronomic management. *European Journal of Agronomy* 28(3): 273-281.
- Roth J.A., I. Ciampitti y T. Vyn. 2013. Physiological evaluations of recent drought-tolerant maize hybrids at varying stress levels. *Agron. J.* 105:1129–1141.
- Rotili D.H., A. Giorno, P. Tognetti y G. Maddonni. 2019. Expansion of maize production in a semi-arid region of Argentina: climatic and edaphic constraints and their implications on crop management. *Agric. Water Manag.* 226.
- Sadras V.O. y S. Milroy. 1996. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crop Res.* 47:253-266.
- Salah H. y F. Tardieu. 1997. Control of Leaf Expansion Rate of Droughted Maize Plants under Fluctuating Evaporative Demand. A Superposition of Hydraulic and Chemical Messages? *Plant Physiol.* 114(3): 893–900. doi: 10.1104/pp.114.3.893.
- Shaw R.H. 1988. Climate requirement. p. 609–638. In G.F. Sprague and J.W. Dudley (ed.) *Corn and corn improvement*. 3rd ed. Agron. Monogr. 18. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Sinclair T. 2017. *Water-Conservation Traits to Increase Crop Yields in Water-deficit Environments: Case Studies (Springer Briefs in Environmental Science)* 1st ed. 2017 Edition, Kindle Edition.
- Sinclair T.R., C. Tanner y J. Bennett. 1984. Water-use efficiency in crop production. *BioScience* 34: 36–40.
- Steiner J.L. 1989. Tillage and Surface Residue Effects on Evaporation from Soils. *Soil Science Society of America Journal.* 53: 911-916.
- Steduto P. y T. Hsiao. 1998. Maize canopies under two soil water regimes II: seasonal trends of evapotranspiration, carbon dioxide assimilation and canopy conductance, and as related to leaf area index. *Agric. For. Meteorol.* 89 (3–4):185–200.
- Suyker A.E. y S. Verma. 2008. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. *Agric. For. Meteorol.* 148 (3): 417–427.
- Taboada M.A. y C. Alvarez. 2008. Root abundance of maize in conventionally- tilled and zero-tilled soils of Argentina. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 32: 769–779.
- Tambascio L., A. Della Maggiora, A. Irigoyen, O. Valentinuz y J. Gardiol. 2002. Efecto de la densidad de plantas sobre la evapotranspiración y eficiencia en el uso del agua en cultivos de maíz y girasol en Balcarce (Argentina). *Revista Argentina de Agrometeorología*, 2(1): 1-9.
- Tardieu F., B. Parent y T. Simonneau. 2010. Control of leaf growth by abscisic acid: hydraulic or non-hydraulic processes? *Plant Cell Environ.* 33: 636–647.
- Tardieu F., J. Zhang, N. Katerji, O. Bethenod, S. Palmer y W. Davies. 1992. Xylem ABA controls the stomatal conductance of field-grown maize subjected to soil compaction or

- soil drying. *Plant Cell Environ.* 15: 193-197.
- Tardieu F. y T. Simonneau. 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviour. *Plant Physiol.* 49: 419-432.
- Teixeira E.I., M. George, T. Herreman, H. Brown, A. Fletcher, E. Chakwizira, J. de Ruiter, S. Maleya y A. Noblea. 2014. The impact of water and nitrogen limitation on maize biomass and resource-use efficiencies for radiation, water and nitrogen. *Field Crop Res.* 168: 109-118.
- Tollenaar M., L. Dwyer y D. Stewart. 1992. Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop Science*, 32(2): 432-438.
- Uhart S.A. y F.H. Andrade. 1995. Nitrogen deficiency in maize. I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. *Crop Sci.* 35: 1376-1383.
- Van Dock S.J., D. Martin, S. Irmak, S. Melvin, J. Petersen y D. Davison. 2010. Crop residue cover effects on evaporation, soil water content, and yield of deficit-irrigated corn in west-central Nebraska. *Transactions of the ASABE*, 53(6): 1787-1797.
- van Oosterom E.J., A.F. Zongjian, B. Yang, D. Fenglu Zhang, S. Kurt, A. Deifel, M. Cooper, C. Messina y G. Hammer. Hybrid variation for root system efficiency in maize: potential links to drought adaptation *Functional Plant Biology* <http://dx.doi.org/10.1071/FP15308>.
- Viets F.G., 1962. Fertilizers and the efficient use of water. *Advances in Agronomy* 14. Academic Press, pp. 223-264.
- Villalobos F.J. y E. Fereres. 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton and sunflower canopies. *Agron. J.* 82: 1153-1159.
- Wang X., C. Müller, J. Elliot et al. 2021. Global irrigation contribution to wheat and maize yield. *Nat Commun* 12, 1235. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21498-5>
- Xu G., X. Xue, P. Wang, Z. Yang, W. Yuan, X. Liu y C. Lou. 2018. A lysimeter study for the effects of different canopy sizes on evapotranspiration and crop coefficient of summer maize, *Agricultural Water Management*, 208: 2018, 1-6.
- Yu Y.Y., N. Turner, Y. Gong, F. Li, C. Fang, L. Ge y J. Ye. 2018. Benefits and limitations to straw- and plastic-film mulch on maize yield and water use efficiency: a meta-analysis across hydrothermal gradients. *Eur. J. Agron.* 99: 138-147.
- Zhang Q., Z. Wang, F. Miao y G. Wang. 2017. Dryland maize yield and water-use efficiency responses to mulching and tillage practices. *Agron. J.* 109 (4): 1196-1209.

