



SISSA

REPORTE TÉCNICO CRC-SAS

REPORTE BALANCE HÍDRICO

Por Alessio Bocco, Natalia Bonel, Luciana Stoll

SISSA - RT 002-2025
OCTUBRE 2025



Contenido

1. <i>Introducción</i>	- 2 -
1.1 Relevancia del estudio	- 3 -
1.2 Importancia del balance hídrico en la agricultura	- 3 -
2. Fundamentos teóricos	- 4 -
2.1 Metodología FAO 56 para la estimación de la evapotranspiración	- 4 -
2.2 Evaporación de referencia (ET _o).....	- 5 -
2.3 Coeficiente de cultivo	- 8 -
2.4 Coeficiente Dual de cultivo	- 9 -
2.5 Etapas de desarrollo del cultivo y su influencia en los valores de K _{cb} y K _e	- 10 -
3. Modelos fenológicos	- 12 -
4. Construcción de series temporales de variables meteorológicas	- 14 -
5. Balance hídrico	- 15 -
6. Caso de estudio	- 19 -
7. Conclusión	- 23 -
8. Referencias	- 23 -



1. Introducción

En el marco del Proyecto de Demostración (PD) del Sistema de Información sobre Sequías para el Sur de Sudamérica (SISSA), orientado al sector agrícola, se identificaron necesidades críticas de los tomadores de decisión. El sector agrícola enfrenta desafíos únicos, dado que los sistemas de producción no solo responden a patrones climáticos regionales, sino también a las particularidades de manejo y condiciones de suelo de cada establecimiento. Este contexto complejo hace que la información meteorológica regional, como la provista por SISSA, no siempre sea suficiente para que los productores o técnicos diseñen adecuadamente sus cultivos.

El *diseño de cultivos* abarca decisiones clave, como la elección del cultivo, rotación, fecha de siembra y densidad, que determinan el desarrollo del cultivo a lo largo de la campaña. Sin embargo, estas decisiones dependen de una combinación de datos que permitan un panorama lo más amplio posible. Aquí surge el tradeoff entre los servicios climáticos, con datos de baja resolución espacial o de estaciones distantes, y la precisión de las mediciones directas en el lote, las cuales, aunque precisas para el contexto específico, no son representativas a nivel regional. Esto marca la necesidad de integrar ambos tipos de información para mejorar la toma de decisiones y adaptar los sistemas agrícolas a las condiciones climáticas locales y regionales.

Específicamente, durante las diversas rondas de discusión y talleres con los tomadores de decisión se identificó al balance hídrico como una herramienta que pudiese responder a varias de las preguntas que se hacen los productores durante una campaña agrícola. El balance permitiría estimar el agua disponible durante distintos momentos del ciclo del cultivo y dar una primera medida del riesgo de estrés en etapas críticas. El balance hídrico es un método que mide el agua disponible en el suelo, considerando entradas (lluvia, riego) y salidas (evapotranspiración, escorrentía, percolación). En la agricultura de secano, como en el caso de Argentina, donde los cultivos dependen de la lluvia en lugar del riego, el balance hídrico es la herramienta que define las posibilidades de un cultivo exitoso. Permite evaluar si las precipitaciones serán suficientes para el crecimiento del cultivo o si es necesario ajustar el calendario de siembra y la selección de cultivos. Este análisis ayuda a optimizar el sistema agrícola y reducir riesgos en condiciones de estrés hídrico.

El modelo de balance planteado se basa en la metodología desarrollada por FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) y comúnmente conocida como FAO 56 (Allen et al., 2005). Se trata de un método desarrollado para estimar las necesidades de riego y el consumo de agua de los cultivos. Basado en el concepto de evapotranspiración de referencia (ET₀), este modelo ajusta la cantidad de agua necesaria en función de la etapa de desarrollo del cultivo y de factores climáticos como temperatura, humedad, viento y radiación solar. La metodología utiliza el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) para calcular ET₀ y luego aplica coeficientes de cultivo (K_c) específicos que reflejan la variabilidad en el consumo de agua durante todo el ciclo del cultivo. La



particularidad de esta implementación del modelo de balance es la capacidad de considerar la fenología del cultivo en la demanda atmosférica (Steduto et al., 2009).

El presente reporte se estructura en tres secciones principales: i) introducción a la problemática, ii) descripción metodológica del balance hídrico, y iii) caso de estudio práctico en la localidad de Río Cuarto, Córdoba (Argentina).

1.1 Relevancia del estudio

El SISSA se enfoca en mitigar los impactos económicos, sociales y ambientales que las sequías generan en la región. Uno de sus pilares es la provisión de información para fortalecer las capacidades institucionales y regionales para la planificación y preparación ante eventos de sequía, mejorando la gobernanza en la gestión de riesgos. En el sector agrícola, SISSA aporta datos y herramientas para aumentar la resiliencia y soportar la toma de decisiones.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha puesto un fuerte énfasis en el trabajo colaborativo, interdisciplinario y transdisciplinario para mejorar los servicios meteorológicos, climáticos y ambientales. Este enfoque busca integrar a los usuarios finales en un proceso de co-diseño, co-producción y co-implementación de productos y servicios. A través de la participación de los usuarios en todas las fases, desde la planificación hasta la ejecución.

En el marco del Proyecto de Demostración (PD) del SISSA en la provincia de Córdoba, se llevaron a cabo dos talleres de co-diseño con usuarios. Estos encuentros tuvieron como objetivo identificar las necesidades y mejoras y/o adaptaciones en el modelo de balance hídrico. La iniciativa busca ajustar los servicios climáticos a las necesidades específicas de los productores, optimizando el manejo del agua y fortaleciendo la resiliencia del sector frente a la variabilidad climática.

1.2 Importancia del balance hídrico en la agricultura

En la región del sur de Sudamérica, la agricultura extensiva se caracteriza por la producción en sistemas de secano, donde el suministro de agua para los cultivos proviene exclusivamente de las precipitaciones. Esta dependencia de la lluvia convierte al clima en un factor crucial para la producción agrícola, ya que cualquier forma de variabilidad climática, como sequías o cambios en los patrones de precipitación, impacta directamente en el desarrollo y rendimiento de los cultivos. Esto es particularmente relevante en cultivos extensivos como el trigo, maíz y soja, que ocupan una gran proporción de la superficie agrícola de la región.

Comprender el comportamiento del sistema suelo-planta-atmósfera a nivel de lote se vuelve esencial para gestionar estos riesgos. La caracterización de los componentes del balance hídrico, incluyendo la evapotranspiración (evaporación y transpiración) y la capacidad de almacenamiento del suelo, permite



anticipar posibles déficits de humedad y ajustar las prácticas de manejo en consecuencia. Este enfoque posibilita que los productores optimicen el uso del agua y planifiquen de forma más precisa el calendario de siembra y el manejo de los cultivos, lo que es fundamental para minimizar pérdidas y maximizar rendimientos en un entorno de alta variabilidad climática.

2. Fundamentos teóricos

2.1 Metodología FAO 56 para la estimación de la evapotranspiración

La metodología FAO 56 (Allen et al., 2005) para la estimación de la evapotranspiración (ET) del cultivo es fundamental en el análisis del balance hídrico, ya que la ET representa una de las principales vías de pérdida de agua en los sistemas agrícolas. La evapotranspiración incluye tanto la evaporación directa desde la superficie del suelo como la transpiración de las plantas, y es un componente crítico para comprender la disponibilidad hídrica en la zona radicular que está disponible para el cultivo.

El balance hídrico es la suma de los flujos de agua que ingresan y egresan del sistema, siendo un indicador esencial de la cantidad de agua disponible para el cultivo. Los ingresos de agua al sistema provienen principalmente de las precipitaciones (P) y del riego (R), que son las fuentes de aporte más comunes en sistemas de secano e irrigación, respectivamente. Cabe mencionar que en el presente sólo se consideran sistemas de secano donde la única entrada proviene de la lluvia. Otros ingresos menos frecuentes incluyen el ascenso de agua subterránea hacia la zona radicular por capilaridad (C), lo cual es significativo en áreas con una capa freática cercana a la superficie. La implementación actual no contempla el ascenso capilar por parte de las napas freáticas.

Por el lado de las pérdidas, el balance hídrico considera la evaporación (E) y la transpiración (T), que en conjunto conforman la ET, así como el escurrimiento superficial (ES) y la percolación profunda (D). En terrenos con pendiente, es necesario incluir los flujos subsuperficiales (ΔFS) que se desplazan horizontalmente; estos flujos pueden ser entrantes o salientes, dependiendo de la dirección del flujo de agua. Sin embargo, en las condiciones agrícolas predominantes en la región estos flujos podrían considerarse como despreciables dada la escasa pendiente dominante.

Conocidos cada uno de los términos que conforman el balance, la evapotranspiración puede definirse a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) y su valor puede representarse por medio de la siguiente expresión:

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



Reordenando la expresión y conociendo el valor de evapotranspiración se puede despejar el contenido de agua en el suelo en un momento dado. La Figura 1, extraída del Manual de FAO 56 (Allen et al., 2005), representa las distintas componentes del balance hídrico en la zona radicular de un cultivo. La zona radicular es la capa del suelo donde se desarrollan las raíces y donde se almacena y toma el agua necesaria para el crecimiento del cultivo. En la parte superior, se muestra la entrada de agua por precipitación (lluvia). Parte de esta agua se pierde como escorrentía superficial, moviéndose lateralmente por la superficie del suelo. Dentro de la zona radicular, el agua se pierde principalmente a través de dos procesos: (i) evaporación desde la superficie del suelo y (ii) transpiración desde las plantas, ambos contribuyendo a la evapotranspiración (ET).

Además, el agua puede filtrarse hacia capas más profundas mediante la percolación profunda, que representa una pérdida para el sistema radicular ya que el agua se mueve fuera del alcance de las raíces. En algunos casos, si el nivel freático es lo suficientemente alto, el agua puede ascender por capilaridad hacia la zona radicular, suministrando una fuente adicional de humedad. También se representan los flujos subsuperficiales, que pueden ser entrantes o salientes según el gradiente de humedad y la pendiente del terreno.

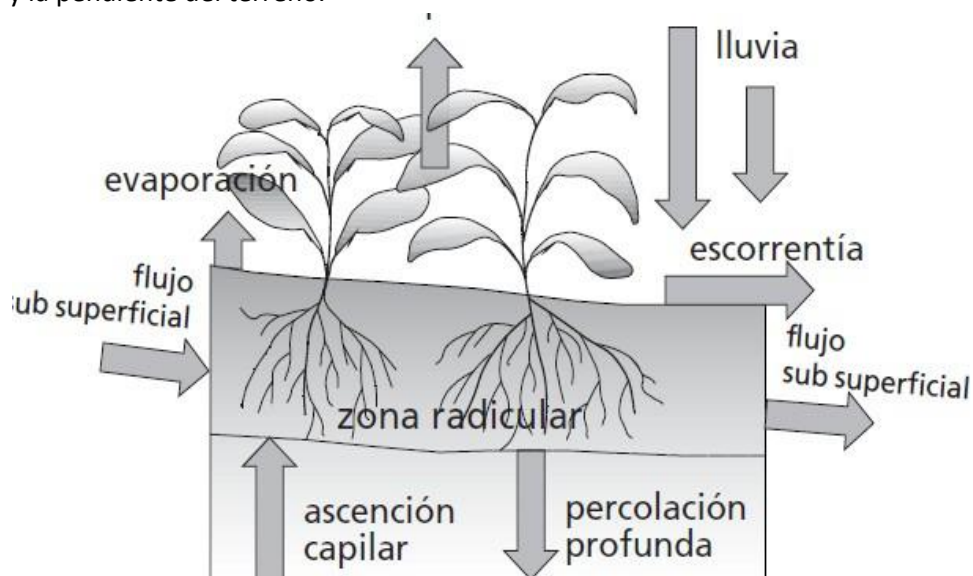


Figura 1: Componentes del balance hídrico en la zona radicular (extraído de FAO 56).

2.2 Evaporación de referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es una medida estándar que estima la cantidad de agua que perdería un cultivo de referencia bajo condiciones óptimas de humedad. Para su cálculo, se utiliza un modelo de pastura con una altura de aproximadamente 12 cm, albedo de 0.23, y resistencia superficial



fija, asumiendo una superficie homogénea y bien regada. Este valor es clave para evaluar las necesidades hídricas de los cultivos y se calcula mediante el método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

El método de Penman-Monteith es el estándar internacional para calcular ET_o y requiere datos meteorológicos como radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa. La ecuación de Penman-Monteith permite calcular la evapotranspiración en una superficie de referencia ideal de la siguiente manera:

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

Donde: ET_o es la evapotranspiración de referencia [mm día^{-1}], R_n la radiación neta en la superficie del cultivo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$], R_a la radiación extraterrestre [mm día^{-1}], G el flujo del calor de suelo [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$], T la temperatura media del aire a 2 m de altura [$^{\circ}\text{C}$], u_2 la velocidad del viento a 2 m de altura [m s^{-1}], e_s la presión de vapor de saturación [kPa], e_a la presión real de vapor [kPa], $e_s - e_a$ el déficit de presión de vapor [kPa], Δ la pendiente de la curva de presión de vapor [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] y γ la constante psicrométrica [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Existen varios métodos alternativos al de Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o). Entre ellos, los métodos de Hargreaves-Samani, Turc o Priestley y Taylor tienen diferentes necesidades de datos y han sido ampliamente usados en la región.

El método de Hargreaves-Samani (1985) estima evapotranspiración potencial a nivel diario utilizando datos de temperatura y radiación astronómica derivada de la latitud y el día juliano. Luego de varias modificaciones la ecuación definitiva elaborada por los autores es la siguiente.

$$Eto = 0.0023 \times R(T_m + 17.8) \times T_D^{0.5}$$

Dónde, R_a corresponde a la radiación astronómica en $\text{MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$; T_m a la temperatura media diaria y T_D a la amplitud térmica.

Una desventaja de este método es que no considera las variaciones debidas al viento, además de otras variables como el paso de frentes y nubosidad (Hargreaves & Allen, 2003). Es uno de los métodos más



precisos cuando no se cuentan con datos necesarios para otros métodos o cuando su calidad es cuestionable (Jensen et al., 1997). Droogers y Allen (2002) modificaron esta ecuación incorporando datos de precipitación como un proxy a la insolación mejorando los resultados.

Otra metodología de estimación corresponde al método de Turc, que se basa en la temperatura del aire y radiación recibida en la superficie del suelo (Turc, 1961). A diferencia del método anterior, utiliza la radiación global en lugar de la radiación astronómica por lo que *a priori* arrojaría mejores resultados. Sin embargo, precisa de más datos como la heliofanía u otro estimador de la radiación. Para ambientes secos, existe una corrección en la que se incorpora la humedad relativa y se detalla a continuación:

$$ET = 0.0133 \frac{T_m}{T_m + 15} (R_s + 50) \quad HR > 50$$
$$ET = 0.0133 \frac{T_m}{T_m + 15} (R_s + 50) \left(1 + \frac{50 - HR}{70}\right) \quad HR < 50$$

Dónde, E_t corresponde a la evapotranspiración de referencia en mm/día; T_m a la temperatura media en °C; R_s a la radiación incidente en cal/cm².día¹ y HR a la humedad relativa en %.

Por último, el método de Priestley y Taylor es una modificación simplificada de la de Penman y es utilizada en áreas en donde no hay grandes déficits de presión de vapor (Priestley & Taylor, 1972) y es semi-empírico en naturaleza.

$$ET_0 = \alpha \times \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) \times (R_n - G)$$

Dónde, E_t corresponde a la evapotranspiración de referencia en mm/día; Δ corresponde a la pendiente de la curva de saturación de vapor en kPa.°C⁻¹; γ a la constante psicrométrica en kPa.°C⁻¹; R_n a la radiación neta en MJ/m².día¹; G al flujo de calor latente en MJ/m².día¹.

El fundamento de esta ecuación se basa en que en condiciones con buena cobertura vegetal y con pequeños déficits hídricos y en ausencia de advección, aproximadamente el 95% de la demanda evaporativa es explicada por la radiación (Stagnitti et al., 1989). En esas condiciones la transferencia de masa en la ecuación de Penman se vuelve casi despreciable en comparación con el término radiativo, por lo tanto, el término aerodinámico puede ser reemplazado por el coeficiente α que puede asumirse como 1.26, valor que puede asumirse constante en una gran variedad de climas (McAneney & Itier, 1996). Sin embargo, para el presente se considera un α de 1.26 cuando la humedad relativa es superior a 60% y otro de 1.74 cuando ésta sea menor a dicho valor.



Independientemente del método de estimación, la metodología es flexible para adaptarse a diversas condiciones según la disponibilidad de datos en cada región. El usuario es capaz de determinar el método a utilizar en función de los datos disponibles.

2.3 Coeficiente de cultivo

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar difiere de la evapotranspiración de referencia (ET_o) debido a las características específicas de cada cultivo, como su altura, densidad de follaje y resistencia aerodinámica. Estas propiedades afectan la cantidad de agua que el cultivo transpira y que el suelo circundante evapora, creando la necesidad de ajustar la ET_o para obtener un valor más preciso de la evapotranspiración del cultivo (ET_c).

Para realizar este ajuste se introduce el coeficiente de cultivo (K_c), que representa las particularidades de cada tipo de vegetación en términos de sus tasas de evaporación y transpiración. El K_c es un factor empírico que varía según el tipo de cultivo, la etapa de desarrollo (por ejemplo, establecimiento, crecimiento rápido, senescencia) y las condiciones ambientales. El K_c permite ajustar la ET_o estándar (calculada bajo condiciones ideales de un cultivo de referencia) para que refleje con mayor precisión las demandas hídricas de un cultivo específico. La fórmula para calcular la evapotranspiración del cultivo es la siguiente:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

donde:

- ET_c: evapotranspiración del cultivo (mm día⁻¹).
- K_c: coeficiente de cultivo, que depende de las características del cultivo y su etapa de crecimiento.
- ET_o: evapotranspiración de referencia, calculada generalmente con el método Penman-Monteith bajo condiciones estándar.

El K_c varía a lo largo del ciclo del cultivo. Al inicio del ciclo, cuando el cultivo es pequeño y cubre poca superficie, el K_c tiende a ser bajo, reflejando una menor evapotranspiración. A medida que el cultivo crece y cubre más superficie, el K_c aumenta hasta alcanzar un valor máximo durante el período de crecimiento máximo, cuando la transpiración es más intensa. Hacia el final del ciclo, el K_c disminuye nuevamente conforme el cultivo madura y requiere menos agua. Cabe mencionar que cada cultivo tiene una serie de coeficientes específicos.

Por ejemplo, un cultivo de trigo puede tener los siguientes valores de K_c en sus diferentes etapas:

- **Establecimiento:** K_c bajo (aproximadamente 0.16)



- **Desarrollo rápido:** Kc aumenta (media 0.75)
- **Crecimiento máximo:** Kc alto (aproximadamente 1.1)
- **Senescencia:** Kc disminuye (aproximadamente 0.25)

La Figura 2 muestra la evolución del Kc para un cultivo de trigo sembrado a mediados de mayo en la localidad de Río Cuarto, Argentina.

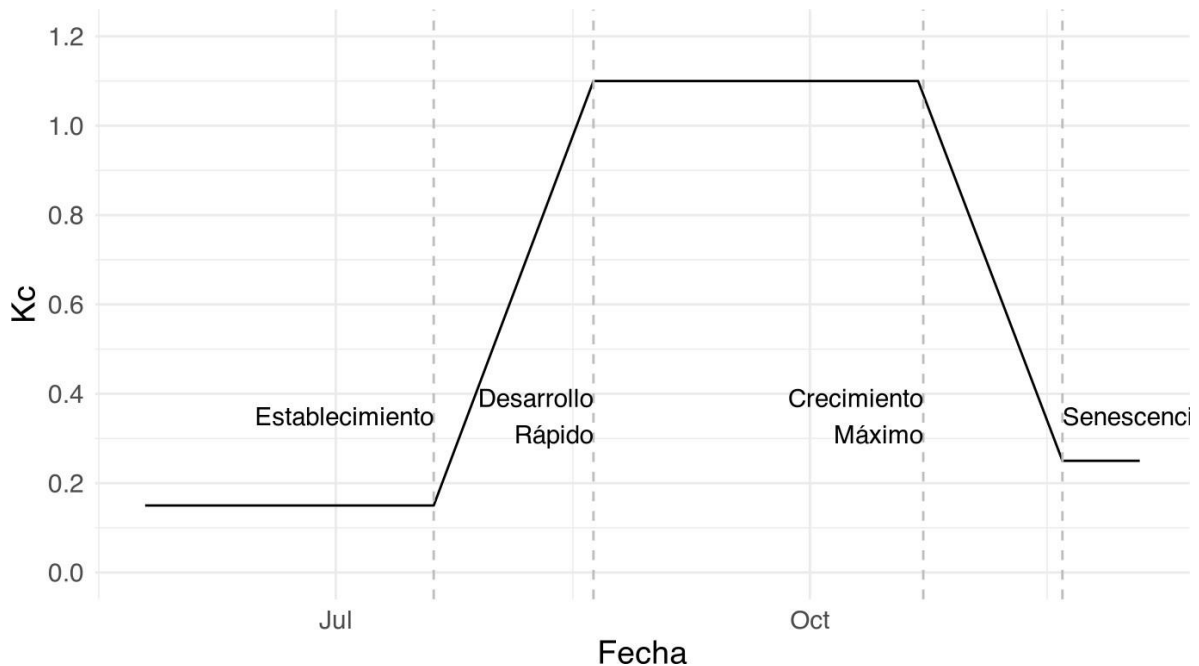


Figura 2: Evolución del Kc para cultivo de trigo.

2.4 Coeficiente Dual de cultivo

El coeficiente dual de cultivo (Kc dual) es una evolución de la anterior y es utilizada para calcular la evapotranspiración del cultivo, particularmente en sistemas agrícolas donde las precipitaciones pueden alterar significativamente la humedad del suelo. A diferencia del coeficiente de cultivo único (Kc), que combina en un solo valor los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo, el Kc dual separa estos componentes en dos factores distintos: el coeficiente basal del cultivo (Kcb) y el coeficiente de evaporación del suelo (Ke). Esta diferenciación permite una estimación más precisa de la demanda de agua, adaptándose mejor a los cambios en las condiciones de humedad del suelo.



La evapotranspiración del cultivo en el modelo dual se calcula de la siguiente manera:

$$ETc = (Kcb + Ke) \cdot ETo$$

donde:

- Kcb: Coeficiente basal del cultivo, representa la transpiración del cultivo bajo condiciones de suelo seco, en las que la humedad del suelo no es una limitante para el crecimiento.
- Ke: Coeficiente de evaporación del suelo, cuantifica la evaporación directa desde la superficie del suelo, que varía en función de la humedad del suelo y se incrementa después de eventos de lluvia.
- ETo: Evapotranspiración de referencia.

El coeficiente Kcb es un parámetro que representa la transpiración del cultivo bajo condiciones en las que el suelo está seco en la superficie, pero la planta no experimenta limitaciones hídricas en el perfil radicular. Este coeficiente, que es específico de cada cultivo, depende de su tipo, su etapa de desarrollo y de factores climáticos como la temperatura y la humedad relativa. Su valor refleja la cantidad de agua que el cultivo extrae directamente del suelo para sus procesos de transpiración, excluyendo la evaporación directa de la superficie del suelo. De acuerdo con la metodología FAO 56, el valor de Kcb varía a lo largo del ciclo del cultivo, siendo bajo en las etapas iniciales, cuando el follaje es escaso y la transpiración es limitada, y alcanzando su punto máximo durante el desarrollo completo del cultivo, cuando la demanda de agua es mayor debido a una mayor superficie foliar. En este aspecto es muy similar al patrón del Kc.

Por otro lado, el coeficiente de evaporación del suelo (Ke) refleja la evaporación directa desde la superficie del suelo, una componente del balance hídrico que varía de acuerdo con el contenido de humedad en la superficie. Después de eventos de recarga, como la precipitación, el valor de Ke es alto debido a la disponibilidad inmediata de agua en la capa superficial del suelo. Sin embargo, a medida que el suelo comienza a secarse y la humedad disminuye, Ke también se reduce, llegando a valores cercanos a cero en condiciones de sequedad superficial prolongada. La evaporación de la superficie del suelo es sensible a factores climáticos como la temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento, los cuales intensifican el proceso de pérdida de agua por evaporación.

2.5 Etapas de desarrollo del cultivo y su influencia en los valores de Kcb y Ke.

La fenología del cultivo, es decir, las etapas de su desarrollo a lo largo del ciclo del cultivo, tiene un impacto directo y significativo en la evapotranspiración. La variación en la fenología afecta factores como el área foliar, la cobertura del suelo y la altura del cultivo, los cuales influyen en la cantidad de



agua que se pierde tanto por transpiración (a través de la planta) como por evaporación (desde el suelo). Debido a estas variaciones fenológicas, los valores de evapotranspiración cambian a lo largo del ciclo de vida del cultivo haciendo que la estimación de las necesidades de agua del cultivo sea un proceso dinámico y no sólo dependiente de variables meteorológicas como en la definición de evapotranspiración de referencia.

En las etapas iniciales, cuando el cultivo recién ha sido sembrado, el área foliar es pequeña y no cubre completamente el suelo. En esta fase, la transpiración es limitada, y la mayor parte de la pérdida de agua ocurre por evaporación desde la superficie del suelo. A medida que el cultivo crece y cubre más área del suelo durante la etapa de desarrollo, la transpiración aumenta y la evaporación desde el suelo disminuye, ya que el follaje impide que el sol y el viento lleguen directamente a la superficie del suelo. Al alcanzar la fase de mitad de temporada, cuando el cultivo tiene una cobertura máxima, la transpiración se convierte en la componente dominante de la evapotranspiración. Finalmente, en la etapa de madurez, la transpiración del cultivo disminuye a medida que envejece y reduce su crecimiento, lo que también reduce la evapotranspiración total.

Es fundamental considerar la fenología del cultivo en el cálculo de la E_T en lugar de basarse únicamente en la evapotranspiración de referencia. La E_{T0} representa la demanda hídrica de una vegetación de referencia estándar bajo condiciones ideales, pero no tiene en cuenta las características específicas del cultivo ni las distintas etapas de su ciclo de vida, ni los cambios en la disponibilidad de agua del suelo. Si solo se utilizara la E_{T0} , se subestimarían o sobrestimarían las necesidades de agua en función de la fase de desarrollo del cultivo. Por ejemplo, en las etapas iniciales, el uso exclusivo de E_{T0} podría sobreestimar la demanda hídrica, ya que el suelo desnudo permite una mayor evaporación que un cultivo joven. En cambio, en la fase de crecimiento máximo, E_{T0} podría subestimar las necesidades hídricas si no se ajusta por la mayor superficie foliar y transpiración del cultivo.

Considerar la fenología permite ajustar los coeficientes de cultivo, como el coeficiente basal (K_{cb}) y el coeficiente de evaporación (K_e), en función de las características reales del cultivo y las condiciones específicas del suelo en cada fase.

La fenología se estima mediante modelos mecánicos que representan los distintos procesos de desarrollo que atraviesa una planta durante su temporada de crecimiento. Estos modelos permiten predecir con mayor precisión las etapas de desarrollo del cultivo (como emergencia, floración y madurez) en función de variables ambientales como la temperatura y la acumulación de unidades térmicas (grados día). Esto es importante ya que las condiciones en las que crece el cultivo varían de un año a otro, no sólo por la variabilidad climática sino por las decisiones de manejo como la fecha de siembra que exponen al cultivo a distintos escenarios. Las referencias basadas en días calendarios asumen un desarrollo constante e invariable, lo cual es una simplificación que ignora las variaciones climáticas de cada campaña. Por ejemplo, un cultivo de maíz podría alcanzar la fase de floración en



distintas fechas dependiendo de si la campaña es más cálida o fría de lo habitual. Ignorar estas variaciones puede llevar a errores significativos en la estimación de las necesidades de agua en etapas claves del desarrollo del cultivo como es la floración. La Figura 3 muestra la evolución del K_{cb} (línea azul), K_e (línea verde) y K_c (línea roja). Al considerar los dos coeficientes es posible modelar de manera más realista los cambios en el coeficiente del cultivo debido a las condiciones climáticas diferenciales. Por ejemplo, luego de eventos de humedecimiento como precipitaciones, el K_e tiene picos elevados dada la mayor disponibilidad de agua rápidamente evaporable por parte del suelo.

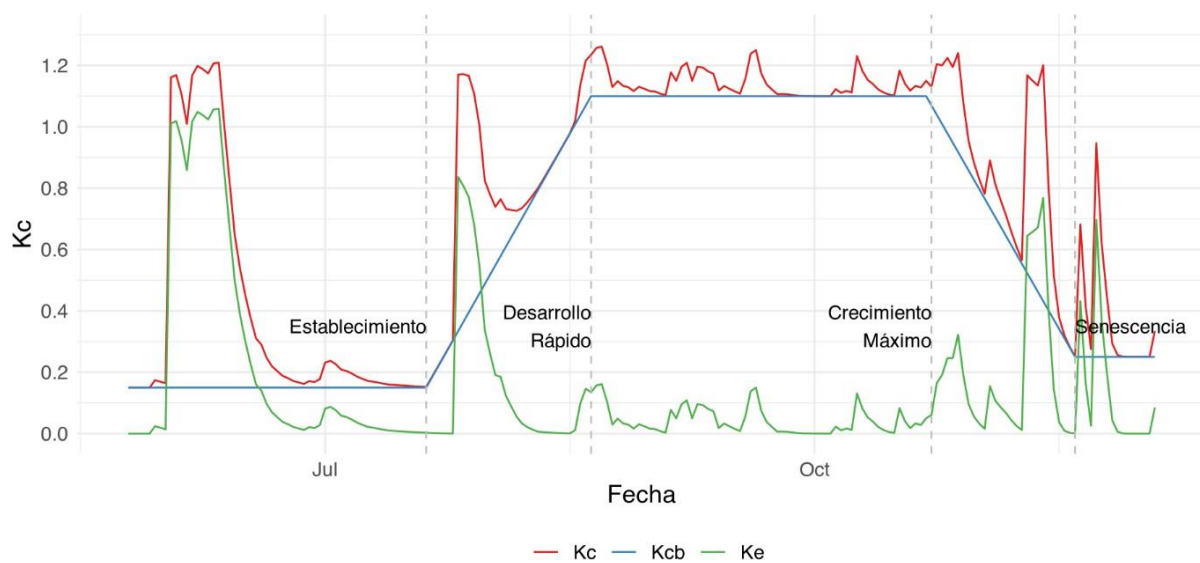


Figura 3: Evolución del K_c , K_{cb} y K_e .

El uso de modelos fenológicos en combinación con los coeficientes duales proporciona una herramienta robusta para estimar las necesidades de agua de manera dinámica y precisa. Además, permite al usuario definir una fecha de siembra y genotipo de cada cultivo lo que aporta un grado extra de customización para adaptarlo a las condiciones propias de cada explotación.

3. Modelos fenológicos

En este estudio, la estimación fenológica se realizará utilizando los modelos CERES (Crop Environment Resource Synthesis) para los cultivos de maíz y trigo, y CROPGRO (Crop Growth) para el cultivo de soja. Ambos modelos son componentes del sistema de simulación DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), una plataforma ampliamente utilizada en estudios agroclimáticos y de manejo de cultivos (Jones et al., 2003)



El modelo CERES fue desarrollado inicialmente para capturar las interacciones entre el clima, el suelo y las prácticas de manejo en cultivos de cereales, particularmente en maíz, trigo y sorgo (Jones et al., 1983). Este modelo simula las etapas de crecimiento del cultivo en función de la acumulación de unidades térmicas o "grados-día". La acumulación de temperatura es un método estándar en la fenología de los cultivos, dado que el desarrollo de las plantas se acelera o se retrasa en respuesta a las variaciones de temperatura (Ritchie & Nasmith, 1991).

El modelo CERES calcula la duración de cada fase fenológica del cultivo en función de las temperaturas diarias. También considera correcciones por necesidades de vernalización en el caso de trigo y fotoperíodo en el caso del maíz. Al simular estas fases, CERES permite estimar con precisión el momento en que el cultivo alcanza etapas críticas de demanda hídrica, lo cual es esencial para ajustar el riego y maximizar la eficiencia del uso del agua (Hoogenboom et al., 1999). A modo de ejemplo, la Figura 4 muestra las distintas etapas de desarrollo del cultivo de trigo sembrado a mediados de mayo en la localidad de Rio Cuarto (Argentina).

Phenological growth phases of Wheat

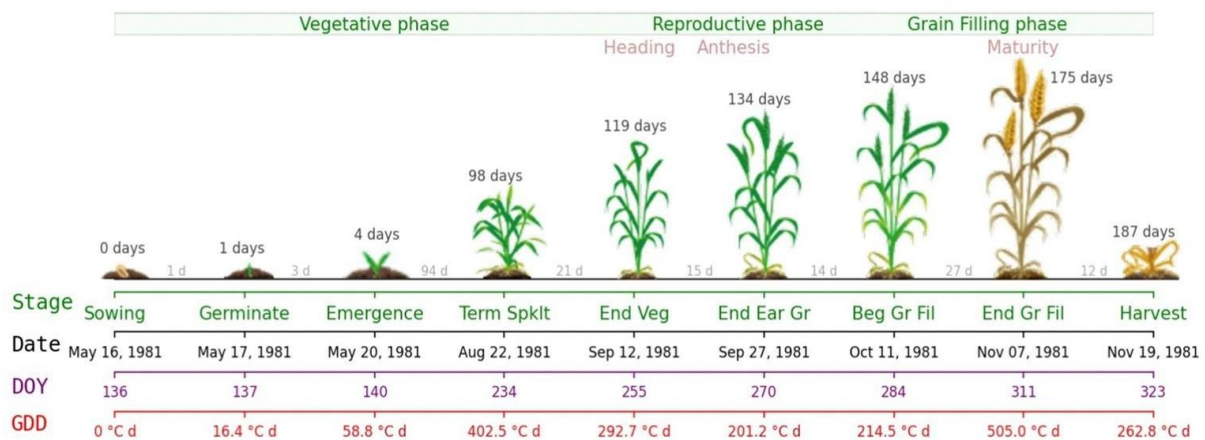


Figura 4: Etapas fenológicas estimadas para el cultivo de trigo.

El modelo CROPGRO fue diseñado específicamente para cultivos de leguminosas, como la soja, y se basa en una estructura modular que permite simular los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas en respuesta a factores ambientales y de manejo (Boote et al., 2018). CROPGRO, al igual que CERES, emplea la acumulación de grados-día para simular las fases fenológicas, pero también incorpora mecanismos fisiológicos específicos que afectan la duración de las distintas etapas como la sensibilidad al fotoperíodo. Esta sensibilidad es diferencial a lo largo del ciclo del cultivo. El modelo



también permite representar los distintos grupos de madurez de soja lo que permite que el usuario elija aquellos materiales que son más representativos de su sistema productivo.

Los parámetros que caracterizan cada uno de los cultivos simulados – trigo, maíz y soja – han sido validados con datos de campo y corresponden con los usados en ProRindes (<https://prorindes.smn.gob.ar>), herramienta que permite realizar pronósticos de rendimientos de cultivos basado en modelos de simulación de cultivos.

4. Construcción de series temporales de variables meteorológicas

Para el cálculo del balance hídrico se pueden utilizar distintas series temporales de entrada. La versión más sencilla del mismo corresponde a series temporales observadas. Las series observadas pueden tener una longitud variable pudiendo corresponder a una o más campañas. Una particularidad del modelo es su capacidad de construir series “híbridas” que combinen datos observados de la campaña actual con datos históricos. Este enfoque permite realizar predicciones del estado hídrico del suelo, considerando tanto las condiciones actuales como una variedad de escenarios históricos para simular las posibles variaciones climáticas a partir de una fecha de pronóstico. En este contexto no se trata de un pronóstico en sentido estricto sino de un escenario creado usando la climatología del sitio.

A modo de ejemplo, el usuario desea emitir un pronóstico de balance hídrico para el 15 de diciembre de 2015 en una localidad agrícola específica. Para ello, se construye una serie climática híbrida que, en su primera parte, incluye datos observados (temperatura, precipitación y radiación) desde el inicio de la campaña (por ejemplo, 1 de octubre de 2015) hasta la fecha del pronóstico (15 de diciembre de 2015). La Figura 5 muestra un ejemplo de cómo sería la construcción de este tipo de series temporales.

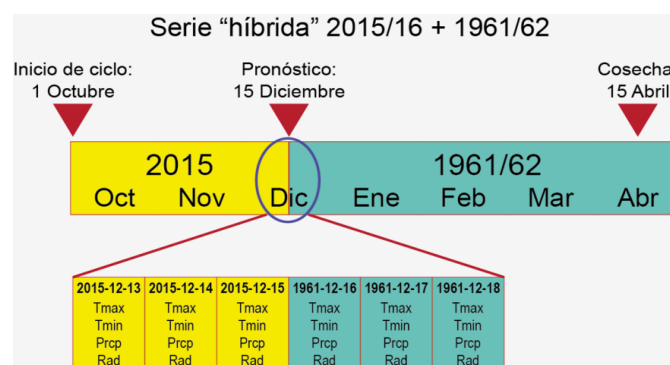


Figura 5: Construcción de series híbridas.



A partir de esa fecha, los datos observados se completan con registros históricos, seleccionando, por ejemplo, los datos correspondientes al período entre el 16 de diciembre de 1961 y el 30 de abril de 1962. De esta manera, se obtiene una serie climática que combina datos actuales con datos históricos. Esta combinación permite simular el balance hídrico desde la fecha de pronóstico hasta el final de la campaña, considerando condiciones históricas representativas de posibles escenarios climáticos futuros.

Además de construir una única serie híbrida, se pueden generar múltiples series utilizando diferentes años históricos para la segunda parte de la serie. Por ejemplo, si se dispone de datos históricos de 1961 a 2014, es posible generar 54 series híbridas para la campaña 2015/16. Cada serie híbrida combina las condiciones observadas de 2015 con los datos de un año histórico distinto (1961, 1962, etc.). Así, se obtienen 54 escenarios de balance hídrico, cada uno de los cuales refleja un posible comportamiento hídrico en función de la variabilidad climática a partir de la fecha de pronóstico.

El uso de múltiples series híbridas permite capturar la incertidumbre en el balance hídrico debido a la variabilidad climática posterior a la fecha de pronóstico. Esta estrategia es especialmente útil para evaluar riesgos de déficit hídrico o excesos de agua en el suelo, considerando un rango de posibles condiciones futuras. Conforme avanza la campaña y se integran más datos observados, la proporción de datos actuales en las series híbridas aumenta, lo que reduce la incertidumbre en el cálculo del balance hídrico.

Cabe mencionar que esta metodología de construcción de series híbridas es válida tanto para estaciones meteorológicas convencionales como para puntos de una grilla regular. No obstante, para que mantenga su potencia sería preferible que tenga una longitud de más de 30 años para poder caracterizar la climatología del sitio y capturar la ocurrencia de eventos extremos.

5. Balance hídrico

El modelo de balance hídrico comienza con la entrada de datos meteorológicos y de parámetros específicos del suelo y del cultivo. Estos datos iniciales son importantes para configurar los estados iniciales del sistema que se irán actualizando a lo largo de la simulación. Los parámetros de suelo y cultivo son seleccionables por parte del usuario. Es decir, debe seleccionar el tipo de suelo o ingresar la granulometría del suelo, si la conoce. Si ésta es desconocida se dispone de una serie de suelos por defecto categorizados en función de su textura. Esta información es muy importante para el cálculo de las constantes hídricas del suelo (Capacidad de Campo, Punto de Marchitez Permanente)

En el modelo, los datos meteorológicos diarios incluyen la evapotranspiración de referencia (ET_o), la



precipitación, las temperaturas máxima y mínima, la velocidad del viento y la humedad relativa mínima. Cabe resaltar que los únicos datos mandatorios son la precipitación y evapotranspiración de referencia, las demás variables son optativas y participan de correcciones en el cálculo del K_c . A esto se añaden los parámetros del cultivo, como los coeficientes de cultivo basal para cada etapa fenológica y la duración de estas etapas, junto con características de la planta como su altura inicial y máxima.

Una vez establecidos los datos iniciales, el modelo define las fechas de inicio y fin de la simulación en función de la disponibilidad de datos meteorológicos. A partir de aquí, se inicializan las variables de estado del sistema, que representan el contenido de humedad del suelo, la profundidad de la zona radicular, la fracción de cobertura del dosel vegetal y otros parámetros críticos para el balance hídrico. Con este marco de referencia, el modelo avanza de manera diaria, extrayendo para cada día los datos climáticos específicos necesarios para actualizar el estado del sistema.

El cálculo del coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) varía en función de la etapa fenológica en la que se encuentra el cultivo en cada día simulado. Dependiendo de esta fase, el modelo ajusta K_{cb} , que representa la transpiración del cultivo, y, al mismo tiempo, calcula la altura de la planta y la profundidad de las raíces, determinantes para evaluar la capacidad de retención de agua del suelo. Además, el modelo calcula el coeficiente máximo de cultivo (K_{cmax}), que refleja el potencial de evapotranspiración en condiciones óptimas.

El modelo también calcula la fracción de cobertura del dosel vegetal y la fracción de suelo expuesto y húmedo, que determinan cuánto del suelo queda disponible para la evaporación. A partir del contenido de humedad del suelo, calcula el coeficiente de reducción de la evaporación y el coeficiente de evaporación del suelo, que reflejan la cantidad de agua que se pierde por evaporación desde la superficie. A continuación, se obtiene la evaporación del suelo, calculada como la evaporación directa desde el suelo a partir del coeficiente de evaporación.

La evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) se calcula combinando los efectos de transpiración y evaporación, ambos multiplicados por E_{To} . De esta forma, el modelo permite evaluar la pérdida de agua en función de las condiciones climáticas diarias y las características específicas del cultivo y el suelo.

El balance hídrico en el suelo también se actualiza cada día mediante ajustes en la cantidad de agua disponible total (TAW , por su sigla en inglés) y el agua fácilmente disponible (RAW , por su sigla en inglés). La primera corresponde al agua total del suelo, que ocupa todos los poros de suelo, mientras que la segunda corresponde al agua útil. El agua útil es un concepto agronómico que representa el volumen que se encuentra entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente y representa el volumen de agua que puede ser absorbido sin resistencia por parte de las raíces de la planta.

Una característica importante del modelo implementado es el cálculo de coeficientes de estrés o



indicadores de estrés que permitan caracterizar las condiciones en las que crece el cultivo. Estos factores de estrés hídrico pueden impactar en el crecimiento y desarrollo del cultivo. Estos indicadores representan condiciones en las que la disponibilidad de agua en el suelo no es suficiente para satisfacer la demanda hídrica del cultivo. Si bien en el modelo no se modelan impactos directos sobre el cultivo, estos parámetros pueden considerarse datos proxy de los impactos del estrés hídrico sobre el rendimiento. El indicador de estrés más importante es el factor de estrés por deficiencia de agua (K_s). El factor de estrés hídrico mide la reducción en la transpiración debido a la falta de agua en el suelo. Este coeficiente se calcula a partir del nivel de agua fácilmente disponible en el suelo (RAW) y el nivel de agotamiento de agua en la zona radicular (D_r , por sus siglas en inglés). Cuando D_r supera a RAW, se activa el factor de reducción de la transpiración K_s , lo que significa que el cultivo comienza a experimentar limitaciones en su capacidad de transpirar. Esto se traduce en una reducción en la evapotranspiración del cultivo ajustada (ET_{cadj}) y, en última instancia, en un menor crecimiento y rendimiento del cultivo. Por ejemplo, la Figura 6 muestra la evolución del K_c y el K_c ajustado, es decir, el coeficiente ajustado por el factor de estrés. La línea punteada corresponde al K_{cb} mientras que la línea sólida negra corresponde al K_c ajustado por el estrés. Cuando el valor de K_c ajustado es menor al K_{cb} implica una reducción de la evapotranspiración debido a una disminución del agua en el suelo. La diferencia entre ambas curvas que ocurre desde agosto a octubre es otro indicador del estrés hídrico que sufrió el cultivo.

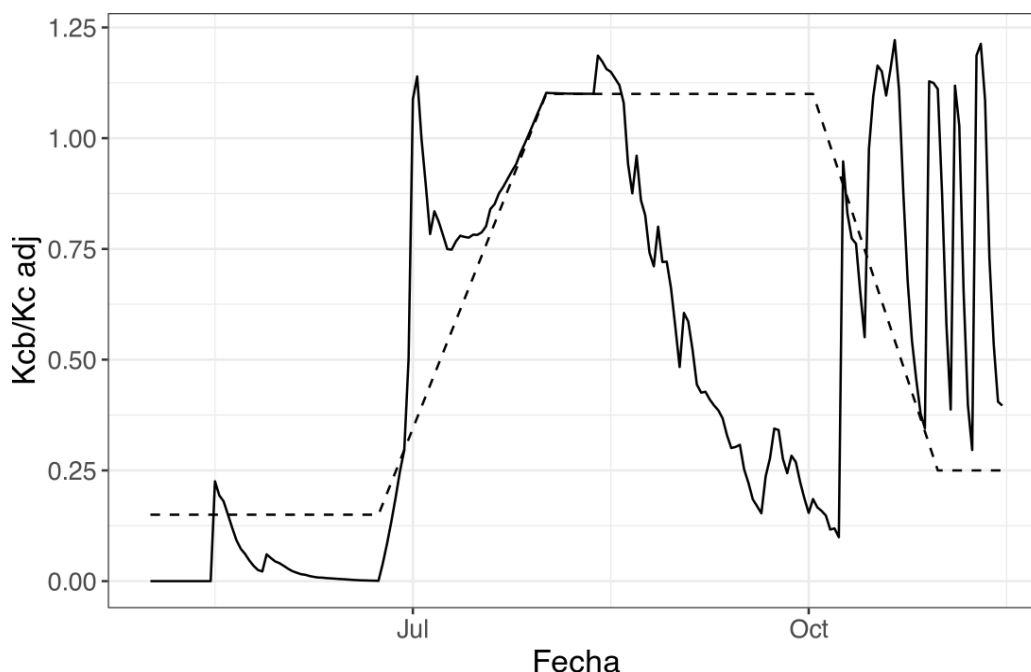


Figura 6: Evolución del k_c y K_{cadj} para el cultivo de trigo en Rio Cuarto, Argentina.



El uso de este tipo de indicadores es muy interesante para el análisis de riesgo ya que permitiría estimar la recurrencia de distintos escenarios estresantes durante el ciclo del cultivo para ajustar las fechas de siembra y rotaciones a los fines de mitigar posibles impactos.

A modo de resumen, la Figura 7 muestra un diagrama de flujo del proceso completo, desde la entrada de los datos meteorológicos hasta el cálculo del balance hídrico para cada estación meteorológica, suelo y cultivo.

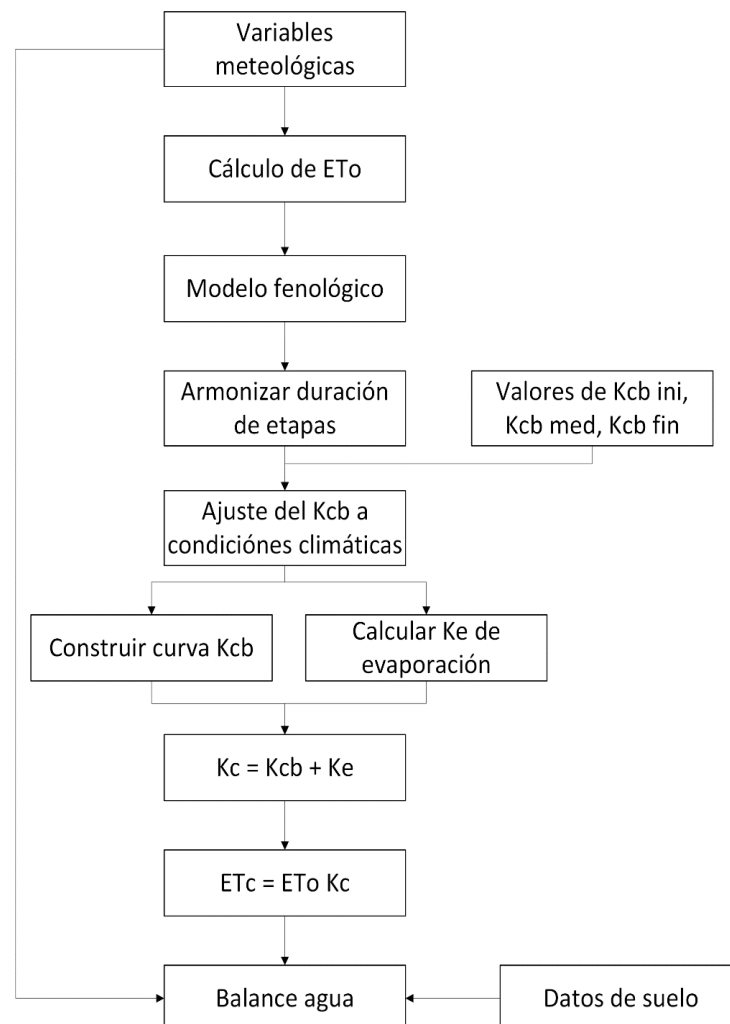


Figura 7: Procedimiento de cálculo de ET. Adaptado de FAO 56



6. Caso de estudio

La presente sección muestra los resultados del balance bajo distintas configuraciones. La primera corresponde al uso de series híbridas para la localidad de Río Cuarto, Córdoba (Argentina), considerando un cultivo de trigo sembrado a mediados de mayo en un suelo profundo con dos condiciones iniciales de agua (seco y húmedo). Las condiciones iniciales determinan el volumen de agua que tiene el suelo al momento de iniciar la simulación y se define como una proporción de capacidad de campo. Típicamente un suelo húmedo se encuentra a capacidad de campo, es decir, la cantidad de agua máxima luego del drenaje del agua gravitacional, mientras que un suelo seco tiene la mitad o menos de ese volumen. La Figura 8 muestra el agua disponible en el suelo en dos escenarios de agua inicial diferente, seco (panel superior) y húmedo (panel inferior) para un cultivo de trigo sembrado a mediados de mayo en la localidad de Río Cuarto.

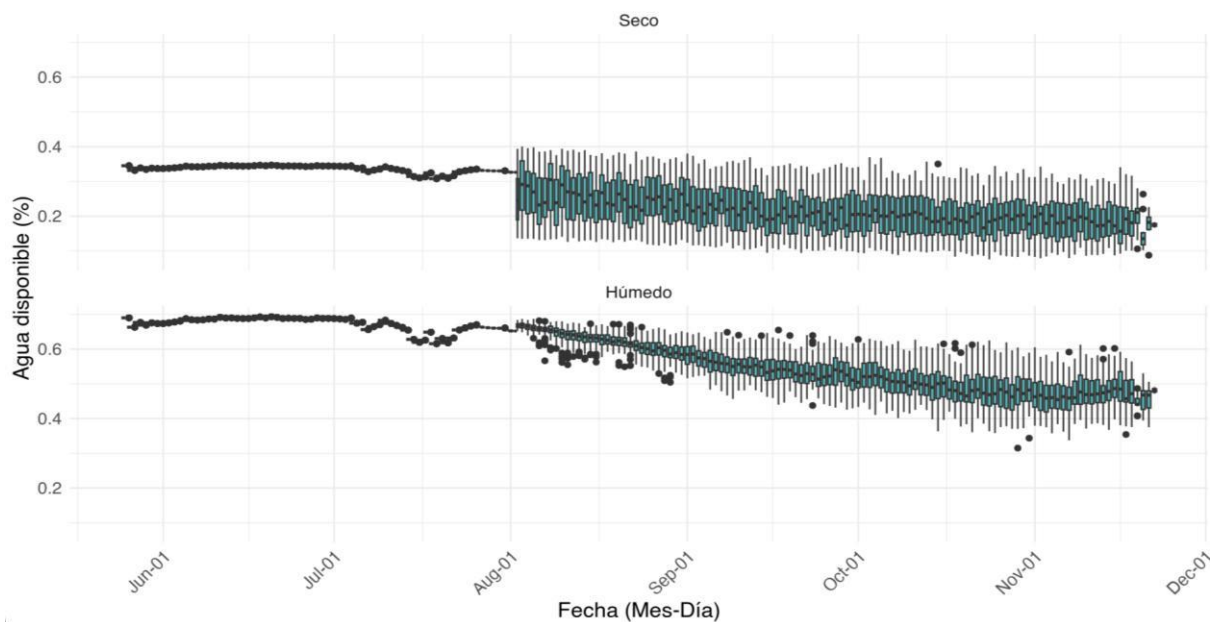


Figura 8: Agua disponible en el suelo durante el ciclo del cultivo de trigo (Río Cuarto, Argentina).

La simulación se inició a principios de mayo con datos observados y luego se completó desde julio en adelante con datos de años anteriores para formar las series híbridas. Dado que en la zona las lluvias invernales son bajas y la evapotranspiración es muy baja por las temperaturas y escaso desarrollo foliar del cultivo, el agua en el suelo se mantiene relativamente estable hasta la primavera. Una vez



comenzada la primavera, la temperatura aumenta y, por lo tanto, la demanda evaporativa. Debido a que en esta región las precipitaciones no son abundantes hasta fines de primavera, la demanda atmosférica debe ser suplida por el suelo. En la condición inicial más seca (panel superior), la variabilidad del volumen de agua disponible comienza a aumentar. Esto se debe a que el efecto amortiguador del suelo es escaso dado el menor volumen inicial de agua. Al crear las series híbridas, algunos años serán secos y el volumen de agua se reducirá rápidamente, mientras que en otros años lloverá y el volumen de agua se mantendrá o incluso aumentará. Al tener una serie temporal larga, de más de 60 años, es posible crear 60 años híbridos y por consecuencia se puede calcular la recurrencia de distintos volúmenes de agua en el suelo para esta condición inicial.

En el panel inferior, en cambio, la condición inicial de agua es mucho mayor por lo que el efecto amortiguador del suelo es mucho más marcado. Esto implica que la variabilidad de las cajas es mucho menor dado que en años secos el suelo actúa como reserva de agua y permite suplir la demanda atmosférica sin generar un estrés para el cultivo o limitar su crecimiento. Un primer análisis de la figura muestra con claridad como siembras con un perfil de suelo a capacidad de campo mitigan en gran medida los riesgos de primaveras secas que podrían afectar severamente el crecimiento del cultivo en un momento donde se está definiendo el rendimiento.

Como se mencionó en la sección anterior, también se puede analizar el coeficiente de estrés (K_s). La Figura 9 muestra la variación del K_s para el mismo cultivo partiendo de las mismas condiciones iniciales, seca (panel superior) y húmeda (panel inferior).

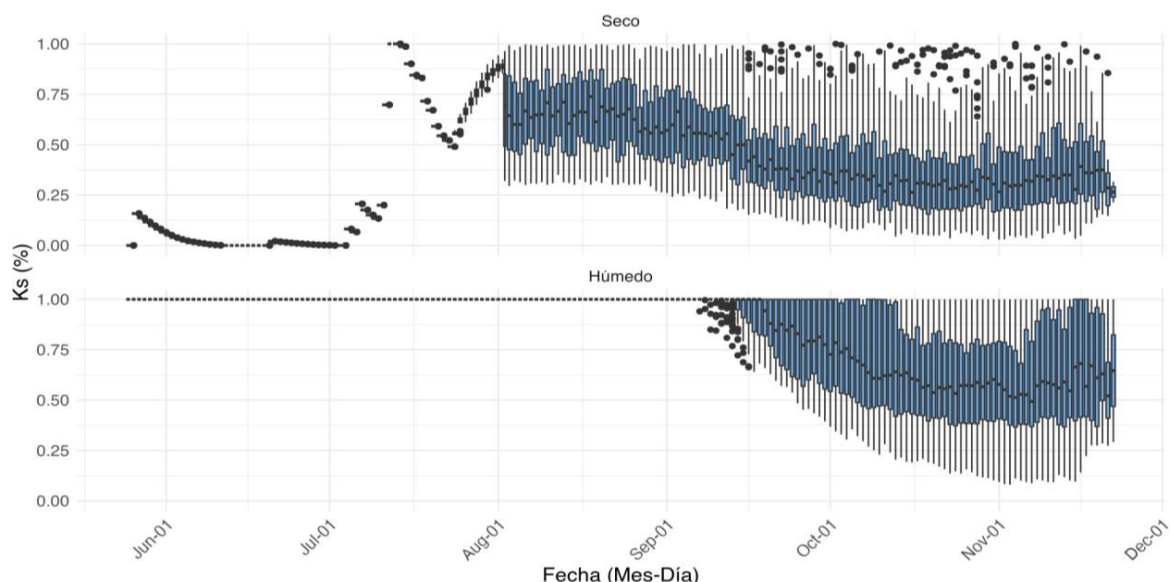


Figura 9: Coeficiente de estrés durante el ciclo del cultivo de trigo (Río Cuarto, Argentina).



En condiciones secas el cultivo experimenta condiciones estresantes rápidamente en su ciclo. Durante el invierno es altamente probable, en el 50% de los casos (mediana de la caja) que el cultivo transpire un 50% del potencial o menos. Esta agua que el cultivo no es capaz de transpirar no será transformada en biomasa y, por lo tanto, en rendimiento de grano. En el caso de la condición inicial húmeda, el suelo actúa como buffer y permite amortiguar la variabilidad climática interanual hasta la primavera. Esto quiere decir que, independientemente del año, un cultivo de trigo sembrado con el perfil de agua lleno no sufrirá estrés hasta septiembre u octubre. Luego, dado que el desarrollo foliar será adecuado y las temperaturas aumentarán, las probabilidades de estrés aumentan, aunque siempre los milímetros de agua iniciales permiten morigerar el estrés hídrico. Dado que se trata de un cultivo de secano es muy improbable que no sufra ningún tipo de estrés durante el ciclo.

Otra posibilidad de uso del balance es para la modelación espacial, considerando tanto datos climáticos grillados como polígonos de suelo. En este ejemplo se modeló el cultivo de trigo para la provincia de Córdoba utilizando datos climáticos del producto AgERA-5 y datos de suelo del Atlas de Suelos de la República Argentina del INTA. Se superpuso la grilla de datos climáticos con los polígonos de suelo predominante. En cada polígono se ponderaron los resultados en función de la superficie cubierta por cada píxel de los datos climáticos. Sólo se consideran unidades cartográficas con suelos bien drenados, es decir, sin influencia importante de napa freática. La Figura 10 muestra la transpiración relativa, es decir, la transpiración real dividida por la transpiración máxima si el cultivo no hubiese sufrido ningún tipo de estrés. En este caso sólo se muestra un año de resultados para resaltar la variabilidad espacial.

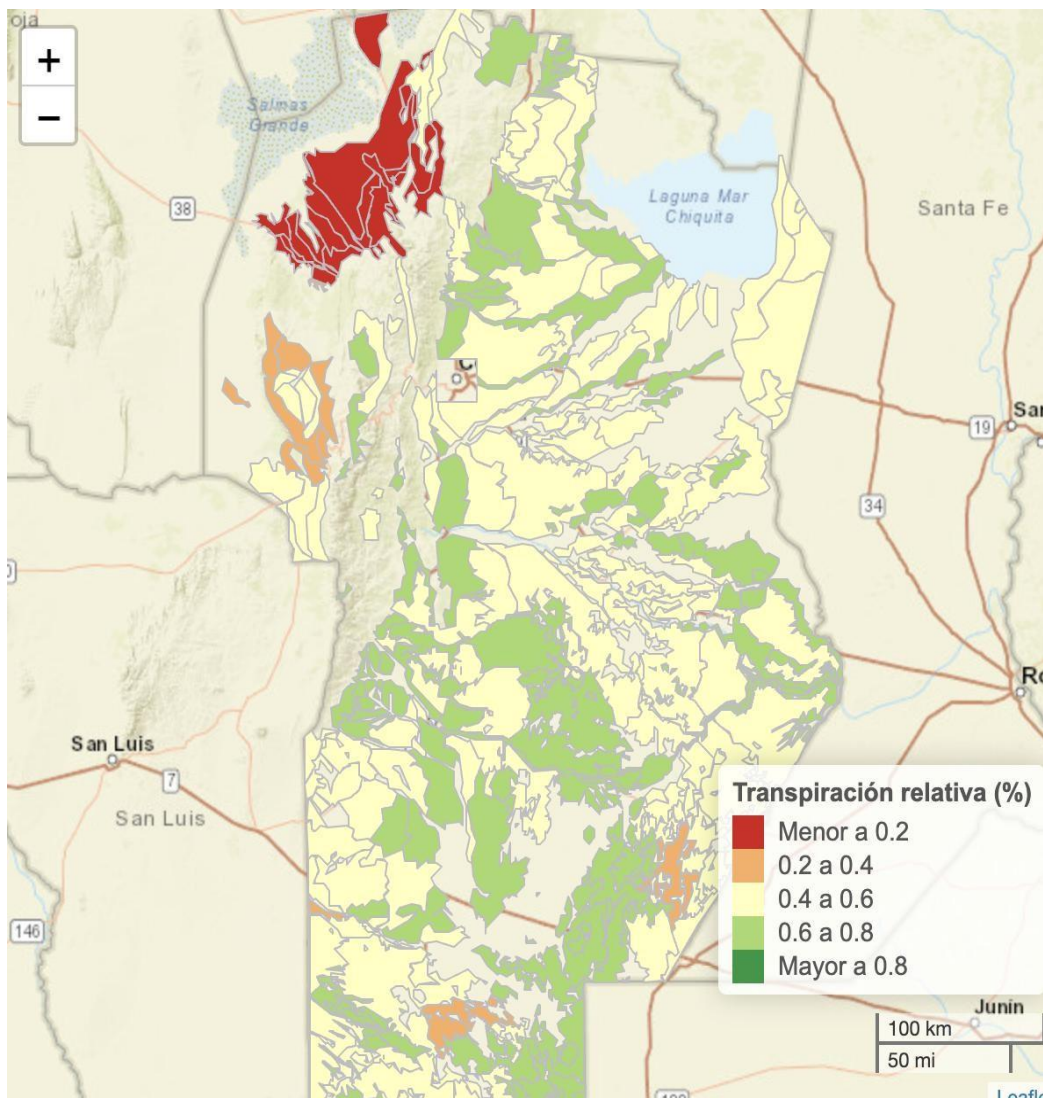


Figura 10: Transpiración relativa para un cultivo de trigo en la provincia de Córdoba.

Valores de transpiración relativa de 1 indican que el cultivo ha podido transpirar sin limitantes mientras que valores más bajos indican crecientes condiciones estresantes. Este tipo de análisis combina tanto la variabilidad edáfica como climática en una región. Cabe señalar que para cada polígono o píxel se pueden definir cultivos y manejos específicos en función de los sistemas agrícolas predominantes.



7. Conclusión

El modelo de balance hídrico presentado ofrece una herramienta flexible y adaptativa para la planificación agrícola. Su flexibilidad radica en su capacidad de ajustarse a distintos diseños de cultivos, lo que permite a los usuarios adaptar el modelo a las especificidades de cada lote en función de factores como el tipo de suelo, las condiciones iniciales de humedad y las prácticas de manejo que se implementen. Esto lo convierte en una opción viable para realizar un seguimiento personalizado del estado hídrico de los cultivos.

Además, el modelo es computacionalmente eficiente en comparación con modelos de simulación de cultivos completos, como DSSAT, que requieren mayores cantidades de datos de entrada y un tiempo de procesamiento más elevado. La simplicidad relativa del modelo de balance hídrico le permite generar estimaciones de manera más rápida, lo cual es ideal para el monitoreo en tiempo real y para el análisis de riesgo en contextos en los que se dispone de una gran cantidad de lotes o regiones a analizar simultáneamente.

El uso de modelos fenológicos reconocidos y difundidos en la región, como CERES para maíz y trigo, y CROPGRO para soja, aporta robustez y validez a las simulaciones de desarrollo de los cultivos. Estos modelos, ya probados en la zona, aseguran una representación confiable de las etapas fenológicas y las necesidades hídricas de cada cultivo. Esto permite obtener indicadores precisos para el monitoreo y la evaluación de riesgo, facilitando la toma de decisiones para optimizar la producción agrícola y la gestión del agua.

8. Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome*, 300(9), D05109.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 2-13.
- Boote, K. J., Jones, J. W., & Hoogenboom, G. (2018). Simulation of crop growth: CROPGRO model. In *Agricultural Systems modeling and Simulation* (pp. 651-692). CRC Press.
- Droogers, P., & Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and drainage systems*, 16(1), 33-45.
- Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53-63.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99.



- Hoogenboom, G., P. W. Wilkens, and G. Y. Tsuji, eds. 1999. DSSATVersion 3. Vol. 4. Honolulu, Hawaii: University of Hawaii.
- Jensen, D., Hargreaves, G., Temesgen, B., & Allen, R. (1997). Computation of ETo under nonideal conditions. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*, 123(5), 394-400.
- Jones, C., Ritchie, J., Kiniry, J., Godwin, D., & Otter, S. (1983). The CERES wheat and maize models. Proceedings of the International Symposium on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer, ICRISAT Center, India.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 235-265.
- McAneney, K., & Itier, B. (1996). Operational limits to the Priestley-Taylor formula. *Irrigation Science*, 17(1), 37-43.
- Priestley, C., & Taylor, R. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly weather review*, 100(2), 81-92.
- Ritchie, J. T., & Nesmith, D. S. (1991). Temperature and crop development. *Modeling plant and soil systems*, 31, 5-29.
- Stagnitti, F., Parlange, J. Y., & Rose, C. (1989). Hydrology of a small wet catchment. *Hydrological Processes*, 3(2), 137-150.
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., Howell, T. A., Evett, S. R., Rojas-Lara, B. A., Farahani, H. J., & Izzi, G. (2009). Concepts and applications of AquaCrop: the FAO crop water productivity model. In *Crop modeling and decision support* (pp. 175-191). Springer.
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Ann. Agron*, 12(1), 13-49.