

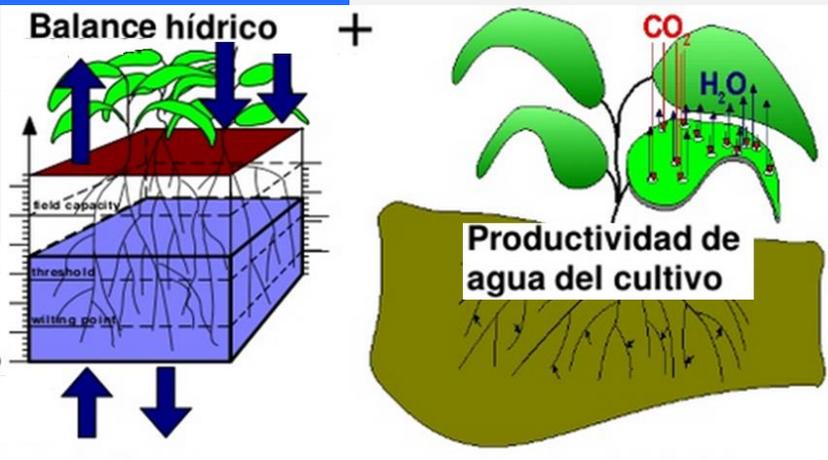


Webinar 23



AquaCrop
Crop Water Productivity Model

La simulación del desarrollo de cultivos con el modelo AquaCrop: conceptos y métodos



Dr. Waldo Ojeda Bustamante
Presidente
Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación

julio del 2020

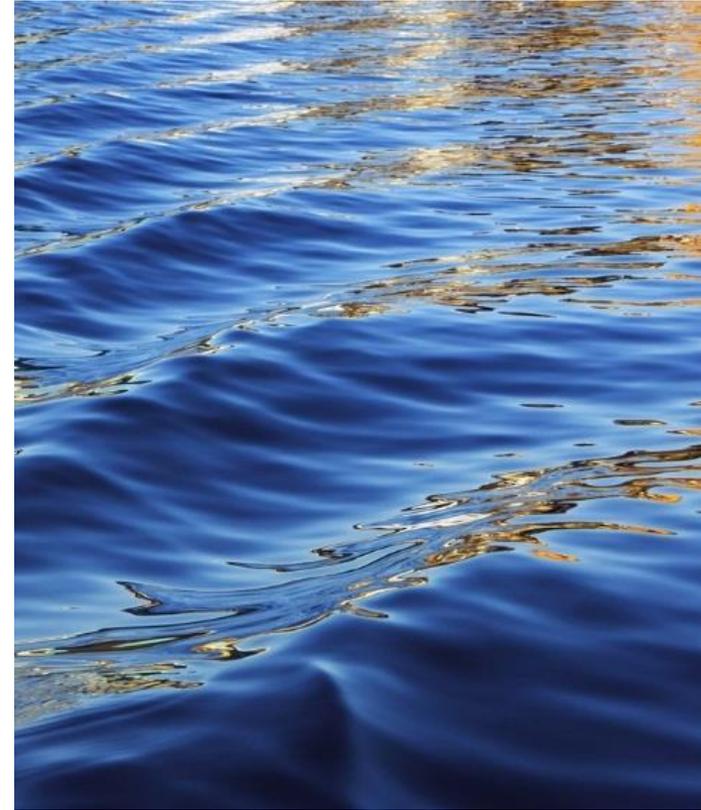
Índice

1. ¿Qué es un modelo de simulación?
2. Alcances y aplicaciones del AquaCrop
3. Conceptos base del AquaCrop
4. Subsistemas del AquaCrop
5. El AquaCrop interconectado
6. Conclusiones





1. ¿Qué es un modelo de simulación?



¿Qué es un modelo?

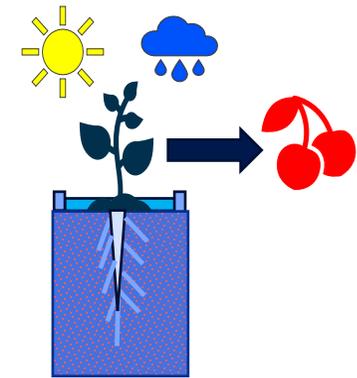
- Un modelo es una abstracción o representación **simplificada de un sistema real**, compuesto de objetos y factores que interactúan entre si en forma organizada.
- Cuando el sistema se simplifica a través de un modelo, puede apoyar en el **análisis de su comportamiento** con la generación de proyecciones o pronósticos de variables de respuesta de interés.

Tipos de modelos



Empíricos/estadísticos

Mecanicistas/basados en procesos



Modelos matemáticos en la agricultura

Simplifican un sistema real a través de una o mas ecuaciones que describen el comportamiento de las variables de interés del sistema agrícola bajo estudio.

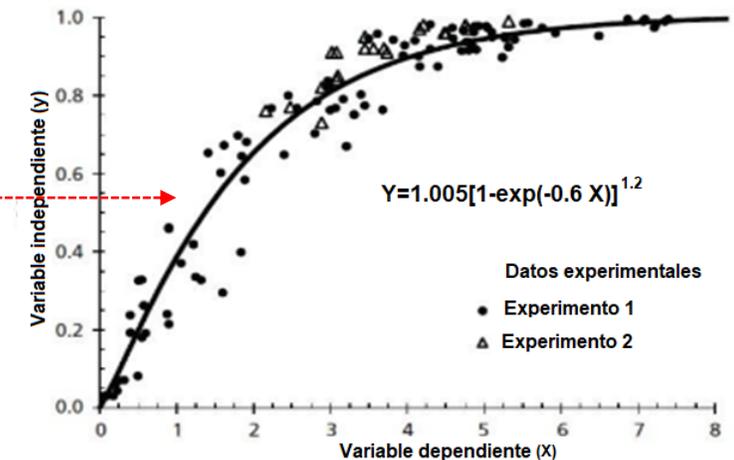
Los dos tipos de **modelos** más usados en la agricultura son:

Modelos estadísticos que describen la correlación entre las variables, con limitada información del proceso de causas y efectos del fenómeno

Modelos mecanicistas son construidos del conocimiento de procesos físicos, químicos, biológicos que gobiernan el sistema agrícola bajo estudio.

Modelos de programación lineal para decidir sobre la cantidad y composición de insumos y recursos a utilizar

Modelos de regresión empíricos para relacionar datos experimentales con un modelo matemático a través de uno o mas parámetros de ajuste.



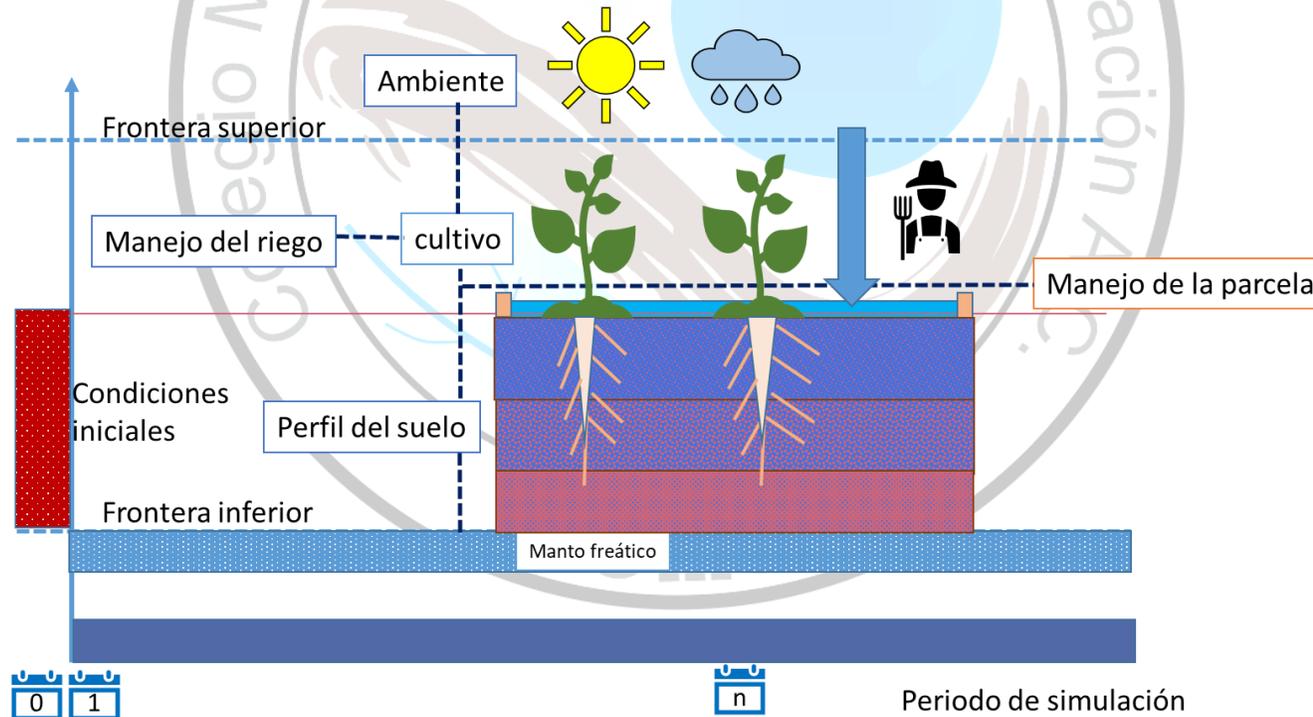


¿Qué es la simulación?



Simulación computacional de sistemas productivos

Representación analítica de un o mas procesos productivos interrelacionados un sistema real y que es representando en un modelo y es “ejecutado” o proyectado en función del tiempo, con el apoyo de herramientas matemáticas y computacionales para “reproducir”, analizar y predecir su funcionamiento sujeto a ecuaciones que gobiernan el proceso y condiciones iniciales, y de frontera.



Elementos de la simulación de un sistema

- 1. Asunciones.** Conjunto de suposiciones, leyes, restricciones, principios, en que se basa el comportamiento del sistema bajo estudio y que constituye el soporte del modelo.
- 2. Parámetros.** Variables control que se mantienen fijas para observar como las variables de entrada (independientes o básica) definen las variables de salida (dependiente o simulada)
- 3. Entradas.** Son los valores de las variables básicas de inicio de la simulación o de frontera del sistema agua-suelo-planta-ambiente.
 - **Condiciones iniciales.** Valores iniciales de las variables independiente, $t=0$
 - **Condiciones de frontera.** Valores de las variables en la frontera del sistema, $t>0$
- 4. Algoritmos.** Convierten los valores de las variables de entrada, a través de una serie de operaciones definidas por el modelo del sistema, en valores de salida de acuerdo a ecuaciones matemáticas o reglas de decisión, compatibles con las asunciones definidas.
- 5. Salidas.** Valores simulados de las variables de respuesta del sistema generadas por el algoritmo codificado, que permiten analizar el comportamiento del sistema a las variables de entrada.

Para que se usa la simulación de sistemas de producción

- Optimización de insumos y recursos
- Simulación de estrategias nuevas o mejoradas
- Identificación de restricciones y puntos críticos del sistema de producción Evaluación de alternativas de mejora del sistema de producción
- Análisis de la capacidad máxima o demanda pico de del sistema de producción
- Estimación de la eficiencia / productividad del sistema de producción
- Simulación de condiciones extremas
- Simulación del comportamiento futuro del sistema

¿Qué son los modelos para simular el crecimiento de cultivos como el AquaCrop?

Son generalmente modelos mecanicistas codificados en programas computacionales, que pueden **simular** el **desarrollo fenológico y crecimiento** de un cultivo, y la respuesta esperada de variables como rendimiento, biomasa y requerimientos de riego. Dichas herramientas sirven de **apoyo** para la toma de decisiones sobre estrategias en el **manejo del cultivo**



El **AquaCrop** es un modelo de crecimiento codificado en un sistema computacional para **simular** la **biomasa y rendimiento cosechable** del cultivo en respuesta al **agua aportada** como factor limitante, a través de su efecto en una serie de procesos biofísicos interrelacionados en función de características del cultivo y variables ambientales relevantes del suelo, atmósfera, así como de las relaciones interrelacionadas entre las condiciones ambientales, estreses y repuestas del cultivo.

Limitaciones de los modelos de crecimiento

El modelo mecanicista puede ser inadecuado para analizar el comportamiento del sistema

Problemas para analizar varias parcelas con diversidad de condiciones de manejo del suelo, agua y fertilidad.

Asumen condiciones homogéneas del cultivo, manejo y suelo durante el ciclo del cultivo

Se tienen que calibrar localmente

La calidad de los resultados depende de la calidad de los datos de entrada

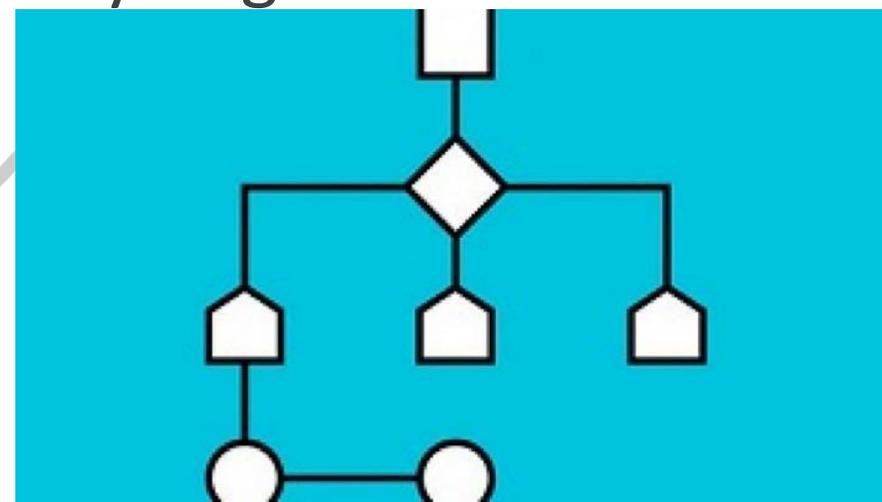
Existencia de errores de muestreo en los datos observados del cultivo, suelo, agua y clima

2. Alcances y aplicaciones del AquaCrop



El AquaCrop como modelo mecanicista

Para nuestro caso, un modelo es un **programa computacional** (AquaCrop) que tienen codificado un **algoritmo** que resuelve una **serie de ecuaciones matemáticas** que gobiernan el desarrollo de los cultivos agrícolas bajo diferentes condiciones ambientales, y que al **ejecutarse** (“correrse”) varias veces se obtienen diversas variables de respuesta de interés, considerando diferentes datos de entrada, condiciones iniciales y de frontera, relacionados con el suelo, agua, cultivo, y ambiente, bajo diferentes escenarios de manejo del cultivo, suelo, fertilización y riego.



Aplicaciones del AquaCrop



a) Estimar **requerimientos de riego** de los cultivos.

b) Generar **calendarios de riego** para máxima producción para **condiciones actuales o ajustadas**.

c) Identificar **restricciones** en la producción agrícola y en la productividad del agua.

d) Comparar y analizar la brecha de **rendimientos actuales y potenciales** en una o varias parcelas de zonas agrícola.

e) Estudiar el **efecto del cambio** de los patrones **climáticos** en la producción agrícola.

f) Analizar escenarios de interés para la planeación, operación, evaluación de zonas de riego.

g) Apoyar en la **toma de decisiones** en políticas o programas de asignación de agua.

h) Como **herramienta educativa** para conocer la **respuesta del cultivo a cambios ambientales o hídricos**.

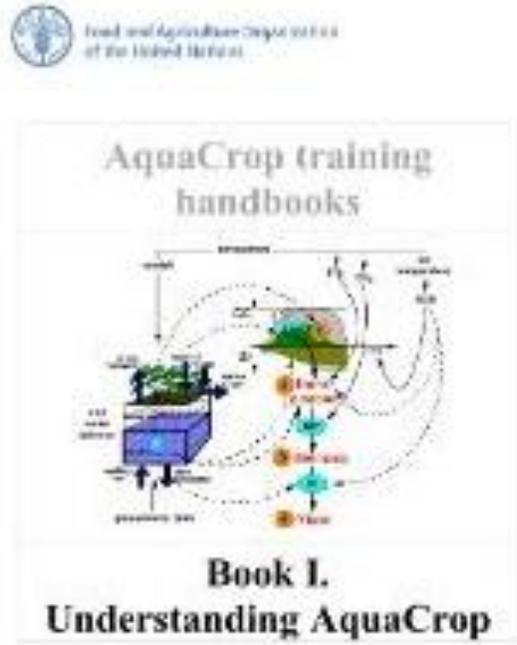
i) Desarrollar **estrategias de déficit hídrico para maximizar la productividad del agua como:**

- Riego deficitario.
- Prácticas de manejo agronómico del cultivo y del riego como fecha de siembra, variedad o cultivar, manejo de la fertilización, uso de acolchados, cosecha de lluvia, cambio en la frecuencia o cantidad del riego .

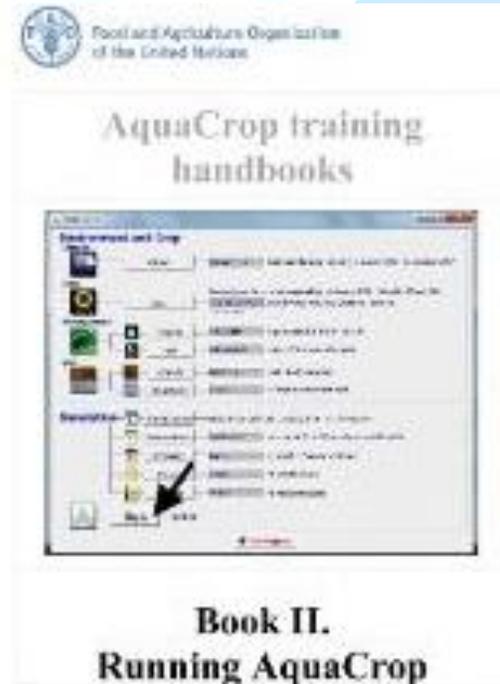
Literatura base del AquaCrop

Los procedimientos usados en el AquaCrop se encuentran en los siguientes documentos de la FAO:

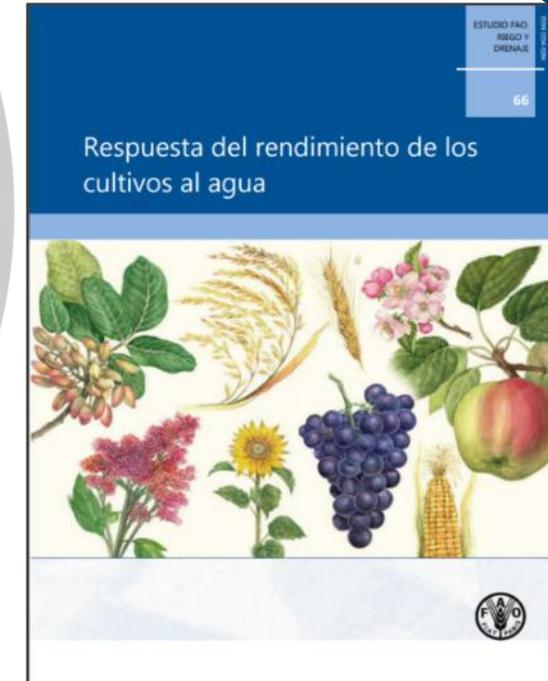
- I. AquaCrop training handbooks. Book I: Understanding AquaCrop. 2017.
- II. AquaCrop training handbooks. Book II: Running AquaCrop. 2017.
- III. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Manual 66 (español e inglés).



<http://www.fao.org/3/a-i6051e.pdf/>



<http://www.fao.org/3/a-i6052e.pdf>



<http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>

[Bibliografía sobre Aquacrop](#)

https://www.zotero.org/groups/368553/aquacrop_publications/items/AWVGFF33/library

3. Conceptos base del AquaCrop



Índice

Principios del AquaCrop

- i. Días Grado Desarrollo (DGD)
- ii. Fenología del cultivo
- iii. Área foliar. Índice de área foliar (IAF) y cobertura del dosel (CC)
- iv. Evapotranspiración del cultivo (ET_c)
- v. Profundidad radicular (Pr)
- vi. Caracterización hídrica del suelo

i. Días Grado Desarrollo (DGD)

- El tiempo térmico combina el **tiempo con la temperatura** y se ha usado para predecir la **fenología de los cultivos**.
- El tiempo térmico se ha expresado históricamente a través de diferentes términos: constante térmica, unidades térmicas, unidades calor, grados día desarrollo o **grados día crecimiento**.
- Para un mejor manejo de los cultivos es necesario conocer sus necesidades térmicas de los cultivos. Se ha comprobado experimentalmente que cada especie cultivada presenta diferente respuesta a la temperatura, respondiendo a **zonas de actividad (biológica) y letalidad**, expresada a través de temperaturas cardinales:
 - Temperaturas letales
 - Temperaturas biológicas
 - Temperaturas óptimas
- **GDD** – Acumulación diaria de la temperatura que se encuentra en el rango de su actividad fisiológica.

ii. Fenología basada de GDD

Cultivo de maíz

- Se ha comprobado experimentalmente que la fenología de los cultivos se puede usar estimar usando valores acumulados del tiempo térmico expresado como Días Grado Desarrollo acumulados ($\Sigma^{\circ}D$) a partir de la emergencia o trasplante.

Etapa	Clave	Duración etapa		Duración acumulada	
		Días n	$^{\circ}DD$	Días n	$\Sigma^{\circ}DD$
Emergencia	Ve	12	109.4	12	109.4
4-hojas	V4	34	207.0	46	316.4
8-hojas	V8	37	185.5	83	502.0
12-hojas	V10	14	74.1	97	576.1
Flor masculina	VT	13	89.1	110	665.2
Jiloteo	R1	15	158.3	125	823.5
Grano acuoso	R2	17	155.1	142	978.6
Grano lechoso	R3	11	123.7	153	1102.3
Grano masoso	R4	11	137.5	164	1239.8
Grano abollado	R5	7	95.8	171	1335.5
Madurez	R6	8	115.6	179	1451.1
Cosecha	-	11	189.6	190	1640.8

Fuente: Ojeda, et al, 2006 (revista Agrociencia-México)

iii. Área foliar

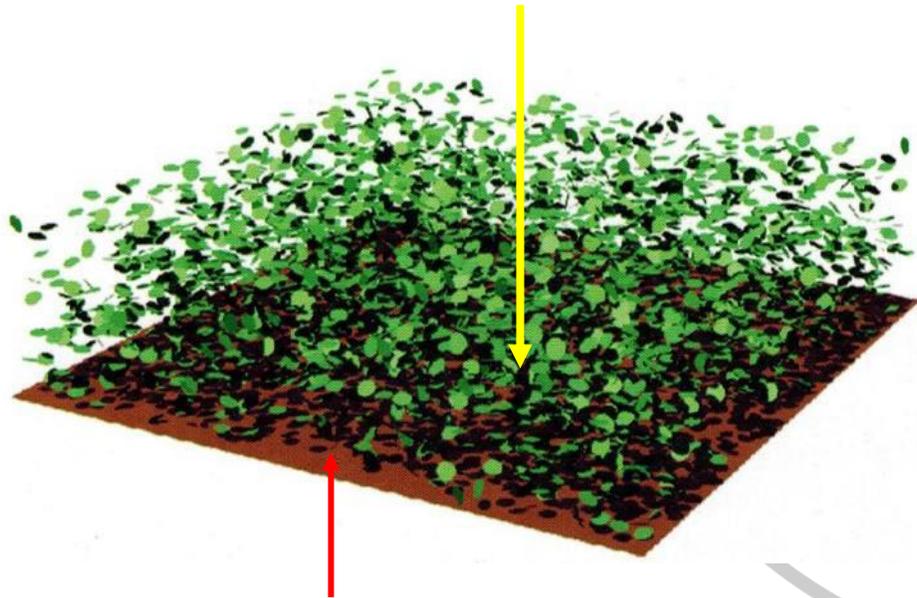
- El **área foliar (AF)** se define como la superficie foliar (L^2) que se encuentra sobre un área cultivada.
- El AF define la **capacidad** de un cultivo para **interceptar la radiación fotosintéticamente activa**, la cual es la fuente primaria de la energía utilizada por las plantas para la asimilación de materia orgánica que constituyen los órganos de las plantas.



Representación del área foliar

Area foliar

Índice de Área Foliar: Superficies traslapadas
Cobertura de Cultivo: Superficie del suelo cubierta por el dosel.



Zonas sombreadas y no sombreadas del suelo

Para nuestro caso:

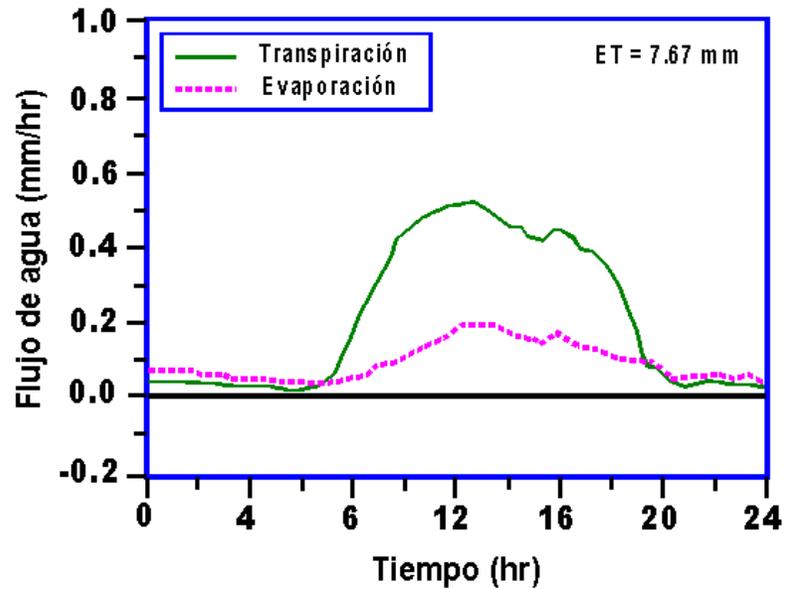
$IAF > 1$

$CC < 1$

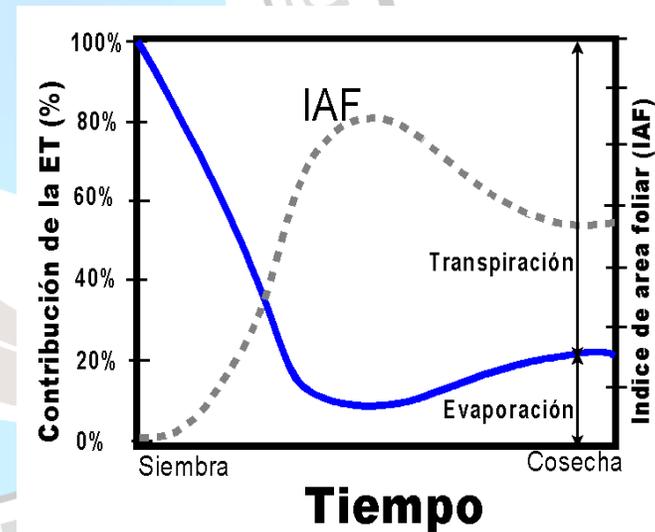
iv. Evapotranspiración del cultivo (ETc)

- La Evapotranspiración de un cultivo considera tanto los componentes de la evaporación de suelo como de la transpiración del cultivo.
- Agua liberada de la superficie tanto del suelo como de la planta en forma de vapor.
- Existe una metodología robusta para estimarlas ya sea integrada o separada por componentes.

Caso: ET día de cultivo en máxima demanda



Variación en un día



Variación en el ciclo

Transpiración del cultivo

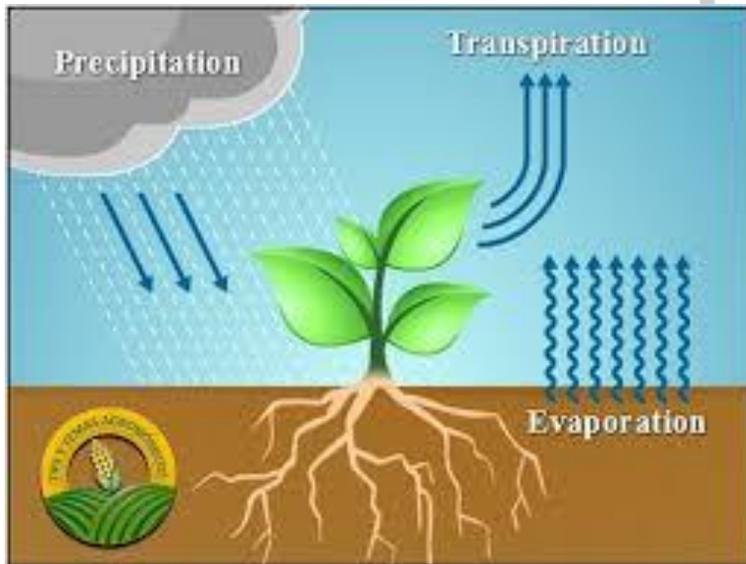
En las plantas el proceso dominante en las relaciones hídricas es la absorción de grandes cantidades de agua del suelo y su transporte a través de la misma para su liberación al ambiente a través de los estomas en un proceso conocido como **transpiración**.

La transpiración es la **salida de vapor de agua hacia la atmósfera** circundante desde las superficies celulares que, en conjunto al intercambio de dióxido de carbono (CO_2), determinan la eficiencia del uso de agua de una planta y se encuentra relacionado con la fotosíntesis.

Evaporación del agua del suelo

La evaporación se **produce** principalmente, en la **superficie humedecida del suelo** que recibe directamente los rayos solares ya que **no** está **protegida** por el **dosel verde del cultivo**.

AquaCrop calcula de manera separada la evaporación del suelo (Es) y la transpiración del cultivo (Tr).



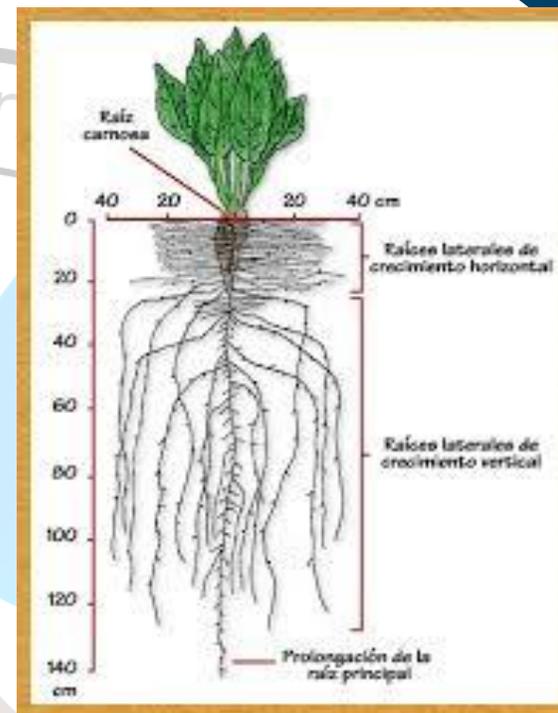
El **otro factor** clave que determina la Es **es el contenido del humedad y características de la capa superficial del suelo**.

v. Profundidad radical efectiva (Zr)

La absorción de agua por las raíces en AquaCrop se simula definiendo la **profundidad efectiva de las raíces (Zr)** que se define como la porción del perfil del suelo en **que las raíces absorben del 90-95%.**

La **Zr** en el periodo del momento de la **siembra hasta el punto previo a la emergencia** corresponde a la **profundidad del suelo** en la cual la semilla en germinación o plántula naciente **puede extraer agua.**

Para efectos del cálculo del balance de agua en AquaCrop, generalmente se considera adecuada una **Zr** inicial fija de **0.2 a 0.3 m** de siembra/trasplante a emergencia.



90% de la extracción de agua en el 75% de la profundidad radical superior.

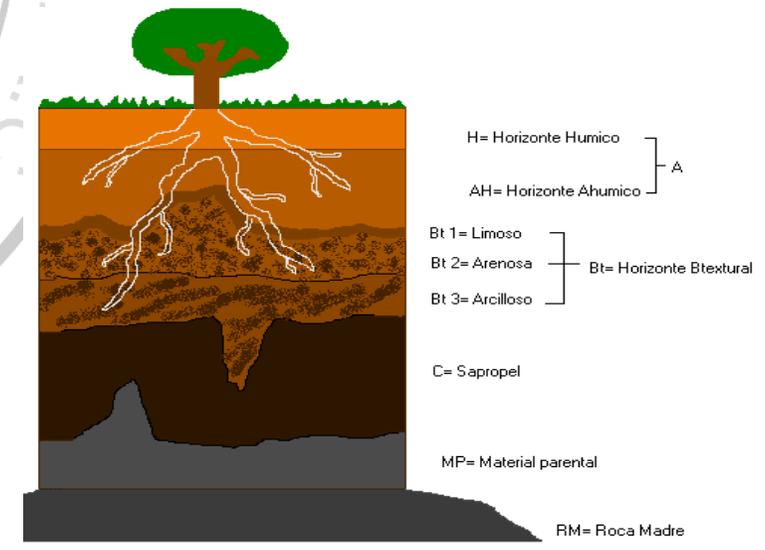
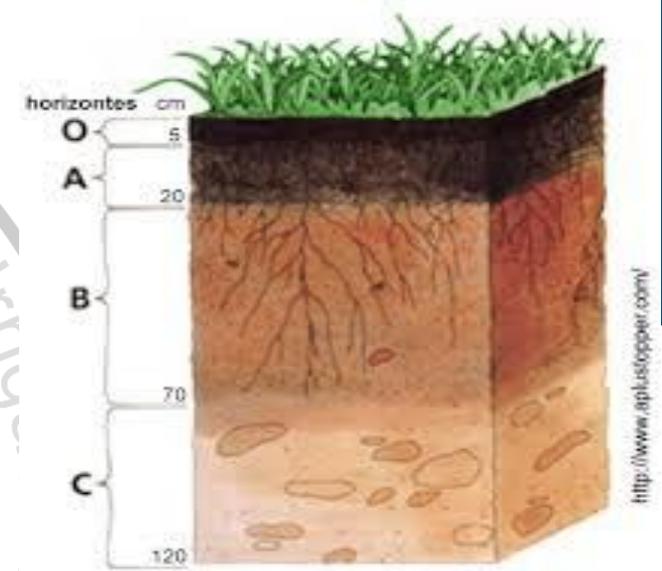


vi. Caracterización hidrica del suelo

El suelo se describe mediante un **perfil de suelo con sus propiedades hídras para liberar o retener agua** y por las **características de la capa freática** (si lo hubiere).

En AquaCrop, el suelo se puede subdividir en dirección vertical hasta en **cinco capas de profundidad variable**, en donde cada capa (u horizonte) tiene características hidro-físicas: el **contenido de humedad** del suelo en el punto de saturación, el límite superior de contenido de agua por gravedad (comúnmente denominado capacidad de campo, **FC**, para fácil referencia), el límite inferior de contenido de agua donde un cultivo puede alcanzar el punto de marchitez permanente (**PWP**), y la conductividad hidráulica en el punto de saturación (**Ksat**).

Con base en estas características, AquaCrop deriva otros parámetros que determinan la evaporación del suelo, el drenaje interno y la percolación profunda, el escurrimiento superficial y el ascenso capilar.



4. Subsistemas de AquaCrop



Índice

Subsistemas del AquaCrop

- i. Desarrollo, crecimiento y fenología del cultivo
- ii. Ambiente – Demanda evapotranspirativa, lluvia y CO_2
- iii. Balance de humedad del suelo
- iv. Manejo del riego y la parcela



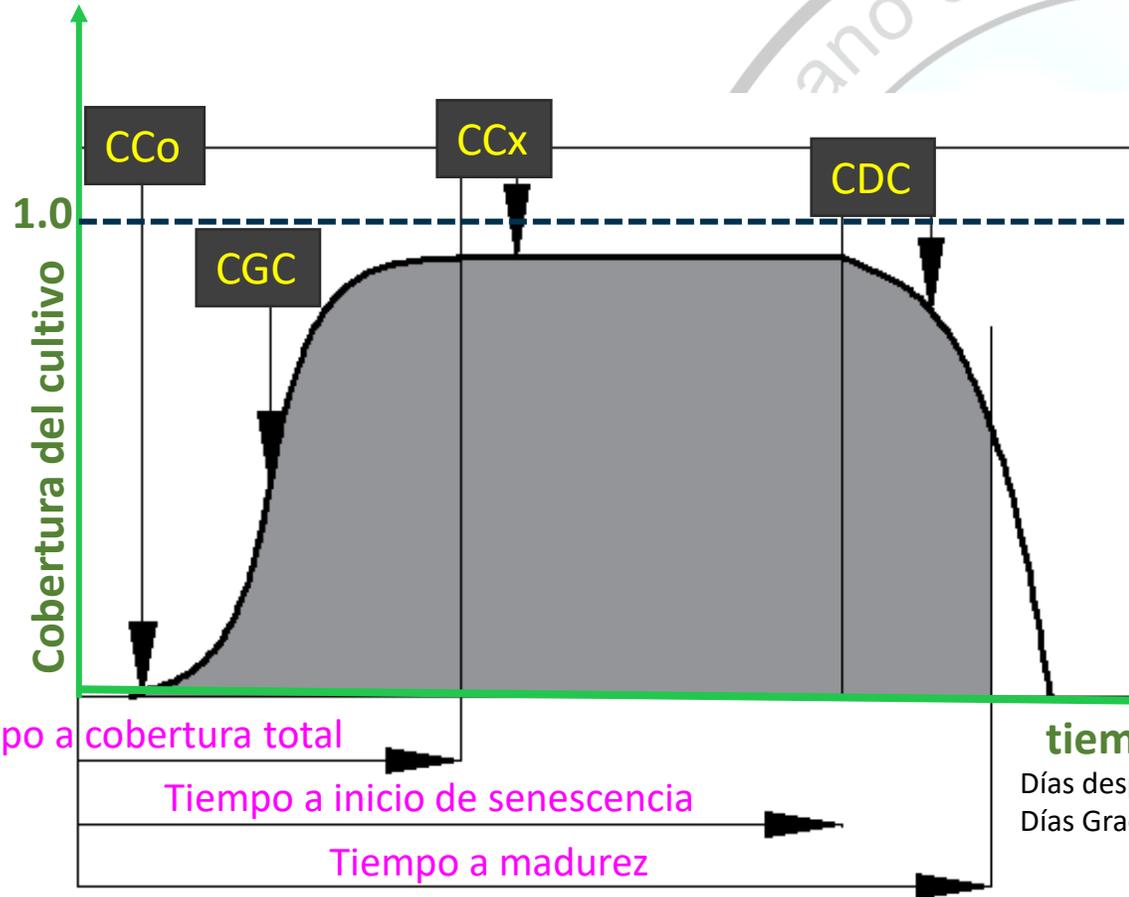
i. Submodelo: Desarrollo y crecimiento del cultivo

El cultivo tiene varios factores que definen su desarrollo

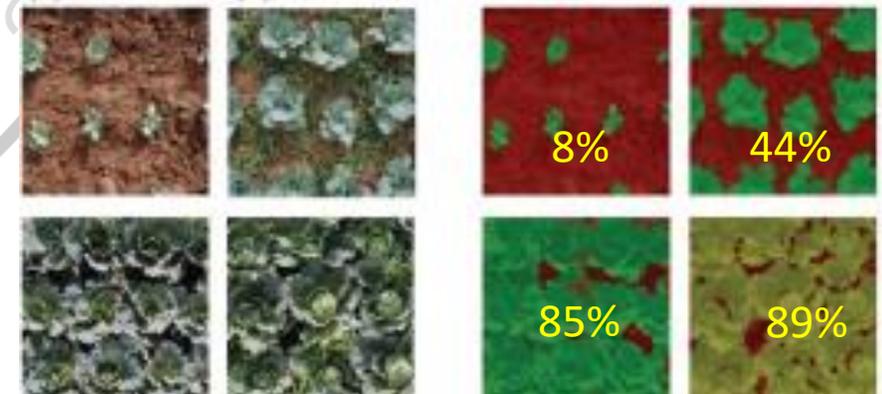


i. Submodelo: Desarrollo y crecimiento del cultivo

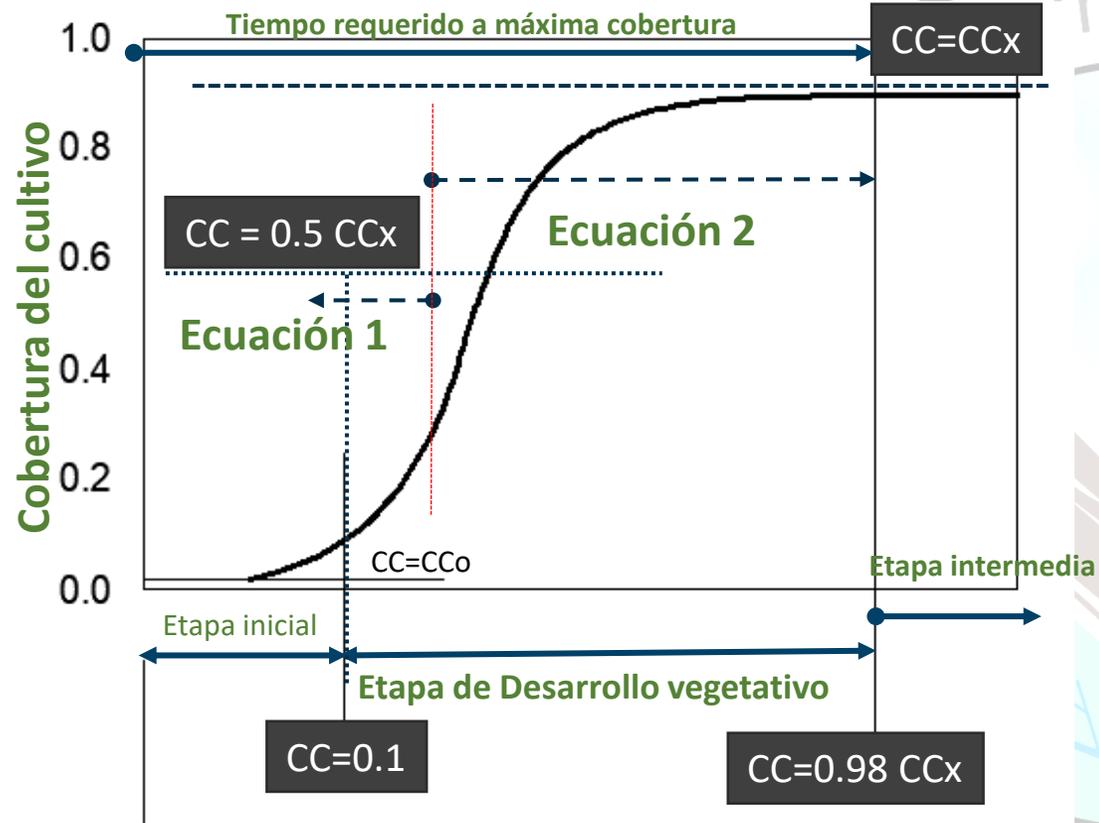
- El AquaCrop requiere caracterizar el desarrollo de la curva de **cobertura del cultivo (CC) óptima**.



- CC₀** es la cobertura inicial del dosel al 90% de emergencia.
- CGC** es el coeficiente de crecimiento del dosel vegetal por unidad de tiempo (por día o DGD) para el cultivo considerado.
- CC_x** es la cubierta de dosel máxima en condiciones óptimas.
- CDC** es el coeficiente de disminución del dosel expresado como reducción en la fracción de CC relativo a CC_x por día o DGD.



Ecuaciones de CC en la etapa de expansión



Ecuación 1

$$CC = CC_o e^{CGC*t}, \text{ para } CC < 0.5CC_x$$

Ecuación 2

$$CC = CC_x - 0.25((CC_x)^2/CC_o) * e^{-CGC*t}$$

CGC es el coeficiente de crecimiento del dosel vegetal por unidad de tiempo (por día o DGD).

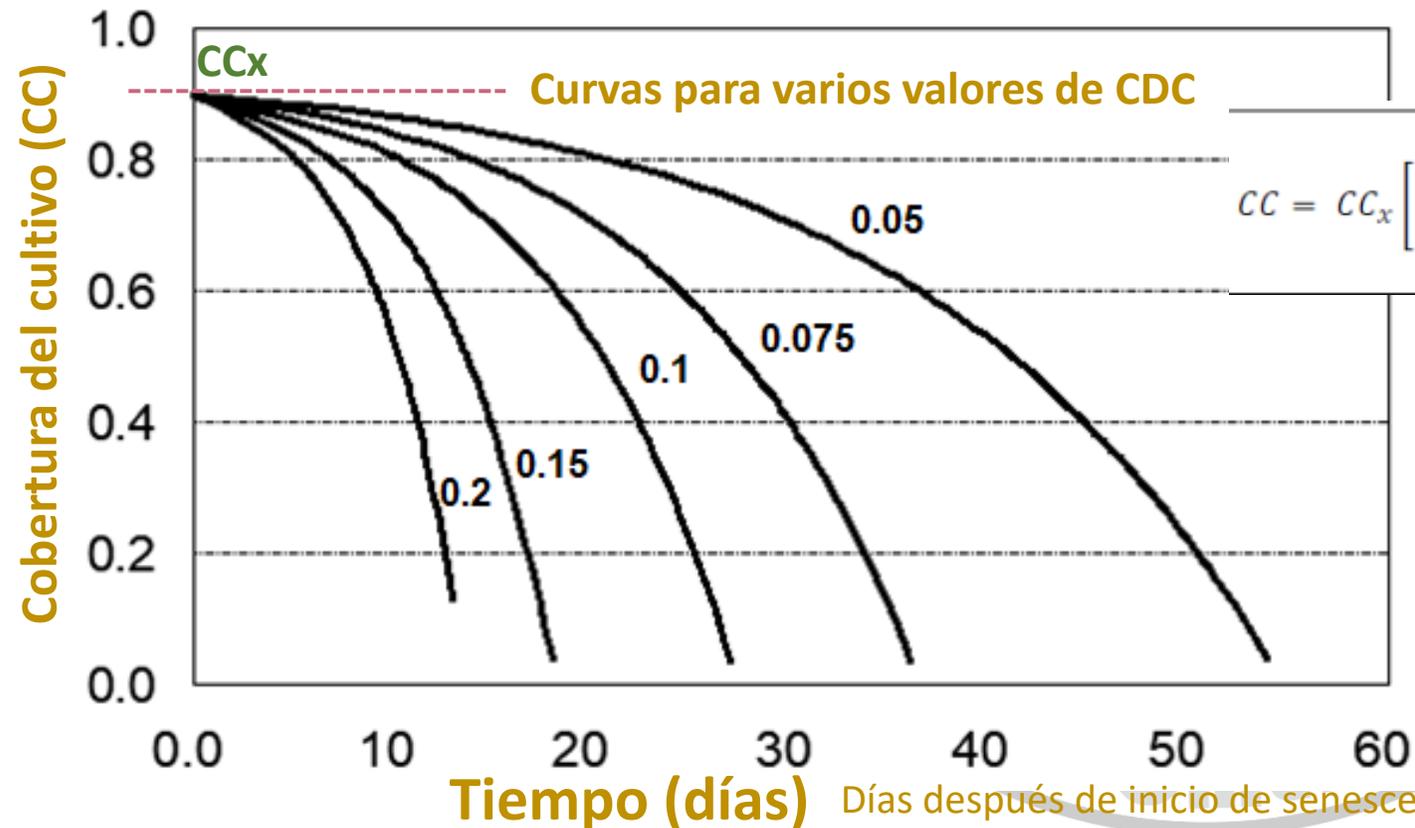
Notas:

- El tiempo transcurrido se puede expresar por días o DGD
- Se requiere especificar o ajustar los parámetros de cobertura: **CCo** y **CCx** y el parámetro de forma de la curva de expansión: **CGC**

Ecuación de CC para la senescencia del dosel

Ecuación para la curva de senescencia de CC:

$$CC = CC_x \left[1 - 0.05 \left(e^{\frac{CDC}{CC_t} * t} - 1 \right) \right]$$

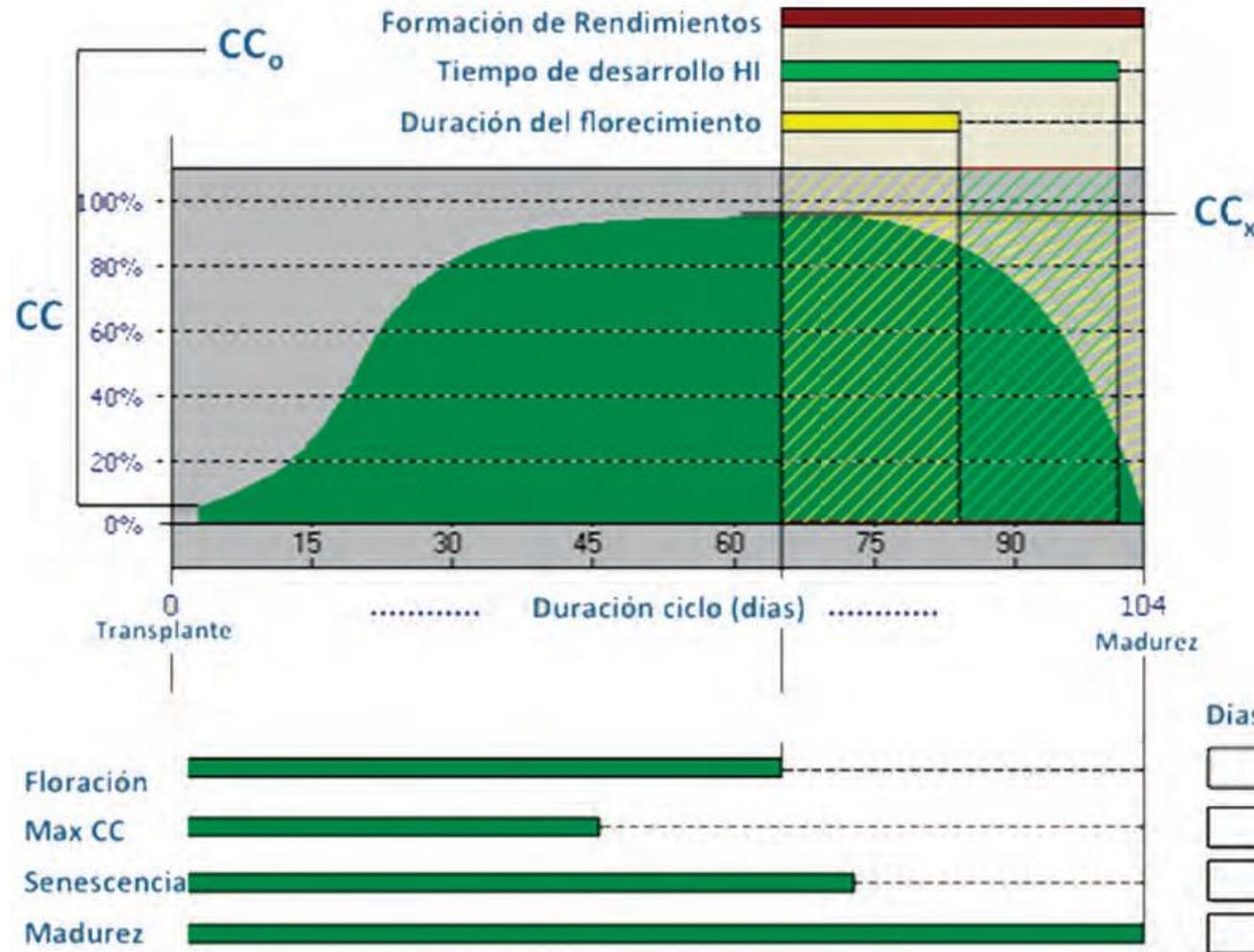


$$CC = CC_x \left[1 - 0.05 \left(e^{\frac{3.33 CDC}{CC_t + 2.29t} - 1} \right) \right] \quad CC = CC_x \left[1 - 0.05 \left(e^{\frac{CDC}{CC_t} t} - 1 \right) \right]$$

t es el tiempo de inicio de la senescencia
 CDC es el coeficiente de disminución del dosel expresado como reducción en la fracción de CC relativo a CCx por día o DGD.

Fenología y Cobertura del Cultivo (CC)

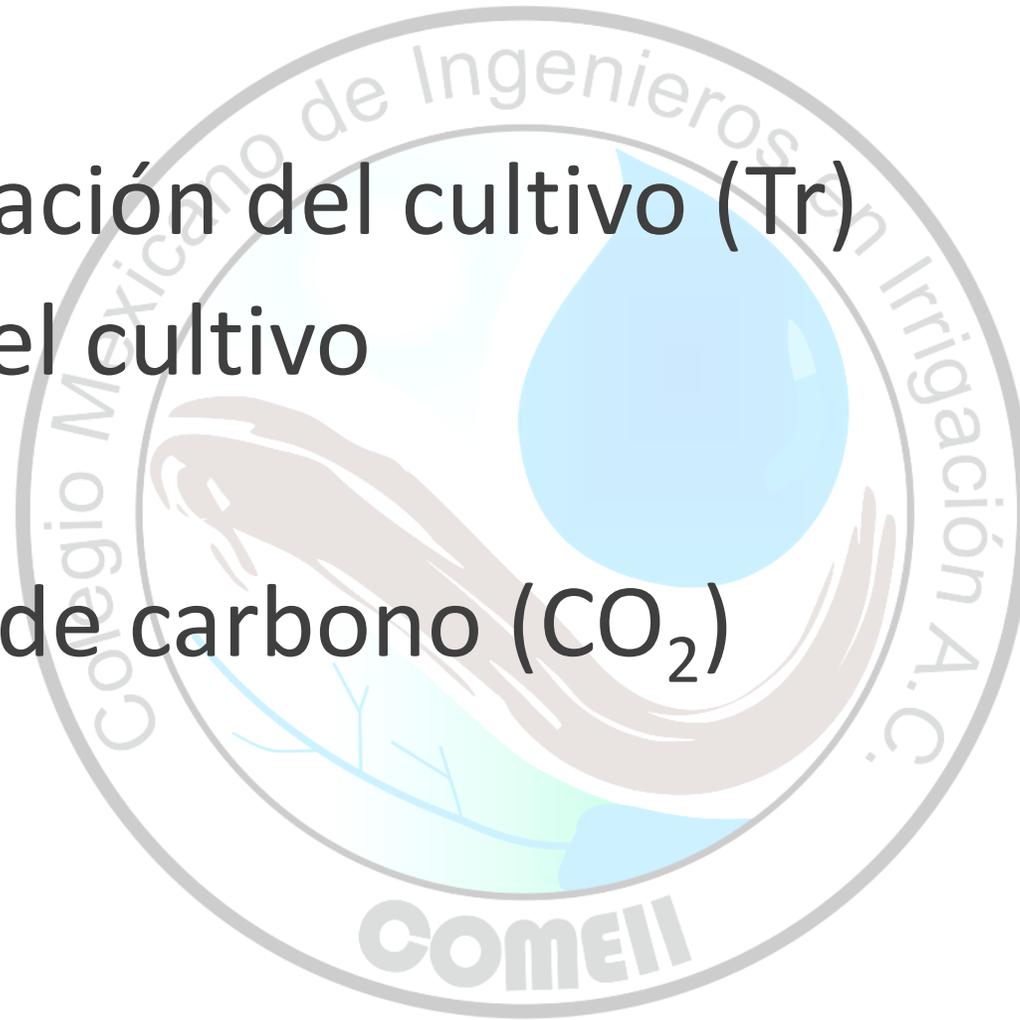
El AquaCrop requiere conocer información de la fenología del cultivo que se presenta en días después de siembra o DGDacum



Submodelo: Ambiente – Demanda evapotranspirativa, lluvia y CO₂



- Transpiración del cultivo (Tr)
- Estrés del cultivo
- Lluvia
- Dióxido de carbono (CO₂)



Transpiración del cultivo

El modelo AquaCrop separa la evaporación del suelo (E) de la transpiración del cultivo (Tr).

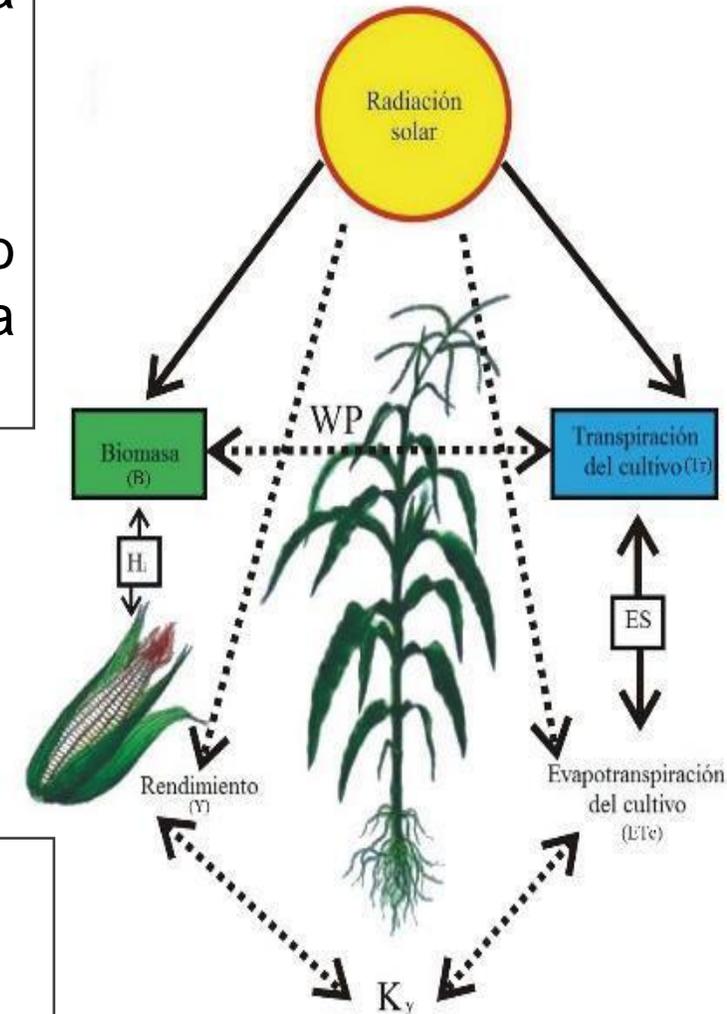
$$ET = E + Tr$$

Una parte fundamental el AquaCrop es predecir la Biomasa (B), como un función de la **transpiración diaria, parte productiva de la ET**, y la productividad del agua (WP):

El modelo asume una relación lineal entre la Biomasa y la transpiración del cultivo, por lo que se debe primero extraer la transpiración de la ET, como componente productivo.

$$B = WP \sum Tr$$

Donde B es expresada en Kg/m², las suma de Tr, expresada como mm o m³ por unidad de área, indica los valores estimados de Tr en el tiempo y WP es expresado como kg de biomasa por m² por mm de agua transpirada, o kg de biomasa por m³ de agua transpirada.



Transpiración del cultivo (Tr)

Uno de los retos en el desarrollo del AquaCrop fue estimar la transpiración a través de un método práctico.

La transpiración del cultivo (Tr_i) en el día i se estima con la siguiente **ecuación**:

$$Tr_i = CC_i * Kc_{Trx} * ETo_i$$

Donde:

- CC_i es cobertura del cultivo en el día i .
- Kc_{Trx} es el máximo coeficiente de transpiración estándar del cultivo (adimensional).
- ETo_i es la evapotranspiración de referencia en el día i .

Ecuación para el calculo de Tr diaria

- Bajo condiciones de estrés la transpiración del cultivo (Tr_i) en el día i se estima con la siguiente **ecuación**:

$$Tr_i = Ks \{ CC_i * KcTr_x \} * ETo_i$$

$KcTr_x$ es el **coeficiente de cultivo** para la **transpiración** máxima

CC_i es la **cobertura del Cultivo** en el día i (decimal)

ETo es la **evapotranspiración de referencia** en el día i (mm)

Ks es el factor de estrés (adimensional) que cuantifica el efecto de estrés hídrico, térmico y salino (osmótico).

Efecto del estrés en los cultivos



Estimación del factor de estrés (Ks)

- Para cuantificar el estrés ambiental, el AquaCrop usa un coeficiente de estrés (Ks), asociado a un cultivo, que afecta al parámetro o factor de desarrollo o productivo bajo análisis y varía de cero (máximo estrés) a uno (sin estrés).

La ecuación general del Ks es la siguiente:

$$Ks = 1 - \frac{(e^{p f_{forma}} - 1)}{(e^{f_{forma}} - 1)}$$

p es valor de la variable a asociarle un factor de estrés. La variables pueden ser la temperatura ambiental, la humedad del suelo, etc. Se debe definir la zona de aplicación de la ecuación de Ks dada por:

$$Ks=1 \text{ cuando } P \leq p_{upper}$$

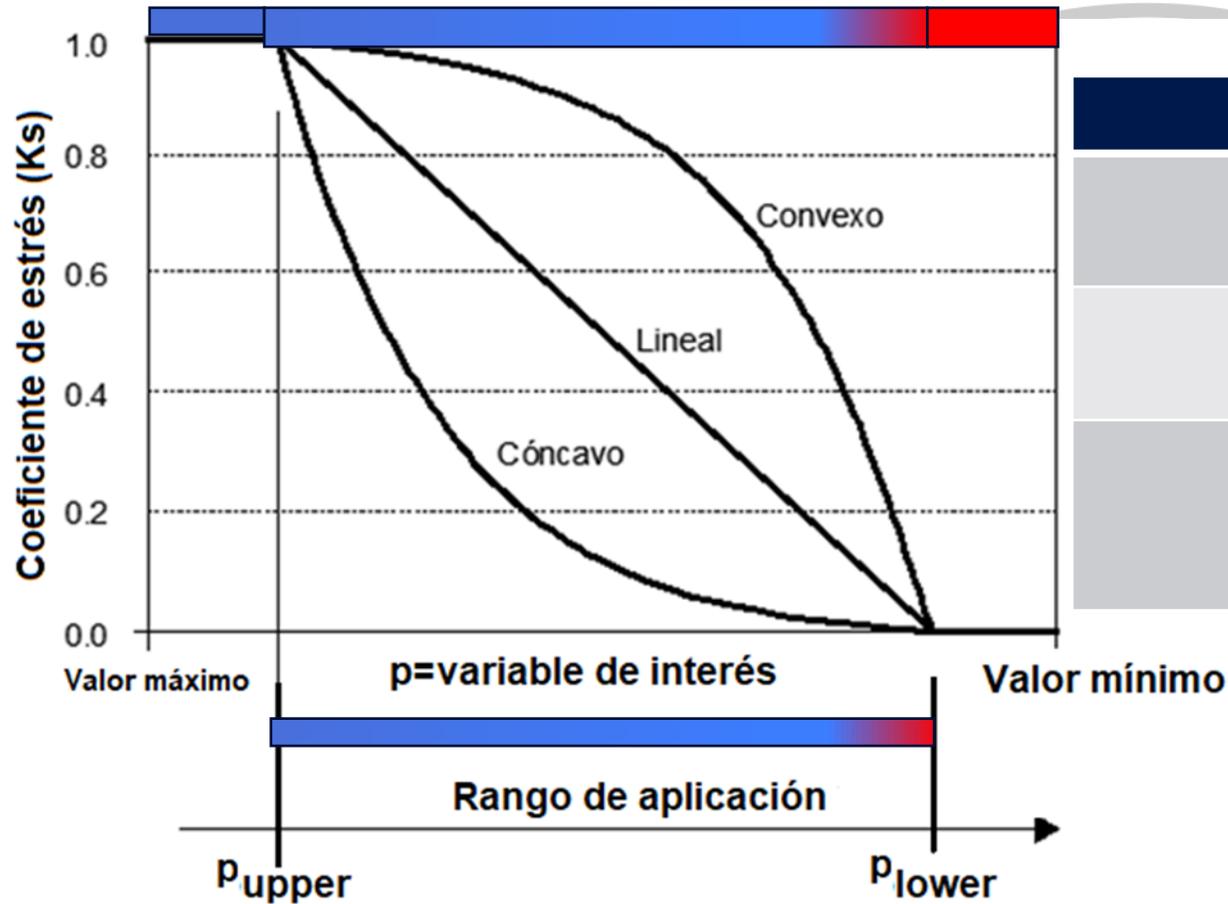
$$Ks=f(p, f_{forma}) \text{ para } p_{upper} < p \leq p_{lower}$$

f_{forma} es un parámetro de forma de la curva del factor de estrés. Si f_{forma}=0 la curva es lineal, Si f_{forma}<0 es cóncava y si Si f_{forma}>0 convexa.

Se deben de especificar los valores para la variable de interés p:

$$p_{upper}, p_{lower}, f_{forma}$$

Curva genérica del coeficiente de estrés (Ks)



SIGLAS	SIGNIFICADO
p	Variable de interés asociado al estrés
P_{upper}	Umbral superior de p (sin estrés hídrico: $K_s = 1$)
P_{lower}	Umbral inferior de p (máximo estrés hídrico: $K_s = 0$)

Si $f_{forma} = 0$ la curva es lineal, Si $f_{forma} < 0$ es cóncava y si $f_{forma} > 0$ convexa.

Precipitación (P)

- El AquaCrop requiere del registro diario de la precipitación durante el ciclo fenológico del cultivo.
- Se tienen tres opciones para estimar la precipitación efectiva en AquaCrop:
 - Todo el agua precipitada es efectiva $Pe=P$
 - Solo un porcentaje ($0 < \alpha \leq 1$) de la precipitación es efectiva:
 $Pe = \alpha P$
 - Se usa una ecuación de ajuste de datos acumulados obtenida por el SCS-USDA (1970): $Pe = f(P, ETC)$ – valida para valores acumulados mensuales o decenales

CO₂



Concentración promedio de CO₂

- El AquaCrop contiene un archivo con datos históricos de la concentración de bióxido de carbono (CO₂) registradas en el Observatorio de “Manua Loa” en Hawaii (EEUU), que se considera como la estación de referencia para CO₂ debido a su localización remota y a su gran distancia de fuentes contaminantes mayores.
- Se ha tomado el valor de referencia de CO₂ del año 2000, como la concentración de CO₂ de referencia.
- Se tiene una base de datos con proyecciones para diferentes escenarios de Cambio Climático disponibles por la IPCC.

Observado

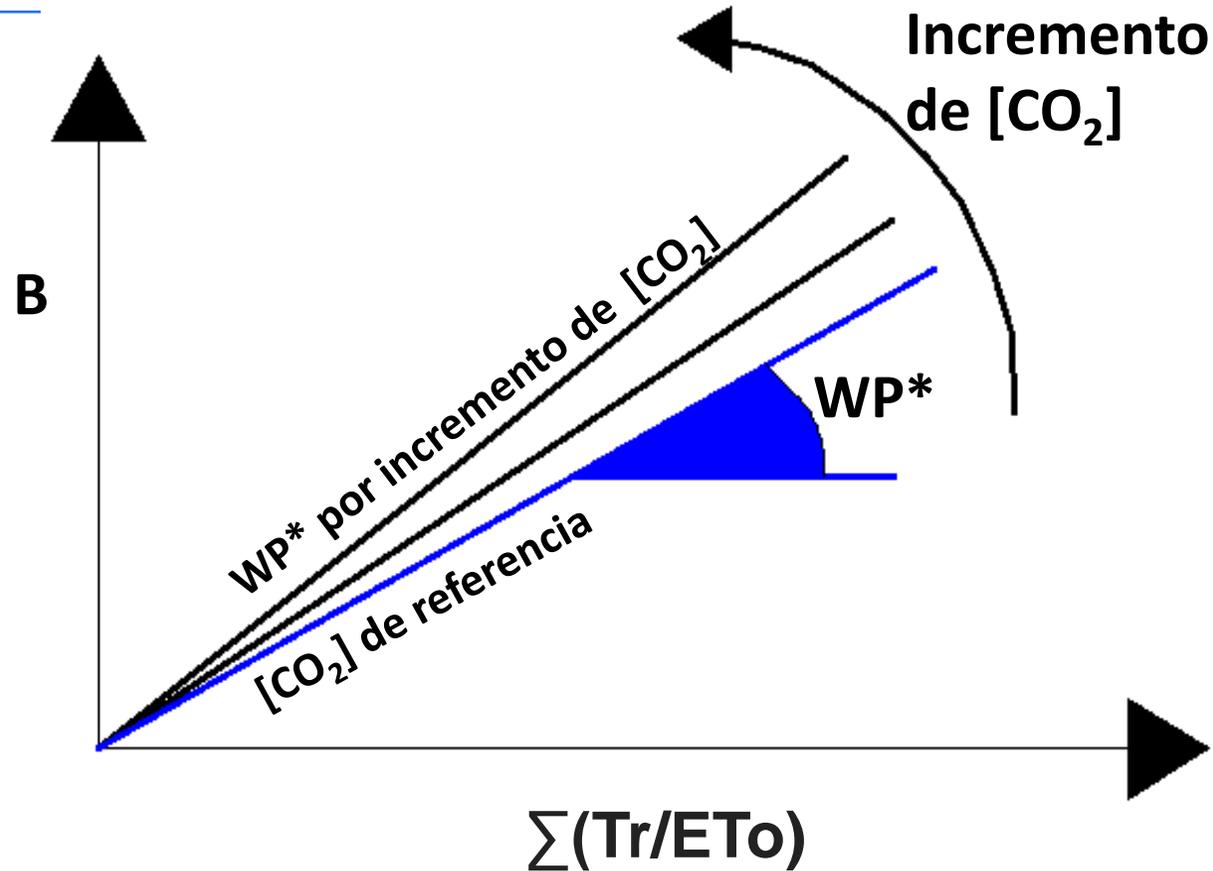
Año	ppm volumen
1980	338.67
1981	339.84
1982	340.56
1983	342.21
1984	343.81
1985	345.3
1986	346.72
1987	348.44
1988	350.96
1989	352.59
1990	353.83
1991	355.18
1992	355.88
1993	356.6
1994	358.03
1995	359.85
1996	361.62
1997	362.76
1998	365.48
1999	367.56
2000	368.77
2001	370.36
2002	372.39
2003	374.94
2004	376.76
2005	378.78
2006	380.91
2007	382.71

IPCC: RCP 8.5

Año	ppm volumen
2007	383.77
2008	385.59
2009	387.37
2010	389.85
2011	391.63
2012	393.82
2013	396.48
2014	398.55
2015	402
2016	404
2017	407
2018	410
2019	413
2020	416
2021	419
2022	422
2023	425
2024	428
2025	431
2026	435
2027	438
2028	442
2029	445
2030	449
2031	452
2032	456
2033	460
2034	464
2035	468
2036	472
2037	476
2038	481
2039	485
2040	489

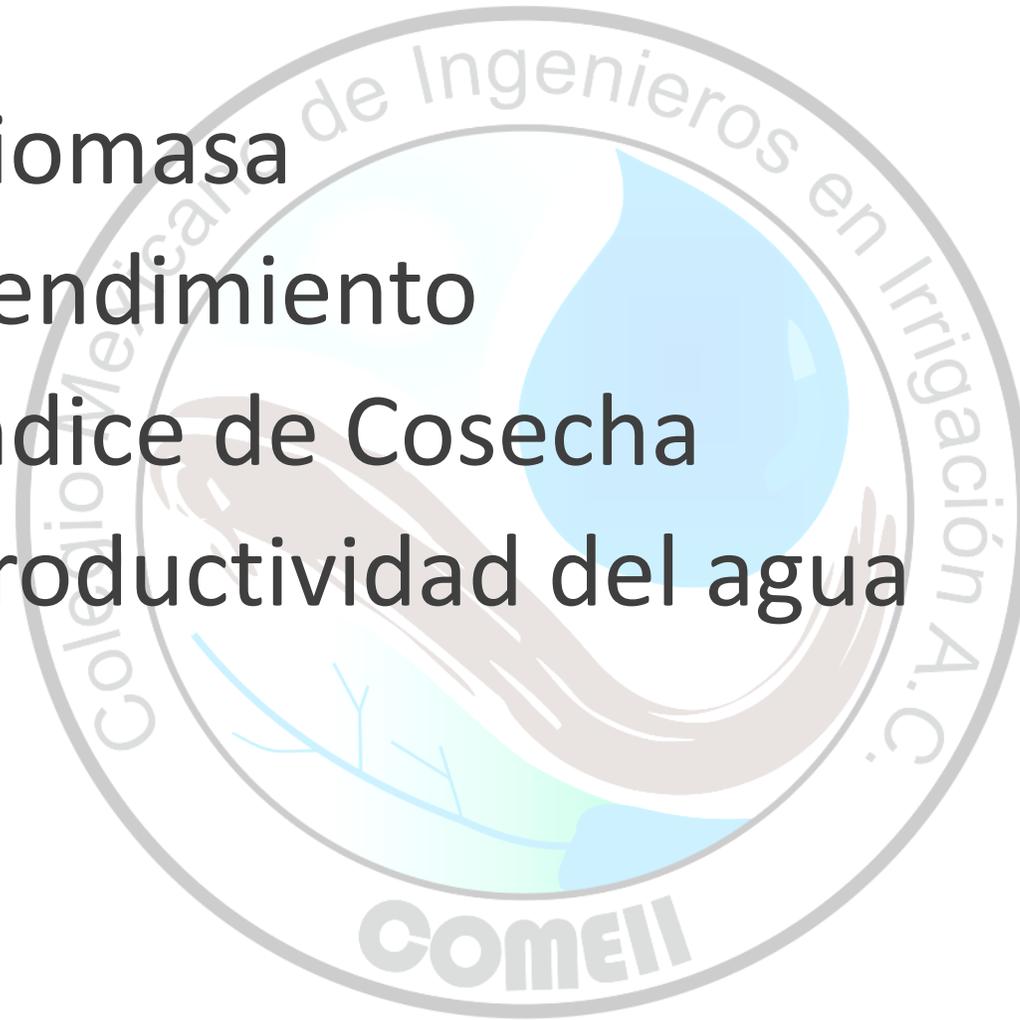
Efecto del incremento de CO₂ en la WP*

- El efecto del CO₂ en la productividad del cultivo se realiza usando un factor de corrección f_{CO_2} , que al multiplicarlo por WP* se actualiza el valor de WP* para el año de interés. El año 2000 es considerado como referencia para las concentraciones de CO₂.
- El factor f_{CO_2} es mayor a 1 para concentraciones mayores del año de referencia y menores de 1 para concentraciones menores.



Submodelo: Biomasa y formación rendimiento

- Biomasa
- Rendimiento
- Índice de Cosecha
- Productividad del agua



Biomasa aérea

- La biomasa son los tejidos vegetales, incluyendo tallo, ramas, hojas, semillas, y flores, que se encuentran sobre la superficie del suelo.
- Las raíces del cultivo forman parte de la biomasa total, pero no de la aérea.



Índice de Cosecha (HI)

El Índice de cosecha (Harvest Index) es un parámetro que define la relación del peso seco de los órganos cosechables (uno más) dependiendo del cultivo puede ser tubérculo, grano, flor o follaje, sobre el peso seco total de la biomasa total aérea (sobre el suelo).

HI es **específico para cada cultivo** bajo condiciones **óptimas**. El AquaCrop estima el HI real dependiendo de la magnitud y duración del déficit hídrico durante una o más etapas del desarrollo del cultivo.



Estimación del rendimiento del cultivo



En la mayoría de los cultivos, solo una parte de la **biomasa** seca producida se destina a los órganos cosechables para producir **rendimiento** (Y), y la relación entre el rendimiento y la biomasa se conoce como **índice de cosecha de referencia** (Hl_o), por tanto se tiene:



$$Y = B \times Hl_o$$

Estimación del rendimiento del cultivo bajo estrés

- Bajo condiciones de estrés se usa:

$$Y = B \times HI_0 \times f_{HI}$$

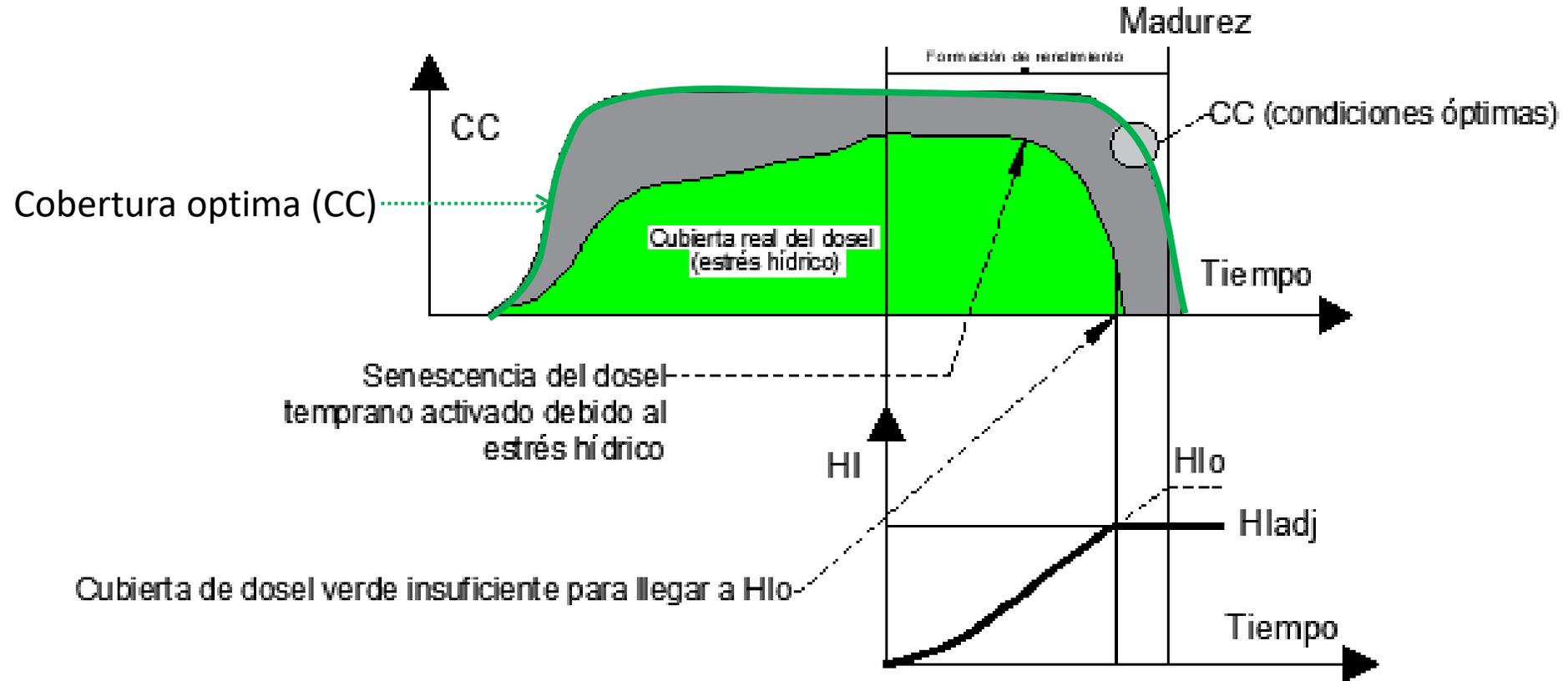
- Donde el factor de ajuste f_{HI} depende de la duración e intensidad del estrés y se integra de los siguientes cinco factores de estrés :

- a) Inhibición en el crecimiento de la hoja
- b) Inhibición de las estomas
- c) Reducción de la reducción del dosel verde por senescencia
- d) Reducción en biomasa debido a estrés **pre-antesis**
- e) Problemas en la polinización



Ajuste del índice de cosecha por CC reducida

- El AquaCrop ajusta el índice de cosecha potencial (H_{lo}) al reducirse el área foliar del cultivo durante el periodo de formación de rendimiento que reduce la intercepción de la radiación solar por debajo de las condiciones óptimas.



Productividad del agua (WP)

La productividad del agua (WP, por sus siglas en inglés) se define la cantidad de **biomasa** que el cultivo puede **producir por unidad de agua consumida**. WP es un parámetro específico para cada cultivo.

Para que **WP sea constante** y no dependa solo de las **condiciones climáticas** y sea específico del cultivo, WP se **normaliza** para la demanda evaporativa atmosférica. El valor normalizado es WP^* , que permanece virtualmente constante en un amplio rango de ambientes.

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum \frac{Tr}{ET_0}} \right]_{CO_2}$$

El valor de CO_2 como subíndice indica la normalización con base a una concentración media anual específica para el año dado. WP^* aumenta al aumentar la concentración de CO_2 en el aire.

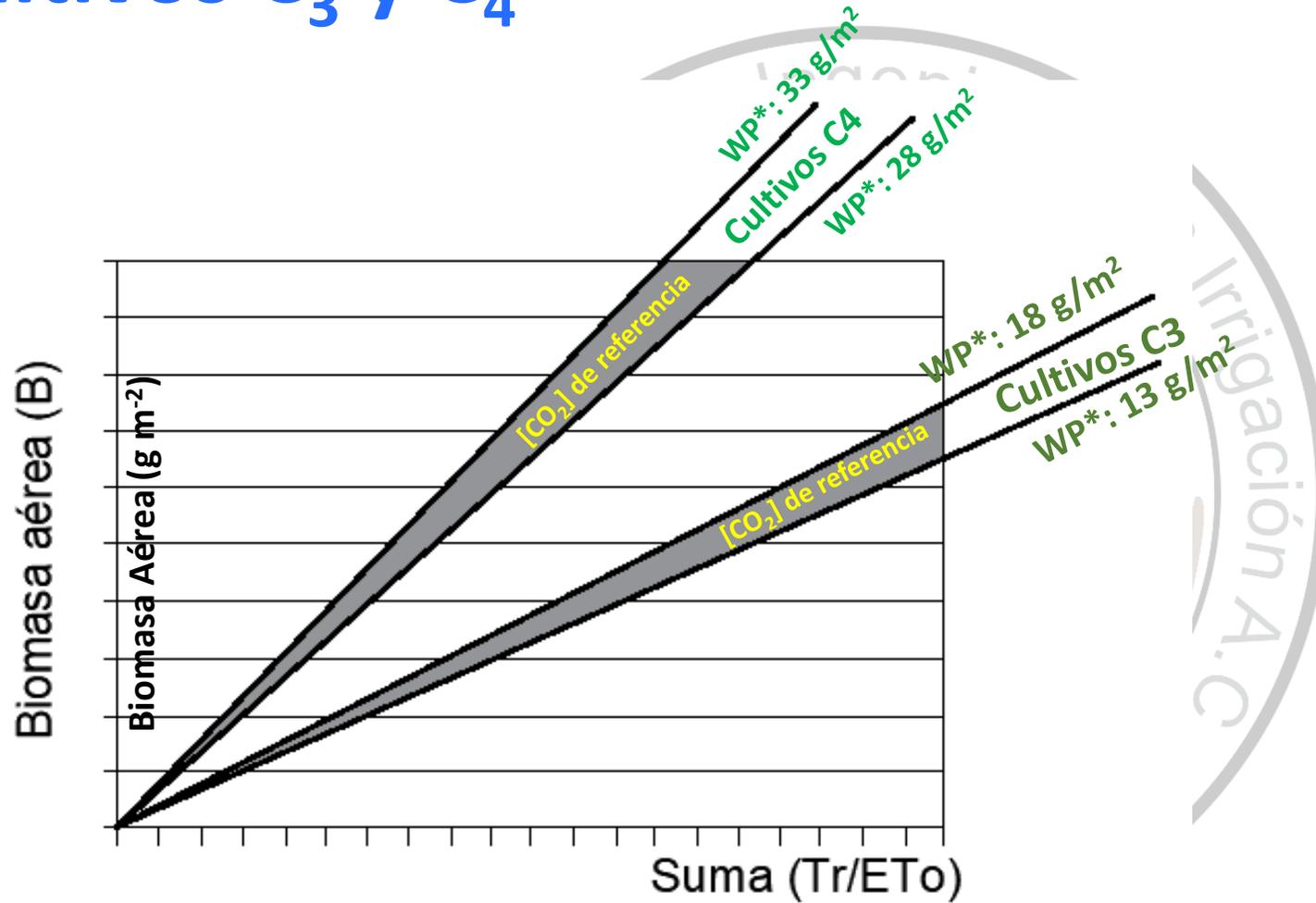
La ecuación de WP^* es aplicable y confiable para datos diarios de Tr y ET_0 , que junto con WP^* se utiliza para calcular la biomasa área producida diariamente.

La **productividad del agua para biomasa (WP)** es fundamental para el funcionamiento de AquaCrop y ha mostrado un **comportamiento notablemente conservativo** (permaneciendo casi constante) cuando se normaliza para diferentes **demandas evaporativas**.

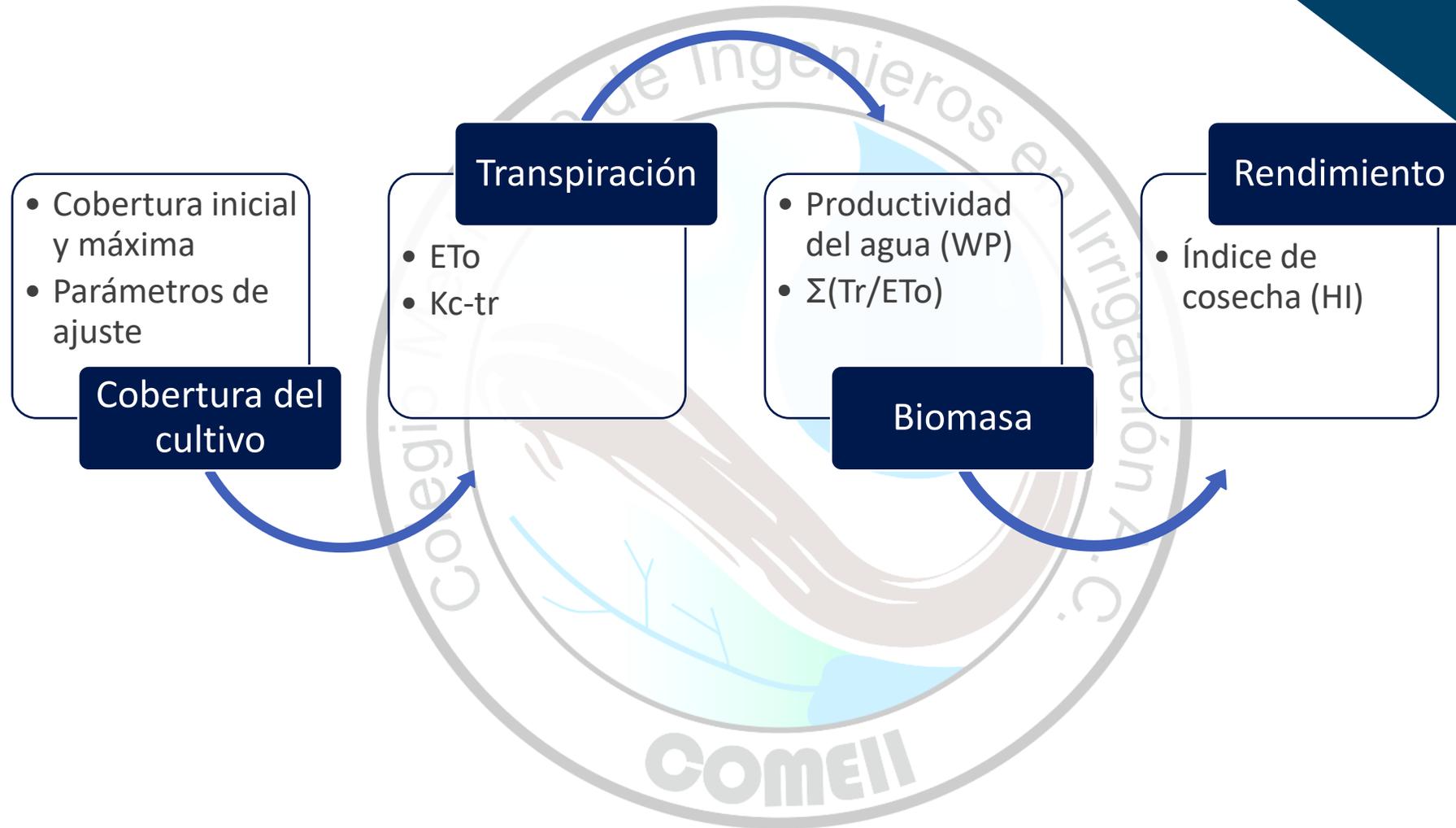


El parámetro de **WP** introducido en AquaCrop se **normaliza** por la **demanda evaporativa de la atmósfera**, simbolizada como E_{To} , y para la concentración de CO_2 en la atmósfera. Se comprobó que la **productividad del agua normalizada para biomasa (WP^*)** es casi **constante** para un cultivo dado cuando los nutrientes minerales no son limitantes, independientemente del estrés hídrico, salvo en casos extremadamente graves.

Rango de variación de WP^* para cultivos C_3 y C_4



Proceso de estimación del rendimiento bajo condiciones de humedad óptima



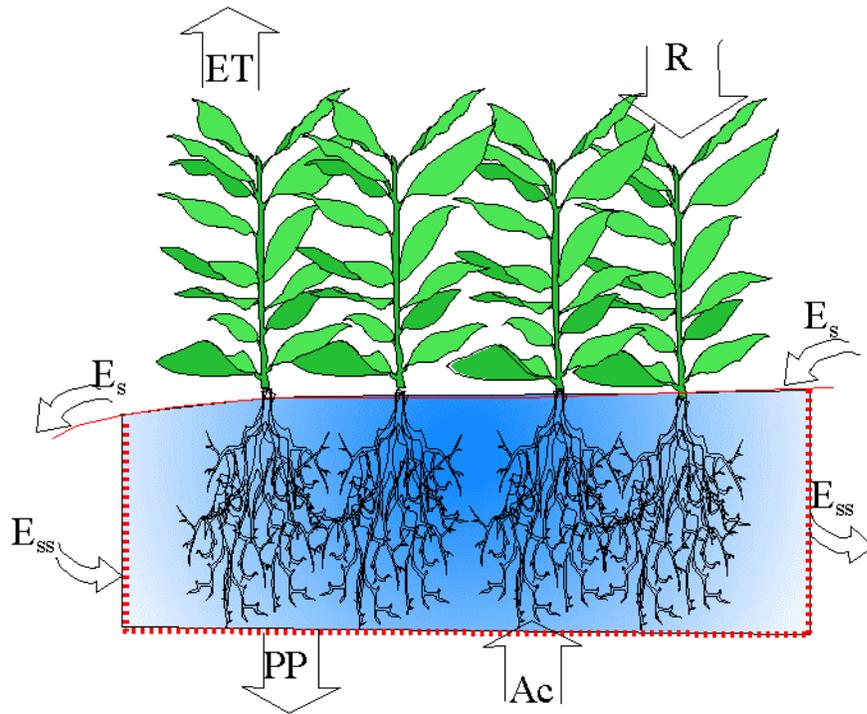
Submodelo: Balance de humedad del suelo

- Constantes de humedad
- Balance de humedad



Humedad del suelo

El contenido de agua en el suelo es calculado diariamente en el AquaCrop mediante un **balance hídrico**, lo que facilita la comprensión de las **estrategias de gestión del riego**, enfocando la zona radical como un reservorio donde hay **flujos de entrada y salida de agua**.



Como **flujos de entrada** se consideran lluvia, riego, ascenso capilar; y de **salida** la escorrentía, percolación profunda y evapotranspiración.

Humedad del suelo



La **cantidad de agua que puede extraer la planta de la zona radical** es conocida como **agua total disponible** del suelo (**TAW**), que es el agua retenida en la zona entre CC y PMP. En condiciones de CC, D_r es cero; y en PMP, D_r es igual a TAW.

$$W_r = 1000 * \theta * z$$

$$D_r = W_{r_{cc}} - W_r = 1000(\theta_{cc} - \theta) * z$$

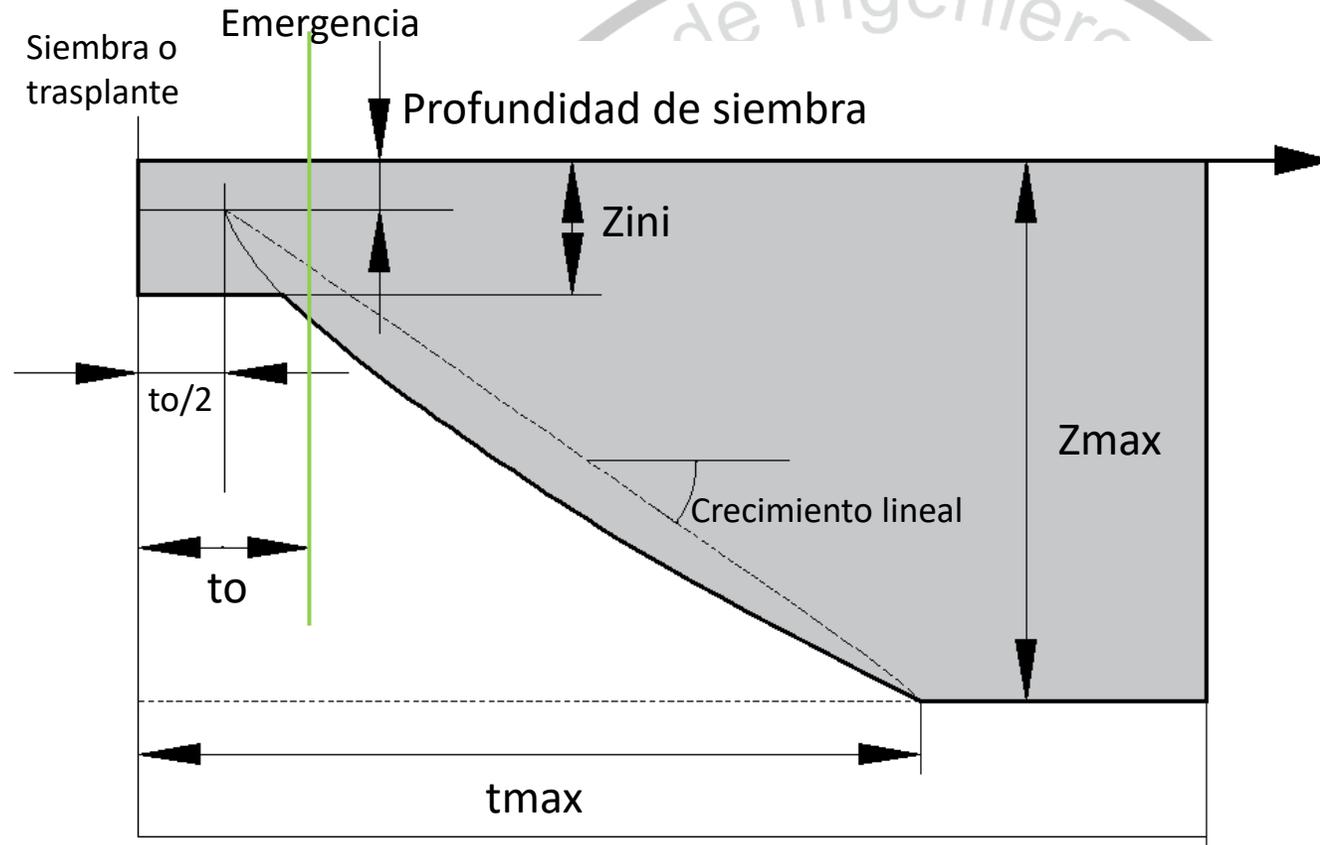
$$TAW = W_{r_{cc}} - W_{r_{PMP}} = 1000(\theta_{cc} - \theta_{PMP})$$

Donde:

θ es el contenido de agua en la zona radicular (m^3/m^3), el contenido de agua en el suelo en la zona radicular expresada en mm tanto a CC y PMP ($W_{r_{cc}}$ y $W_{r_{PMP}}$), y el contenido de agua en el suelo en la zona radicular en (m^3/m^3) a CC y PMP (θ_{cc} y θ_{PMP}).

La profundidad efectiva de enraizamiento (z), es la profundidad a la que las raíces pueden extraer agua del suelo. La profundidad mínima de enraizamiento para el cálculo del balance es de 0.2-0.3 m.

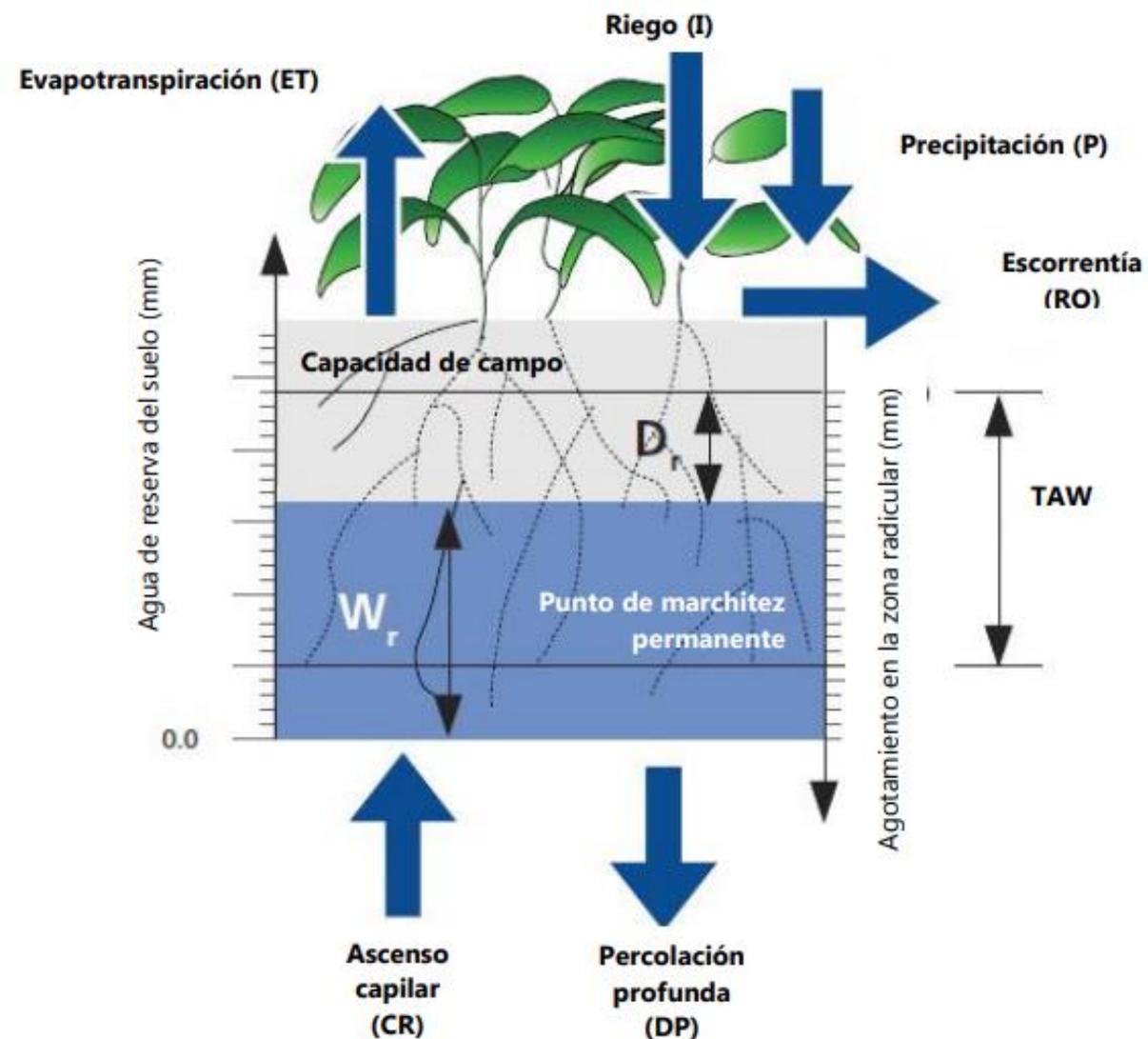
Modelo del crecimiento radical



Balance de humedad del suelo

A través del seguimiento del agua y los flujos de agua y sales de **entrada** (precipitación, riego y ascenso capilar) y **salida** (escorrentía, evapotranspiración y percolación profunda) en los límites de la zona radicular, se puede calcular durante el ciclo fenológico del cultivo la **cantidad de agua y sal almacenada en la zona radical**.

Cuando se calcula el balance de humedad en el suelo, la cantidad de agua almacenada en la zona radical se puede expresar como una **lámina de agua equivalente (W_r)** o como el abatimiento de humedad en la zona radicular (D_r). La humedad aprovechable o **disponible total** en el suelo (**TAW**) es la cantidad de agua retenida en la zona radicular, entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Para una humedad a capacidad de campo, el abatimiento de humedad en la zona radicular (D_r) es cero y, en el punto de marchitez permanente, D_r es igual a TAW o 100% de la TAW.



Submodelo: Manejo del riego y parcela



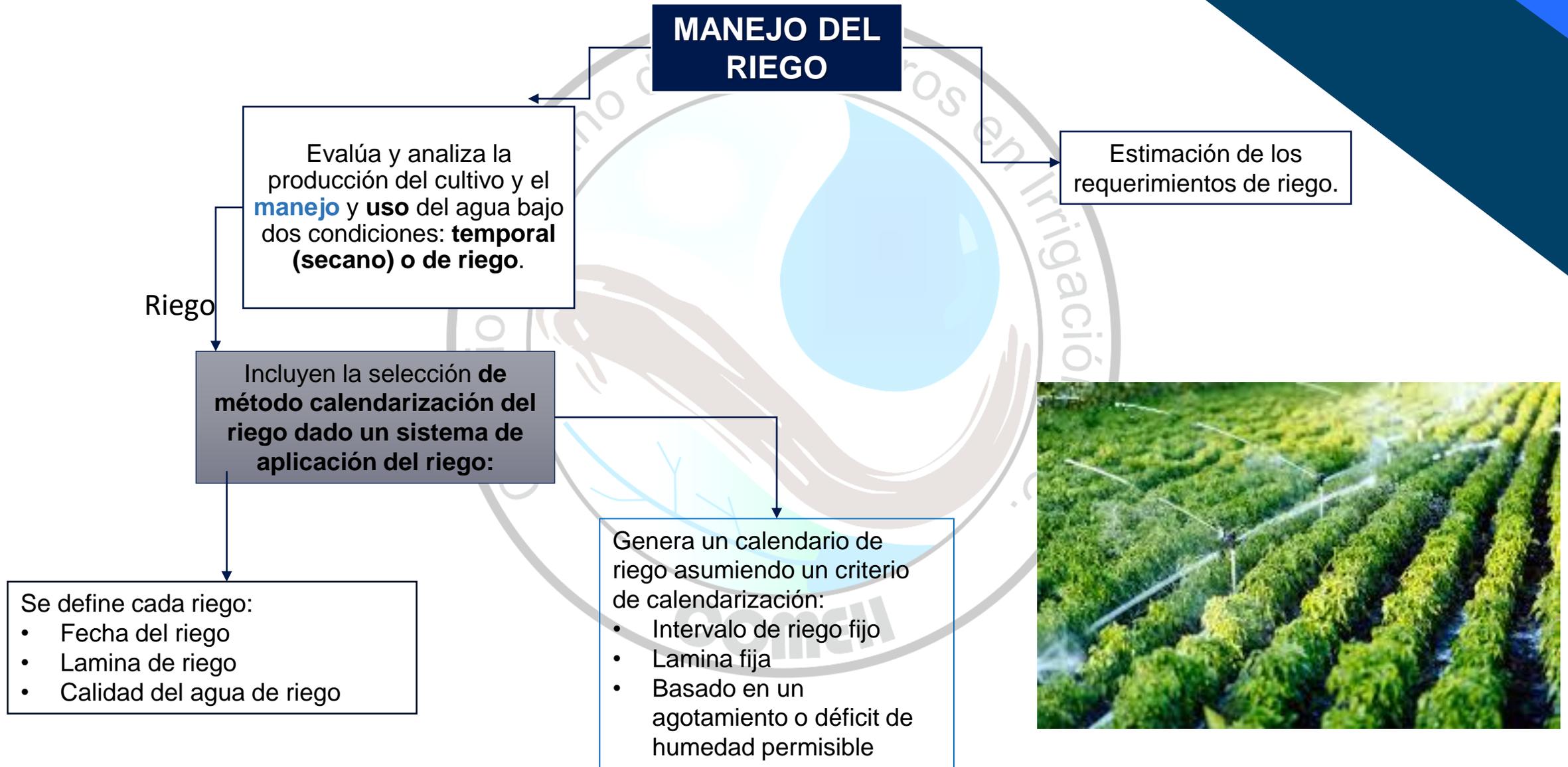
Manejo de
riego



Manejo de
la parcela



i) Manejo del riego



ii) Manejo de la parcela

MANEJO DE LA PARCELA



Fertilidad del suelo

Acolchado del suelo

Uso de bordos o pozas

Para el crecimiento del cultivo

Para reducir la evaporación

Para estancar el agua o controlar la escorrentía superficial y mejorar la infiltración

Los efectos de la fertilidad en el crecimiento y la productividad del cultivo no se simulan directamente.

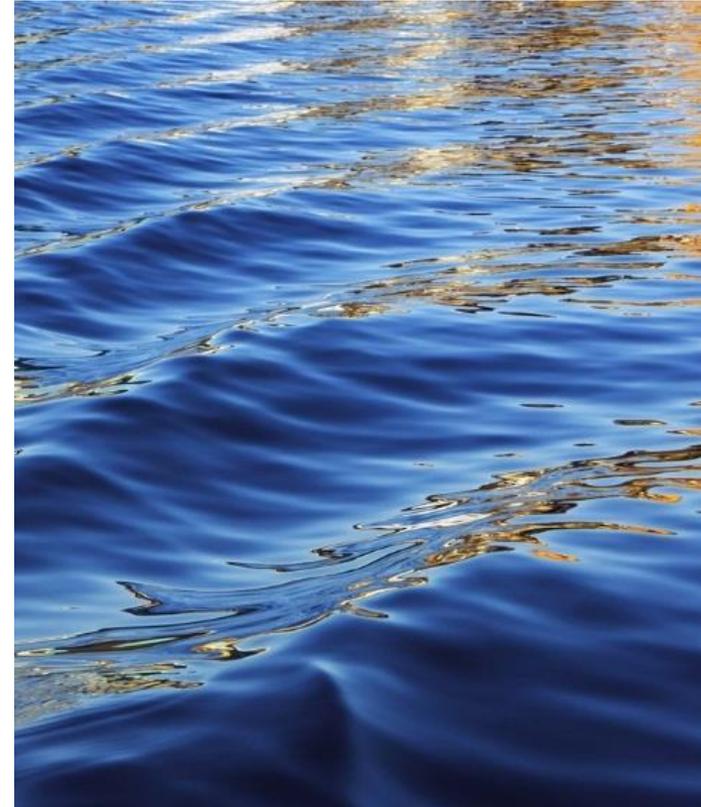
AquaCrop proporciona ajustes predeterminados de los parámetros esenciales del cultivo para varias categorías limitantes de fertilidad, que van desde casi óptima hasta baja.

Estos ajustes están basados en el patrón de evolución del dosel, fotosíntesis, y la WP a diferentes niveles de fertilidad reportados en varios estudios

- Considerado únicamente por su efecto en la reducción de la evaporación del suelo.
- Debe ser especificado por el usuario en términos de porcentaje de superficie de suelo cubierta y efectividad del material de acolchado.

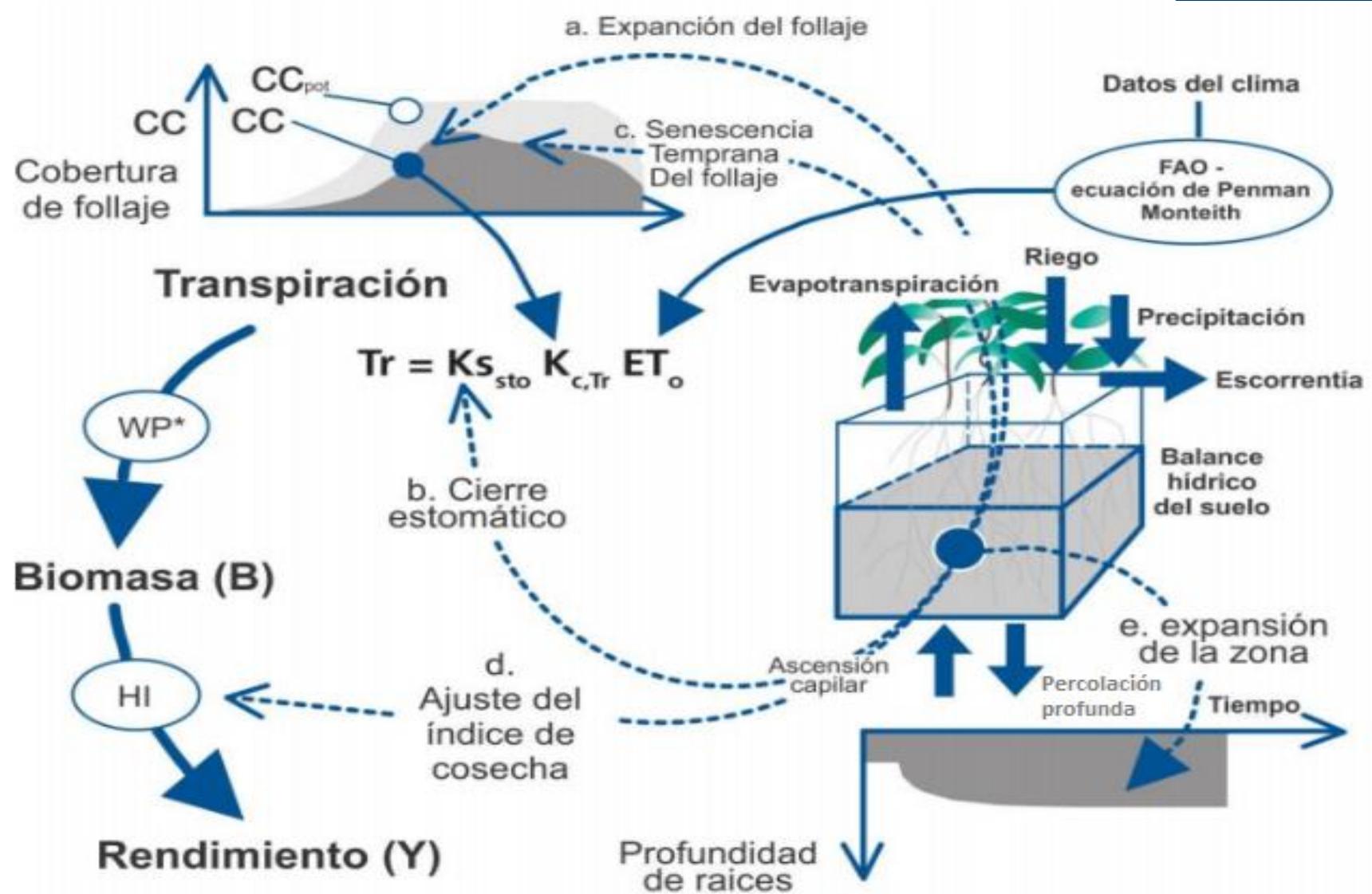
- En suelo permeables, es posible escoger "sin escorrentía" sin construir bordos o camellones

- Se puede definir un bordo y su altura para prevenir la escorrentía y forzar toda el agua lluvia o de riego a infiltrarse en el suelo.
- Los camellones permiten la simulación de cultivos que usan agua estancada o inundada..

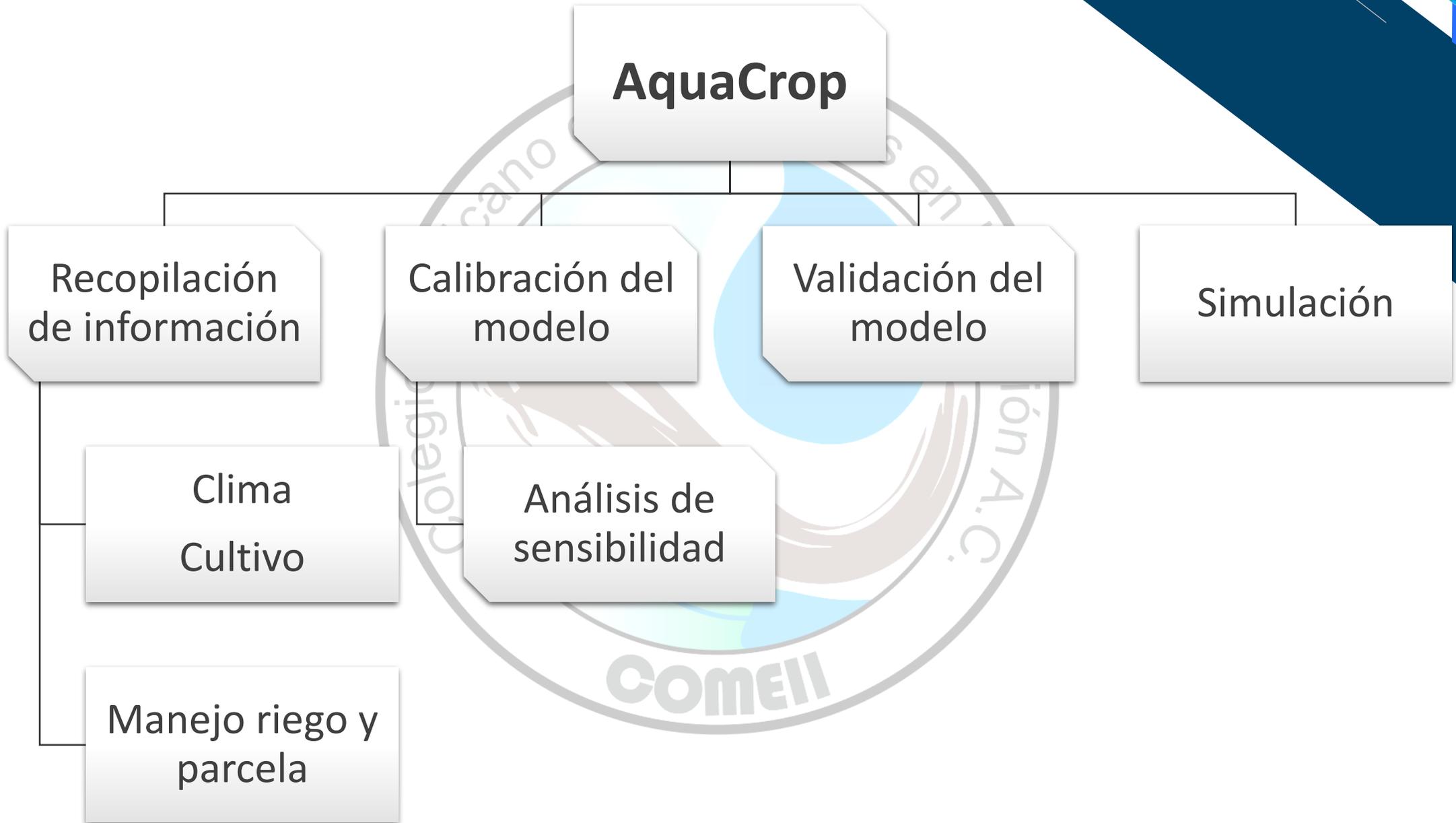


5. El AquaCrop interconectado

Esquema de Cálculo del modelo AquaCrop



Proceso para aplicación del AquaCrop



Ejemplo de calibración del modelo

CALIBRACIÓN DEL MODELO DE CULTIVO

Definición de parámetros NO conservativos

Seguimiento de materia seca

Producción

Cobertura de Cultivo

Biomasa

Rendimiento

Simulación

Registro

Pruebas de ajuste datos simulados vs observados

Ajuste de parámetros conservativos

No

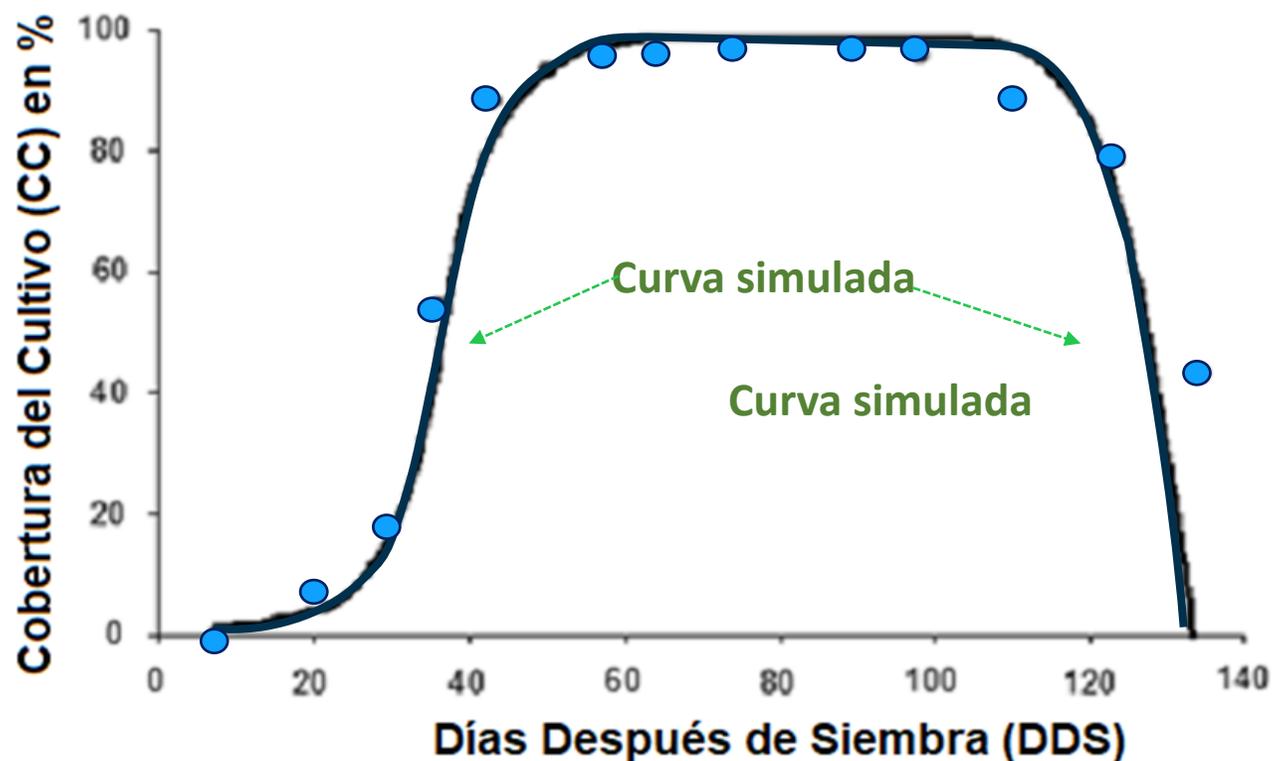
¿Aceptado?

Sí

MODELO CALIBRADO

Datos observados vs simulados de la CC

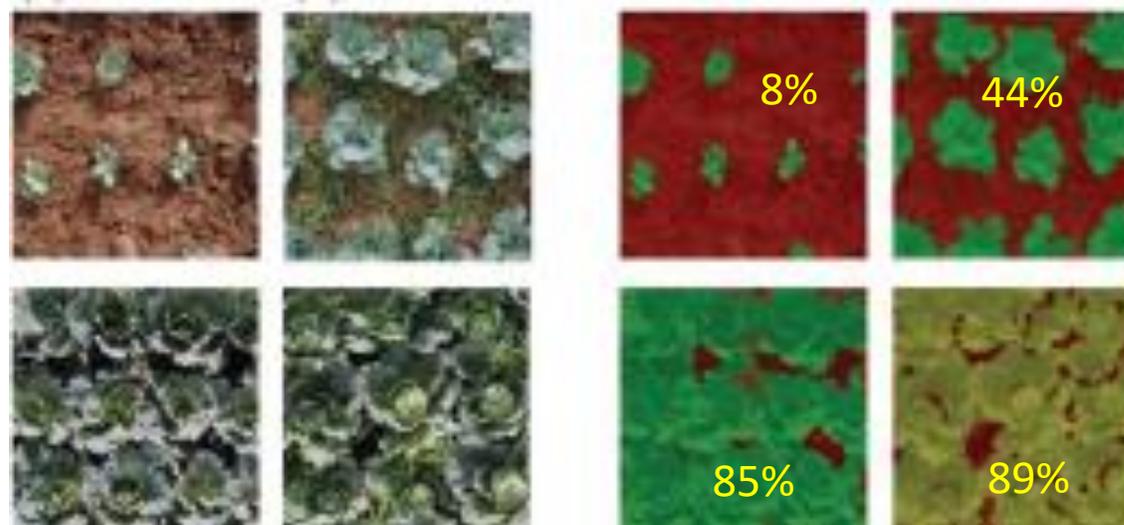
- Cuando se tienen datos de campo de CC, es posible ajustar los parámetros de las tres ecuaciones que usa AquaCrop para definir las tres zonas de CC: expansión, máxima y declive de la cobertura del dosel.



Ejemplo típico de un curva de CC durante del desarrollo fenológico de una gramínea bajo condiciones óptimas

Obtención de datos de CC en campo

- Una parte importante del proceso de calibración y validación es ajustar la curva simulada a los datos observados tomando una serie de fotografías durante el desarrollo del ciclo fenológico de un cultivo manejado bajo condiciones óptimas. Posteriormente se calibran los valores de WP* y Hlo para ajustar el modelo a los valores observados del rendimiento.



Cultivos calibrados en el mundo con el AquaCrop

Cultivo	Lugar
Algodón	Córdoba, España
Maíz	Davis, E.E.U.U
Papa	Lima, Perú
Quinua	Bolivia
Tomate	Córdoba, España
Trigo	Valenzano, Italia
Girasol	Córdoba, España
Cebada	Tigray, Etiopía
Sorgo	Texas, USA
Remolacha azucarera	Foggia, Italia
Soya	Patancheru, India





6. Conclusiones



AquaCrop
Crop Water Productivity Model

Comparación AquaCrop con CropWat



- Ambos estiman el requerimiento hídrico de los cultivos
- El CropWat asume relaciones mas simples para estimar el rendimiento bajo estrés hídrico. Considera que toda la ET es productiva.
- El CropWat no considera el estrés térmico ni el tiempo térmico. Usa días calendario.
- La fenología es predicha y ajustada por el AquaCrop en función de DGD. CropWat no hace ajustes de la fenología en función de las condiciones ambientales.
- AquaCrop requiere de mas parámetros y validación den campo.
- CropWat es mas simple y no requiere de validación ya que existe una gran cantidad de información sobre los parámetros de calendarización del riego que requiere.
- Ambos modelos usan un balance hídrico similar.
- La última versión: AquaCrop 6.1 (mayo 2018) y CropWat v8. (2008) con Visual Delphi 4.0
- Asumen condiciones de homogeneidad espacial de suelo, cultivo, ambiente, manejo.
- Ambos son difíciles de ejecutar para una zona de riego con diversidad de cultivos, parcelas y fecha de siembra. Sin embargo, Aquacrop tiene versiones para R y para simulaciones iterativas (Plug-in)
- AquaCrop es mas versátil para usarse bajo condiciones de variabilidad y cambio climático.

Conclusiones

- El modelo AquaCrop es un **modelo computacional** que facilita estimación del rendimiento de los cultivos en respuesta a la humedad disponible en el suelo y en las necesidades hídricas del cultivo.
- Es una excelente herramienta, **una vez validada** con datos de campo, de planeación y análisis para la toma de decisiones sobre el manejo de los cultivos bajo condiciones de estrés hídrico y térmico.
- Considera una **serie de procesos biofísicos básicos** que han sido **simplificados** a través de un número reducido de parámetros para adaptarlos a diferentes cultivos y condiciones locales.
- Ha sido aplicado a **diferentes cultivos bajo diferentes ambientes contrastantes** alrededor del mundo.



AquaCrop
Crop Water Productivity Model



AquaCrop
Crop Water Productivity Model



Muchas gracias

Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Presidente

Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación

w.ojeda@riego.mx



Para citar esta presentación:

Ojeda Bustamante, W. 2020. [La simulación del desarrollo de cultivos con el modelo AquaCrop: conceptos y métodos](#). Serie de Seminarios Virtuales 2020. Colegio Mexicano de Ingenieros en Irrigación (COMEII). México. 73 pp.

Consulta el portal del COMEII y sus redes sociales:

www.comeii.com y www.riego.mx