



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE USO DE AGUA EN MAÍZ (*Zea mays*) MEDIANTE TÉCNICAS ISOTÓPICAS $\delta^2\text{H}$ (Deuterio, D) y $\delta^{18}\text{O}$ (Oxígeno 18) BAJO DISTINTOS CRITERIOS DE RIEGO

*Estimation of water use efficiency in maize (*Zea mays*) through the use of isotopic techniques $\delta^2\text{H}$ (Deuterium, D) and $\delta^{18}\text{O}$ (Oxygen 18) under different irrigation levels.*

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas.

JUAN CARLOS SEPÚLVEDA QUESADA

Director de Tesis
Osvaldo Salazar G.

Profesores consejeros
Marco Garrido S.
Joseph Govan

SANTIAGO - CHILE
2022

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA EN MAÍZ (*Zea mays*)
MEDIANTE TÉCNICAS ISOTÓPICAS $\delta^{2}\text{H}$ (Deuterio, D) y $\delta^{18}\text{O}$ (Oxígeno 18) BAJO
DISTINTOS CRITERIOS DE RIEGO

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de
Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas.

JUAN CARLOS SEPÚLVEDA QUESADA

Calificaciones

DIRECTOR DE TESIS

Osvaldo Salazar Guererro
Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.

7,0

PROFESORES CONSEJEROS

Marco Garrido Salinas
Ingeniero Agrónomo, Mg, Dr.

5,3

Joseph Govan
Bachelor en Ciencias Naturales,
especialidad Química, Ph.D.

6,2

Santiago, Chile
2022

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Isabel Margarita Quesada Riquelme y mi padre Juan Carlos Sepúlveda Meyer por la paciencia, apoyo y consejos en cada momento de mi vida fundados siempre en amor incondicional.

Al profesor Osvaldo Salazar y Adriana Nario que me han acompañado desde el comienzo de este arduo proyecto entregando disposición creatividad para solventar las dificultades que representa llevar a cabo un proyecto como este bajo un contexto de pandemia e incertidumbres.

A mis amigos de la infancia Martín Bolelli, Jorge Henríquez e Ignacio Muñoz que me apoyaron con su alegría, motivación y proactividad trabajando en terreno y haciendo de esta una experiencia más afable. A mis compañeros Diego Gallinato y Paula Maldonado por trabajar conmigo en este proceso entregando un punto de vista enriquecedor y a todos los que han aportado en concretar este sueño desde la compañía y el cariño.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
MARCO TEÓRICO	3
Cambio climático y su efecto en la agricultura.....	3
Importancia del manejo del riego, concepto de EUA.....	4
La producción de maíz en Chile	5
Técnicas isotópicas para estudios del continuo suelo-agua-planta.....	6
Modelamiento del continuo suelo-agua-planta: modelo AquaCrop.....	9
HIPÓTESIS	11
OBJETIVOS	11
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
Ubicación del estudio	12
Material biológico	12
Tratamientos.....	12
Manejo del experimento.....	13
Variables medidas.....	14
Balance hídrico.....	14
Evapotranspiración de cultivo.....	14
Riego	15
Parametrización del modelo AquaCrop	16
Cobertura del dosel.....	18
Composición isotópica	18
Eficiencia del uso del agua.....	18
Análisis estadístico.....	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
Composición isotópica agua de suelo, riego y precipitaciones.....	23
Validación AquaCrop.....	27

CONCLUSIÓN	33
LITERATURA CITADA.....	34
ANEXOS	39
Anexo 1. Información complementaria sitio experimental.....	39
APENDICES	40
Apéndice 1. Análisis de la varianza para rendimiento y biomasa.	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Diseño del sistema de riego y caudal para cada tratamiento.	16
Cuadro 2. Información de cultivo observada y utilizada para calibrar AquaCrop.....	16
Cuadro 3. Información requerida para el proceso de ajuste del modelo AquaCrop (Cornejo, 2019).	17
Cuadro 4. Estados fenológicos del cultivo según los días después de la siembra (DDS)...	21
Cuadro 5. Composición isotópica de deuterio (δ^2H) y oxígeno 18 ($\delta^{18}O$) en el agua de riego y evento de lluvia durante el estudio.....	24
Cuadro 6. Cantidad de agua evaporada (E), transpirada (Tr) y evapotranspirada (fTr) bajo el método de Concentración isotópica de deuterio (δ^2H) y oxígeno ($\delta^{18}O$) para los distintos tratamientos.	27
Cuadro 7. Factores de estrés observados en los distintos tratamientos.	28
Cuadro 8. Biomasa observada (OBS) y simulada (SIM) por AquaCrop comparadas por diferencia porcentual (DP).....	30
Cuadro 9. Rendimiento en grano observado (OBS) y simulado (SIM) por AquaCrop comparadas por diferencia porcentual (DP).	30
Cuadro 10. Eficiencia de uso del agua (EUA) observada (OBS) y simulada (SIM) en los diferentes tratamientos.....	31
Cuadro 11. Volumen de agua evaporada (E), transpirada (Tr) y fracción transpirada (fTr) observadas (OBS) y simuladas (SIM) en los diferentes tratamientos.	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principio del método de balance de masa isotópico (IMB) para particionar la evaporación y la transpiración del cultivo en el campo (Li <i>et al.</i> , 2016).	7
Figura 2. Distribución de tratamientos en sitio experimental.	13
Figura 3. Coeficiente del cultivo estimado para maíz en la zona de estudio.....	15
Figura 4. Lámina neta de riego óptimo (LN) para suplir 100% de la evapotranspiración del cultivo (ET_C) comparado por días después de la siembra (DDS) en los diferentes tratamientos.	16
Figura 5. Evapotranspiración de referencia (ET_0) y evapotranspiración del cultivo (ET_c) para el cultivo de maíz en la zona de estudio.	20
Figura 6. Porcentaje de cobertura del dosel durante la temporada.....	21
Figura 7. Contenido de agua monitoreado en la zona radical durante la temporada.....	22
Figura 8. Temperatura del suelo en cada tratamiento durante el estudio.	23
Figura 9. Concentración isotópica de oxígeno 18 ($\delta^{18}O$) en el agua en el suelo agrupado por fecha de extracción en los diferentes tratamientos.	25
Figura 11. Contenido de agua (WC) en la zona radical simulado durante la temporada. ...	28
Figura 12. Comparación del contenido de agua (WC) simulado por AquaCrop (SIM) con el contenido de agua observado (OBS) en los diferentes tratamientos (T1, T2 y T3).	29

RESUMEN

El 76% de la superficie de Chile está afectada por sequía por lo que es fundamental utilizar prácticas y tecnologías que permitan maximizar la eficiencia del uso de agua (EUA) en la agricultura. La EUA se puede cuantificar en base a la cantidad de biomasa generada en relación con el aporte de agua que recibe un cultivo. Una de las alternativas para aumentar la EUA es generar un déficit hídrico moderado previo a la fase reproductiva, lo que disminuye el crecimiento vegetativo y favorece el crecimiento reproductivo aumentando la relación entre producción y cantidad de agua utilizada. Sin embargo, en el caso de un estrés hídrico severo, existe un cierre estomático y se adelanta la senescencia del cultivo lo que puede perjudicar drásticamente la producción. Se realizó un ensayo en la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) con el objetivo de comparar la EUA en el cultivo de maíz bajo 3 escenarios de riego: 70% de la ET_C , 50% de la ET_C y 35% de la ET_C durante toda su etapa de desarrollo. Se utilizaron técnicas isotópicas de δ^2H (Deuterio, D) y $\delta^{18}O$ (Oxígeno 18) que permitieron medir y diferenciar con precisión la evaporación y transpiración del agua, que junto a un monitoreo constante del contenido de agua del suelo permitió realizar un análisis a nivel suelo-agua-planta, demostrando que la fracción de transpiración no varió significativamente en los tratamientos, obteniendo una mayor EUA con 35% de la ET_C potencial. También se validó el programa AquaCrop para predecir los contenidos de agua del suelo, agua evaporada y agua transpirada bajo los distintos tratamientos, permitiendo analizar de forma accesible el sistema.

Palabras Clave: AquaCrop, eficiencia del uso de agua, estrés hídrico, técnicas isotópicas.

ABSTRACT

Around 76% of the surface of Chile is affected by drought, so it is essential that practices and technologies that allow maximizing the water use efficiency (WUE) in agriculture are used. WUE can be quantified based on the amount of biomass generated in relation to the water supply received by a crop. One of the alternatives to increase WUE is to generate a moderate water deficit prior the reproductive phase, which decreases vegetative growth and favors reproductive growth, increasing the relationship between production and amount of water used. However, in the case of severe water stress, there is a stomatal closure, and the senescence of the crop is advanced, which can drastically affect production. A trial was conducted at Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) with the goal to compare WUE in maize crops under 3 irrigation scenarios: 70% ET_C , 50% ET_C and 35% ET_C during irrigation throughout its development stage. Isotopic techniques δ^2H (Deuterium, D) y $\delta^{18}O$ (Oxygen 18) used made it possible to accurately measure and differentiate water evaporation and transpiration applied with constant monitoring of soil water content, allowed analysis on the soil-water-plant level. This analysis proved that the transpiration fraction does not vary significantly across treatments, meaning a greater WUE with 35% of the potential ET_C was obtained. It was also possible to validate the AquaCrop program, which made it possible to predict the water content of the soil, water evaporated, and water transpired under the different treatments, allowing the system to be analyzed in an accessible way.

Keywords: AquaCrop, water use efficiency, hydric stress, isotope techniques.

MARCO TEÓRICO

Cambio climático y su efecto en la agricultura

El cambio climático es una alteración del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima y los parámetros meteorológicos como temperatura, presión atmosférica, precipitaciones, nubosidad, entre otros (ODEPA, 2013). El calentamiento global es un fenómeno causado por el cambio climático, causando un aumento de la temperatura de la atmósfera terrestre de aproximadamente 0,8 °C, aunque 2/3 de este aumento se produce desde 1980. Hay una certeza del 90% de que la causa del calentamiento es el aumento de gases de efecto invernadero (GEI), que resultan de las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la deforestación (ODEPA, 2013). Se afirma que la agricultura aporta cerca del 12% de todas las emisiones de GEI, especialmente de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), causadas en primer lugar por la ganadería y cultivos de arroz, mientras que en segundo lugar se encuentra la fertilización nitrogenada (Ministerio de Agricultura, 2013).

A nivel nacional, para el 2050 se vivirá en un país más caluroso, menos lluvioso, más propenso a tormentas y con más días nublados. Los paisajes se modificarán por la menor disponibilidad de agua y el avance de las zonas áridas, trasladando cultivos desde la zona central hacia el sur y disminuyendo la cobertura de los bosques (ODEPA, 2013). El grado de aridez de un clima, no sólo depende de la precipitación, sino del balance entre precipitaciones y tasas de evaporación. En La Serena y Ovalle existe un cambio desde un régimen árido a uno hiperárido (desértico). La aridización del régimen pluviométrico, junto a un aumento de la temperatura del orden de 0,5°C a 0,6°C produjo una caída en los rendimientos de los cereales que hizo desaparecer casi por completo su cultivo en casi la totalidad de la Región de Coquimbo (AGRIMED, 2014).

La disminución de las precipitaciones, entre otros factores, ha sido causada por el efecto de bloqueo que el anticiclón del Pacífico ejerce al paso de los frentes, especialmente si se desplaza hacia el sur, interceptando la trayectoria de los frentes que se mueven desde el SO (Santibáñez, 2016). Hacia mediados de siglo, la precipitación disminuiría en torno a un 20%, en la zona árida y semiárida (AGRIMED, 2014).

La Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA, 2013) estima que en la Región Metropolitana se registran 10 días menos de lluvia que hace 100 años, donde esta tendencia se acentuará y dentro de 17 años registrará 46 mm menos de agua caída y para el 2050 serán 64 mm menos. Más al norte, en la Región de Coquimbo, la disminución de las precipitaciones significará casi 20 mm menos de agua caída en 2030 y casi 30 mm menos en 2050. En la Región del Maule, se espera que en 2030 se registren 130 mm menos de lluvia y a mediados de siglo, la baja será de casi 180 mm. En la Región de los Ríos se ha documentado una disminución de 540 mm durante los últimos 71 años. Dentro de la zona centro sur también se presentará otro fenómeno: lloverá más intensamente en cortos períodos de tiempo, lo que impediría la infiltración de agua en el suelo, al aumentar el escurrimiento superficial.

En las regiones de Valparaíso y Metropolitana el aumento de las temperaturas en el valle central alcanza valores de 3.000 días grado, manteniéndose una franja costera y precordillerana más fresca entre los 1.800 y 2.500 días grado (AGRIMED, 2014).

Se estima un aumento promedio de 1,5°C para la costa, cifra que irá creciendo a medida que se avanza hacia el interior. Sobre los dos mil metros de altura, el alza podría llegar a superar los tres grados centígrados generando una reducción del área andina capaz de almacenar nieve entre las estaciones del año (Santibañez, 2016). Las crecidas invernales de los ríos con cabecera andina se verán incrementadas por el aumento de las cuencas aportantes y la reserva nival de agua se verá disminuida. También se estima que el viento aumente su intensidad, especialmente entre las zonas costeras y cordilleranas debido al aumento de su gradiente térmico (AGRIMED, 2014) lo que aumentaría la evapotranspiración de referencia (ET₀).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2009) estima que la población mundial aumentará en más de un tercio entre 2009 y 2050, se calcula que la demanda de cereales, destinados tanto al consumo humano como animal, alcanzará unos 3 mil millones de toneladas en 2050, frente a la cifra actual de cerca de 2,1 mil millones de toneladas. Lo anterior, implica una responsabilidad social especialmente en los sectores más vulnerables donde la Agricultura Familiar Campesina posee un rol en la seguridad alimentaria y en el cuidado y protección del entorno natural y cultural pero presenta las mayores brechas tecnológicas (Meza, 2014) lo que genera una obligación a planificar e investigar la forma de adaptarse al cambio climático a través de la elaboración de estrategias de anticipación y de reacción en función de los impactos esperados, involucrando tanto el diseño e implementación directa de medidas, como también la creación de capacidades de adaptación por la vía de un mayor nivel de conocimiento sobre los riesgos, impactos y medidas disponibles para enfrentar el cambio climático. Ante esto, es vital en el uso eficiente de los recursos, generando sistemas productivos con un menor consumo de agua, de energía y de agroquímicos. El ser eficientes involucra sistemas productivos que además contarían con menor huella de carbono (C) (aporte agregado a la mitigación) y con menor huella del agua (Ministerio de Agricultura, 2013).

Importancia del manejo del riego, concepto de EUA

En la actualidad, la producción agrícola en Chile está fuertemente relacionada con el uso de riego debido a las bajas precipitaciones que cada vez dificultan más la producción en secano.

El estrés hídrico afecta al crecimiento debido a la reducción de la fotosíntesis, limitaciones en la apertura de los estomas, limitaciones bioquímicas (Efeoğlu *et al.*, 2009) y la reducción del turgor necesario para la expansión celular. Un déficit hídrico prolongado estimula la producción de ácido abscísico, el cual señala el cierre estomático al unirse con receptores proteicos en la superficie de las membranas plasmáticas de las células de guarda (Deng *et al.*, 2009; Vallabhaneni y Wurtzel, 2010). Diferentes cultivos tienen diferente tolerancia a la sequía, relacionado a la mantención de bajos niveles de ácido abscísico en las hojas (Aroca *et al.*, 2003). Bajo la dinámica de cambio climático con un aumento considerable en las temperaturas y disminución de las precipitaciones, el agua ha tomado relevancia como una de las principales limitantes en la producción agrícola por lo que se requiere optimizar su

uso. Tres elementos pueden contribuir a obtener un mayor “valor por gota”: optimizar el servicio de agua, la eficiencia del uso de agua (EUA) y la eficiencia de manejo agronómico (FAO, 2011). La EUA puede ser determinado principalmente según dos enfoques, el enfoque fisiológico, el cual puede ser medido en un determinado momento instantáneo (EUAI), en términos de asimilación de C y agua transpirada, generalmente a nivel de hoja. Mientras que el enfoque agronómico, es medido a nivel de cultivo a escala estacional, expresada en términos de materia seca producida en relación con el agua utilizada por el cultivo durante su ciclo de desarrollo (Acevedo *et al.*, 2015). El enfoque fisiológico nos permite entender los resultados globales obtenidos del enfoque agronómico (Katerji *et al.*, 2008). De esta forma se explica que un cultivo con un metabolismo C4 como el maíz posea una mayor EUA que un cultivo con un metabolismo C3 al poseer respectivamente tasas de asimilación de C de entre 2-5 y 1-3 g de CO₂ por kg H₂O transpirada (Carvajal *et al.*, 2010). Para términos prácticos de este ensayo, se utilizará el enfoque agronómico que coincide con el concepto de productividad del agua (WP), kg de biomasa o rendimiento por m³ de agua aplicada (Steduto *et al.*, 2009). El principal manejo agronómico asociado a la EUA es el sistema de riego. En Chile, el 72% de la superficie regada no utiliza tecnologías debido a que el riego de tipo gravitacional es el de mayor predominancia (Aprey, 2012), con pérdidas del 70-80% del agua empleada, causados por la evaporación, mientras que el riego por goteo presenta una eficiencia de riego del 90% (Antúnez *et al.*, 2009). Por lo que, es de suma importancia utilizar correctamente el riego tecnificado ya que un uso incorrecto disminuye drásticamente su eficiencia.

La producción de maíz en Chile

El maíz es uno de los principales alimentos a nivel mundial. Presenta los mayores volúmenes de producción a nivel global en comparación a cualquier cereal. Posee un rendimiento promedio de 5,9 ton ha⁻¹, en Chile el rendimiento promedio alcanza un valor de 12,4 ton ha⁻¹, duplicando la media internacional (FAO, 2018) causado por las óptimas condiciones climáticas, el uso mayoritario de variedades híbridas y uso de riego. Debido al cambio climático se estima una disminución productiva entre 10 y 20% en el valle central desde Coquimbo hasta Bío-Bío. En el maíz, los riesgos de sequía se mantienen extremadamente altos en toda la zona central del país, desplazándose las zonas productivas hacia la zona sur y la costa (Ministerio de Agricultura, 2013).

Es un cultivo exigente en temperatura, el mayor potencial de producción en riego se encuentra en valles interiores de la zona central donde los rendimientos se sitúan entre 14 y 17 ton ha⁻¹, disminuyendo hacia las áreas más frescas en la costa (AGRIMED, 2014). También es sensible al estrés hídrico y presenta un período crítico desde 10 a 15 días antes de la floración, hasta pasado el estado de choclo. La fase de floración, en tanto, es el período más crítico ya que en dicho período debe favorecerse una eficaz polinización, una óptima fecundación de los granos (cuajado) y un buen crecimiento inicial de los granos (Vergara, 2011). Este cultivo presenta las siguientes etapas fenológicas vegetativas VE Emergencia, V1 Primera hoja, V2 Segunda hoja, V(n) n-enésima hoja y VT Espigadura. Mientras que sus etapas reproductivas son: R1 Seda, R2 Ampollamiento, R3 Grano lechoso, R4 Grano pastoso, R5 Llenado de grano y R6 Madurez fisiológica (Saavedra, 2014). El maíz suele presentar

una alta EUA asociado a un buen manejo agronómico y a su mecanismo fotosintético C4. Por las numerosas definiciones, es difícil parametrizar un único valor de EUA, pero WP al normalizarse (WP*) por la demanda evaporativa se comporta de forma conservativa (Steduto *et al.*, 2018), manteniéndose constante en casi cualquier ambiente.

En el futuro AGRIMED (2014) define que el potencial de producción del maíz se expandirá considerablemente hacia latitudes más altas como consecuencia del aumento de las temperaturas. También disminuirá 10 a 20% en el potencial productivo en las regiones actualmente productoras de la zona árida y semiárida debido al estrés térmico. En zonas interiores del valle central la disminución ocurre debido a que no es posible desplazar las fechas de siembra más allá de agosto. La costa y precordillera mejorarán su potencial productivo en alrededor de 25%.

Técnicas isotópicas para estudios del continuo suelo-agua-planta

Los isótopos son átomos cuyo núcleo es idéntico en cuanto al número de protones, pero tienen distinto número de neutrones. La proporción de isótopos estables de un elemento se representa a través de la notación delta (δ), en unidades de tanto por mil, ‰ (Sharp, 2007). Por diferencia de masa atómica, el isótopo pesado difunde (menos común) o reacciona a menor velocidad que el isótopo ligero durante cualquier transformación biogeoquímica que tenga lugar en la biosfera, lo que conduce a enriquecimientos en el isótopo minoritario o empobrecimientos (se vuelve más ligera) relativos de un isótopo respecto al otro (fraccionamientos), los cuales son provocados por efectos isotópicos o factores de fraccionamiento (α) (Mateo, 2004). De esta forma, el grado de fraccionamiento de los isótopos nos revela un historial de los procesos biogeoquímicos que ocurrieron sobre un tejido vegetal, animal, agua o una roca. Existen numerosas técnicas isotópicas que nos permiten estudiar sistemas completos basándose en distintos elementos. La composición isotópica de una sustancia, medida por espectrometría de masas, suele expresarse en notación diferencial según la ecuación 1:

$$\delta X (\text{‰}) = R_{\text{muestra}} / (R_{\text{estándar}} - 1) 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde, δX es la composición isotópica referida a un estándar, R_{muestra} y $R_{\text{estándar}}$ son cocientes molares de los isótopos pesados sobre los ligeros, presentes en la muestra y el estándar (Yépez *et al.*, 2013). El valor estándar utilizado es el agua oceánica media estándar de Viena (VSMOW) (Coplen, 1994). Las proporciones isotópicas del agua VSMOW se definen de la siguiente manera: $^2\text{H}/^1\text{H} = 155,76 \pm 0,1$ ppm y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2005,20 \pm 0,43$ ppm (Smith, 2015).

Las técnicas isotópicas, permiten separar los valores de evaporación (E) y de transpiración (Tr), en base al balance de masas (IMB) (Yakir y Sternberg, 2000), de un cultivo con precisión debido a que la E causa el enriquecimiento de ^{18}O y ^2H , ya que se evaporan a mayores temperaturas que ^{16}O y ^1H , en el agua cerca de la superficie, mientras que la Tr no provoca un fraccionamiento significativo de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ (Li *et al.*, 2016) (Figura 1).

El balance de masas de agua en el suelo determinado hasta cierta profundidad puede definirse según la ecuación 2:

$$W_{t_2} - W_{t_1} = Q_i + Q_r + Q_u - Q_t - Q_s \quad (\text{Ec. 2})$$

Mientras que el equilibrio de la composición isotópica del agua de acuerdo con la ecuación 3:

$$(W\delta)_{t_2} - (W\delta)_{t_1} = Q_i\delta_i + Q_r\delta_r + Q_u\delta_u + Q_e\delta_e + Q_t\delta_t + Q_s\delta_s \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

W: la cantidad de agua del suelo dentro de una profundidad dada, kg m^{-2} .

Q: la cantidad de agua agregada o que sale del suelo, kg m^{-2} .

δ : composición de isótopos ($\delta^{18}\text{O}$ o $\delta^2\text{H}$) de agua, ‰.

Subíndice t1 y t2: momento de inicio y momento de finalización del período determinado, respectivamente;

Subíndice i, r, u, e, t, y s: agua de riego, lluvia, agua de capilaridad, evaporación, transpiración y filtración, respectivamente (Li *et al.*, 2016).

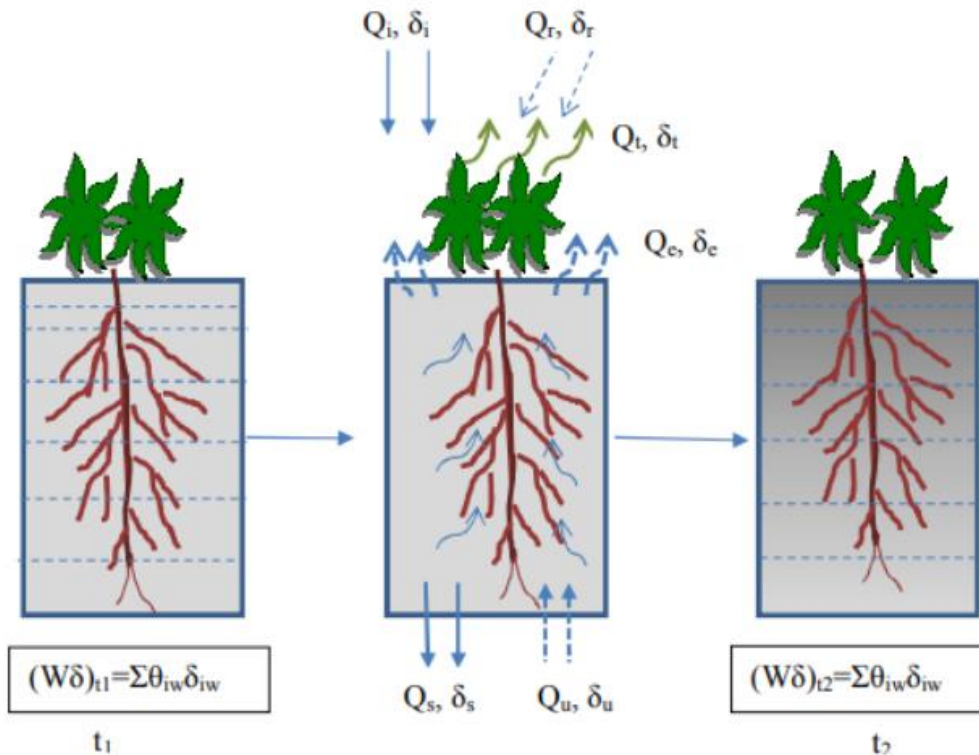


Figura 1. Principio del método de balance de masa isotópico (IMB) para particionar la evaporación y la transpiración del cultivo en el campo (Li *et al.*, 2016).

En el método IMB, δ_e no se mide directamente, sino que se calcula en base a la relación cuantitativa del fraccionamiento de isótopos entre líquido y vapor (α_{v-l}), que se ha obtenido experimentalmente de muchos estudios (Majoube, 1971) como se presenta en las ecuaciones 4 y 5:

$$\ln \alpha_{v-l} = 1137 / T - 0.4156 / T - 0.0020667, \text{ para } ^{18}\text{O} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\ln \alpha_{v-l} = 24844 / T - 76.248 / T + 0.052612, \text{ para } ^2\text{H} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde T es la temperatura absoluta (K).

Entonces δ_e se calcula usando la ecuación 6.

$$\delta_e = (\delta_{t2} + 1000) / (\alpha_{v-l} - 1000) \quad (\text{Ec. 6})$$

δ_t se calcula usando la ecuación 7 que se obtiene al asumir que el fraccionamiento solamente ocurre en los primeros centímetros del suelo por lo que se calcula como la mezcla ponderada del agua del suelo en la zona de la raíz entre t_1 y t_2 , el agua de riego y el agua de lluvia (ecuación 7).

$$\delta_t = ((W\delta)_{t1} + (W\delta)_{t2} + Q_i\delta_i + Q_r\delta_r) / (W_{t1} + W_{t2} + Q_i + Q_r) \quad (\text{Ec. 7})$$

La masa total de agua es calculada sumando el contenido inicial de agua más los flujos de entrada (riego, lluvia y capilaridad), y la fracción de cada componente (x) es calculado como la masa del componente dividido por la masa total de agua obteniéndose la ecuación 8.

$$x_{t1}(W\delta)_{t1} + x_i\delta_i + x_r\delta_r + x_u\delta_u = x_{t2}(W\delta)_{t2} + x_e\delta_e + x_t\delta_t + x_s\delta_s \quad (\text{Ec. 8})$$

De esta forma obtenemos la fracción de agua evaporada (x_e) utilizando la ecuación 9.

$$x_e = \frac{(x_{t1}(W\delta)_{t1} + x_i\delta_i + x_r\delta_r - x_{t2}(W\delta)_{t2} - \delta_t(x_i + x_r + x_{t2} - x_{t1}))}{(\delta_e - \delta_t)} \quad (\text{Ec. 9})$$

Sustituyendo x_e en la ecuación 8 podemos obtener el valor de x_t y al multiplicar estos valores por la masa total de agua obtenemos las masas de agua evaporada y transpirada durante un periodo determinado.

Con las ecuaciones 1, 2, y 3 podemos parametrizar y cuantificar los procesos hídricos que ocurren en el sistema suelo-agua-planta los que a su vez nos permiten darnos una idea de los distintos procesos que ocurren en cada uno de estos, logrando así, estudiarlos con mayor precisión y detalle. Para que el principio sea viable y los resultados confiables se requiere que se cumplan una serie de supuestos:

1) A medida que las muestras de suelo de series de tiempo se toman de diferentes posiciones, la variación espacial del contenido de agua del suelo y la composición isotópica del agua del suelo dentro del área de muestreo se supone mínima y puede ignorarse.

2) El movimiento lateral del agua del suelo se supone mínimo. También se supone que no hay fraccionamiento de isótopos cuando el agua líquida se mueve dentro del perfil del suelo (hacia arriba y hacia abajo).

3) La composición de isótopos del agua de riego y las muestras de lluvia tienen el mismo valor que el agua que ingresa al suelo, lo que significa que no hay fraccionamiento de isótopos cuando estas aguas permanecieron en la superficie del suelo.

4) Cualquier condensación de vapor atmosférico en la superficie del suelo o en la planta que entre en el perfil del suelo (por ejemplo, rocío), o vapor evaporado recondensado en los poros del suelo, se considera lo suficientemente pequeño como para ser despreciada.

5) No hay un flujo preferencial, o es insignificante, a través de los macro-poros del suelo.

6) Se supone que el riego y/o la lluvia ocurren como un evento único inmediatamente después del período que comienza en t_1 , y T_r ocurre continuamente hasta el final de t_2 .

7) Aunque E puede ocurrir teóricamente en cualquier parte del perfil del suelo, especialmente en los 20 o 30 cm superiores, se usa una supuesta profundidad, aquí establecida a 15 cm debajo de la superficie del suelo, como el sitio de evaporación. La temperatura promedio a 15 cm debajo de la superficie del suelo se usa para determinar el factor de fraccionamiento de isótopos, α .

8) A 5 cm debajo de la superficie del suelo, el vapor de agua está en equilibrio isotópico con agua líquida en la capa de suelo de 0-10 cm. La actividad del agua en el suelo también es igual que el agua pura. Mientras tanto, no hay fraccionamiento isotópico cinético en la evaporación que se produce dentro del perfil del suelo.

9) La composición isotópica del agua transpirada es el promedio de la composición isotópica del agua del suelo absorbida por las raíces (Li et al., 2016).

Modelamiento del continuo suelo-agua-planta: modelo AquaCrop

Comprender la relación agua-suelo-planta es fundamental para conocer los procesos físicos del suelo, sus efectos sobre el desarrollo de las plantas, aprender a manejar el suelo y el agua en relación con los requerimientos de los cultivos con prácticas de conservación y adaptar estos manejos en función de la influencia del ambiente y las prácticas agrícolas (Angella *et al.*, 2016).

El continuo suelo-agua-planta puede definirse como un sistema biológico y su interpretación y análisis es sumamente complejo por lo que se suele recurrir al uso de modelos que en conjunto con sus ecuaciones parametrizadas representa una hipótesis colectiva sobre el sistema real de forma simplificada (Loomis *et al.*, 1979). Para la correcta utilización de los modelos que estudian el continuo suelo-agua-planta es fundamental realizar una calibración y una validación. La calibración consiste en ajustar los valores de los parámetros en función a datos obtenidos experimentalmente, esto es sumamente importante para obtener resultados lo más similares posibles al sistema real. Estos valores tienen relación a las condiciones climáticas, de riego, de suelo y del cultivo debido a su profunda variabilidad. Por otra parte, la validación consiste en evaluar que el modelo en realidad opera en la información ingresada de la forma intencionada e involucra una comparación de las predicciones del modelo con resultados de ensayos independientes relacionando tanto los procesos (por ejemplo, tasa fotosintética) como los estados del sistema (por ejemplo, niveles de biomasa) (Loomis *et al.*, 1979). Un ejemplo de este tipo de modelos es AquaCrop. Es un modelo de FAO que simula los rendimientos alcanzables de los principales cultivos herbáceos como una función del consumo de agua en condiciones de riego pluvial, suplementario, deficiente y completo (Steduto *et al.*, 2018). AquaCrop se basa en el enfoque del Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 33, que utiliza una función de producción empírica para evaluar la respuesta del rendimiento al agua, pero AquaCrop separa la evaporación del suelo no productiva (E) de la transpiración del cultivo productiva (T_r), estimando la producción de biomasa directamente

a partir de la transpiración del cultivo mediante un parámetro de productividad del agua (Steduto *et al.*, 2018).

HIPÓTESIS

El riego en una planta de maíz grano bajo déficit hídrico, puede ser optimizado cuantificando su eficiencia del uso de agua integrando el método de balance de masa isotópica (IMB) con el software AquaCrop.

OBJETIVOS

Objetivo general

Comparar la eficiencia del uso de agua (EUA) durante el desarrollo del cultivo de maíz, bajo distintos suplementos de riego, tanto mediante el método de balance de masa isotópico (IMB) como el software AquaCrop.

Objetivos específicos

Cuantificar la cantidad de agua transpirada y evaporada, por el cultivo de *Zea mays* en los distintos tratamientos de estrés hídrico controlado, tanto mediante el método IMB como el software AquaCrop.

Validar el modelo AquaCrop para simular el rendimiento de maíz y EUA bajo distintos suplementos de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio

El estudio se llevó a cabo en el Centro de Estudios Nucleares (CEN) perteneciente a la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), ubicada en la Comuna Las Condes, Provincia de Santiago, Región Metropolitana (33° 25'S – 70° 31'W). El ensayo se estableció en noviembre de 2020 en doce micro parcelas de 4 m de largo y 3 m de ancho en una superficie total de 270 m², que cuenta con riego automatizado por cintas.

El suelo del sitio experimental es de origen coluvial, perteneciente a la Asociación Challay, miembro de la Familia franca fina, mixta, térmica de los Lithic Haploxerolls (Mollisol) (CIREN, 1996). La clase textural del suelo es franco limoso (23,6 % arcilla, 45,5% limo y 30,9% arena). En el Anexo 1 se presentan otros resultados de propiedades físicas y químicas del suelo realizado entre los años 2016-2018.

La zona de estudio presenta clima mediterráneo semi-árido. Según la caracterización climática de las comunas y subcomunas del territorio de Chile establecida por Santibañez *et al.* (2016), el sector precordillerano de Las Condes presenta las siguientes características según los datos climáticos registrados entre 1980 y 2010: temperatura máxima estival de 29,7°C; temperatura mínima estival 11,5°C; temperatura máxima invernal de 13,7°C; temperatura mínima invernal 4,3°C; temperatura media del período estival de 19,6°C; temperatura media del período invernal 8,5°C; precipitación normal anual de 464 mm; precipitación anual más baja de 400 mm; y precipitación anual más alta de 536 mm.

En el sitio experimental se han realizado ensayos con maíz desde la temporada 2016-2018. Durante la temporada 2017-2018 se obtuvo un rendimiento que varió entre 7 y 10 ton ha⁻¹ de maíz dulce, con una dosis de fertilizante de 200 kg N ha⁻¹.

Material biológico

Se utilizaron semillas de maíz grano (*Zea mays* L.) (variedad tardía 33Y74 – Pioneer) previamente desinfectadas sembradas con una sembradora manual a una densidad de 8 semillas por metro lineal, con una distancia entre línea de 0,75 m.

Tratamientos

En el sitio experimental (parcela de 270 m²) se establecieron 12 hileras de 24 m, espaciadas cada 0,75 m, orientadas hacia el Este.

Estas hileras representan tres tratamientos con dos repeticiones donde la unidad experimental son dos hileras. La variable del tratamiento es el suplemento de riego que representa el 70, 50 y 35% de la evapotranspiración de cultivo en condiciones estándar (ETc) durante la temporada noviembre 2020 a abril 2021. Cada tratamiento tuvo dos repeticiones. Las repeticiones de un mismo tratamiento fueron ubicadas de forma aleatorizada como se muestra

en la Figura 2, donde el tratamiento 3 corresponde al 70% ETc, tratamiento 2 al 50% ETc y el tratamiento 1 al 35% ETc.

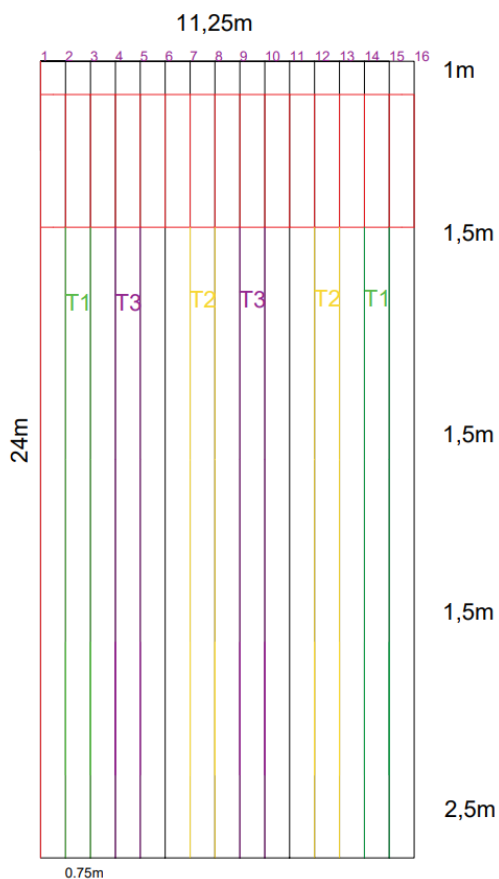


Figura 2. Distribución de tratamientos en sitio experimental.

Donde: T indica el tratamiento (verde T1, amarillo T2 y morado T3).

Manejo del experimento

Previo a la preparación de suelos se aplicó glifosato para el control de las malezas. El experimento se fertilizó con una dosis de nitrógeno (N) equivalente a 200 kg ha^{-1} , parcializado con un 25% en siembra y el 75% restante en el estado vegetativo V7, utilizando una mezcla maicera (18-19-19) y urea, respectivamente. El control de malezas se realizó de forma manual. La siembra se realizó el 30 de octubre de 2020 y la cosecha se realizó el 30 de abril de 2021.

Variables medidas

Balance hídrico

Mediante el método de balance de masas de agua en el suelo, se evaluó el balance entre las masas entrantes y que salen de la zona radical del cultivo durante su ciclo.

Según Jensen y Allen (2016) la ecuación básica del balance hídrico del suelo para un área definida con profundidad z (que constituye un volumen), durante un período de tiempo específico, Δt , se puede escribir como se presenta en la ecuación 10:

$$\Delta\theta z_s = P - Q_r + I - ET_a - DP + GW \quad (\text{Ec.10})$$

donde:

$\Delta\theta$: es el cambio en el contenido promedio de agua del perfil del suelo (m^3m^{-3})

z_s : es la profundidad del perfil del suelo monitoreado (mm)

P : es el monto total de precipitaciones (mm)

Q_r : es la escorrentía superficial que sale del área de estudio (mm)

I : es el monto total de riego (mm)

ET_a : es la evapotranspiración real (mm)

DP : es la percolación profunda, por debajo de la profundidad z_s (mm)

GW : es el ascenso capilar (mm)

El balance se utilizó tanto para la calibración del modelo de AquaCrop como para la utilización de las técnicas isotópicas. Por las características del suelo, se pudo despreciar el ascenso capilar y no se observó percolación profunda ni escorrentía superficial debido a los bajos volúmenes de riego. Por lo tanto, el cambio en el contenido de agua del suelo fue exclusivamente afectado por precipitación, riego y evapotranspiración.

Evapotranspiración de cultivo

Se utilizó el modelo FAO-PM. La temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar y temperatura del suelo se midieron diariamente utilizando una estación meteorológica (iMetos® ag (IMT280), Pessl Instrument) en el sitio de investigación. Con estos datos se calculó la evapotranspiración de referencia (ET_0). La evapotranspiración de cultivo (ET_c) en condiciones estándar (Figura 5) se obtiene al multiplicar ET_0 por el coeficiente del cultivo (K_C), el valor de K_C se obtiene del estudio FAO riego y drenaje n°56 (Allen, 2006) (Figura 3) y se adaptadas al contexto nacional (Melillán, 2015).

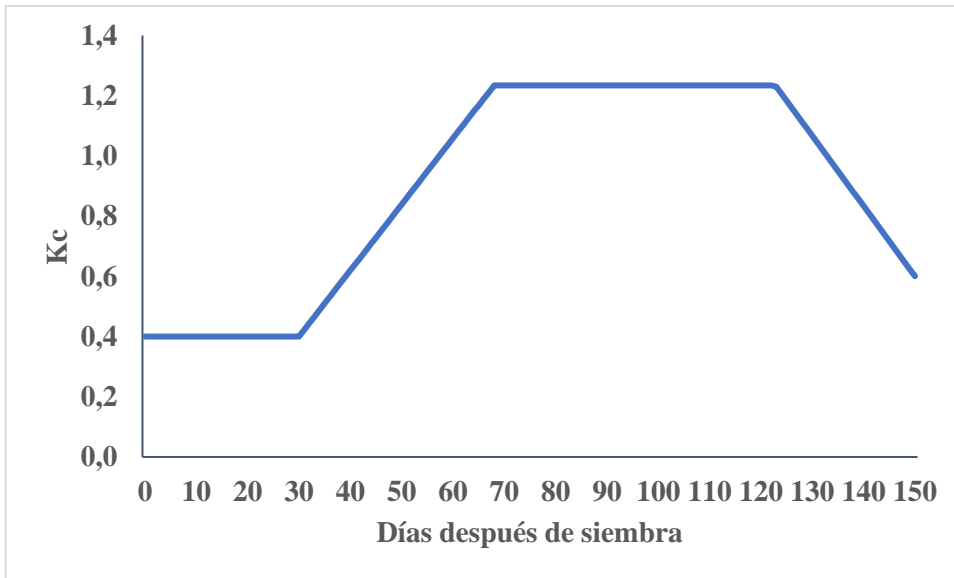


Figura 3. Coeficiente del cultivo estimado para maíz en la zona de estudio.

Riego

Tras la siembra se comenzó regando mediante manguera hasta la emergencia del cultivo. Posteriormente, se instaló, aforó y calibró el sistema de riego aplicándose dosis subóptimas, debido a problemas de terreno, en todos los tratamientos diferenciándolos a partir de los 19 DDS (V3), alcanzándose el volumen de agua deseado 35 DDS (V5) produciéndose un importante déficit hídrico durante este periodo (Figura 4).

El sistema de riego utilizado fue tecnificado por cinta. Se estimó el suplemento de riego en base a la demanda de evapotranspiración, determinando el tiempo de riego necesario para suplirlo con dos cintas juntas por hilera con un marco de emisores de 0,20 x 0,75 m y un caudal de emisores de 0,96 L h⁻¹, este representa el 70% demanda de ETc en condiciones estándar. El tiempo de riego y marco de emisores fueron igual para todos los tratamientos. El 35% de ETc en condiciones estándar fue suplido usando el mismo tipo de cinta, en este caso una por hilera. Mientras que el 50% de ETc en condiciones estándar se realizó usando una cinta que posee un caudal por emisor de 1,36 L h⁻¹. El sistema de riego se aplicó desde el 18 de noviembre (18 días después de la siembra) hasta que el cultivo alcanzó madurez fisiológica buscando suplir la demanda de evapotranspiración del cultivo en magnitud de cada tratamiento como se muestra en el Cuadro 1. La eficiencia del sistema de riego fue inferior a la esperada, siendo estimada en 60% al comparar los caudales potenciales con el contenido de agua del suelo, debido a la falta de presión, constantes fugas y daños en las cintas de riego.

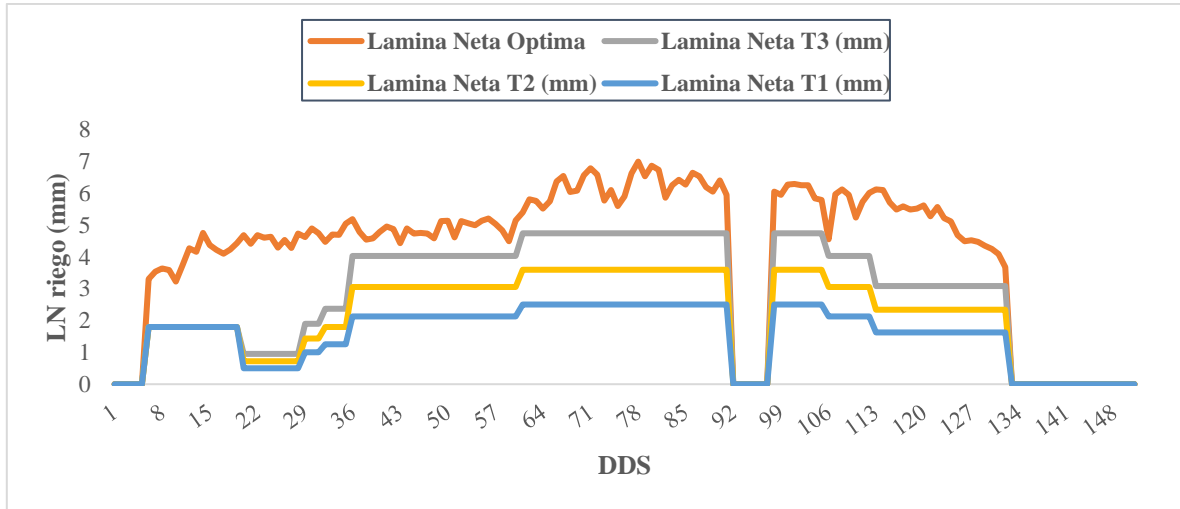


Figura 4. Lámina neta de riego óptimo (LN) para suplir 100% de ET_C en condiciones óptimas comparado por días después de la siembra (DDS) en los diferentes tratamientos.

Luego de aumentar la dosis de riego, el 11 de diciembre de 2020 (42 DDS) se instalaron los sensores para monitorear el contenido de agua del suelo.

Cuadro 1. Diseño del sistema de riego y caudal para cada tratamiento.

Tratamiento	N° Cintas	Caudal emisor	
		----- L h ⁻¹ -----	
1	simple	0,96	4,8
2	simple	1,36	6,8
3	doble	0,96	9,6

Parametrización del modelo AquaCrop

Para la calibración del modelo Aquacrop se obtuvieron los parámetros a través de observaciones en terreno (Cuadro 2).

Cuadro 2. Información de cultivo observada y utilizada para calibrar AquaCrop.

Parámetro	Datos de Parametrización			
	Unidad	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3
Fecha de siembra		30-10-2020	30-10-2020	30-10-2020
Densidad plantación	Plantas ha ⁻¹	57.222	60.278	69.167
Emergencia	DDS	10	10	10
Cobertura máxima	DDS	94	112	94
Senescencia	DDS	115	115	125
Madurez	DDS	150	150	150
Floración	DDS	74	74	74
Duración Floración	días	30	30	38

Cuadro 3. Información requerida para el proceso de ajuste del modelo AquaCrop (Cornejo, 2019).

Módulos de Aquacrop				
Cultivo	Clima	Suelo	Prácticas de Manejo	
			Riego	Campo
Emergencia, Cobertura de dosel inicial (o densidad de siembra), Cobertura máxima de dosel, Inicio y duración de floración, Senescencia, Madurez fisiológica del grano, Índice de cosecha (HI), Fecha de siembra, Método de siembra, Temperaturas críticas (base y máxima), Profundidad inicial y máxima de raíces, Días a máxima profundidad de raíces, Productividad de agua (WP).	Precipitación, Temperaturas máxima y mínima, Evapotranspiración de referencia (<i>ET_o</i>), Concentraciones de CO ₂ .	Textura, Número de horizontes, Punto de marchitez permanente, Capacidad de campo, Punto de saturación, Conductividad hidráulica saturada, Curva número (CN), Lámina rápidamente evaporable (REW), Profundidad de capa restrictiva, Profundidad de nivel freático.	Método, Lámina neta, Lámina bruta, Fechas de aplicación, Eficiencia de la aplicación.	Grado de fertilidad del suelo respecto al cultivo, Presencia de acolchados o residuos de cosecha, Capa de agua permanente sobre el suelo.

Cobertura del dosel

Se fotografió el cultivo durante cada uno de sus estados fenológicos. Estas imágenes fueron introducidas en la App Canopeo (<https://canopeoapp.com>) de procesamiento de imágenes que permitió estimar la cobertura vegetal del cultivo de maíz.

Composición isotópica

Para estimar la composición isotópica se registró la cantidad de agua de cada riego y evento de lluvia y se obtuvieron muestras de agua representativas para la medición de isótopos.

También se registró la temperatura del suelo a 15 cm de profundidad de forma manual cada 10 días aproximadamente ya que es crítica para calcular δe (Li *et al.*, 2016).

El contenido de agua del suelo fue monitoreado por sensores (Soil moisture probe Delta-T Devices PR2/6) enterrados a 85 cm de profundidad, tomando registros cada 20 cm (0-15, 15-25, 25-45 y 45-80cm) con tres repeticiones, siendo uno por tratamiento. Estos datos fueron registrados cada 10 días aproximadamente, las últimas mediciones fueron tras el último riego y previo a la cosecha.

Se tomaron 4 muestras de suelo en los primeros 40 cm del suelo a las profundidades 0-5, 5-10, 10-20 y 20-40 cm. Esto se realizó en los 3 tratamientos y en las 2 repeticiones en 5 momentos asociado al periodo de lluvia y a las siguientes etapas fenológicas del cultivo: V7, R1, R5 y MF; las que se utilizaron para medir la concentración isotópica de deuterio (2H) y oxígeno 18 (^{18}O) del agua del suelo. Las muestras de suelo se obtuvieron bajo la cinta de riego entre los emisores de goteo donde el perfil de mojamiento se encuentra más homogéneo.

Las muestras de suelo se les extrajo el agua a través de destilación al vacío (bajo un vacío de 110 Pa) (Li *et al.*, 2016) utilizando un sistema de extracción de agua desde la matriz suelo compuesto por un block calefactor modular (VWR) y un refrigerador de inmersión (Huber, TC50-NR), en los casos que no se logró extraer los volúmenes de agua necesarios para la posterior medición, se mezclaron las repeticiones de los tratamientos. El agua extraída del suelo fue conservada en frascos de vidrio sellados bajo refrigeración hasta la medición de isótopos.

Se utilizó un analizador de isótopos de agua basado en espectroscopia para realizar la medición de isótopos de las muestras de agua del suelo, lluvia y riego. El cálculo de E y Tr se realizó en base a las ecuaciones principales del método IMB.

Eficiencia del uso del agua

La eficiencia del uso del agua se cuantificó a través de la biomasa producida al momento de cosecha dividido por la cantidad de agua aplicada durante su ciclo de desarrollo. Además, se midió a través de la masa de grano seco, producido en base a la cantidad de agua requerida por el cultivo durante todo su ciclo de desarrollo, con el objetivo de estimar el índice de cosecha real. También se integró el concepto de porcentaje de agua transpirada en relación

con agua evapotranspirada, dividiendo la cantidad de agua transpirada por la cantidad de agua evapotranspirada durante la temporada, lo que nos permite identificar el porcentaje de agua útil (transpirada) frente al agua evaporada.

Análisis estadístico

Se realizó un estudio de diseño observacional descriptivo.

Para comparar los modelos de AquaCrop e IMB, se utilizó la eficiencia de modelado de la verosimilitud estadística convencional (Ef) (ecuación 12) (Nash y Sutcliffe, 1970) para las variables de biomasa, rendimiento, transpiración y evaporación.

Se empleó el error cuadrático medio normalizado ($NRMSE$) (ecuación 14) para analizar las variables de contenido de agua en el suelo, biomasa y rendimiento estimados por AquaCrop. O_i y P_i son las observaciones y predicciones respectivamente, \bar{O} y \bar{P} sus promedios y n el número de observaciones

$$Ef = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{Ec. 12})$$

Un Ef de 1 indica una coincidencia perfecta entre el modelo y las observaciones, un Ef de 0 significa que las predicciones del modelo son tan precisas como el promedio de los datos observados y un Ef negativo ocurre cuando la media de las observaciones es una mejor predicción que el modelo (Nash y Sutcliffe, 1970). En una revisión de las aplicaciones del modelo hidrológico, Moriasi *et al.* (2007) definieron las siguientes clasificaciones de desempeño para los valores E : $<0,5$ no satisfactorio; $0,50 < E < 0,65$ satisfactorio; $0,65 < E < 0,75$ bueno; y $0,75 < E < 1,00$ muy bueno.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (\text{Ec. 13})$$

El error cuadrático medio (ecuación 11) mide la magnitud promedio de la diferencia entre simulaciones y observaciones. Varía entre 0 hasta el infinito positivo, indicando un buen rendimiento del modelo y un rendimiento deficiente respectivamente. Debido a que $RMSE$ se expresa en las unidades de la variable estudiada, no permite probar el modelo en una amplia gama de condiciones meteorológicas y climáticas (Jacovides y Kontoyiannis, 1995). Por lo tanto, $RMSE$ se puede normalizar utilizando la media de los valores observados (\bar{O}).

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\sum \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} 100 \quad (\text{Ec. 14})$$

Una simulación puede considerarse excelente si el $NRMSE$ es $<10\%$, buena si está entre el 10 y el 20%, regular si está entre el 20 y el 30% y mala si es $> 30\%$ (Jamieson *et al.*, 1991).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En relación con la fecha de siembra del cultivo de maíz en este estudio, Pioneer (2020) señala que la fecha límite para la siembra del híbrido 33Y74 en la zona es el 15 de octubre. Por lo tanto, el retraso en la siembra de maíz en el estudio pudo determinar condiciones no óptimas durante el periodo crítico, esto conlleva a una menor tasa de crecimiento del cultivo y menor número de espiguillas viables, afectando el número de granos (Andrade *et al.*, 1996a). En este sentido, en otro estudio realizado en la ciudad de Balcarce, Argentina, siembras tardías resultaron en una disminución en el componente número de granos del 20 al 54% para las siembras de noviembre y diciembre, respectivamente, en un cultivo sin limitantes hídricas ni nutricionales (Andrade, 1995).

La evapotranspiración de referencia (ET_0) fue ligeramente superior a la evapotranspiración de cultivo (ET_c) en las etapas iniciales (Figura 5). Durante este periodo, la ET_c se vio fuertemente ligada a los fenómenos de evaporación del suelo antes que la canopia alcanzara su máximo desarrollo. Lo anterior, está directamente relacionado a la fenología del cultivo ya que a partir de los 60 días después de la siembra (DDS) el cultivo se encuentra en la etapa V9 (Cuadro 4) y se observa como aumenta su evapotranspiración potencial al incrementar su biomasa y transpirar en mayores tasas hasta llegar al inicio de madurez fisiológica (132 DDS). Finalmente, cuando disminuye su capacidad de transpirar domina el proceso de evaporación del agua del suelo.

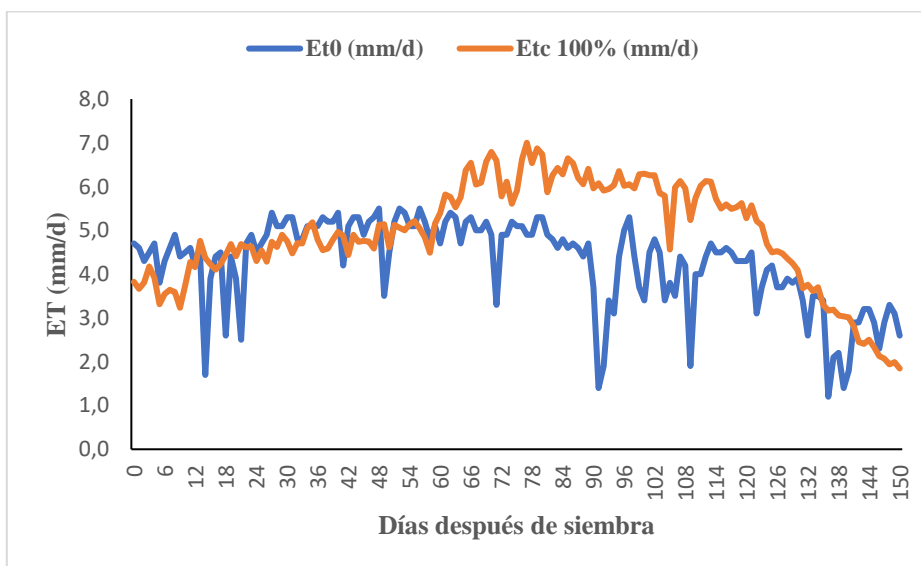
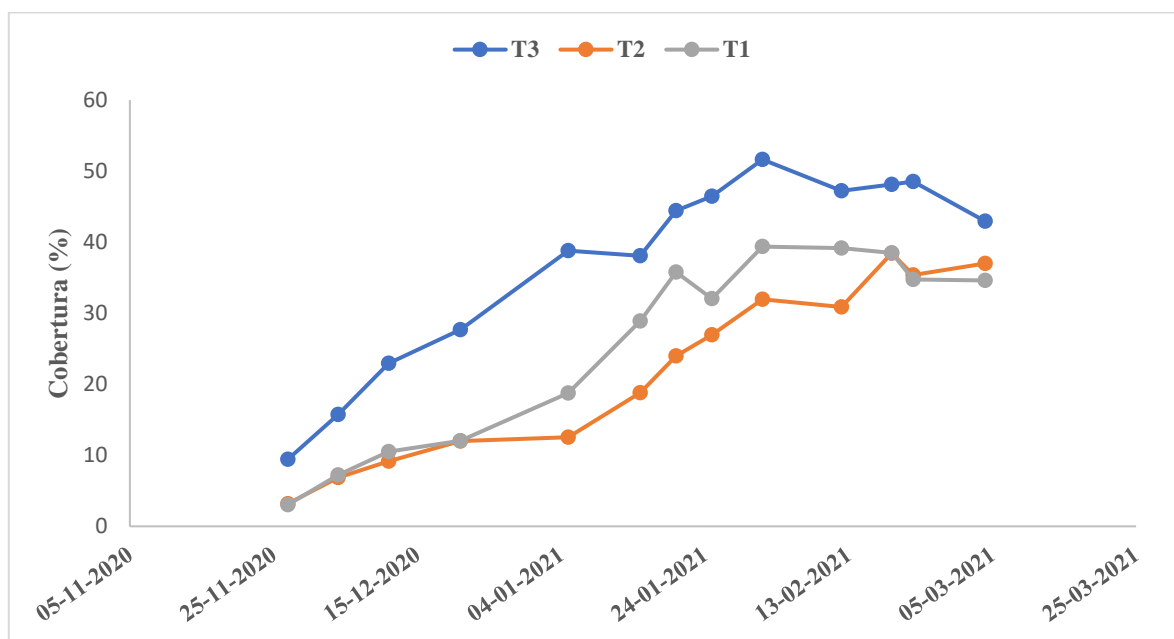


Figura 5. Evapotranspiración de referencia (ET_0) y evapotranspiración del cultivo (ET_c) para el cultivo de maíz en la zona de estudio.

Las lecturas de cobertura comenzaron en el estado V4. Se observó como al aumentar la cobertura, aumenta la evapotranspiración (Figura 6).

Cuadro 4. Estados fenológicos del cultivo según los días después de la siembra (DDS).

Fecha	DDS	Estado Fenológico
30-10-2020	0	Siembra
09-11-2020	10	V1
18-11-2020	19	V3
27-11-2020	28	V4
04-12-2020	35	V5
11-12-2020	42	V6
21-12-2020	52	V7
30-12-2020	61	V9
05-01-2021	67	V11
15-01-2021	77	R1
25-01-2021	87	R2
12-02-2021	105	R3
19-02-2021	112	R4
22-02-2021	115	R5
11-03-2021	132	Mf
30-04-2021	182	Cosecha

**Figura 6.** Porcentaje de cobertura del dosel durante la temporada.

Se observaron contenidos de agua similares entre los tratamientos hasta el 5 de enero de 2021 cuando el cultivo se encontraba en V11. Lo anterior generó un estrés hídrico de igual magnitud entre tratamientos durante la etapa de rápido crecimiento vegetativo provocando una disminución en el crecimiento de la planta y en el aumento del índice de área foliar

debido a un menor tamaño de las hojas (Cakir, 2004). Desde el 15 de enero se observó diferencias en el contenido de agua en el suelo (Figura 7). Por su parte, T1 mantuvo niveles de agua constantes a lo largo de todo el ensayo mientras que T2 y T3 mantuvieron tendencias similares.

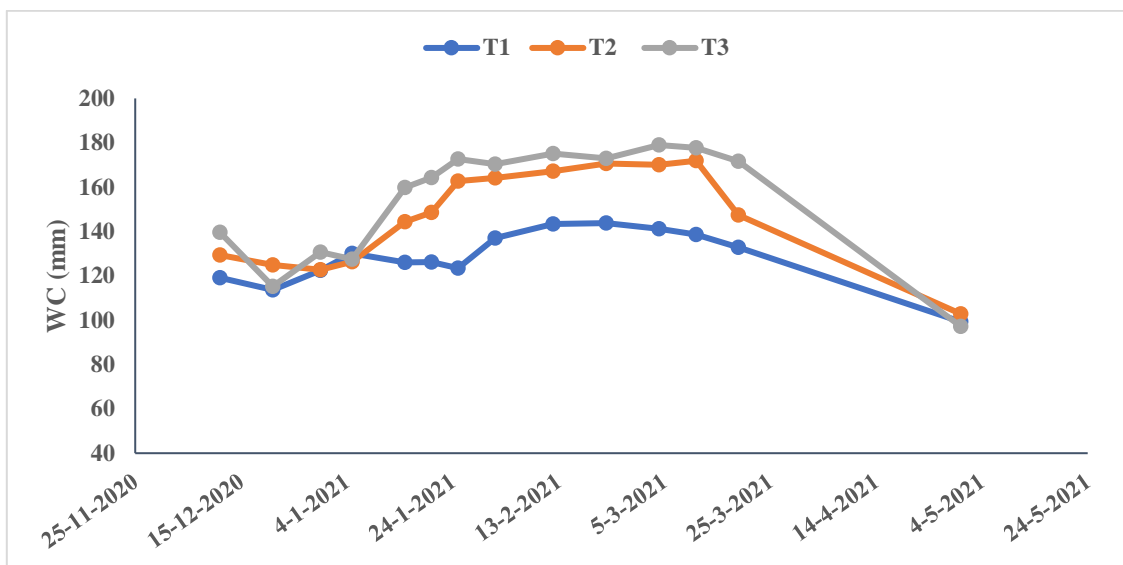


Figura 7. Contenido de agua monitoreado en la zona radical durante la temporada.

Entre el 11 de diciembre de 2020, después de alcanzar la dosis deseada de riego, y el 19 de febrero 2021, cuando se disminuye la dosis de riego, se observó una leve diferencia en la temperatura del suelo entre los tratamientos (Figura 8). Lo anterior, está directamente relacionado a los niveles de agua del suelo y a la característica termorreguladora del agua que mientras más agua evapora el suelo, menor es su temperatura, sumado a la cobertura diferenciada de los tratamientos que provoca sombreado en el suelo.

A grandes rasgos se observó como la temperatura del suelo disminuyó después del 30 de noviembre de 2020, momento en el cual se aumentan los volúmenes de riego en los tratamientos, y se mantuvo constante hasta el 25 de enero cuando vuelve a disminuir significativamente poco antes del día de la lluvia cuando el clima presentó menores temperaturas, pero vuelve a alzarse desde el 4 a 11 de marzo.

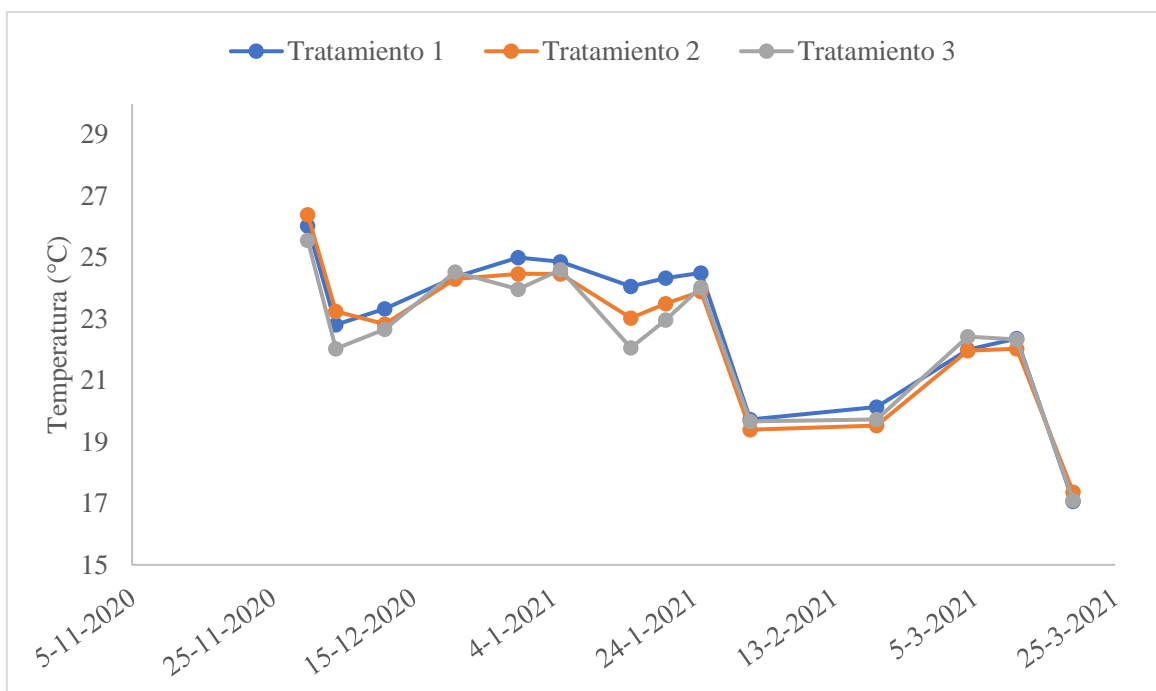


Figura 8. Temperatura del suelo en cada tratamiento durante el estudio.

Composición isotópica agua de suelo, riego y precipitaciones

La composición isotópica del agua de riego fue relativamente constante durante todo el ensayo variando entre δ^2H -86 y δ^2H -80,2 y entre $\delta^{18}O$ -12,2 y $\delta^{18}O$ -11,5.

Es importante destacar que durante el período de desarrollo del cultivo de maíz se presentó un evento de lluvia el día 29 de enero 2021, equivalente a 27 mm, cuando el cultivo se encontraba en la etapa R2. No se observó un aumento importante en el contenido de agua en el suelo debido a que se apagó el sistema de riego entre el 28 de enero y el 4 de febrero. Además, se recolectaron dos muestras de agua de lluvia para su análisis isotópico, obteniendo una composición isotópica de δ^2H -49 y $\delta^{18}O$ -7 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Composición isotópica de deuterio (δ^2H) y oxígeno 18 ($\delta^{18}O$) en el agua de riego y evento de lluvia durante el estudio.

Muestra de agua	Fecha de muestreo					
	21-dic	20-ene	29-ene	4-feb	22-feb	24-mar
Riego						
δ^2H	-80,2	-80,2	-	-86,0	-83,0	-81,1
$\delta^{18}O$	-11,5	-11,5	-	-12,2	-11,8	-11,5
Lluvia						
δ^2H	-	-	-49	-	-	-
$\delta^{18}O$	-	-	-7	-	-	-

Desde los estados fenológicos V7 a R1, que es el momento que el cultivo comienza una mayor susceptibilidad hídrica, se observó en todos los tratamientos como se enriqueció $\delta^{18}O$ mientras que δ^2H se mantuvo estable. El tratamiento 3 fue el más enriquecido, dando señales de mayor evaporación lo que tiene relación a un mayor suplemento de riego, especialmente en los primeros centímetros del suelo donde se presenta la fracción de agua fácilmente evaporable.

El 4 de febrero, se pudo observar empobrecimiento en el agua del suelo luego del evento de lluvia la que, al poseer volúmenes de agua superiores al riego habitual, empobrece en mayor medida ya que a pesar de estar más enriquecido que el riego, está más empobrecido que el agua en el suelo. A esto se suma la disminución de la evaporación del suelo causado por las condiciones climáticas.

En la muestra del 22 de febrero (R5) posterior a la disminución de la cantidad de suplemento de riego en todos los tratamientos, hubo una importante disminución en la temperatura del suelo lo que disminuyó la evaporación, el T3 se enriqueció mientras que los T2 y T1 se empobrecieron ligeramente con la recarga del riego.

En la etapa de MF (24 de marzo) se encontraron composiciones isotópicas similares entre tratamientos, ligeramente empobrecidos respecto a la composición isotópica en el estado V7, lo que se explica por la finalización del suministro de riego, disminución de la temperatura del suelo y enriquecimiento total similar. De esto podemos inferir que el tratamiento 3, al tener mayores contenidos de agua en el suelo posee una tasa mayor de enriquecimiento, ya que hay más agua fácilmente evaporable. Sin embargo, al momento de detener el suministro de riego, se alcanzan composiciones isotópicas similares lo cual puede ser atribuible al error en los supuestos del modelo representado en la figura 9 por las barras.

Como observaron Ferretti *et al.* (2003), la simplificación más significativa del modelo de isótopos proviene de tratar todas las entradas como un solo evento de recarga, seguido de pérdidas continuas. En alrededor del 10% de los casos, las soluciones aritméticas de las ecuaciones del modelo dieron como resultado valores negativos, como observaron Hsieh *et al.* (1998), los cuales se deben omitir de los promedios. El valor de $\delta^{18}O$ asignado a la transpiración, δt , fue la cantidad promedio ponderada de entradas de precipitación y agua del suelo, pero el sistema de riego por goteo diariamente restableció parcialmente el perfil de

agua del suelo por lo que el valor de δt no es exacto. También asumimos que la transpiración ocurrió en estado estacionario, pero es probable que hubiesen ocurrido condiciones de estado no estacionario, especialmente durante períodos secos o excepcionalmente húmedos (Harwood *et al.*, 1998; Pendall, 1997). Las mediciones directas de vapor y de la corriente de transpiración reducirían la dependencia de estas suposiciones. A pesar de estas limitaciones, el enfoque isotópico tiene mérito y puede proporcionar información adicional sobre las vías de pérdida de agua de los ecosistemas naturales y gestionados (Ferretti *et al.*, 2003). En el momento en que mejor se desempeña el modelo es al momento de ocurrir la lluvia ya que el sistema de riego se pausa. Así, pudimos evidenciar el enriquecimiento producido por el fraccionamiento de la evaporación del agua en el suelo tanto entre diciembre y enero como entre febrero y marzo (Figuras 9 y 10).

Al observar estos procesos, pudimos encontrar un mayor dinamismo en las mediciones de $\delta^{18}O$ en comparación con δ^2H , donde se presentaron resultados más constantes a lo largo del tiempo, pero ambas presentaron tendencias similares, por lo que en conjunto nos permiten analizar los resultados con mayor precisión.

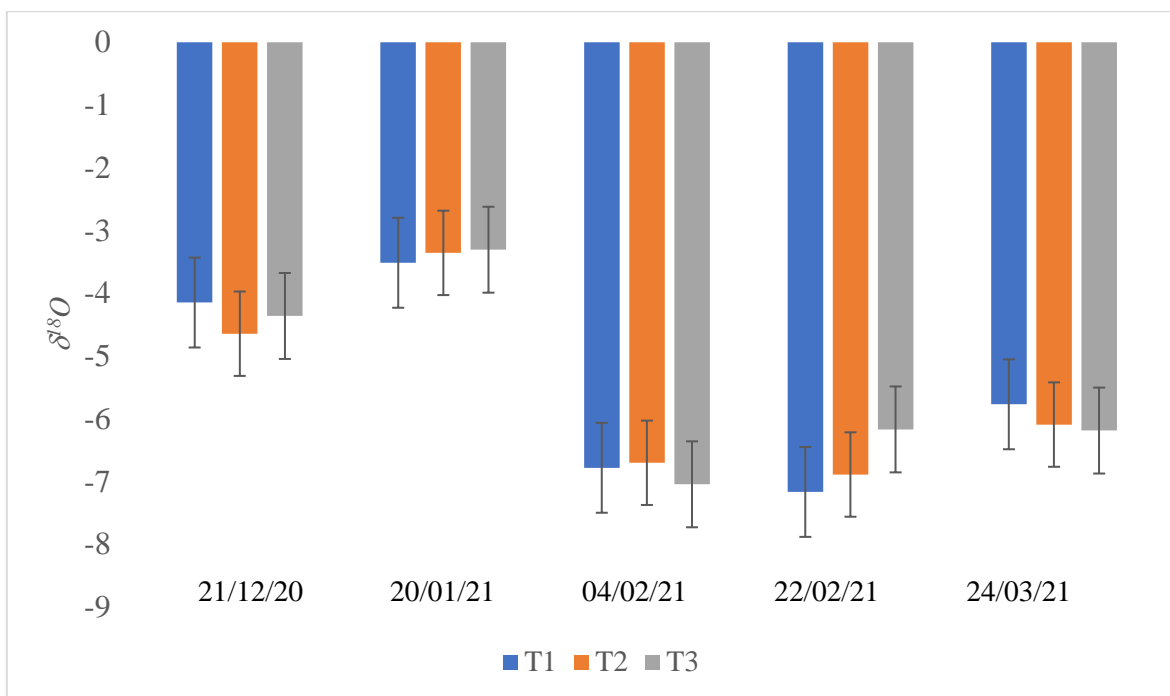


Figura 9. Concentración isotópica de oxígeno 18 ($\delta^{18}O$) en el agua en el suelo agrupado por fecha de extracción en los diferentes tratamientos.

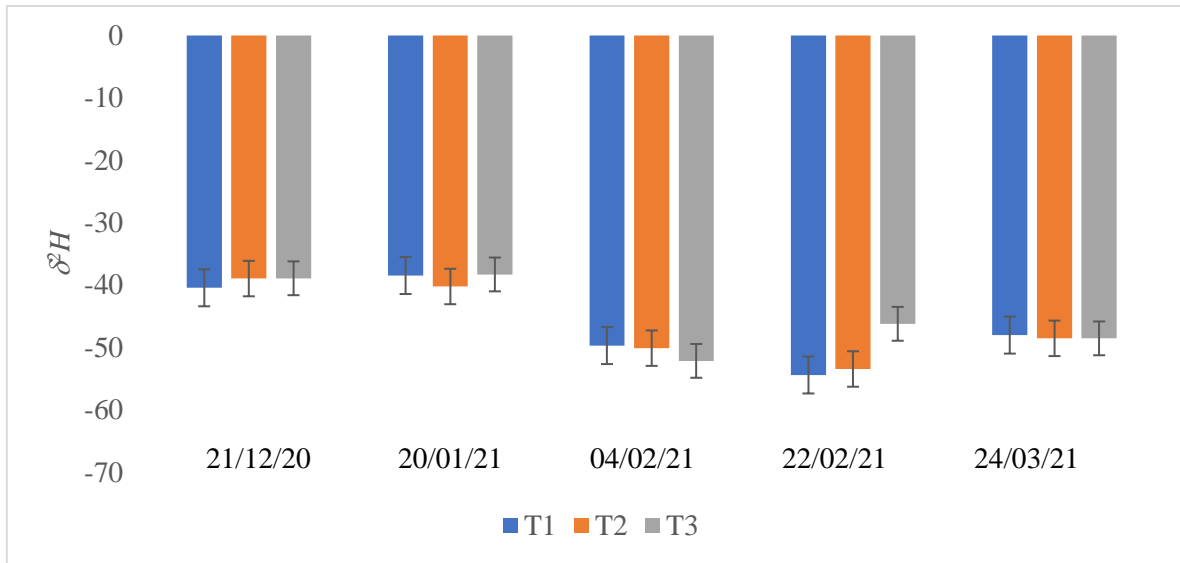


Figura 10. Concentración isotópica de deuterio (δ^2H) en el agua en el suelo agrupado por fecha de extracción en los diferentes tratamientos.

A través del método de balance IMB, que utiliza del balance de agua entrante y saliente en conjunto con sus respectivos contenidos isotópicos, se pudo estimar la cantidad de agua evaporada (E), Transpirada (Tr) y la relación que existe entre al agua transpirada y la evapotranspirada (fTr). Lo anterior, permite identificar la proporción de agua que es aprovechada por el cultivo, ya que la producción de masa seca ocurre en función del agua transpirada y de la eficiencia de conversión del cultivo (Andrade *et al.*, 1996a). Por ejemplo, el maíz requiere menos requerimientos hídricos para la producción de masa seca que una planta C3 (Medrano *et al.*, 2007), pero esto no significa que sea más tolerante al estrés hídrico, sino que son más eficientes en el uso del agua (INTAGRI, 2018). En los tratamientos observamos que a mayor volumen de riego mayor evaporación y transpiración bajo ambos isótopos ($\delta^{18}O$ y δ^2H). Así, el T2 presentó la mayor cantidad de agua transpirada con relación a la evapotranspirada (fTr), demostrando que se aprovecha de mejor forma el agua, mientras que T3 y T1 tienen resultados similares liberando el agua a la atmosfera en proporciones similares, pero volúmenes diferentes (Cuadro 6). Hogan *et al.* (2020) utilizaron técnicas isotópicas en maíz para estimar valores medios de 67,5% de fTr . Además, en este estudio se reportó una amplia variabilidad en la fracción de transpiración, variando diariamente entre 43 y 88,5%. También los autores destacan que durante los periodos en que las condiciones meteorológicas dan lugar a elevadas tasas de ET sin que el suelo esté húmedo, se espera que la fTr se acerque al 90%.

Cuadro 6. Cantidad de agua evaporada (E), transpirada (Tr) y evapotranspirada (fTr) bajo el método de Concentración isotópica de deuterio (δ^2H) y oxígeno ($\delta^{18}O$) para los distintos tratamientos.

Isótopo	Tratamiento	Parámetro		
		E	Tr	fTr
		-- mm --	-- mm --	-- % --
$\delta^{18}O$	1	143,8	69,7	32,6
δ^2H	1	100,5	96,8	49,1
$\delta^{18}O$	2	195,7	116,4	37,3
δ^2H	2	129,1	138,3	51,7
$\delta^{18}O$	3	252,1	146,2	36,7
δ^2H	3	179,8	160,1	47,1

Validación AquaCrop

Considerando los parámetros requeridos para la calibración de AquaCrop (Cuadro 3), los diferentes tratamientos tienen velocidades de crecimiento diferentes que, si bien son la misma variedad de maíz, alcanzan su cobertura máxima y senescencia en diferentes fechas. Lo anterior está relacionado directamente con el estrés hídrico (Cuadro 7) que nos señala que el tratamiento 1 presentó estrés a través de cierre estomático, disminución en la expansión de la canopia mientras que todos los tratamientos presentan estrés asociado a las malezas. Esto no se vio representado en terreno, ya que todos los tratamientos en las etapas iniciales mostraron signos de estrés tales como amarillamiento, paraheliotropismo y disminución de la tasa de crecimiento del dosel. En contraste, el contenido de agua en el suelo en la zona radical

simulada durante la temporada (Figura 11), al compararla con el contenido de agua observado en las mismas fechas (Figura 12) muestran una similitud lo que se demuestra a través de biomasa y rendimiento similar (Cuadro 7 y 8).

Cuadro 7. Factores de estrés observados en los distintos tratamientos.

Tratamiento	Factores de estrés*					WP _{ET}	Rendimiento	
	Temperatura	Agua			WP _{ET}			Rendimiento
		CE	EC	Malezas				
		----- % -----			- kg m ⁻³ -	- kg ha ⁻¹ -		
1	4	20	40	25	1,71	3,91		
2	4	0	1	25	1,73	5,16		
3	4	0	0	25	1,98	7,13		

* CE= Cierre de estomas; EC= Expansión de la canopia; WP_{ET}= Productividad del agua respecto a la ET.

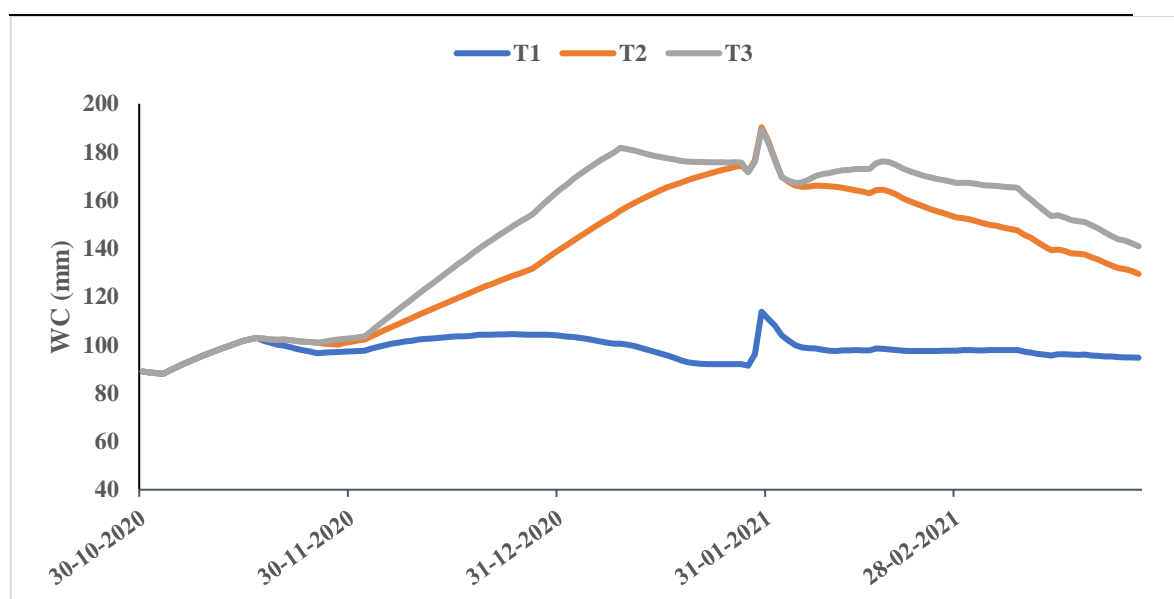


Figura 11. Contenido de agua (WC) en la zona radical simulado durante la temporada.

El contenido de agua del suelo simulado (SIM) durante el ensayo muestra una tendencia similar al contenido de agua observado siendo el T3 el contenido de agua mayor, luego el T2 y finalmente el T1 que se mantiene constante a lo largo del tiempo (Figura 10). A diferencia del contenido de agua observado (OBS), la precipitación del 29 de enero generó que el T3 y T2 igualen su contenido de agua ya que el modelo simula una condición de saturación del suelo lo que no fue observado en terreno. Al analizar los resultados OBS versus SIM, obtuvimos un valor de *NRMSE* de 15,75 que está en un rango de satisfactorio como indicador de la precisión del modelo. También podemos observar que en el T1 se obtienen valores de mayor diferencia entre contenido SIM y OBS, mientras que en los otros tratamientos el software simula con mayor precisión el contenido de agua OBS en el suelo (Figura 12).

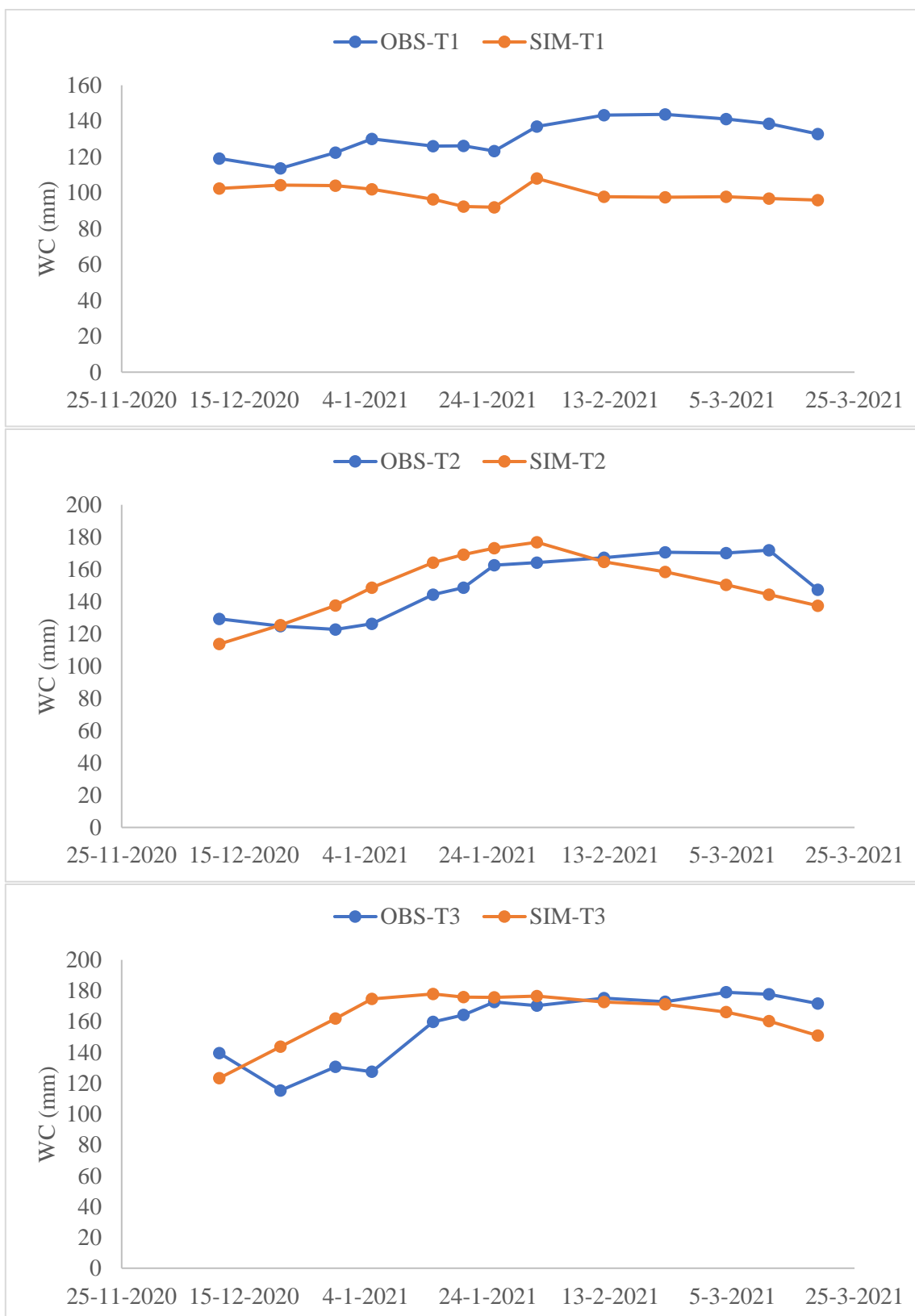


Figura 12. Comparación del contenido de agua (WC) simulado por AquaCrop (SIM) con el contenido de agua observado (OBS) en los diferentes tratamientos (T1, T2 y T3).

Para el rendimiento se comparó el peso de los granos en los distintos tratamientos en ton ha^{-1} , pero también se comparó la biomasa producida, ya que el maíz de silo tiene un interés comercial. En los tratamientos observamos como el 35% y 50% de ET_c obtuvieron resultados similares mientras que el tratamiento de 70% ET_c muestra una mayor biomasa y rendimiento (Cuadro 8 y 9). Esto se explica porque el modelo subestimó el contenido de agua en el suelo en el T1, por lo que también subestima rendimiento y biomasa producido por el tratamiento mejorando su precisión en los T2 y T3.

Cuadro 8. Biomasa observada (OBS) y simulada (SIM) por AquaCrop comparadas por diferencia porcentual (DP).

Tratamiento	Biomasa		
	OBS	SIM	DP
	-- ton ha^{-1} --		- % -
1	10,54	7,18	32
2	10,21	9,31	9
3	12,38	13,24	-7

Cuadro 9. Rendimiento en grano observado (OBS) y simulado (SIM) por AquaCrop comparadas por diferencia porcentual (DP).

Tratamiento	Rendimiento		
	OBS	SIM	DP
	-- ton ha^{-1} --		- % -
1	6,91	3,91	43
2	6,44	5,16	20
3	8,20	7,13	13

Podemos analizar que el modelo AquaCrop subestimó la biomasa obtenida en los tratamientos 1 y 2, mientras que subestimó el rendimiento en todos los tratamientos, donde se obtuvieron mayores diferencias. AquaCrop también generó una clara tendencia al aumento de biomasa y rendimiento cuando más agua reciben los tratamientos, mientras que, en lo observado, el tratamiento 1 obtuvo una mayor biomasa y rendimiento que el tratamiento 2. Lo anterior, se condice con la Figura 6, que nos muestra una mayor cobertura en el tratamiento 3, luego 1 y finalmente 2. También se obtuvo un valor de E_f de -3,6 para biomasa y de -6 para rendimiento lo que es insatisfactorio y valores de $NRMSE$ de 18,7% y 27,6% para biomasa y rendimiento lo cual es clasificado como satisfactorio y regular, respectivamente.

Al momento de comparar los indicadores de eficiencia de uso del agua (Cuadro 10) se observaron mejores resultados en el T1, luego se encuentra el T2 con una eficiencia levemente mejor que el T3. Lo anterior sugiere que mientras menos agua se aplica al cultivo, éste es más eficiente en su aprovechamiento, lo que el software no logró simular entregando una eficiencia similar entre el T1 y T3, y que son similares también a T2. Sin embargo, esto

es esperable ya que el modelo utiliza valores normalizados de productividad del agua (WP) para simplificar la interacción entre el cultivo y los diferentes ambientes en los que puede simular. Los datos observados coinciden con lo planteado por Ko y Piccinini (2009) que plantean el riego deficitario desde la ET_c , donde demuestran que esta estrategia de riego se traduce en mayores rendimientos junto a una mayor eficiencia en el uso del agua (EUA). En adición, reportan que es factible utilizar un régimen de riego de 75% de ET_c con una reducción del 10% del rendimiento de grano. Payero (2006) obtuvo en maíz rendimientos de 88% en relación con los tratamientos sin déficit hídricos y utilizando un 62% del agua de riego. En este experimento la estrategia de riego fue de demorar el riego hasta 2 semanas antes del panojamiento o en su defecto hasta permitir un agotamiento del 70 % agua disponible del suelo. La etapa reproductiva se mantuvo en un rango de 40 a 70 % de agua disponible y luego de esta etapa un 30 % de agua disponible.

Cuadro 10. Eficiencia de uso del agua (EUA) observada (OBS) y simulada (SIM) en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	EUA Biomasa		EUA Grano	
	OBS	SIM	OBS	SIM
	----- kg mm ⁻¹ -----			
1	4,0	2,9	2,6	1,6
2	2,9	2,6	1,8	1,4
3	2,7	2,9	1,8	1,6

Cuadro 11. Volumen de agua evaporada (E), transpirada (Tr) y fracción transpirada (fTr) observadas (OBS) y simuladas (SIM) en los diferentes tratamientos.

Tratamiento	E		Tr		fTr	
	OBS	SIM	OBS	SIM	OBS	SIM
	----- mm -----				-- % --	
1	122,1	128,3	87,1	111,9	0,42	0,47
2	162,4	175,3	127,4	134,8	0,44	0,43
3	216,0	170,2	155,9	199,9	0,42	0,54

La cuantificación del agua E y Tr nos permite comparar de mejor forma los resultados observados bajo la técnica isotópica de IMB y el modelo de AquaCrop. Bajo estos parámetros, los resultados obtenidos por el software son satisfactorios obteniendo valores de 0,58 y 0,48 de E_f en E y Tr , respectivamente. Este resultado es muy importante ya que los volúmenes de agua evaporada y transpirada nos permiten cuantificar la eficiencia de un cultivo bajo otro prisma, fTr , que cuantifica la proporción de agua que el cultivo aprovecha dentro del proceso de evapotranspiración.

Se comentó que mientras más agua tenían los tratamientos mayores volúmenes transpiran y evaporan (Cuadro 11), pero también se pudo observar y simular que la proporción de agua transpirada de la evapotranspirada es similar. Se destaca lo anterior, ya que, si el estrés hídrico es lo suficientemente severo, la conductancia estomática se reduce lo que limita el

intercambio gaseoso, declina la fotosíntesis neta y la tasa de crecimiento del cultivo (Rahaman *et al.*, 2012). Además, la senescencia de las hojas más viejas disminuye el área foliar activa. Esto reduce la proporción de radiación incidente interceptada afectando negativamente la producción de biomasa (Otegui *et al.*, 1995). Asimismo, este estudio reportó que el indicador granos m^{-2} y el rendimiento estuvieron relacionados con la *ETc* durante el período entorno a floración femenina. Las deficiencias hídricas en dicha etapa resultaron en reducciones de 4,7 granos m^{-2} y 17,7 kg ha^{-1} por cada mm disminuido de *ETc*. La transpiración y fotosíntesis del cultivo se reducen como resultado de la menor cobertura del dosel verde y de una menor conductancia estomática. Lo anterior, provoca la reducción de la tasa de producción de biomasa y, por ende, la disminución del rendimiento de grano donde el maíz es una especie de hábito de crecimiento determinado (meristema apical es transformado de vegetativo a reproductivo) generando poca plasticidad para adaptarse a pérdidas de estructuras reproductivas ante condiciones desfavorables (Andrade y Ferreiro 1996b; Sadras *et al.*, 2000). Un efecto negativo adicional es que la aceleración de la senescencia del dosel disminuye la duración de éste y acorta el período de llenado del grano lo que provoca que no exista tiempo suficiente para que aumentara el índice de cosecha y alcanzar su nivel máximo normal. El resultado final es que la reducción porcentual del rendimiento del grano sería incluso mayor a la reducción porcentual de biomasa (Steduto *et al.*, 2012). En los distintos tratamientos de este estudio se pudieron observar distintos niveles de estrés, lo que provocó diferentes coberturas máximas a diferentes tasas de crecimiento y distintos niveles de sombreado en el suelo que generaron un microclima dentro de la canopia que disminuye la tasa de evaporación del agua en el suelo, esperando evidenciar una fracción de transpiración diferente entre tratamientos. Por lo tanto, se observó que los procesos fisiológicos de respuesta del maíz al estrés hídrico modifican la EUA, pero no la proporción de agua transpirada la que puede ser fácilmente modificada por manejos agronómicos.

Las deficiencias hídricas en las distintas etapas del cultivo del maíz influyen de manera diferencial en el rendimiento. Así, el entorno de la floración queda definida como la etapa más crítica, seguido de la etapa de llenado de granos y la fase vegetativa (Andrade *et al.*, 2000; Cakir, 2004; Giménez 2012). Bajo esta lógica, el método de riego deficitario controlado optimizado (ORDI) optimiza la distribución del agua disponible para riego a lo largo del ciclo del cultivo en condiciones de escasez de agua usando como entrada rendimiento potencial, Evapotranspiración máxima acumulada de cada etapa de desarrollo del cultivo, valor de coeficiente de sensibilidad al estrés hídrico (K_y) de cada etapa de desarrollo determinando la relación entre evapotranspiración real y evapotranspiración máxima para cada etapa de K_y (Conceição *et al.*, 2015). En el ensayo actual el déficit hídrico se generó durante toda la duración del experimento, con un especial énfasis en las etapas iniciales, pero no se utilizó un modelo que permitiese integrar los procesos fisiológicos del cultivo en el calendario de riego lo que generó rendimientos inferiores a lo esperado.

CONCLUSIÓN

Las técnicas isotópicas nos permitieron cuantificar la cantidad de agua evaporada y transpirada del suelo y con eso estimar la fracción de transpiración, la cual no tuvo diferencias significativas dando a entender la presencia de otros mecanismos fisiológicos del cultivo que le permiten aprovechar de mejor forma el agua bajo condiciones de estrés hídrico.

También se pudo validar el modelo de AquaCrop para simular las cantidades de agua evaporada y transpirada, pero no así el rendimiento de maíz bajo suplementos muy bajos de riego, ya que se obtuvieron valores menores a los observados en todos los tratamientos, aumentando el error mientras menor era el contenido de agua.

De esta forma se concluye que tanto la técnica de balance de masas isotópicas como AquaCrop son métodos recomendables para estimar la evaporación y transpiración de un cultivo. También, al analizarlas en conjunto a los rendimientos y biomasa obtenidos, se puede cuantificar de forma integral la eficiencia del uso y aprovechamiento del agua por un cultivo permitiendo así evaluar distintos manejos y prácticas agronómicas que nos permitan adaptarnos al cambio climático.

Si bien la EUA demostró ser mayor en los cultivos con menor dosis de riego, es importante recalcar que los rendimientos son menores que la media productiva nacional pero la utilización de riego tecnificado, que permite un mojado diario, y la priorización del agua para la etapa crítica del cultivo son fundamentales para lograr obtener una producción.

LITERATURA CITADA

Acevedo, E., Garrido, M., Silva, H., & Silva, P. 2015. Manual de Estudio y Ejercicios Relacionados con el Contenido de Agua en el Suelo y su Uso por los Cultivos. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 86 p.

AGRIMED. 2014. Atlas del cambio climático en las zonas de régimen árido y semiárido. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 136 p.

Allen, R. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Organización de las naciones unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO) Roma, Italia. 326 p.

Andrade, F. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. Field Crops Research. 41:1-12.

Andrade, F., Cirilo, A., Uhart, S., & Otegui, M. 1996a. Ecofisiología del cultivo de maíz. Dekalbpress, INTA/ UNMP. Balcarce, Argentina. 292 p.

Andrade, F., & Ferreiro, M. 1996b. Reproductive growth on maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. Field Crops Research. 48:155-165.

Andrade, F., Aguirrezabal, L., & Rizzalli, R. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. 61-96 p. *In*: Andrade, F. & Sadras, V. (ed.) Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Editorial Médica Panamericana. Buenos Aires, Argentina.

Angella, G., Frías, C., & Salgado, R. 2016. Conceptos Básicos de las Relaciones Agua-Suelo-Planta. INTA Ediciones. Buenos Aires, Argentina. 34 p.

Antúnez, A., Felmer S., & Mora, D. 2009. Nodo tecnológico de riego en el secano. Región de O'Higgins. Fase II. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín N° 190. Litueche, Chile. 122 p.

Aprey, A. 2012. Cambios territoriales y tecnológicos en el riego agrícola en Chile entre los años 1997 y 2007. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Santiago, Chile. 16 p.

Aroca, R., Vernieri, P., Irigoyen J., Sánchez-Día, M., Tognoni F., & Pardossi, A. 2003. Involvement of abscisic acid in leaf and root of maize (*Zea mays* L.) in avoiding chilling-induced water stress. Plant Science 165(3):671-679.

Cakir, R. 2004. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. Field Crops Research 8(1):1-16.

Carvajal, M., Mota, C., Alcaraz-López, C., Iglesias, M., & Martínez-Ballesta, M. 2010. Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Murcia, España. 43 p.

Centro de Información de Recursos Naturales. 1996. Estudio Agrológico, Región Metropolitana. CIREN. Publicación 115. Santiago, Chile. 464 p.

Conceição, B., Carvalhoa, D., Domínguez, A., Tarjuelo, J., & Martínez Romero, A. 2015. Comparación entre la propuesta generadas por el Modelo de Simulación de Riego Optimizado con un riego constante en cultivo de zanahoria en Brasil. 85-90 p. *In: XXXIII Congreso Nacional de Riegos, Valencia, España. 16-18 junio. Universitat Politècnica de València. Valencia, España.*

Cornejo, F. 2019. Balance hídrico en sistemas de rotación maíz y cultivos cubierta en condiciones de clima mediterráneo. Tesis Magister. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 40 p.

Coplen, T. 1994. Reporting of stable hydrogen, carbon, and oxygen isotopic abundances: Pure and Applied Chemistry 66: 273–276.

Deng, X., FU, F., Ni, N., & LI, W. 2009. Differential Gene Expression in Response to Drought Stress in Maize Seedling. *Agricultural Sciences in China* 8: 767-776.

Efeoğlu, B., & Ekmekçi, N. 2009. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery. *South African Journal of Botany* 75: 34-42.

FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia. 322 p.

FAO. 2009. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia. 4 p.

FAO. 2011. The state of the world's land and water resources for food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations & Earthscan. Roma, Italia & Londres, Inglaterra. 308 p.

FAO. 2018. FAO statistical yearbook. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome, Italy. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data> (Consultado en julio de 2020).

Ferretti, D., Pendall, E., Morgan, J., Nelson, J., Lecain, D., & Mosier, A. 2003. Partitioning evapotranspiration fluxes from a Colorado grassland using stable isotopes: Seasonal variations and ecosystem implications of elevated atmospheric CO₂. *Plant and Soil* 254: 291-303.

Giménez, L. 2012. ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay?. 33-43 p. *In: 2° Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas, Paysandú, Uruguay. 6-8 de noviembre. INIA. Montevideo, Uruguay.*

Harwood, K., Gillon, J., Griffiths, H., & Broadmeadow, M. 1998. Diurnal variation of $\delta^{13}\text{C}\text{O}_2$, $\delta\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ and evaporative site enrichment of $\delta\text{H}_2^{18}\text{O}$ in *Piper aduncum* under field conditions in Trinidad. *Plant Cell Environ* 21: 269–283.

- Hogan, P., Parajka, J., Oismüller, M., Heng, L., Strauss, P., & Blöschl, G. 2020. High-Frequency Stable-Isotope Measurements of Evapotranspiration Partitioning in a Maize Field. *Water* 12(11): 3048.
- Hsieh, J., Chadwick, O., Kelly, E., & Savin, S. 1998. Oxygen isotopic composition of soil water: Implications for partitioning evapotranspiration. *Geoderma* 82:269–293.
- INTAGRI. 2018. Plantas C3, C4 y CAM. Serie Nutrición Vegetal, Núm. 125. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p.
- Jacovides, C., & Kontoyiannis, H. 1995. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management* 27:365–371.
- Jamieson, P., Porter, J. & Wilson, D. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research* 27:337–350.
- Jensen, M., & Allen, R. 2016. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements, 2nd edition. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. USA. 744 p.
- Katerji, N., Mastroianni, M., & Rana, G. 2008. Water Use Efficiency of Crops Cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *European Journal of Agronomy* 28:2493-2507.
- Ko, J., & Piccini, G. 2009. Corn yield responses under crop evapotranspiration based irrigation management. *Agricultural Water Management* 96:799–808.
- Li, G., Hu, Q., Wang, X., & Li, B. 2016. Separation of evaporation and transpiration in winter wheat and summer maize cropping system in North China Plain with water isotope mass balance method. IAEA-TECDOC-1813. Beijing, China. 10 p.
- Li, G., Hu, Q., Wang, X., & Li, B. 2015. Isotope mass balance method to partition evaporation and transpiration in cropping field. International Symposium on Managing Soils for Food Security and Climate Change Adaptation and Mitigation. FAO/IAEA. Vienna, Austria. 8 p.
- Loomis, R., Rabbinge, R., & Ng, E. 1979. Explanatory Models in Crop Physiology. *Annual Review of Plant Physiology* 30:339-367.
- Nash, J., & Sutcliffe, J. 1970. River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290.
- Majoube, M. 1971. Fractionnement en oxygen 18 et en deuterium entre l'eau et savapeur, J. Chim. Phys. 10:1423-1436.
- Mateo, M., Ferrio, J., & Araus, J. 2004. Isótopos estables en fisiología vegetal. 113-160 p. *In: Reigosa, M., Pedrol, N., & Sánchez, A. (eds.), La ecofisiología vegetal, una ciencia de síntesis. Paranimfo. Madrid, España.*
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas* 43:63-84.

- Melillán, C. 2015. Evapotranspiración de referencia: para la determinación de las demandas de riego en Chile. Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile. Disponible en <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26480> (consultado en marzo 2021).
- Meza, L. 2014. La agricultura familiar y el cambio climático. 79-101 p. *In* Guzmán, L., Salomón, S. (eds.), *Agricultura Familiar en América Latina y el Caribe: Recomendaciones de Política*. FAO. Santiago, Chile.
- Ministerio de Agricultura. 2013. Plan de adaptación al cambio climático del sector Silvoagropecuario. Gobierno de Chile. Santiago, Chile. 64 p.
- Moriasi, D., Arnold, J., Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50:885-900.
- ODEPA. 2013. Cambio Climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Santiago, Chile. 38 p.
- Otegui, M., Andrade, F., & Suero, E. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research*. 40(2):87-94.
- Payero, J., Melvin, S., Irmak, S., & Tarkalson, D. 2006. Yield response to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agricultural Water Management*. 84:101-112
- Pendall, E. 1997. Precipitation Seasonality Recorded in D/H Ratios of Pinyon Pine Cellulose in the Southwestern United States. The University of Arizona, Tucson. 264 p.
- Rahaman, I., Hossain, M., Motofakkerazad, R., & Seyed, L. 2012. Water stress in plants; causes, effects and responses. 1-13 p. *In*: Rahman, I., & Hasegawa, H. (ed). *Water stress*. Intech. Rijeka, Croacia.
- Saavedra, G. 2014. El Cultivo de Maíz Choclero y Dulce. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín N° 303. 146 p.
- Sadras, V., Ferreiro, M., Gutheim, F., & Kantolic, A. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. 29-60 p. *In*: Andrade, F., & Sadras, V. (ed). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Editorial Médica Panamericana. Buenos Aires, Argentina.
- Santibañez, F. 2016. El cambio climático y los recursos hídricos de Chile. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. 60 p.
- Smith, D., Cappa, C., Wilson, K., Cohen, R., Geissler, P., Saykally, R. 2005. Descripción unificada de reordenamientos de enlaces de hidrógeno dependientes de la temperatura en agua líquida. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 102 (40): 14171–14174.
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T., & Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water. *Agronomy Journal* 101(3):426-337.

- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T., & Fereres, E. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Food and Agriculture Organization of the United Nations & Earthscan. Roma, Italia & Londres, Inglaterra. 530 p.
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T., & Fereres, E. 2018. Reference Manual, Annexes- AquaCrop, Version 6.0 – 6.1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia. 85 p.
- Sharp, Z. 2007. Principles of Stable Isotope Geochemistry. Pearson Prentice Hall. Denver, USA. 360 p.
- Tarin, T., Yépez, E., Garatuza-Payan, J., Watts, C., Rodriguez, J., Vivoni, E., & Méndez-Barroso, L. 2014. Partición de la evapotranspiración usando isótopos estables en estudios ecohidrológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua* 5(3):97-114.
- Vallabhaneni, R., & Wurtzel, E. 2010. From epoxy-carotenoids to ABA: the role of ABA 8'-hydroxylases in drought-stressed maize roots. *Archives of biochemistry and biophysics* 504(1):112-117.
- Vergara, A. 2011. Manual de recomendaciones cultivo de maíz grano. Cropcheck. Santiago, Chile. 43 p.
- Yakir, D. & Sternberg, L. 2000. The Use of Stable Isotopes to Study Ecosystem Gas Exchange. *Oecologia* 123:297-311.

ANEXOS

Anexo 1. Información complementaria sitio experimental

(Fuente: División de Investigación y Aplicaciones Nucleares. 2014)

Caracterización fisicoquímica del suelo del sitio experimental 2016-2018.

Año de estudio	Profundidad	Densidad aparente	Carbono orgánico	Nitrógeno total	C/N	pH
	cm	Mg m ⁻³	----- %	-----	-	-
2016-2017	0-10	1,55 ± 0,11	1,37±0,06	0,16±0,03	8,6	7,2
	10-20	1,68 ± 0,24	0,80±0,02	0,12±0,30	6,7	7,3
	20-40	1,60±0,24	0,66±0,03	0,10±0,02	6,6	7,5
2017-2018	0-10	1,06±0,1	1,93±0,17	0,11±0,006	17,5	7,5
	10-20	1,30±0,06	1,34±0,11	0,07±0,012	19,1	7,7
	20-40	1,48±0,03	1,06±0,13	0,06±0,002	17,7	7,8

Caracterización fisicoquímica del suelo del sitio experimental 2013-2014.

Profundidad (cm)	Textura	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Carbono orgánico (%)	Materia orgánica (%)	Nitrógeno total (%)
0-35	Franco	23,6	45,5	30,9	0,74	1,27	0,101
10-35	Franco	26,1	43,5	30,5	0,67	1,15	0,099
35-46	Franco arcilloso	28,0	41,2	30,7	0,97	1,66	0,121
46-56	Franco	21,5	44,9	33,6	0,55	0,15	0,089

Sólo se tiene la densidad aparente inicial obtenida de una muestra de profundidad de 0-10 cm (1,15 g cm⁻³) y de 10-20 cm (1,06 g cm⁻³).

APENDICES

Apéndice 1. Análisis de la varianza para rendimiento y biomasa.

Análisis de la varianza

Biomasa ton/ha

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Biomasa ton/ha	32	0,15	0,10	21,67

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	30,66	2	15,33	2,64	0,0888
Tratamiento	30,66	2	15,33	2,64	0,0888
Error	168,67	29	5,82		
Total	199,33	31			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=2,14372

Error: 5,8163 gl: 29

Tratamiento	Medias	n	E.E.
2	10,21	10	0,76 A
1	10,54	10	0,76 A B
3	12,38	12	0,70 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Rendimiento

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rendimiento	32	0,21	0,15	21,75

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	18,66	2	9,33	3,76	0,0354
Tratamiento	18,66	2	9,33	3,76	0,0354
Error	72,05	29	2,48		
Total	90,72	31			

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1,40111

Error: 2,4846 gl: 29

Tratamiento	Medias	n	E.E.
2	6,44	10	0,50 A
1	6,91	10	0,50 A B
3	8,20	12	0,46 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

