



# **UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE POSTGRADO**

## **BALANCE HÍDRICO EN SISTEMAS DE ROTACIÓN MAÍZ Y CULTIVOS CUBIERTA EN CONDICIONES DE CLIMA MEDITERRÁNEO**

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

**FELIPE ANÍBAL CORNEJO GUTIÉRREZ**

Directores de Tesis

OSVALDO SALAZAR GUERRERO  
MIGUEL QUEMADA SÁENZ-BADILLOS

Profesores consejeros:

Cristián Kremer F.  
Marco Pfeiffer J.

SANTIAGO - CHILE  
2019

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

**BALANCE HÍDRICO EN SISTEMAS DE ROTACIÓN MAÍZ Y CULTIVOS  
CUBIERTA EN CONDICIONES DE CLIMA MEDITERRÁNEO**

**WATER BALANCE IN MAIZE COVER CROP ROTATIONS UNDER  
MEDITERRANEAN CLIMATE CONDITIONS**

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.

**FELIPE ANÍBAL CORNEJO GUTIÉRREZ**

|  | Calificaciones<br>(Memoria de Título) | Calificaciones<br>(Tesis de Grado) |
|--|---------------------------------------|------------------------------------|
| <b>DIRECTOR DE TESIS</b>                                   |                                       |                                    |
| Osvaldo Salazar Guerrero<br>Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.  | 7,0                                   | 7,0                                |
| Miguel Quemada Saénz-Badillos<br>Ingeniero Agrónomo, Ph.D. | 6,5                                   | 6,5                                |
| <b>PROFESORES CONSEJEROS</b>                               |                                       |                                    |
| Cristián Kremer Fariña<br>Ingeniero Agrónomo, Ph.D.        | 6,6                                   | 6,6                                |
| Marco Pfeiffer Jakob<br>Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.      | 6,9                                   | 6,9                                |

Santiago, Chile  
2019

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres Luis Felipe Cornejo y Myriam Gutiérrez por su apoyo incondicional, no sólo en esta etapa de mi vida, sino que, en todo momento, por la paciencia que han tenido y por creer en mí. A mi hermana Maricela Cornejo, cuñado Felipe Riveros y primo Andrés Castro quiero agradecerles su cariño, por estar siempre dispuestos a ayudarme y de tenderme la mano en momentos difíciles.

A mis directores de tesis, profesores Osvaldo Salazar y Miguel Quemada por su apoyo total y disposición para guiarme en todo momento a lo largo del proceso formativo y en el presente trabajo.

A mis compañeros y amigos, Elizabeth Ramírez, Samuel Estay, Catherine Vargas y Eduardo Vega, por ser parte de este largo camino que recorrimos juntos. Gracias por todos los momentos que compartimos. De igual forma agradezco a los profesores Oscar Seguel y Cristián Kremer por su apoyo y enseñanzas desde los cursos de pregrado, que influyeron en la decisión de continuar en el magíster.

Agradezco por su apoyo financiero durante el desarrollo de mi magíster a CONICYT PFCHA/ BECA DE MAGÍSTER NACIONAL/2018 - 22181437. Y al Proyecto Fondecyt Regular 2015 N° 1150572 titulado: “Effect of inorganic nitrogen fertilization and cover crops on maize production in dissolved inorganic and organic nitrogen leaching in a coarse-textured soil”.

Finalmente agradezco a todas las personas de mi familia y de la universidad que han estado involucrados de una u otra manera en que pueda lograr los sueños y objetivos que me he propuesto. Mi más sincera gratitud hacia ustedes.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN.....  | 1  |
| ABSTRACT.....   | 2  |
| INTRODUCCIÓN.....   | 3  |
| HIPÓTESIS.....  | 7  |
| OBJETIVOS .....   | 7  |
| Objetivo general.....   | 7  |
| Objetivos específicos .....   | 7  |
| MATERIALES Y MÉTODOS .....  | 8  |
| Ubicación del estudio.....  | 8  |
| Tratamientos .....  | 8  |
| Variables a medir .....   | 9  |
| Balance hídrico .....   | 9  |
| Evapotranspiración de cultivo .....   | 10 |
| Riego .....   | 10 |
| Contenido de agua del suelo.....  | 10 |
| Calibración del modelo AquaCrop .....   | 11 |
| Percolación de agua medida con lisímetros .....   | 13 |
| Conductividad hidráulica .....  | 14 |
| Análisis estadístico.....   | 15 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....   | 16 |
| Estacionalidad de la percolación profunda en los sistemas de rotación de cultivos.....  | 16 |
| Evapotranspiración en diferentes sistemas de rotación de cultivos.....  | 20 |
| Percolación profunda medida con lisímetros .....  | 23 |
| Modelo AquaCrop para simular el contenido de agua del suelo.....  | 26 |
| CONCLUSIONES.....   | 30 |
| LITERATURA CITADA .....   | 31 |
| ANEXOS .....  | 38 |
| <b>Anexo 1.</b> Descripción morfológica del sitio de estudio.....   | 38 |
| <b>Anexo 2.</b> Caracterización de propiedades físicas del sitio de estudio (Rossi, 2017). .....  | 38 |
| <b>Anexo 3.</b> Caracterización de propiedades químicas del sitio de estudio (Rossi, 2017). ....  | 39 |
| <b>Anexo 4.</b> Caracterización de propiedades químicas del sitio de estudio, continuación. ....  | 39 |
| <b>Anexo 5.</b> Suministro parcializado y total de los fertilizantes utilizados en el ensayo (N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> y K <sub>2</sub> O) según tratamientos y ensayo..... | 39 |
| <b>Anexo 6.</b> Conductividad hidráulica de las parcelas medidas con cilindro infiltrómetro. ....   | 40 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|   |    |
|---|----|
| <b>Cuadro 1.</b> Tratamientos y ensayos utilizados en el estudio.....   | 9  |
| <b>Cuadro 2.</b> Información requerida para el proceso de ajuste del modelo AquaCrop.....   | 12 |
| <b>Cuadro 3.</b> Evapotranspiración de cultivo (ETc) y Rendimiento observado (OBS) y simulado (SIM) del cultivo de <i>Z. mays</i> L. obtenido en la temporada primavera-verano 2018 por tratamiento. .... | 23 |
| <b>Cuadro 4.</b> Cantidad de agua percolada observada (OBS) y simulada (SIM) por temporada y la eficiencia de modelamiento (E) para cada tratamiento.....   | 24 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Balance hídrico de un cultivo de <i>Z. mays</i> L. (adaptado de Sahoo y Panda, 2014).  | 3  |
| <b>Figura 2.</b> Esquematación del lisímetro instalado en el ensayo de campo.....   | 14 |
| <b>Figura 3.</b> Infiltrómetro (DualHead Infiltrometer, Decagon).....   | 15 |
| <b>Figura 4.</b> Registro de precipitaciones para el periodo de duración del ensayo desde mayo de 2017 a octubre de 2018.....   | 16 |
| <b>Figura 5.</b> Efecto de los cultivos cubierta continuos en la percolación profunda del suelo (ver Cuadro 1 para la explicación de los códigos de tratamiento) durante diferentes períodos. Las diferentes letras dentro de los períodos indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en ese período ( $p < 0,05$ ). .....                          | 17 |
| <b>Figura 6.</b> Efecto de las rotaciones de maíz – cultivos cubierta y las tasas de fertilización en la percolación profunda del suelo (ver Cuadro 1 para una explicación de los códigos de tratamiento). Las diferentes letras en las barras dentro de un período indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en ese período ( $p < 0,05$ ). ..... | 18 |
| <b>Figura 7.</b> Efecto de los cultivos cubierta continuo (ballica vs trébol) en la evapotranspiración (ETc) de las parcelas durante un período de mayo de 2017 a septiembre de 2018. Valores estimados según metodología propuesta por Allen et al. (2016), corregido con valores de Kc de FAO-56 (Allen, 2006).....   | 21 |
| <b>Figura 8.</b> Efecto de las rotaciones de maíz – cultivos cubierta (ballica vs trébol) en la evapotranspiración (ETc) de las parcelas durante un período de mayo de 2017 a septiembre de 2018. Valores estimados según metodología propuesta por Allen et al. (2016), corregido con valores de Kc de FAO-56 (Allen, 2006).....   | 22 |
| <b>Figura 9.</b> Comparación de la cantidad de agua percolada según lo observado por el lisímetro y calculado para todos los tratamientos.....  | 25 |
| <b>Figura 10.</b> Resultados de contenido de agua a la profundidad de 50 cm medidos por el sensor, simulados por el modelo AquaCrop y medidos con barreno para el tratamiento Zm <sub>250</sub> -F. ..  | 27 |
| <b>Figura 11.</b> Resultados de contenido de agua a la profundidad de 50 cm medidos por el sensor, simulados por el modelo AquaCrop y medidos con barreno para el tratamiento Zm <sub>250</sub> -Lm.  | 27 |
| <b>Figura 12.</b> Resultados de contenido de agua a la profundidad de 50 cm medidos por el sensor, simulados por el modelo AquaCrop y medidos con barreno para el tratamiento Zm <sub>400</sub> -Lm.  | 28 |
| <b>Figura 13.</b> Resultados de contenido de agua a la profundidad de 50 cm medidos por el sensor, simulados por el modelo AquaCrop y medidos con barreno para el tratamiento Zm <sub>400</sub> -Tr. ..   | 28 |
| <b>Figura 14.</b> Resultados de contenido de agua a la profundidad de 50 cm medidos por el sensor, simulados por el modelo AquaCrop y medidos con barreno para el tratamiento Zm <sub>400</sub> -Tr. ..   | 29 |

## RESUMEN

Las prácticas modernas de conservación en la agricultura apuntan a mantener una cobertura permanente del suelo durante todo el año utilizando cultivos cubierta (CC) invernales que modifican el sistema, especialmente los componentes del balance hídrico como la percolación profunda. En este estudio se utilizó un diseño experimental de parcelas de campo, donde se evaluaron en total 13 tratamientos con 4 repeticiones agrupados en dos ensayos que consideraron distintas dosis de N y rotaciones de cultivos. El ensayo 1 representa sistemas con CC permanente; mientras que el ensayo 2 corresponde a la incorporación un CC en una rotación con el cultivo de maíz. Los cultivos corresponden a: maíz grano (*Zea mays* L.) (variedad tardía 33Y74 – Pioneer), ballica anual (*Lolium multiflorum* Lam) ('Winter Star II' – ANASAC) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.) ('Kopu II' – ANASAC). El objetivo principal fue evaluar el balance de agua en sistemas de rotación de *Z. mays* L. CC y su impacto en la percolación durante la temporada 2017-2018, a partir de la ecuación de balance hídrico, agua recolectada por lísimetros y el modelo AquaCrop. Establecer un CC durante la época invernal en zonas de clima mediterráneo disminuyó la percolación profunda. En el ensayo 1 la mayor reducción en percolación se presentó en los tratamientos con *L. multiflorum* (Lm<sub>0</sub> y Lm<sub>150</sub>) con montos de 82 mm y 96 mm en el 2017, pero sin efectos significativos en 2018. En las parcelas de *T. repens* (Tr<sub>0</sub> y Tr<sub>150</sub>) la percolación fue levemente superior a 200 mm en 2017 e inferior a 80 mm 2018. En ambos casos fue menor que en barbecho (F). Para el ensayo 2, en los tratamientos con CC que incluyen *L. multiflorum* la percolación fue cercana a los 100 mm en 2017 y varió entre 23 y 39 mm el 2018. Estos montos son menores comparados con *T. repens* como antecesor del *Z. mays*, que percolaron en promedio 220 mm el año 2017 y 105 2018, respectivamente. En el caso de los tratamientos Z maíz- barbecho, superaron los 300 mm el año 2017 y alcanzaron aproximadamente 150 mm el año 2018. Durante primavera-verano, no se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos con montos que superaron los 1.300 mm. La mayor evapotranspiración correspondió a los tratamientos con rotaciones *Z. mays*- *L. multiflorum* seguido por *T. repens*. En el rendimiento promedio para *Z. mays* no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

**Palabras Claves:** AquaCrop, evapotranspiración, percolación.

## ABSTRACT

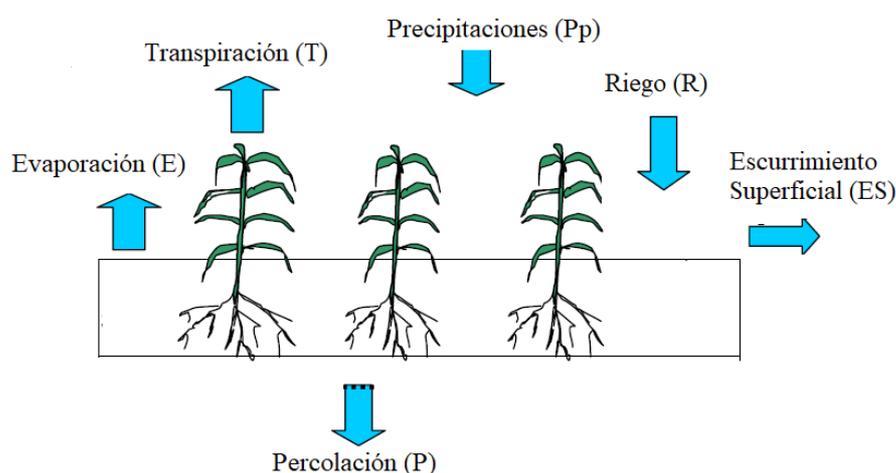
Modern conservation practices in agriculture aim to maintain permanent soil coverage throughout the year using winter cover crops (CC) that modify the system, especially water balance components such as deep percolation. In our study an experimental design of field plots was used, where a total of 13 treatments were evaluated with 4 replications per treatment grouped in two trials that considered different doses of N and crop rotations. Trial 1 represented a system with permanent CC; whereas trial 2 corresponded to the incorporation of a CC in a rotation with the maize crop. The crops corresponded to: maize (*Zea mays* L., late variety 33Y74 - Pioneer), annual grass (*Lolium multiflorum* L., 'Winter Star II' - ANASAC) and white clover (*Trifolium repens* L., 'Kopu II' - ANASAC). Main objective was to evaluate water balance in a rotation systems of *Z. mays* - CC and its impact on percolation during 2017-2018 season, using water balance equation, water collected by lysimeters and the AquaCrop model. Establishing a CC during winter season in areas of Mediterranean climate decreased deep percolation. For trial 1, greatest reduction in percolation occurred in treatments with *L. multiflorum* (Lm<sub>0</sub> and Lm<sub>150</sub>) with amounts of 82 mm and 96 mm in 2017 and values close to zero in 2018. In plots of *T. repens* (Tr0 and Tr150) percolation was over 200 mm in 2017 and less than 80 mm at 2018. In both cases, it was lower than in fallow (F). For trial 2, in CC treatments that include *L. multiflorum* percolation was close to 100 mm in 2017 and varied between 23 and 39 mm in 2018. These amounts are smaller compared to *T. repens* as predecessor of the *Z. mays*, which percolated on average 220 mm in 2017 and 105 2018, respectively. In the case of *Zea mays*-fallow treatments, they exceeded 300 mm in 2017 and reached approximately 150 mm in 2018. During spring-summer there were no statistically significant differences between treatments with amounts that exceeded 1300 mm. There was less deep-water percolation in the water balance of a maize-CC system. Highest evapotranspiration corresponded to treatments with *L. multiflorum* followed by *T. repens*. Regarding average yield for *Z. mays*, there were found no statistically significant differences among the treatments.

**Keywords:** AquaCrop, evapotranspiration, percolation.

## INTRODUCCIÓN

Frente a la creciente escasez de agua, el deterioro de la calidad de los recursos hídricos y las incertidumbres del cambio climático, mejorar la eficiencia y productividad del uso del agua en los sistemas agrícolas es de suma importancia para responder a la progresiva demanda de alimentos de la población mundial. Para lograr este objetivo, la agricultura de secano y regadío debe adoptar soluciones de gestión que se basen en el conocimiento de los ciclos y procesos en el sistema suelo-agua-planta (FAO, 2012).

El equilibrio de los flujos de agua que entran y salen del sistema suelo-planta se denomina balance hídrico (Figura 1) y puede ser expresado en términos de altura o volumen de agua evaporada de la superficie por unidad de tiempo (Jensen y Allen, 2016). Los flujos de entrada corresponden a las precipitaciones, aguas superficiales aplicadas (riego) y flujos laterales subterráneos. Los flujos de salida incluyen la evapotranspiración de los cultivos (ETc), el escurrimiento superficial, flujos laterales en la zona vadosa y la percolación (Kane y Yang, 2004). La percolación se define como el flujo de agua a través de un suelo, que se pierde por debajo de la zona de enraizamiento, llegando a las napas subterráneas (Chapin et al., 2011). Según Jensen y Allen (2016) la densidad de flujo de percolación profunda se estima en función de la capacidad de campo del suelo, que es también conocido como el límite superior drenado.



**Figura 1.** Balance hídrico de un cultivo de *Z. mays* L. (adaptado de Sahoo y Panda, 2014).

Dado que el agua es el principal factor que limita la producción agrícola, se hace significativo el estudio y el conocimiento sobre el balance hídrico asociado al manejo y realidad geográfica de los distintos cultivos, como una herramienta más para ayudar a procesos de adaptación al cambio climático. En este sentido, este trabajo se enmarca en las zonas de clima Mediterráneo que se caracterizan por inviernos templados y lluviosos, veranos secos y calurosos, variables, tanto en temperaturas como en precipitaciones, sumado a una alta radiación solar y elevada tasa de evapotranspiración (Zalidis et al., 2002). En general, las precipitaciones en este tipo de clima no son muy abundantes aunque existen zonas en las que superan los 1.000 mm (Gómez-Zotano et al., 2015). Sin embargo, uno de los aspectos más relevantes es que las precipitaciones se concentran solo en el invierno, generando déficit hídrico en la época estival, lo que implica la práctica del riego para satisfacer las necesidades hídricas de la mayor parte de los cultivos comerciales en dicha zona (Cavero et al., 2008).

Debido a los recursos hídricos limitados en estas regiones, la determinación precisa de las necesidades de agua del cultivo es hoy en día una condición necesaria para mantener una agricultura de regadío eficiente (Ward et al., 2012). Sin embargo, aunque la agricultura de regadío contribuye a la productividad y diversificación de los cultivos, tiene un considerable potencial de contaminación de las aguas subterráneas cuando riegos excesivos están asociados a sobrefertilización con nitrógeno (N) (Nájera et al., 2015). En relación a esto, Gabriel et al. (2012) mencionan que la producción de maíz (*Zea mays* L.) ha sido reconocida durante mucho tiempo como un importante contribuyente a la contaminación de las aguas subterráneas por nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), de esta manera controles adecuados de aplicación de N y agua son técnicas básicas para controlar pérdidas de  $\text{NO}_3^-$  por percolación (Gehl et al., 2005).

Por otro lado, del área cultivada en Chile, los cereales comprenden aproximadamente 514 mil ha (temporada 2017/18), de las cuales el 17% corresponde al *Z. mays*. Este cultivo, se siembra principalmente en las regiones de O'Higgins y El Maule, donde se encuentra el 64% de la superficie (ODEPA, 2017). Se cultiva principalmente en suelos planos ubicados en terrazas aluviales (Casanova et al., 2013), bajo riego convencional durante primavera-verano (septiembre-abril). Estos sistemas de producción normalmente usan altas tasas de fertilización de N ( $350\text{-}560 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), junto con una baja eficiencia de riego ( $<45\%$ ) (Salazar et al., 2014). En promedio,  $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$  no son absorbidos por las plantas y son susceptibles de lixiviación (Salazar y Nájera, 2011). Particularmente importantes son los suelos de textura gruesa cultivados con *Z. mays* que son más propensos a la lixiviación de N debido a la alta percolación y la baja capacidad de retención de agua (Casanova et al., 2013). Del mismo modo, en otras áreas Mediterráneas del mundo, los campos de regadío con altas dosis de N se han destacado como de alto riesgo de crear áreas de contaminación difusa de N (Isidoro et al., 2006; Berenguer et al., 2009; Salmerón et al., 2010; Salmerón et al. 2011). Por lo que es necesario desarrollar técnicas que permitan que estos sistemas sean sustentables en el tiempo para los agricultores y el medio ambiente.

Las prácticas modernas de conservación del suelo en la agricultura apuntan a mantener una cobertura permanente durante todo el año, sembrando cultivos intermedios, que generalmente no son de interés económico, en el momento en que no hay cultivos comerciales (Gabriel y Quemada, 2011). Los cultivos cubierta (CC) tienen beneficios tales como: los residuos de los CC aumentan el contenido de materia orgánica del suelo (MOS) generando un aumento en la infiltración y retención de agua en el suelo, y disminuyendo la evaporación. Mientras que cuando los CC son parcialmente incorporados al suelo cumplen varias funciones como: retener el agua superficial e incorporar MOS lo que genera un aumento en la infiltración a la zona de la raíz; permitir el control de malezas y plagas; reducir la erosión del suelo, mantener un mayor contenido de agua y mejorar la disponibilidad de nutrientes (Lu et al., 2000), ofreciendo múltiples beneficios para el suelo, la producción agrícola y el ambiente (Blanco-Canqui et al., 2015). Sin embargo, dentro de las posibles desventajas de la inclusión de CC se menciona que en las regiones Mediterráneas y semiáridas se puede generar una competencia con los cultivos estivales por los nutrientes en el suelo, donde además hay evidencias de una disminución en la eficiencia del uso del agua (Salmerón et al., 2010).

Ward et al. (2012) indican que existe una escasa investigación sobre impacto de los CC en los componentes del balance hídrico en sistemas de producción de grano en regiones con clima mediterráneo, particularmente el efecto sobre la percolación de agua hacia las napas subterráneas. Dabney et al. (1998) mencionan que los CC generalmente aumentan la tasa y la cantidad de infiltración por lluvia o riego tanto para sistemas convencionales como sin labranza, aunque el impacto de diferentes CC puede variar con el sistema de labranza, el tipo

de suelo y el clima. Con un sistema de riego por surcos, se requiere en algunos casos aumentar las tasas de aplicación de agua para lograr una eficiencia óptima (Gulick et al., 1994).

En los ecosistemas donde se cultiva *Z. mays* durante la primavera-verano hay una gran variación estacional en la ETc (Anderson et al., 2012), siendo muy influyente en el balance hídrico, ya que esta es una de las mayores pérdidas de agua del sistema. Dabney et al. (1998) observaron que los cultivos de cobertura pueden influir en la precipitación almacenada; la evaporación al alterar la radiación neta, la velocidad del viento, el déficit de presión de vapor y la temperatura de la superficie, alteran la escorrentía al aumentar la rugosidad hidráulica y la tasa de infiltración. Sin embargo, Blanco-Canqui et al. (2015) mencionan que existe documentación limitada en la literatura sobre los efectos de los CC en las propiedades físicas e hidráulicas del suelo.

De acuerdo con Unger y Vigil (1998), la principal limitación de los CC en regiones semiáridas es la disponibilidad de agua en el momento de la siembra para garantizar el establecimiento. Incluso si hay agua residual disponible en el perfil del suelo, si las capas superiores están secas, el crecimiento de los CC es escaso, ya que las raíces no alcanzan la humedad residual de las capas más profundas. En este sentido, en regiones húmedas o semiáridas, los CC crecientes pueden reducir el agua disponible para el cultivo comercial y su rendimiento (Nielsen y Vigil, 2005; Nielsen et al., 2015). La eliminación temprana del CC es una alternativa que puede mejorar el manejo del agua del suelo donde los riesgos de lixiviación son mínimos (Unger y Vigil, 1998).

A pesar de lo mencionado anteriormente existen interrogantes sobre los impactos que el CC puede tener en el balance hídrico de los sistemas agrícolas (Ward et al, 2012), donde se destacan las siguientes brechas de conocimiento: i) se cree que los CC competirán por el agua y los nutrientes con el cultivo comercial y disminuirán el rendimiento del *Z. mays*, aunque se cultivan en diferentes estaciones; ii) el manejo especial de CC, como necesidad de riego, porque los agricultores utilizan el barbecho para acumular agua; iii) los beneficios que CC puede tener para el suelo y el *Z. mays*; y iv) cómo cambia la evapotranspiración del cultivo anual (dependiendo de la especie utilizada) y los impactos en la percolación de agua durante el invierno de acuerdo con los tipos de cultivos que se usan.

El suelo es un sistema heterogéneo y poroso, compuesto por partículas muy pequeñas e independientes, cuyo arreglo determina el volumen del espacio poroso, en el cual se transmite o se retienen el agua y el aire (Hillel, 2013). Las propiedades físicas y químicas de los suelos son muy importantes para el crecimiento de los cultivos. En particular, este crecimiento se ve afectado por la estructura del suelo (Fuentes et al., 2014), la cual define su capacidad de retención de agua dependiendo de la distribución y tamaño de las partículas, porosidad y densidad aparente ( $D_a$ ). Ward et al. (2012) señalan que la incorporación de rastrojos asociado con los CC es eficaz en aumentar la retención del agua en el suelo, como resultado de una mejora tanto en la estructura como un aumento en la conductividad hidráulica saturada del suelo ( $K_s$ ) (Hubbard et al., 2013). La  $K_s$  (longitud/tiempo) es una medida de la capacidad de un suelo para conducir el agua bajo un gradiente de potencial hidráulico que determina la tasa de infiltración, las prácticas de riego y drenaje y otros procesos hidrológicos que dependen del movimiento de agua en el suelo (Hillel, 2012), esta propiedad podría ser modificada por la incorporación de CC invernal en comparación con el barbecho.

Una forma de evaluar el balance hídrico de los cultivos y sus potenciales rendimientos es a través del uso de modelos que permitan predecir y simular escenarios. AquaCrop es un modelo desarrollado por FAO que simula el crecimiento y desarrollo de cultivos herbáceos como una

función del consumo de agua bajo condiciones de secano o riego, suplementario o total (Steduto et al., 2009). Este modelo integra el efecto de las variables edáficas y climáticas, junto con las variables de manejo, para simular la producción de los cultivos en respuesta al agua en el sistema suelo-planta. Para cada uno de ellos deben especificarse los parámetros: fecha de siembra, cobertura inicial del dosel (CCo), cobertura máxima del dosel (CCx), días a dosel máximo (Max CC), duración ciclo, índice de cosecha, riegos, fertilización (prácticas de manejo): el nivel de fertilidad del suelo se asocia a la relación entre los rendimientos observados y los rendimientos óptimos. Una vez se han determinado los diferentes parámetros de los módulos puede obtenerse la producción de biomasa seca y el rendimiento cosechable en peso seco. El modelo no permite realizar simulaciones de cultivos de cobertura dado que estos no están incorporados en los códigos.

AquaCrop simula valores diarios y requiere relativamente de pocos datos y normalmente disponibles o posibles de ser estimados a partir de la literatura existente (Heng et al., 2009; Todorovic et al., 2009); donde algoritmos y procedimientos de cálculo modelan la infiltración del agua, percolación, desarrollo del follaje y de la zona de raíces, la evaporación y la tasa de transpiración, dando como resultados un balance hídrico del suelo, la producción de biomasa y el rendimiento.

## **HIPÓTESIS**

En el balance hídrico de un sistema de rotación de *Z. mays* – cultivos cubierta existe una menor percolación profunda de agua que en un sistema *Z. mays* – barbecho, mientras que un cultivo cubierta genera un menor contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del *Z. mays*.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar el impacto de un sistema de rotación de *Z. mays* – cultivos cubierta en la percolación de agua, en distintas estaciones del año para una zona con clima mediterráneo.

### **Objetivos específicos**

1. Evaluar la estacionalidad de la percolación en diferentes sistemas de rotación de cultivos.
2. Analizar la evapotranspiración estimada en diferentes sistemas de rotación de cultivos y evaluar su efecto en la percolación profunda.
3. Calibrar el modelo AquaCrop para simular el balance hídrico en sistemas de rotación *Z. mays* – cultivos cubierta, durante el periodo de cultivo de *Z. mays*

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del estudio

El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental Antumapu perteneciente a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicada en la Comuna La Pintana, Provincia de Santiago, Región Metropolitana (33° 34 'S - 70° 37' O). El ensayo se estableció el año 2015 en un suelo de origen aluvial, perteneciente a la Serie de suelos Santiago, miembro de la Familia franca gruesa sobre arenosa esquelética, mixta, térmica de los Entic Haploxerolls (CIREN, 1996). Las parcelas se ubican en un sitio experimental de aproximadamente 570 m<sup>2</sup>, que cuenta con un sistema de riego automatizado.

Se realizó una caracterización morfológica del perfil del suelo durante 2016 (Anexo 1). De esta forma, se tomaron muestras de los horizontes genéticos definidos para realizar el análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo. El primero incluyó la determinación de la textura utilizando el método del hidrómetro Bouyoucos, la densidad real con picnómetro, la densidad aparente mediante método del cilindro y la retención de agua con dispositivos de presión y cama de arena, siguiendo la metodología propuesta por Sandoval et al. (2012) (Anexo 2).

El sitio tiene un clima descrito como Mediterráneo semiárido, con veranos calurosos e inviernos relativamente fríos, una temperatura media anual del aire de 14°C y una precipitación media anual de 278 mm, la mayor parte ocurre entre mayo y agosto (Santibáñez y Uribe, 1990).

### Tratamientos

En este experimento se trabajó a escala de microparcels, donde el sitio experimental se dividió en 52 de ellas, con medidas individuales de 2,5 m de ancho y 4,0 m de largo, organizadas en 4 bloques de 13 parcelas cada uno.

Se evaluaron diferentes tratamientos, agrupados en dos ensayos, presentados en el Cuadro 1. El Ensayo 1 representa sistemas con CC permanente durante todo el año; mientras que el Ensayo 2 corresponde a la rotación entre CC establecidos durante la época de otoño-invierno y maíz durante primavera-verano.

Las especies utilizadas en los dos ensayos corresponden a: maíz grano (*Zea mays* L.) (variedad tardía 33Y74 – Pioneer), ballica anual (*Lolium multiflorum* Lam) ('Winter Star II' – ANASAC) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.) ('Kopu II' – ANASAC) inoculado comercialmente con rizobios.

**Cuadro 1.** Tratamientos y ensayos utilizados en el estudio.

| Ensayo | Tratamiento              | Rotación anual de cultivos                                 | Dosis N<br>kg N ha <sup>-1</sup> |
|--------|--------------------------|--|----------------------------------|
| 1      | F                        | Barbecho–barbecho  | 0                                |
|        | Lm <sub>0</sub>          | <i>L. multiflorum</i> - <i>L. multiflorum</i>              | 0                                |
|        | Lm <sub>150</sub>        | <i>L. multiflorum</i> - <i>L. multiflorum</i>              | 150                              |
|        | Tr <sub>0</sub>          | <i>T. repens</i> - <i>T. repens</i>                        | 0                                |
|        | Tr <sub>150</sub>        | <i>T. repens</i> - <i>T. repens</i>                        | 150                              |
| 2      | Zm <sub>250</sub> -F     | <i>Zea mays</i> –barbecho                                  | 250                              |
|        | Zm <sub>400</sub> -F     | <i>Zea mays</i> –barbecho                                  | 400                              |
|        | Zm <sub>250</sub> -Lm    | <i>Zea mays</i> - <i>L. multiflorum</i>                    | 250                              |
|        | Zm <sub>400</sub> -Lm    | <i>Zea mays</i> - <i>L. multiflorum</i>                    | 400                              |
|        | Zm <sub>250</sub> -Tr    | <i>Zea mays</i> - <i>T. repens</i>                         | 250                              |
|        | Zm <sub>400</sub> -Tr    | <i>Zea mays</i> - <i>T. repens</i>                         | 400                              |
|        | Zm <sub>250</sub> -Lm+Tr | <i>Zea mays</i> - <i>T. repens</i> + <i>L. multiflorum</i> | 250                              |
|        | Zm <sub>400</sub> -Lm+Tr | <i>Zea mays</i> - <i>T. repens</i> + <i>L. multiflorum</i> | 400                              |

Las dosis de siembra a utilizar para el caso de *Z. mays* grano correspondió a 9 semillas por metro lineal, cuyo espacio entre hilera es de 65 cm. En el caso de *L. multiflorum*, se aplicaron 35 kg ha<sup>-1</sup>, es decir, 120 g de semillas por parcela; para el *T. repens* blanco la dosis fue 5 kg ha<sup>-1</sup> (20 g de semillas por parcela), calculadas en base a lo recomendado por el fabricante. En los tratamientos Zm– Zm<sub>250</sub>-Lm+Tr y Zm<sub>400</sub>-Lm+Tr, que se conforman por la mezcla de las praderas, las semillas se mezclaron en una proporción de 70% *T. repens* y 30% *L. multiflorum* en base a la dosis recomendada.

La fertilización estuvo compuesta por cuatro dosis de N, dependiendo del ensayo, siendo estas: 0 y 150 kg de N ha<sup>-1</sup> para el Ensayo 1 y, 250 y 400 kg de N ha<sup>-1</sup> para el Ensayo 2. La fuente nitrogenada utilizada fue salitre potásico (13,5% N y 45% K<sub>2</sub>O), de manera que la dosis de K se niveló aplicando KCl (60% K<sub>2</sub>O) a los tratamientos que no recibieron salitre potásico. En cuanto al fósforo (P) se aplicó súper fosfato triple (46% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), de acuerdo con una dosis calculada según la capacidad tampón del suelo para aumentar el P disponible y a los resultados de disponibilidad de P-Olsen. Las aplicaciones de N y K se parcializaron en dos fechas, a la siembra y al estadio de octava hoja (V8) del *Z. mays*. El detalle de la parcialización se presenta en el Anexo 5.

### Variabes a medir

#### Balance hídrico

El método de cálculo consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo. Las entradas de agua a la zona radicular son las precipitaciones, aporte capilar, y el riego de las cuales una fracción se puede perder por escurrimiento superficial, movimiento lateral de la zona vadosa y percolación profunda, la que eventualmente recargará las napas subterráneas. La evaporación del suelo y la transpiración del cultivo pueden agotar el agua disponible (Allen, 2006). El proceso de cálculo comienza empleando la ecuación de Penman-Monteith. A partir de los componentes del balance se puede calcular el cambio de contenido de agua en el suelo a lo largo de un periodo de tiempo.

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,  $\Delta t$ , se puede escribir como se presenta en la ecuación 1:

$$\Delta\theta z_s = P - Q_r + I - ET_a - DP + GW \quad (\text{Ec.1})$$

donde:

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

$z_s$ : 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)

### **Evapotranspiración de cultivo**

La temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar y temperatura del suelo se midieron diariamente utilizando una estación meteorológica (modelo Decagon EM50-DEC, EE. UU.), ubicada en el sitio de investigación. Con los datos registrados de las variables climáticas se calculó la evapotranspiración potencial ( $ET_o$ ) usando la ecuación combinada FAO Penman-Monteith (Allen, 2006).

Para determinar la evapotranspiración de cultivo ( $ET_c$ ) se multiplica  $ET_o$  por el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ). La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de  $ET_o$ . Por lo tanto, mientras  $ET_o$  representa un indicador de la demanda climática, el valor de  $K_c$  varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando solo en una pequeña proporción en función del clima y fue obtenido a partir de los datos FAO-56 (Allen, 2006).

### **Riego**

El experimento contó con riego tecnificado, por cinta, con emisores de  $1,4 \text{ L h}^{-1}$ , dispuestos en terreno con un marco de  $0,2 \times 0,65 \text{ m}$  (76 emisores por parcela). La precipitación del equipo es de  $10,08 \text{ mm h}^{-1}$  y el sistema funcionó desde el día 15 de octubre hasta que el *Z. mays* alcanzó el estado de madurez fisiológica. En algunos periodos las parcelas se regaron en exceso con una carga controlada, con el objetivo de generar percolación y obtener lixiviados para mediciones de pérdidas de N de otros estudios en el sitio experimental.

### **Contenido de agua del suelo**

El contenido de agua del suelo se monitoreó en una parcela por tratamiento ubicada en el bloque 2 del ensayo, y usando sensores (modelo Decagon EC-5) enterrados a 50 cm de profundidad conectados a un datalogger (modelo Decagon EM50). Esta información fue utilizada para comparar el contenido agua del sensor con el simulado por el modelo AquaCrop.

Se tomaron muestras de suelo con barreno (0-25 y 25-50 cm) en cada tratamiento para medir el contenido de agua en las distintas épocas del año. Las mediciones se realizaron en los meses

de noviembre de 2017, enero de 2018, marzo de 2018 y julio de 2018. Las muestras se colectaron desde el centro de cada parcelas para la determinación del contenido de agua gravimétrico del suelo seco a 105 °C por 48 h (Sandoval et al., 2012). Estas mediciones se utilizaron como referencia para verificar el funcionamiento de los sensores.

A partir de los datos recopilados se calculó un balance hídrico por periodos de tiempo acotados a cada estación del año, con el cual se estimó el volumen de agua que se pierde por percolación profunda en cada tratamiento.

### **Calibración del modelo AquaCrop**

AquaCrop es un modelo desarrollado por FAO que simula el crecimiento y desarrollo de cultivos herbáceos como una función del consumo de agua bajo condiciones de secano o riego, suplementario o total (Steduto et al., 2009). Este modelo integra el efecto de las variables edáficas y climáticas, junto con las variables de manejo, para simular la producción de los cultivos en respuesta al agua en el sistema suelo-planta. Algoritmos y procedimientos de cálculo modelan la infiltración del agua, el drenaje fuera de la zona radicular, el desarrollo de la canopia y de la zona de raíces, la evaporación y la tasa de transpiración, dando como resultados un balance de agua del suelo, la producción de biomasa y la formación del rendimiento de los cultivos.

La transpiración es traducida a biomasa mediante la productividad del agua normalizada por la demanda evaporativa atmosférica y la concentración de dióxido de carbono del aire, específicos del cultivo a simular (Raes et al., 2009a). El modelo posee parámetros denominados conservativos, ya prefijados, como productividad del agua normalizada (WP\*), coeficientes de cobertura del canopeo (CDC), coeficientes del cultivo (Kc) índice de cosecha de referencia (HIo), presumiblemente aplicables a diferentes condiciones; y parámetros no específicos, que pueden ser modificados según el genotipo y el manejo a utilizar (Hsiao et al., 2009). Entre las principales variables que afectan el crecimiento y rendimiento final de los cultivos se destacan la radiación solar, la temperatura, el estado nutricional y la humedad del suelo.

De acuerdo con Raes et al. (2009a), el modelo AquaCrop consta de varias ecuaciones que, con datos de clima, densidad de población, características genéticas, tipo de suelo, nivel de fertilización y nivel de déficit hídrico, simulan el crecimiento y rendimiento del cultivo.

En la simulación del desarrollo del cultivo se genera la respuesta posible al estrés térmico que pueda presentarse, según las condiciones climáticas durante su ciclo de desarrollo; se estima de acuerdo con las condiciones del clima a partir de la fecha de siembra y se usa especialmente para el período de polinización. El modelo considera tres tipos de respuesta al estrés hídrico: 1) inhibición de la expansión del dosel vegetal, 2) aceleración de la senescencia del dosel vegetal y 3) cierre estomático. Para cuantificar el impacto del estrés hídrico para cada respuesta, el modelo considera una curva que se activa al alcanzar límites establecidos para la humedad del suelo. Según Heng et al. (2009) y Raes et al. (2009b), el modelo AquaCrop es una herramienta viable para evaluar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento de los cultivos durante varias etapas de desarrollo. Por tanto, es útil para planear y evaluar estrategias en diferentes condiciones de disponibilidad de agua, sistema de riego, tipo de suelo y fecha de siembra. Toda la información empleada tanto en el proceso de ajuste, como en el de validación y aplicación del modelo AquaCrop se encuentra resumida en el Cuadro 2, agrupada de acuerdo con el módulo de AquaCrop al cual pertenece.

**Cuadro 2.** Información requerida para el proceso de ajuste del modelo AquaCrop

| Módulos de Aquacrop   |  |  |   |   |
|---|--|--|---|---|
| Cultivo   | Clima  | Suelo  | Prácticas de Manejo   |   |
|   |  |  | Riego   | Campo   |
| Emergencia,<br>Cobertura de<br>dosel inicial (o<br>densidad de<br>siembra),<br>Cobertura<br>máxima de<br>dosel,<br>Inicio y<br>duración de<br>floración,<br>Senescencia,<br>Madurez<br>fisiológica del<br>grano,<br>Índice de<br>Cosecha (HI),<br>Fecha de<br>Siembra,<br>Método de<br>Siembra,<br>Temperatura<br>criticas (Base y<br>Máxima),<br>Profundidad<br>inicial y máxima<br>de raíces,<br>Días a máxima<br>profundidad de<br>raíces,<br>Productividad<br>de Agua (WP). | Precipitación,<br>Temperaturas<br>Máxima y Mínima,<br>Evapotranspiración<br>de referencia del<br>cultivo (ETo),<br>Concentraciones<br>de CO <sub>2</sub> . | Textura, Número<br>de Horizontes,<br>Punto de<br>Marchitez<br>Permanente,<br>Capacidad de<br>campo,<br>Punto de<br>Saturación,<br>Conductividad<br>Hidráulica<br>Saturada,<br>Curva Número<br>(CN),<br>Lámina<br>rápidamente<br>evaporable<br>(REW),<br>Profundidad de<br>capa restrictiva,<br>Profundidad de<br>nivel freático. | Método,<br>Lámina neta,<br>Lámina bruta,<br>Fechas de<br>aplicación,<br>Eficiencia de<br>la aplicación. | Grado de<br>fertilidad<br>del suelo<br>respecto al<br>cultivo,<br>Presencia<br>de<br>acolchados<br>o residuos<br>de cosecha,<br>Capa de<br>agua<br>permanente<br>sobre el<br>suelo. |

Las variables meteorológicas requeridas por el modelo fueron obtenidas a partir de los registros de la estación meteorológica ubicada en el campo experimental. Los datos de suelo provienen de los análisis realizados. Los parámetros relativos a los cultivos se obtuvieron del manual FAO-56 (Allen et al., 2006).

El rendimiento del *Z. mays* se calculó cuando las plantas llegaron al estado de madurez fisiológica. Se cosecharon 3 plantas completas por unidad experimental provenientes del centro de la repetición. Posteriormente, las mazorcas fueron desgranadas. Los granos se llevaron a estufa de aire forzado a 72°C hasta lograr masa constante. Una vez secos, se escogieron 1.000 granos y se les determinó su masa. Esta información en conjunto con la densidad de plantas se emplea para expresar el rendimiento en qq ha<sup>-1</sup>. En el caso de los cultivos cubiertas, *T. repens* y *L. multiflorum*, estos no pueden ser simulados por el modelo dado que no están incluidos en los módulos que existen actualmente.

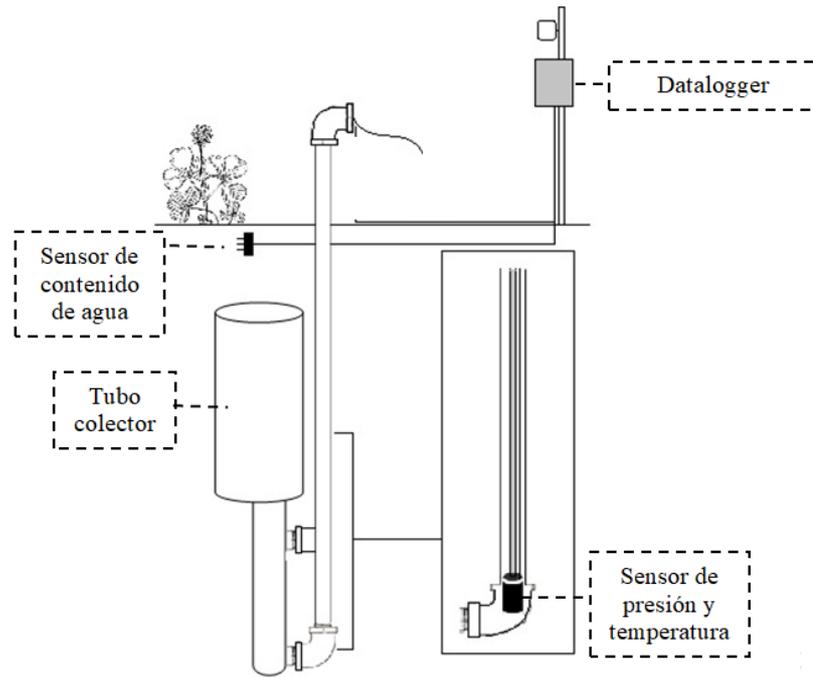
El objetivo del proceso de calibración es minimizar las diferencias entre los datos medidos y simulados. Los parámetros calibrados y sus rangos son seleccionados en base a mediciones de campo, el manual de referencia AquaCrop (Steduto et al., 2012) y los valores reportados en la literatura. La eficiencia de modelado de la verosimilitud estadística convencional ( $E$ ) (ecuación 2), se usará como la función de verosimilitud (Nash y Sutcliffe, 1970)

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O')^2} \quad \text{Ec. (2)}$$

donde  $O_i$  es el valor individual de la variable observado en el momento  $i$ ,  $S_i$  es el valor simulado individual en el tiempo  $i$ ,  $O'$  es el valor medio observado y  $n$  es el número de valores simulados observados. El valor de  $E$  varía desde menos infinito hasta 1, donde un valor  $E$  de 1 representa una predicción perfecta y valores más bajos indican una concordancia menos precisa entre el modelo y las observaciones (Nash y Sutcliffe, 1970). Por lo tanto, un valor de cero para  $E$  indica que  $O'$  es tan buen predictor como el modelo, mientras que los valores negativos indican que la media observada es un mejor predictor que el modelo. 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.

### Percolación de agua medida con lisímetros

En el bloque 2 del experimento, fueron instalados nueve lisímetros (Decagon modelo G3) con el objetivo de medir el volumen de agua percolada cada una hora. Los lisímetros (Figura 2) se conforman de un tubo colector, que recibe el agua que se mueve bajo la zona de raíces, unido mediante una manguera a otro tubo acoplado a un filtro de fibra de vidrio y tierra de diatomeas que separan el suelo del colector, y están ubicados a 50 cm de profundidad en las parcelas que reciben la menor dosis de N. El colector se ensambla a otro tubo que posee un sensor de temperatura, presión y conductividad eléctrica (CE) (Decagon modelo EC-5), conectado a una manguera que sube hasta alcanzar la superficie del equipo. Los datos de percolación se almacenan en un Datalogger (Decagon modelo EM50), que se conecta también a través de cables con un sensor de contenido de agua del suelo y con el sensor de temperatura y presión. La utilización del lisímetro permite obtener un dato real del volumen de agua que se pierde por percolación profunda a través del tiempo.



**Figura 2.** Esquematación del lisímetro instalado en el ensayo de campo

### Conductividad hidráulica

Conductividad hidráulica saturada de campo,  $K_s$  ( $\text{cm s}^{-1}$ ) es una propiedad hidráulica fundamental del suelo que describe la facilidad con la que el agua puede moverse a través de espacios de poro o fracturas bajo condiciones de saturación de campo. El análisis propuesto por Reynolds y Elrick (1990) se conoce como el enfoque de dos estanques y es la técnica utilizada por el Infiltrómetro DualHead. Se utilizó la ecuación 3 propuesta por Nimmo et al. (2009).

$$K_s = \frac{i}{F} \quad (\text{Ec.3})$$

donde  $i$  ( $\text{cm s}^{-1}$ ) es la tasa de infiltración constante (final) (volumen dividido por área) y  $F$  es una función que corrige la sorptividad y los efectos geométricos.

A nivel de campo se realizó una prueba de infiltración del suelo para determinar el efecto de los sistemas de rotación de cultivos en la  $K_s$  utilizando un infiltrómetro (Figura 3, DualHead Infiltrometer, Decagon) con la metodología explicada en el manual del usuario (Decagon Devices, Inc., 2016a). La información recopilada se utilizó como input para el modelo AquaCrop.



**Figura 3.** Infiltrómetro (DualHead Infiltrometer, Decagon).

### Análisis estadístico

La variable respuesta para el ensayo se obtuvo utilizando el siguiente modelo lineal mixto (MLM) según la ecuación 4:

$$Y = \mu + R_i + \tau_j + (R\tau)_{ij} + \beta_{ik} + P_i(k) + \epsilon_{ijk} \quad (\text{Ec.4})$$

donde:

Y= variable respuesta;

$\mu$ = media general;

R= factor rotación de cultivos más fertilización;

$\tau$ = factor tiempo;

$R\tau$ = interacción rotación de cultivos y tiempo;

$\beta$ = efecto bloque;

P= efecto parcela;

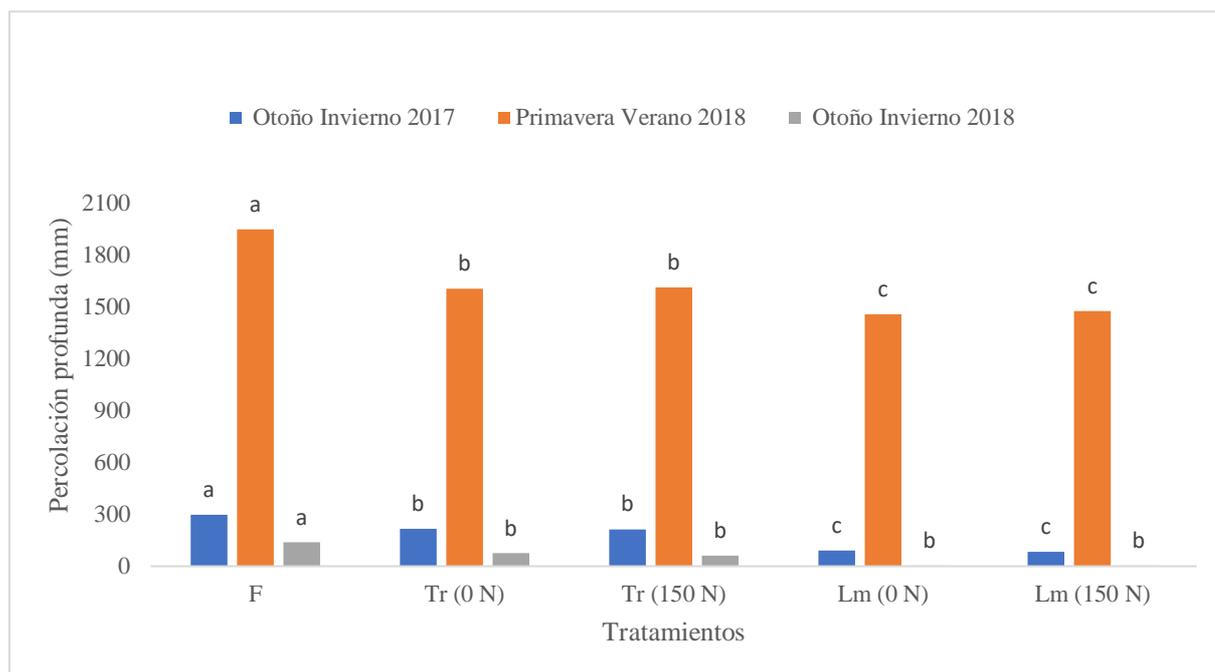
$\epsilon$ = error experimental, el cual se asume normalmente distribuido.

La media de los tratamientos, factores rotación de cultivos, dosis de N y tiempo, y su interacción, corresponden al componente fijo del modelo, mientras que el efecto de los bloques y parcelas anidadas al bloque, en conjunto al error experimental, constituyen el componente aleatorio del modelo.

Los datos serán analizados mediante modelos lineales mixtos (MLM). En el caso de encontrar diferencias estadísticamente significativas, para la interacción de los factores o en su defecto, los factores de manera independiente, se realizó la prueba de comparaciones múltiples (PCM) de Fisher ( $\alpha= 0,05$ ).



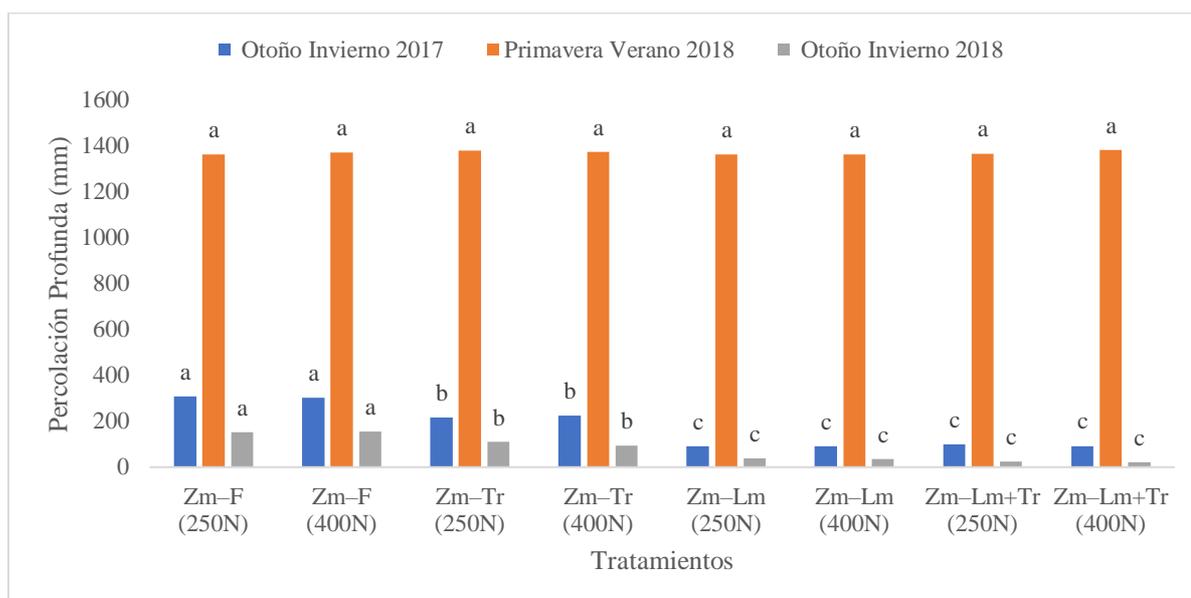
registraron 82 mm y 96 mm en el 2017. El año 2018 la percolación profunda de estos tratamientos fue prácticamente nula. En el caso de Tr<sub>0</sub> y Tr<sub>150</sub> la percolación promedio fue de 216 y 214 mm respectivamente para el año 2017 y fue menor para el 2018 con 75 y 62 mm.



**Figura 5.** Efecto de los cultivos cubierta continuos en la percolación profunda del suelo (ver Cuadro 1 para la explicación de los códigos de tratamiento) durante diferentes períodos. Las diferentes letras dentro de los períodos indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en ese período ( $p < 0,05$ ).

En la época primavera-verano la diferencia numérica en los montos de agua percolada entre los tratamientos es estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ). La cantidad de agua aplicada fue excesiva en relación con los requerimientos hídricos de los cultivos (el agua aplicada a través del riego alcanzó 1.937 mm en la temporada). Considerando la capacidad de almacenamiento del suelo y la absorción por los cultivos, la altura de agua que se perdió por percolación superó los 1.400 mm, llegando a más de 1.800 mm para el barbecho.

En el ensayo 2, que incluye los tratamientos de rotaciones *Z. mays* -CC, los tratamientos con CC que incluyen *L. multiflorum*: Zm<sub>250</sub>-Lm, Zm<sub>400</sub>-Lm, Zm<sub>250</sub>-Lm+Tr, Zm<sub>400</sub>-Lm+Tr registraron una menor percolación profunda de agua (Figura 6), que varió entre 93 y 101 mm para el año 2017 y entre 23 y 39 mm el 2018 con diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,05$ ) durante la época de otoño-invierno. En el caso de Zm<sub>250</sub>-F y Zm<sub>400</sub>-F, superaron levemente los 300 mm el año 2017 y alcanzaron un poco más de 150 mm el año 2018, mientras que en Zm<sub>250</sub>-Tr, Zm<sub>400</sub>-Tr se obtuvieron 216 y 224 mm el año 2017 y 110 y 94 mm el año 2018, respectivamente. Durante primavera-verano, no se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. La cantidad de agua aplicada durante esta época a través del riego no permite evidenciar un efecto del CC en el agotamiento de agua del suelo y además fue excesiva, situación que es muy común en los campos donde se cultiva *Z. mays*.



**Figura 6.** Efecto de las rotaciones de maíz – cultivos cubierta y las tasas de fertilización en la percolación profunda del suelo (ver Cuadro 1 para una explicación de los códigos de tratamiento). Las diferentes letras en las barras dentro de un período indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en ese período ( $p < 0,05$ ).

Diversos estudios destacan el barbecho como una técnica adecuada para la acumulación de agua en el suelo (Puricelli, 1977; Glave, 1979). Aunque, al analizar el balance hídrico, se puede observar pérdidas de agua asociadas a la evaporación desde el suelo y la percolación profunda Krüger (1993). Al sembrar un CC se produce una reasignación del agua evaporada del suelo al flujo transpiratorio de las plantas disminuyendo estas pérdidas de agua.

Muñoz-Carpena et al. (2008), utilizando diferentes modelos de balance hídrico, concluyeron que la utilización de CC como antecesores de *Z. mays* mejoró las condiciones físicas del suelo, incrementó la retención del agua y la evapotranspiración real del cultivo siguiente. Sin embargo, los resultados de incluir CC, frecuentemente, resultan muy variables entre sitios, dada la cantidad de factores involucrados (clima, suelo, manejo) y la fuerte interacción entre ellos durante el desarrollo. En investigaciones realizadas por Bodner et al. (2007) utilizando el método de coeficiente de doble cultivo de la FAO, concluyeron que el CC redujo la alta evaporación de un suelo desnudo y consideraron adecuada su utilización para manejo del agua en ambientes con condiciones climáticas similares a las que estuvo expuesto el ensayo.

Se observó que en los tratamientos con rotaciones *Z. mays* -CC cuando se incluyó una gramínea (*L. multiflorum*) existió menor percolación profunda que al cultivar una leguminosa (*T. repens*), y en ambos casos fue menor que al mantener el suelo desnudo durante el mismo periodo. Esta situación fue similar a lo reportado por Gabriel et al. (2012), que en su investigación trabajaron con barbecho y CC de cebada (*Hordeum vulgare*), vicia (*Vicia villosa* y *Vicia sativa*) y colza de invierno (*Brassica rapa*). En su caso, las diferencias en la percolación profunda aparecieron durante el período de cobertura y el de *Z. mays*. En cuanto a los montos de agua percolada durante el invierno, oscilaron entre una ausencia de filtración de agua en 2007/08 a más de 230 mm en 2009/10, producto de la variabilidad de las precipitaciones. La percolación profunda que se midió durante el invierno fue siempre mayor en el barbecho que en los tratamientos de CC y fue mayor en *V. villosa* y *V. sativa* que en comparación con *H. vulgare*, principalmente porque los cultivos cereales evapotranspiraron una mayor cantidad de agua que las leguminosas.

Cabe destacar que el efecto en la reducción de la cantidad total de agua percolada para los tratamientos con CC se debió tanto a una disminución en el agua que se mueve hacia horizontes más profundos en el perfil de suelo después de un evento de lluvia como a períodos de drenaje más cortos. Esto ocurre porque la percolación profunda comienza más tarde y termina antes en los tratamientos con CC (Gabriel et al., 2012).

Como se aprecia en las figuras 5 y 6 la percolación profunda ocurrió principalmente durante la temporada de crecimiento del *Z. mays* donde la evapotranspiración y el drenaje acumulados durante este periodo no fueron diferentes entre los tratamientos. Esto ilustra claramente el exceso de riego como una deficiencia potencial y recurrente en el manejo del agua, en parte justificada por una capacidad de retención de agua del suelo relativamente baja y una permeabilidad muy alta (Muñoz-Carpena et al., 2008). Esta situación también fue planteada por Salmeron et al. (2010) al evaluar el uso de CC en condiciones de clima Mediterráneo, durante la época en que se cultivó el maíz. Por el contrario, Gabriel et al. (2012), en los períodos de crecimiento del *Z. mays*, ajustaron el riego a los requerimientos del cultivo y solo se produjo percolación durante la primavera producto de las precipitaciones. Por lo tanto, en este caso las diferencias en la percolación entre los tratamientos se derivaron de las diferencias en el contenido de agua del suelo en la siembra del maíz y se vincularon al agotamiento del agua por el CC.

Los CC al utilizar agua para crecer, pueden reducir potencialmente los rendimientos del cultivo posterior en las regiones semiáridas de secano (Unger y Vigil, 1998; Nielsen y Vigil, 2005; Nielsen et al., 2015; Reeves, 2017) y podría ser relevante en las condiciones de clima Mediterráneo, donde el agua es un factor limitante y la precipitación invernal puede ser baja. Sin embargo, es un problema menor en las áreas húmedas y con riego disponible para compensar el déficit en el momento de la siembra. En adición, la conservación del agua en verano por los residuos de los CC puede ser más importante que el agotamiento en primavera al determinar el rendimiento final (Campbell et al., 1984; Clark et al., 1997), si los déficits no retrasan el establecimiento del cultivo.

En California, McGuire et al. (1998) y Mitchell et al. (1999) observaron reducciones en el contenido de agua del suelo de primavera de hasta 80 mm debido a los CC. El uso del agua por los CC depende en gran medida de las condiciones y el período de crecimiento (Thorup-Kristensen et al., 2003). Sin embargo, no todo el uso del agua causa una competencia. En áreas con suficiente exceso de precipitación, se reemplazará el agua utilizada por los CC, y solo se reducirá la percolación, mientras que el almacenamiento no se ve afectado, como también McGuire et al. (1998) observó en un año con altas precipitaciones invernales.

Ward et al. (2012) mencionan que es poco probable que la inclusión de CC en sistemas agrícolas en regiones con un clima Mediterráneo tenga un impacto importante en el balance hídrico, pero pueden aumentar la sostenibilidad general del sistema. En muchas regiones y zonas climáticas, se ha demostrado que los CC y la retención de residuos reducen la evaporación de la superficie del suelo (por ejemplo, Bolliger et al., 2006; Salado-Navarro y Sinclair, 2009) evidenciando de un mayor almacenamiento de agua en estas condiciones Monzon et al. (2006). Sin embargo, según lo discutido por Gregory et al. (2000), es probable que la capacidad de reducir la evaporación disminuya a medida que aumenta la evaporación potencial y la lluvia se vuelve más esporádica.

Los CC generalmente aumentan la tasa y la cantidad de infiltración de la lluvia o el riego (Blanco-Canqui et al., 2012). Esto es cierto tanto para los sistemas convencionales como para los de no labranza, aunque el impacto puede variar según el sistema de labranza, el tipo de

suelo y el clima (Dabnei et al., 1998). Los CC pueden aumentar la infiltración a través de distintos mecanismos: evitando el sellado de la superficie, al cubrir el suelo y absorber la energía cinética de las gotas de lluvia, pueden disminuir el desprendimiento y la reorganización de las partículas del suelo (Romkens et al., 1990) y aumentado la capacidad de almacenamiento de agua disponible, incrementando la macroporosidad del suelo directamente a través del crecimiento de las raíces e indirectamente al mejorar el hábitat y la actividad de la mesofauna (Tomlin et al., 1995).

Producto de las condiciones climáticas en las cuales se desarrolló el ensayo, el monto de precipitaciones mostró una gran variabilidad interanual. En cuanto a la cantidad de agua evapotranspirada por los cultivos, se observaron diferencias importantes entre los tratamientos producto de su sensibilidad al índice de área foliar (IAF) y coeficiente de cultivo (Kc) (Gabriel et al., 2012). Los CC que desarrollan rápidamente a principios de otoño, llevan a un aumento en la evapotranspiración y una disminución en el volumen de agua percolada. *L. multiflorum* se desarrolló y cubrió el suelo más rápido que *T. repens*, por lo tanto, si el objetivo de usar CC es disminuir la percolación profunda *L. multiflorum* mostró mayor efectividad como CC.

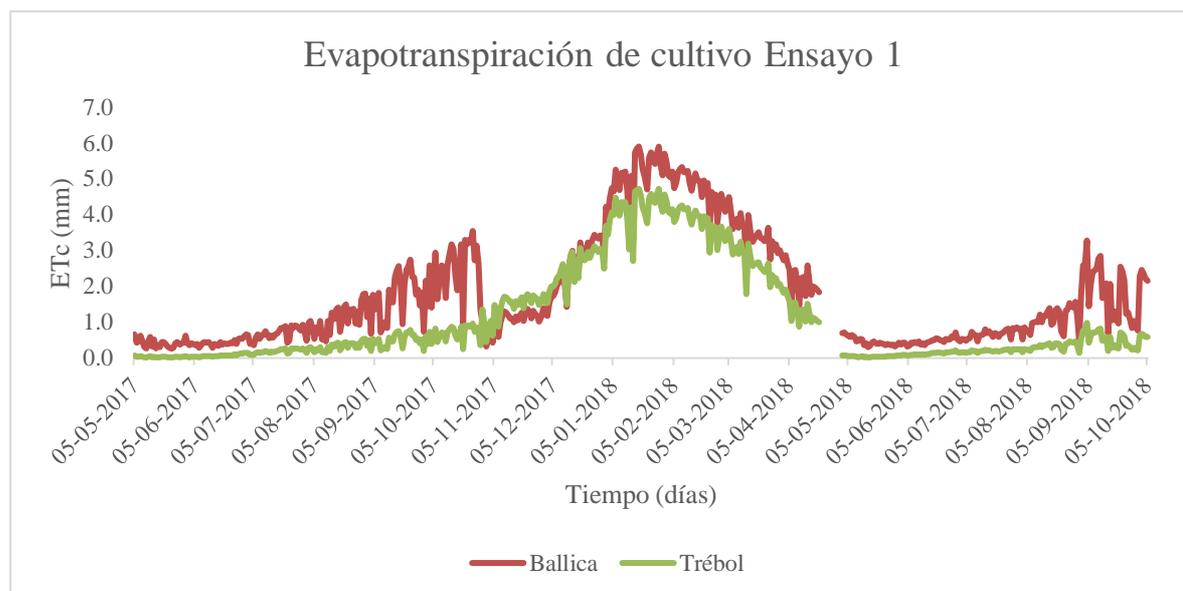
En ambientes con limitaciones de agua, se requiere conocimiento sobre la extracción adicional por los CC en comparación con un suelo desnudo para generar una estrategia de manejo sostenible. La percolación profunda depende en gran medida del volumen total de agua que entra al sistema suelo. Esto es relevante en las condiciones de clima Mediterráneo, porque el monto de precipitaciones es muy variable a través de los años (Rivas-Martínez, 2010) y en los periodos con mayor precipitación la percolación tiende a aumentar en todos los tratamientos. En este sentido siempre fue mayor en los tratamientos con suelo descubierto, seguidas por los tratamientos con leguminosas y finalmente las gramíneas.

### **Evapotranspiración en diferentes sistemas de rotación de cultivos**

Bajo las condiciones propuestas en este ensayo, para estimar las necesidades de agua de los cultivos agrícolas se utilizó el método del coeficiente de cultivo FAO 56 (Allen et al., 1998). El modelo semi-empírico de la FAO proporciona un cálculo simple tanto de la evaporación del suelo como de la transpiración de la planta, basado en los coeficientes específicos del cultivo y en el balance hídrico diario. Para ello, la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se calculó utilizando el modelo de FAO-Penman-Monteith y se corrigió por el coeficiente de cultivo obtenido siguiendo la relación propuesta para el *Z. mays* en condiciones climáticas semiáridas (Martínez-Cob, 2008). El método del coeficiente de cultivo se ha aplicado para estimar el uso de agua y los requisitos de riego de una amplia gama de cultivos agrícolas en diferentes condiciones climáticas (Abdelhadi et al., 2000; Poulouvalis et al., 2001; Zhang et al., 2004; Howell et al., 2004). Los requisitos de datos son menores que para los modelos mecanicistas de suelo, planta y atmósfera, por lo que este enfoque podría ser una herramienta conveniente para evaluar el riesgo de agotamiento de agua del suelo por los CC.

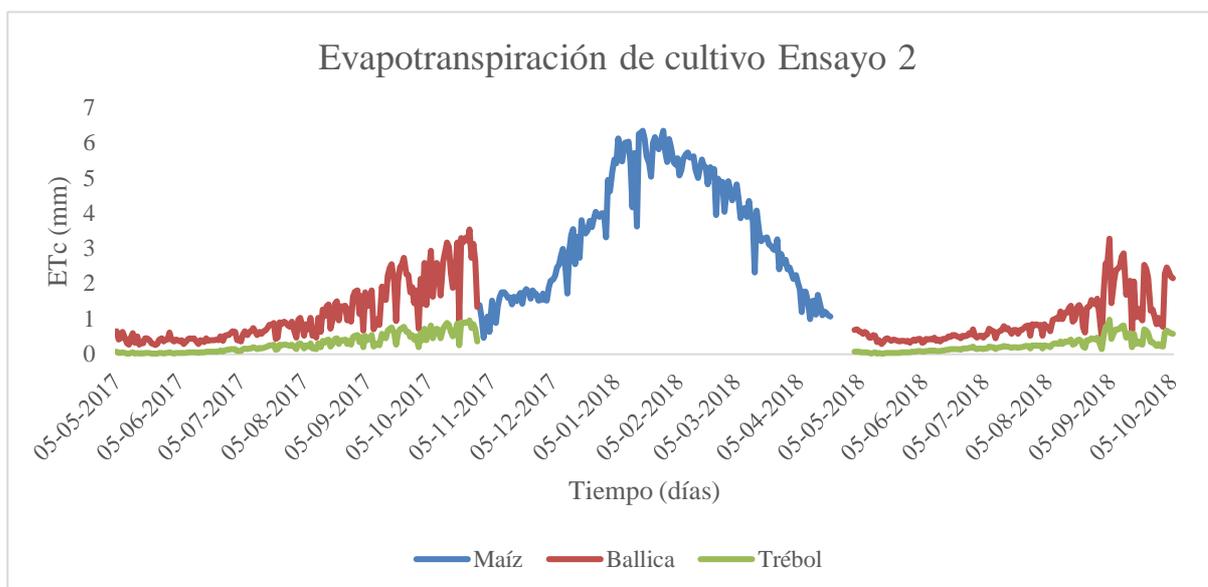
La ET<sub>c</sub> es la combinación de los procesos de evaporación superficial del suelo y la transpiración de los cultivos, ambos constituyen pérdidas de agua hacia la atmósfera (Jensen y Allen, 2016). Estos procesos ocurren simultáneamente y estimarlos por separado es muy difícil de lograr, ya que en las primeras etapas del cultivo la pérdida de agua es principalmente por evaporación directa del suelo. Sin embargo, a medida que avanza el ciclo del cultivo y finalmente cuando este cubre prácticamente toda la superficie la transpiración se convierte en el proceso principal (Hobbins et al., 2001; Gong et al., 2006). Las diferencias en resistencia, transpiración, altura, rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las

características radiculares dan lugar a diferentes niveles de evapotranspiración aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas (Xu y Singh, 2005). El barbecho produjo una evaporación mayor que los otros tratamientos. Durante el otoño-invierno, en el ensayo 1, osciló entre 50 y 38 mm, para los años 2017 y 2018 respectivamente. La mayor evapotranspiración correspondió a *L. multiflorum* (250 a 184 mm), seguido del *T. repens* (177 y 132 mm). En la época de primavera verano se calculó una evapotranspiración de 550 y 472 mm para *L. multiflorum* y *T. repens*, respectivamente. Las principales diferencias se dan por la baja demanda atmosférica de agua durante la época invernal, en relación con lo ocurrido en verano, en especial durante los meses de diciembre- enero donde se alcanza la máxima demanda de agua (Figura 7).



**Figura 7.** Efecto de los cultivos cubierta continuo (ballica vs trébol) en la evapotranspiración (ETc) de las parcelas durante un período de mayo de 2017 a septiembre de 2018. Valores estimados según metodología propuesta por Allen et al. (2016), corregido con valores de Kc de FAO-56 (Allen, 2006).

El *T. repens* tuvo una cobertura de suelo significativamente más baja debido a condiciones de germinación adversas. Anderson et al. (2012) destacan que en sus estudios la evapotranspiración fue la diferencia más importante entre los tratamientos, dado que existe una alta variación estacional de este componente del balance hídrico. Los períodos de cultivo de *Z. mays* tuvieron una alta evapotranspiración 605 mm (Figura 8), y en general similar para los casos estudiados por otros autores que varían entre 589 y 717 mm. De esta forma, los tratamientos con rotaciones *Z. mays* – *L. multiflorum* son los que evapotranspiran un mayor volumen de agua anual.



**Figura 8.** Efecto de las rotaciones de maíz – cultivos cubierta (ballica vs trébol) en la evapotranspiración (ETc) de las parcelas durante un período de mayo de 2017 a septiembre de 2018. Valores estimados según metodología propuesta por Allen et al. (2016), corregido con valores de Kc de FAO-56 (Allen, 2006).

La eficiencia de modelado de la verosimilitud estadística convencional ( $E$ ) (ecuación 2), se utilizó como la función de verosimilitud (Nash y Sutcliffe, 1970). El valor de  $E$  varía desde menos infinito hasta 1, donde un valor  $E$  de 1 representa una predicción perfecta y valores más bajos indican una concordancia menos precisa entre el modelo y las observaciones. 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. Al analizar la ETc para *Z. mays* en el Cuadro 2, se obtiene que la  $E$  de modelación de AquaCrop responde de manera satisfactoria ( $E > 0,5$ ) según lo simulado y calculado. Esto quiere decir que el modelo es bastante robusto en cuanto a los parámetros y variables de cultivo, particularmente en *Z. mays* que es uno de los cultivos más estudiados y trabajados por el modelo. Cabe destacar la importancia de una medición con mayor precisión de la ETc en campo, para lograr un mejor ajuste del modelo y mejorar las simulaciones.

Para validar las simulaciones realizadas se requiere que los rendimientos obtenidos por el modelo se aproximen a los alcanzados experimentalmente (Hansen et al., 2012). Los rendimientos de *Z. mays* obtenidos en campo y simulados se presentan en el cuadro 2. Dentro de estos tratamientos, se puede observar a Zm<sub>250</sub>-Tr con mayor rendimiento calculado y el Zm<sub>250</sub>-F con el menor, no obstante, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ( $p < 0,05$ ), al igual que en los resultados de las SIM. Por lo tanto, según las condiciones del ensayo, los CC no tendrían efecto en el rendimiento y percolación profunda durante este periodo. Este resultado es similar a los descritos por Salmeron et al. (2010) donde los tratamientos de CC invierno redujeron el rendimiento del *Z. mays* en comparación con el barbecho, aunque no de manera significativa estadísticamente.

**Cuadro 3.** Evapotranspiración de cultivo (ETc) y Rendimiento observado (OBS) y simulado (SIM) del cultivo de *Z. mays* L. obtenido en la temporada primavera-verano 2018 por tratamiento.

| Tratamiento                   | Primavera 2017-Verano 2018 |        |          |                              |       |
|-------------------------------|----------------------------|--------|----------|------------------------------|-------|
|                               | ETc                        |        |          | Rendimiento                  |       |
|                               | OBS                        | SIM    | <i>E</i> | OBS                          | SIM   |
|                               | --- mm ---                 |        |          | --- qqm ha <sup>-1</sup> --- |       |
| <b>Zm<sub>250</sub>-F</b>     | 561,60                     | 605,60 | 0,52     | 126,2                        | 124,1 |
| <b>Zm<sub>400</sub>-F</b>     | 558,20                     | 605,60 | 0,63     | 128,3                        | 128,7 |
| <b>Zm<sub>250</sub>-Lm</b>    | 545,10                     | 605,60 | 0,75     | 132,2                        | 132,4 |
| <b>Zm<sub>400</sub>-Lm</b>    | 549,20                     | 605,60 | 0,66     | 130,4                        | 127,7 |
| <b>Zm<sub>250</sub>-Tr</b>    | 551,00                     | 605,60 | 0,62     | 143,6                        | 124,4 |
| <b>Zm<sub>400</sub>-Tr</b>    | 554,30                     | 605,60 | 0,44     | 133,1                        | 130,0 |
| <b>Zm<sub>250</sub>-Lm+Tr</b> | 552,70                     | 605,60 | 0,69     | 131,3                        | 140,1 |
| <b>Zm<sub>400</sub>-Lm+Tr</b> | 547,60                     | 605,60 | 0,63     | 140,5                        | 135,9 |

Por otro lado, hay autores que afirman que los CC pueden aumentar los rendimientos en los cultivos comerciales, manteniendo la humedad del suelo (Ebelbar et al., 1984; Salton y Mielniczuk, 1995), disminuyendo las temperaturas máximas y la amplitud térmica, y aumentando el reciclaje de nutrientes (De María y Castro, 1993). Los cultivos de leguminosas aumentan la disponibilidad de N en el suelo. Su absorción por el cultivo de *Z. mays* y el rendimiento de granos depende de un adecuado sistema de rotación (Gabriel et al.2012). Investigaciones realizadas por Giacomini et al. (2004) en la zona sur de Brasil, comprobaron que el cultivo individual de leguminosa o asociada con un cereal como CC afectaron positivamente el rendimiento de *Z. mays*. En este caso, además de no evidenciar este efecto en el rendimiento del *Z. mays*, el *T. repens* de la mezcla (Lm-Tr), fue afectado por el rápido crecimiento y desarrollo de *L. multiflorum*.

### Percolación profunda medida con lisímetros

Para las mediciones de la cantidad de agua percolada por tratamiento, se utilizó la información entregada por los sensores presentes en los lisímetros. Debido a que algunos sensores fallaron en el transcurso de la recolección de datos se tienen las mediciones de los tratamientos F<sub>0</sub>-F, Lm<sub>0</sub>-Lm, Lm<sub>150</sub>-Lm, Tr<sub>0</sub>-Tr, Zm<sub>250</sub>-F, Zm<sub>250</sub>-Lm y Zm<sub>250</sub>-Tr+Lm.

Analizando el Cuadro 3, en el cual se presenta la cantidad de agua percolada por temporada según el tratamiento, en la temporada otoño invierno 2017 y 2018 se obtuvo principalmente un desempeño insatisfactorio, exceptuando al tratamiento F<sub>0</sub>-F y Zm<sub>250</sub>-Lm en 2017 y F<sub>0</sub>-F, Zm<sub>250</sub>-F y Zm<sub>250</sub>-Tr+Lm en 2018. En cuanto a los demás tratamientos el resultado obtenido puede estar relacionado con la falta de datos para la calibración del modelo, lo que repercutió en el balance de agua durante esta temporada. De todas formas, se puede apreciar que la cantidad de agua percolada disminuye considerablemente al utilizar CC. Esto demuestra el efecto que genera la incorporación de CC en la rotación con *Z. mays*, tal como lo reportado por Salmeron et al. (2011), Gabriel et al. (2012) y Quemada et al. (2013).

La eficiencia de modelación obtenida en la temporada primavera-verano varía de 0,41 a 1,00, con resultados satisfactorios a muy buenos en los tratamientos con *Z. mays*; Zm<sub>250</sub>-F (*E* = 1,00) seguido del tratamiento Zm<sub>250</sub>-Lm (*E* = 0,82) y Zm<sub>250</sub>-Tr+Lm (*E* = 0,72). Estos resultados están relacionados a la disponibilidad de datos y menor incertidumbre al momento de trabajar con

este cultivo. En la temporada primavera- verano, como es esperable se registran los mayores valores de percolación producto de la cantidad de agua recibida por cada tratamiento.

En las praderas permanentes se aprecia en el Cuadro 4, que en la temporada primavera-verano se tienen resultados positivos y satisfactorios, a excepción de Lm<sub>0</sub>-Lm, el cual con un valor de ( $E = 0,41$ ), no obstante, los resultados no son satisfactorios durante otoño-invierno de ambos años, la falta de datos de los CC generó relevancia en la simulación de la percolación.

**Cuadro 4.** Cantidad de agua percolada observada (OBS) y simulada (SIM) por temporada y la eficiencia de modelamiento ( $E$ ) para cada tratamiento.

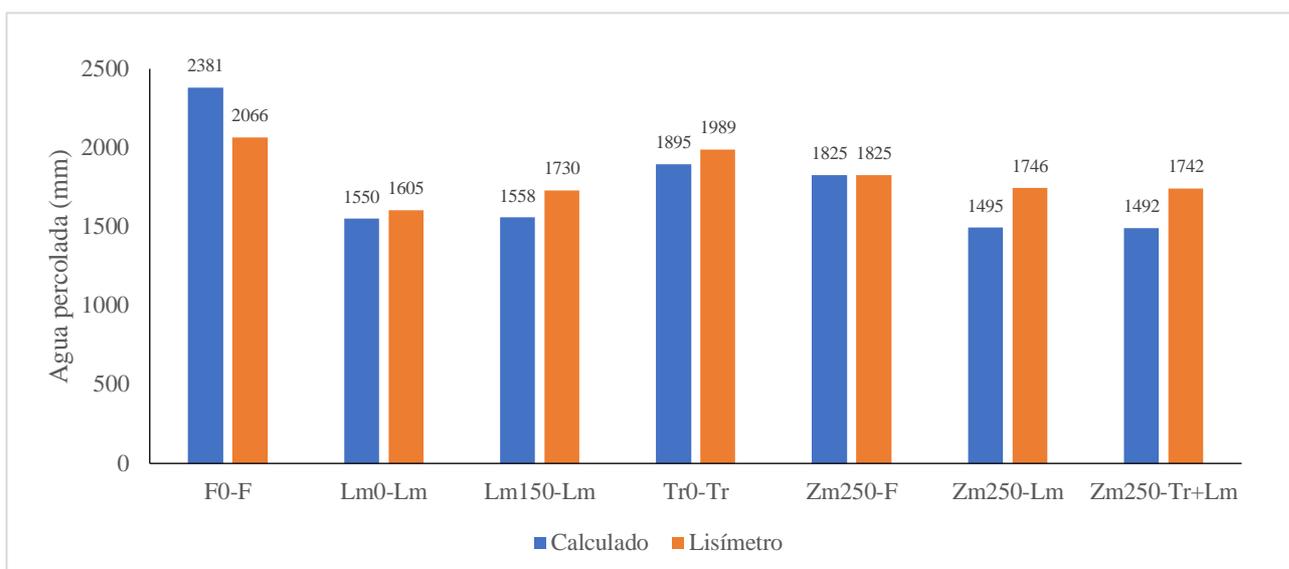
| Tratamiento                   | Otoño-invierno 2017 <sup>2</sup> |        |       | Primavera-Verano <sup>1</sup> |         |      | Otoño-invierno 2018 <sup>3</sup> |       |       |
|-------------------------------|----------------------------------|--------|-------|-------------------------------|---------|------|----------------------------------|-------|-------|
|                               | OBS                              | BH     | $E$   | OBS                           | SIM     | $E$  | OBS                              | BH    | $E$   |
|                               | --- mm ---                       |        |       | --- mm ---                    |         |      | --- mm ---                       |       |       |
| <b>F<sub>0</sub>-F</b>        | 619,13                           | 423,54 | 0,77  | 1447,00                       | 1940,61 | 0,41 | 0,00                             | 17,50 | -     |
| <b>Lm<sub>0</sub>-Lm</b>      | 207,30                           | 94,36  | 0,09  | 1229,21                       | 1452,88 | 0,41 | 168,00                           | 3,44  | -0,28 |
| <b>Lm<sub>150</sub>-Lm</b>    | 335,8                            | 82,19  | 0,11  | 1372,71                       | 1474,88 | 0,90 | 21,00                            | 1,99  | -0,13 |
| <b>Tr<sub>0</sub>-Tr</b>      | 517,81                           | 216,14 | 0,22  | 1308,00                       | 1611,93 | 0,83 | 163,00                           | 66,58 | -0,10 |
| <b>Zm<sub>250</sub>-F</b>     | 51,90                            | 92,70  | 0,04  | 1751,12                       | 1722,16 | 1,00 | 22,47                            | 10,32 | 0,66  |
| <b>Zm<sub>250</sub>-Lm</b>    | 155,00                           | 92,64  | 0,65  | 1589,00                       | 1402,29 | 0,82 | 2,00                             | 0,26  | -0,13 |
| <b>Zm<sub>250</sub>-Tr+Lm</b> | 594,00                           | 101,84 | -0,28 | 1148,00                       | 1476,17 | 0,72 | 0,00                             | 15,10 | -     |

<sup>1</sup>Primavera 2017 y Verano 2018. Simulado por el modelo AquaCrop.

<sup>2</sup> y <sup>3</sup> Periodos donde el observado corresponde a los registros del lisímetro comparado con valores obtenidos a partir de la ecuación de balance hídrico.

En la Figura 9 se presentan los montos totales de agua percolada durante el periodo del ensayo, donde a pesar de existir diferencias numéricas entre lo observado en el lisímetro y lo calculado, se aprecia que ambos siguen la misma tendencia. El tratamiento F<sub>0</sub>-F es el con mayor cantidad de agua percolada, producto de la ausencia de cultivo que transpire durante todo el año, dejando como principal salida de agua la evaporación que se produce en los primeros cm de suelo. El tratamiento que sigue es Tr<sub>0</sub>-Tr, esto puede tener relación con la dificultad de este cultivo para germinar y establecerse, además de la menor demanda evapotranspirativa en comparación con los tratamientos que incluyen *L. multiflorum* en la rotación.

Los tratamientos de rotaciones con *Z. mays* – CC presentan una menor cantidad de agua percolada que el tratamiento Zm<sub>250</sub>-F, por lo que se confirma lo sugerido por Quemada et al. (2013) donde el reemplazo del barbecho por CC en clima mediterráneo reduciría la percolación de agua. Los tratamientos que obtuvieron una mejor respuesta fueron Zm<sub>250</sub>-Lm y Zm<sub>250</sub>-Tr+Lm, registrando los menores montos de agua percolada tanto en los calculados a partir del balance hídrico como en los registros del lisímetro.



**Figura 9.** Comparación de la cantidad de agua percolada según lo observado por el lisímetro y calculado para todos los tratamientos.

Los montos de agua aplicados a través del riego pueden provocar un gran impacto producto que el agua que se perdió en profundidad genera un elevado potencial de contaminación por lixiviación de  $\text{NO}_3^-$  aportados por la fertilización (Díez et al., 2000; Moreno et al., 1996).

En este sentido según Díez et al. (2000), se observa que los valores más altos de  $\text{NO}_3^-$  lixiviados se encuentran suelos en barbecho, y tienden a disminuir, en presencia de CC, en especial de los de cultivos cereales. Esto puede ser explicado porque, durante la época invernal, los requerimientos de N son suplidos por lo almacenado en el suelo, dejando una menor disponibilidad al momento de la siembra del *Z. mays*, por lo tanto, menor potencial de lixiviación durante la época más crítica que son las primeras etapas de desarrollo. En los casos en los que se utilizó un cultivo de la familia de las leguminosas, la lixiviación de  $\text{NO}_3^-$  tiende a disminuir en comparación con barbecho, pero a su vez, es mayor si la comparamos con un cereal (Quemada et al., 2013).

La producción de *Z. mays* en Chile, concentrada principalmente en las Regiones de O'Higgins y el Maule se utilizan altas tasas de fertilización nitrogenada ( $350\text{-}560 \text{ kg ha}^{-1}$ ) junto al empleo de sistemas de riego gravitacional muy poco eficientes. En promedio  $200 \text{ kg N ha}^{-1}$  no son absorbidos por el *Z. mays* y quedan susceptibles a ser lixiviados (Salazar y Nájera, 2011), siendo los suelos de textura gruesa los que presentan mayor riesgo debido a la mayor porosidad de drenaje (poros gruesos) que permiten alta percolación y baja retención de agua (Casanova et al., 2013). En este contexto, la incorporación de CC podría constituir una herramienta efectiva para prevenir la pérdida del N por lixiviación en este cultivo (Gabriel et al., 2013).

## Modelo AquaCrop para simular el contenido de agua del suelo

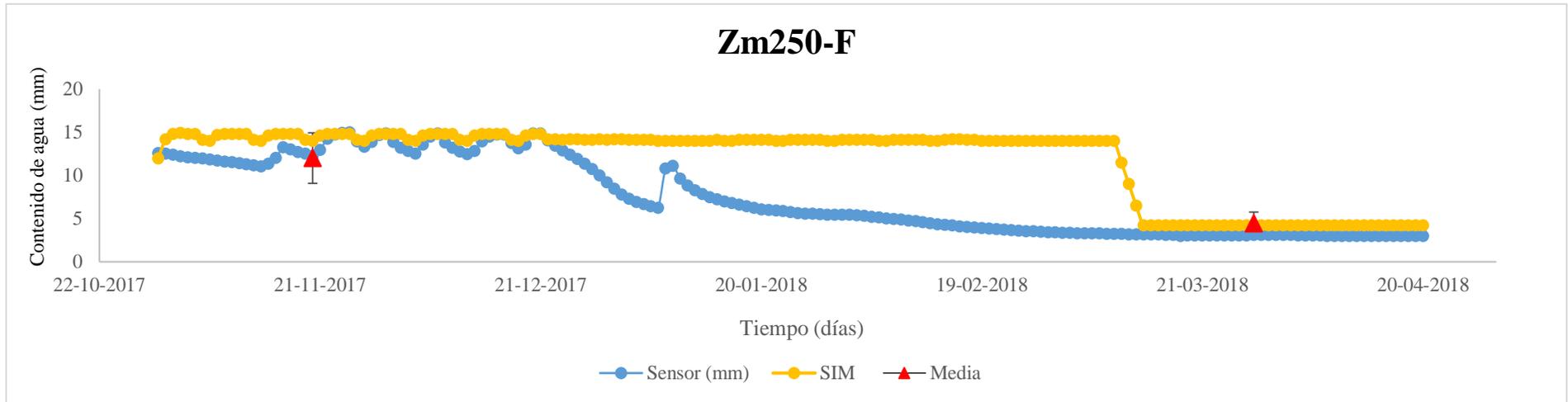
La conductividad hidráulica (longitud/tiempo) es una medida de la capacidad de un suelo para conducir el agua bajo un gradiente de potencial hidráulico que determina la tasa de infiltración, las prácticas de riego y drenaje y otros procesos hidrológicos que dependen del movimiento de agua en el suelo (Hillel, 2012). Se midió valores de  $K_s$  del suelo para utilizarlos como inputs en el modelo (anexo 6) junto con las propiedades físicas de las parcelas determinadas por (Rossi et al., 2017).

De los sensores de humedad (modelo Decagon EC-5) colocados a 50 cm de profundidad, se obtuvieron datos diarios para los tratamientos:  $Z_{m250-F}$ ,  $Z_{m250-Lm}$ ,  $Z_{m400-Lm}$ ,  $Z_{m250-Tr}$   $Z_{m250-Lm+Tr}$ , con el objetivo de calibrar el modelo AquaCrop para las condiciones del ensayo. Se realizaron simulaciones para el periodo en que se cultivó *Z. mays* (Figuras 10 a 14). Al realizar una apreciación visual de los resultados de contenido de agua simulados en relación con los contenidos de agua registrados por el sensor, se puede observar que, al inicio del periodo, entre los meses de octubre-enero, el modelo respondió para todos los tratamientos. Sin embargo, durante el mes de febrero los sensores registraron que el suelo se secó de forma repentina debido a que durante este mes se dejó de regar. Este cambio en el contenido de agua del suelo a los 50 cm de profundidad no fue captado por el modelo y provoca que la simulación sea insatisfactoria en todos los tratamientos.

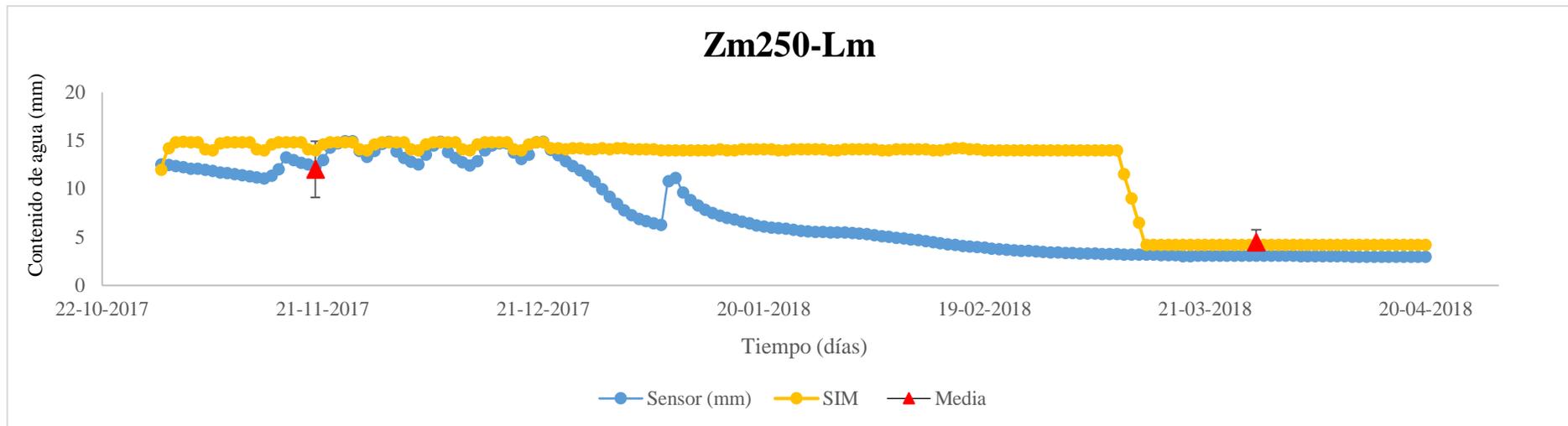
Cabe destacar que durante el periodo de simulación se tomaron muestras con barreno para medir el contenido de agua del suelo, las cuales se encuentran dentro del rango de lo observado en el sensor y el modelo. Es probable que el modelo no responda bien al realizar el balance hídrico al nivel de detalle esperado (50 cm de profundidad y diario), en donde claramente para el periodo comprendido entre enero y marzo el contenido de agua  $\sum$  SIM es mayor al  $\sum$  OBS, es decir, el modelo sobreestima el contenido de agua. De esta forma, se pudo observar que el enfoque principal está relacionado al cultivo, como se pudo apreciar tanto en las simulaciones de ETc como en las de rendimiento, donde si respondió satisfactoriamente.

Otro punto importante es que el modelo al simular el balance hídrico considera capas de suelo de una profundidad determinada y variables entre ellas. Es recomendable realizar el balance hídrico para el perfil de suelo completo para obtener mejores resultados de contenido de agua y para esto es necesario tener registros con sensores a varias profundidades y no solo a una, como en este caso. Las principales discrepancias en la predicción del contenido de agua también pueden estar asociadas a la variabilidad de las propiedades hidráulicas del suelo. En este sentido, al calibrar cada tratamiento se utilizaron los valores de las propiedades físicas e hidráulicas (ver Anexo 2) que representan a todo el terreno en donde se realizó el experimento, excepto para la  $K_s$  del primer horizonte que se midió para cada parcela del ensayo.

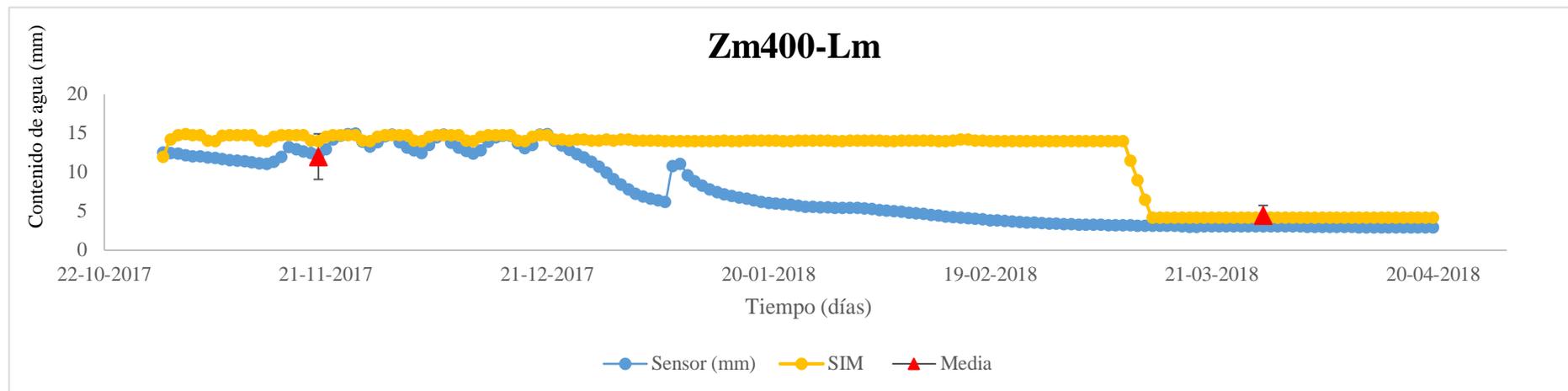
Según estos resultados, se puede decir que para la temporada de *Z. mays* el modelo cumplió con la simulación esperada para el rendimiento y evapotranspiración, no obstante, al simular el contenido de agua diario del suelo, el modelo no fue lo suficientemente robusto. Lo anterior ocurre principalmente porque a medida que avanza la temporada los contenidos de agua entregados por los sensores se van alejando de la media de los valores simulados.



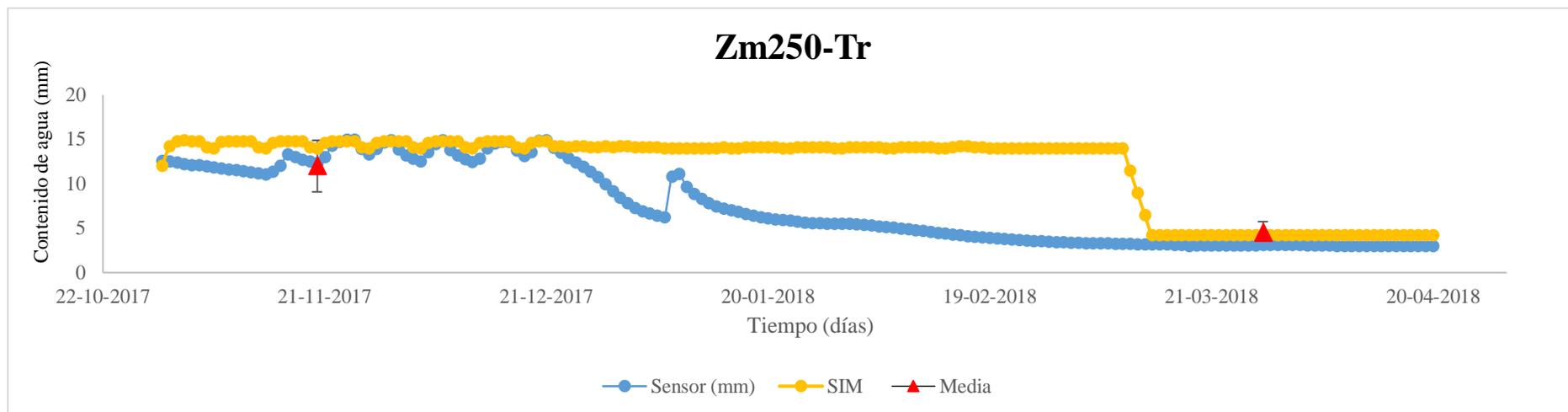
**Figura 10.** Resultados de contenido de agua a la profundidad de 50 cm medidos por el sensor, simulados por el modelo AquaCrop y medidos con barreno para el tratamiento Zm<sub>250</sub>-F.

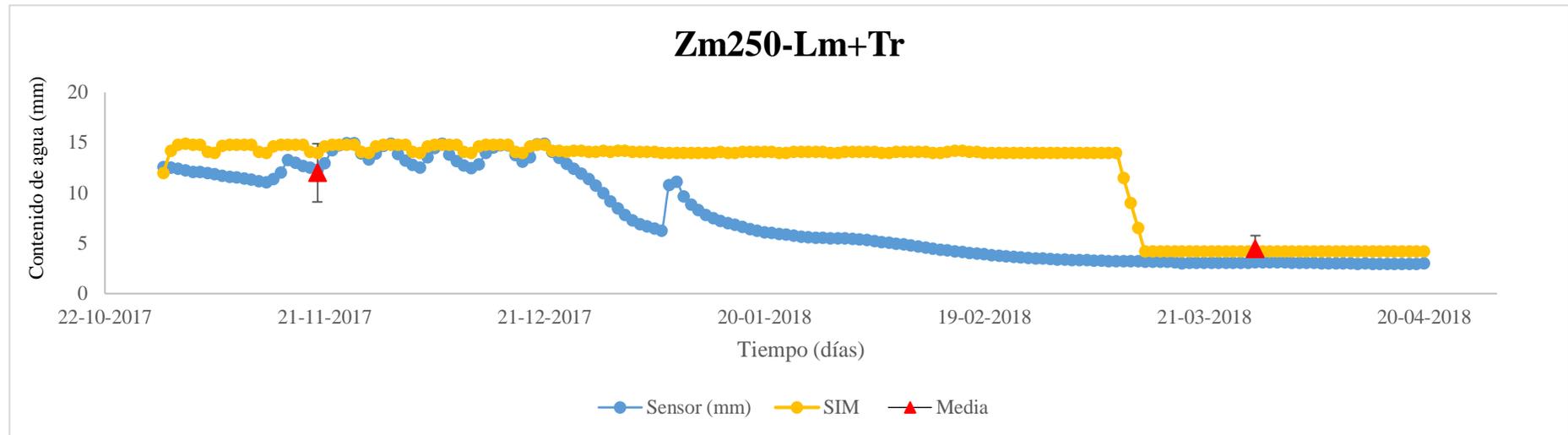


**Figura 11.** Resultados de contenido de agua a la profundidad de 50 cm medidos por el sensor, simulados por el modelo AquaCrop y medidos con barreno para el tratamiento Zm<sub>250</sub>-Lm.



**Figura 12.** Resultados de contenido de agua a la profundidad de 50 cm medidos por el sensor, simulados por el modelo AquaCrop y medidos con barreno para el tratamiento Zm<sub>400</sub>-Lm.





**Figura 14.** Resultados de contenido de agua a la profundidad de 50 cm medidos por el sensor, simulados por el modelo AquaCrop y medidos con barreno para el tratamiento Zm<sub>400</sub>-Tr.

## CONCLUSIONES

Al analizar los componentes del balance hídrico en sistemas de rotación *Z. mays* – cultivos de cobertura se observó un claro impacto entre los tratamientos en los que se incluye un cultivo de cobertura invernal y los que se deja el suelo desnudo durante esta época. A su vez entre los cultivos que se utilizaron también existen diferencias, tanto en el agua que se pierde por percolación profunda, como en la evapotranspiración. Según los resultados obtenidos bajo las condiciones propuestas en el ensayo, se puede afirmar que en el balance hídrico de un sistema de rotación de *Z. mays* – cultivos cubierta existe una menor percolación profunda de agua. Sin embargo, producto que, el riego de las parcelas se inició antes de la siembra, no se evidenciaron problemas en el establecimiento del cultivo asociados al agotamiento de agua por el cultivo de cobertura.

En caso de mantener un suelo con cobertura permanente, en contraste con un suelo desnudo durante todo el año, la percolación profunda se redujo en gran medida para el caso los tratamientos con *L. multiflorum* con montos inferiores a los calculados para praderas de *T. repens*. En las rotaciones *Z. mays* – cultivos cubierta se obtuvo resultados similares, donde los tratamientos que incluyen *L. multiflorum* registran una menor percolación profunda de agua que los tratamientos con *T. repens* y el barbecho.

El barbecho produjo una evaporación mayor que los otros tratamientos. La mayor evapotranspiración correspondió a las rotaciones *Z. mays* L con *L. multiflorum* seguido del *T. repens*. En cuanto al rendimiento promedio calculado para *Z. mays* no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, por lo tanto, según las condiciones del ensayo, los cultivos de cobertura no tendrían efecto en el rendimiento y percolación profunda durante este periodo.

A pesar de existir diferencias numéricas entre lo observado en el lisímetro y lo calculado, se aprecia que ambos siguen la misma tendencia. El tratamiento F<sub>0</sub>-F es el con mayor cantidad de agua percolada. El tratamiento que sigue es Tr<sub>0</sub>-Tr. Los tratamientos que obtuvieron una mejor respuesta fueron Zm<sub>250</sub>-Lm y Zm<sub>250</sub>-Tr+Lm.

Bajo las condiciones propuestas en el ensayo el modelo AquaCrop no respondió satisfactoriamente al realizar simulaciones de contenido de agua a 50 cm de profundidad. Sin embargo, es un modelo adecuado para simular el desarrollo del cultivo y predecir rendimiento. Es posible que al realizar el balance hídrico del perfil de suelo completo se obtengan buenos resultados, al incorporar dentro del análisis la variabilidad en las características del suelo.

## LITERATURA CITADA

- Abdelhadi, A.W., T. Hata, H. Tanakamaru, A. Tada and M.A. Tariq. 2000. Estimation of crop water requirements in arid region using Penman-Monteith equation with derived crop coefficients: a case study on Acala cotton in Sudan Gezira irrigated scheme. *Agricultural Water Management* 45: 203-214.
- Allen, R. G. 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.
- Anderson, R.G., Y.F. Jin and M.L. Goulden. 2012. Assessing regional evapotranspiration and water balance across a Mediterranean montane climate gradient. *Agricultural and Forest Meteorology* 166: 10-22.
- Berenguer, P., F. Santiveri, J. Boixadera and J. Lloveras. 2009. Nitrogen fertilisation of irrigated maize under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 30: 163-171.
- Blanco-Canqui, H., M.M. Claassen, and D.R. Presley. 2012. Summer cover crops fix nitrogen, increase crop yield, and improve soil-crop relationships. *Agronomy Journal* 104: 137-147.
- Blanco-Canqui, H., T. M. Shaver, J. L. Lindquist, C. A. Shapiro, R. W. Elmore, C. A. Francis, and G. W. Hergert, 2015, Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate Soils. *Agronomy Journal* 107(6): 2449-2474.
- Bodner, G., W. Loiskandl and H.-P. Kaul. 2007. Cover crop evapotranspiration under semi-arid conditions using FAO dual crop coefficient method with water stress compensation. *Agricultural Water Management* 93: 85-98.
- Bolliger, A., J. Magid, T.J.C. Amado, F.S. Neto, M.D.D. Ribeiro, A. Calegari, et al. 2006. Taking stock of the Brazilian "zero-till revolution": A review of landmark research and farmers' practice. *Advances in Agronomy* 91: 47-110.
- Campbell, R., R. Sojka and D. Karlen. 1984. Conservation tillage for soybean in the US southeastern coastal plain. *Soil and Tillage Research* 4: 531-541.
- Casanova, M., O. Salazar, O. Seguel and W. Luzio. 2013. Human-induced soil degradation in Chile. pp. 121-158. *The Soils of Chile*. (Hartemink, A. ed.) Springer, Dordrecht. 183 p.
- Cavero, J., L. Jimenez, M. Puig, J.M. Faci and A. Martinez-Cob. 2008. Maize Growth and Yield under Daytime and Nighttime Solid-Set Sprinkler Irrigation. *Agronomy Journal* 100: 1573-1579.
- Clark, A.J., A.M. Decker, J.J. Meisinger and M.S. McIntosh. 1997. Kill date of vetch, rye, and a vetch-rye mixture: II. Soil moisture and corn yield. *Agronomy Journal* 89: 434-441.
- Chapin, F. S., M. C. Chapin, P. A. Matson, and P. Vitousek. 2011. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer. 386 p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1996. Estudio Agrológico. Descripción de suelos materiales y símbolos: VI Región (Publicación N° 114). 425 p.
- Dabney, S.M., J.A. Delgado and D.W. Reeves. 2001. Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32: 1221-1250.

Dabney, S.M. 1998. Cover crop impacts on watershed hydrology. *Journal of Soil and Water Conservation* 53: 207-213.

Devices, D. Inc., 2016a. Dual Head Infiltrimeter-Operator's Manual. 45 p.

Diez, J. A., R. Caballero, R. Roman, A. Tarquis, M. C. Cartagena, and A. Vallejo. 2000. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain: *Journal of Environmental Quality* 29: 1539-1547.

De María, I.C. & Castro, O.M. 1993. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um latossolo roxo, sob sistemas de manejo com milho e soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 17: 471-477.

Dinnes, D.L., D.L. Karlen, D.B. Jaynes, T.C. Kaspar, J.L. Hatfield, T.S. Colvin, et al. 2002. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained midwestern soils. *Agronomy Journal* 94: 153-171.

Di Paolo, E. and M. Rinaldi. 2008. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field Crops Research* 105: 202-210.

Ebelhar, S.A., W.W. Frye and R.L. Blevins. 1984. Nitrogen from legume cover crops for no-tillage corn. *Agronomy Journal* 76: 51-55.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. ESTUDIO FAO: RIEGO Y DRENAJE 66, Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf> (Consultado el: 6 de Noviembre de 2018).

Fuentes, I., M. Casanova, O. Seguel, F. Najera and O. Salazar. 2014. Morphophysical pedotransfer functions for groundwater pollution by nitrate leaching in Central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 74: 340-348.

Gabriel, J.L. and M. Quemada. 2011. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: Yield, N uptake and fertiliser fate. *European Journal of Agronomy* 34: 133-143.

Gabriel, J.L., R. Muñoz-Carpena and M. Quemada. 2012. The role of cover crops in irrigated systems: Water balance, nitrate leaching and soil mineral nitrogen accumulation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 155: 50-61.

Gabriel, J. L., A. Garrido y M. Quemada, M. 2013. Cover crops effect on farm benefits and nitrate leaching: linking economic and environmental analysis. *Agricultural Systems* 121: 23-32.

Gehl, R.J., J.P. Schmidt, L.R. Stone, A.J. Schlegel and G.A. Clark. 2005. In situ measurements of nitrate leaching implicate poor nitrogen and irrigation management on sandy soils. *Journal of Environmental Quality* 34: 2243-2254.

Giacomini S. J.; C. Aita. I. C. Chiapinotto; A. P. Hübner; M. G. Marques y F. Cadore. 2004. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto: II – Nitrogênio

- acumulado pelo milho e produtividade de grãos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 28:751-762.
- Glave, A. 1979. El barbecho para trigo en la Región Semiárida Pampeana. Informe Técnico. N 15. INTA, EEA Bordenave 14 p.
- Gómez-Zotano, J., J. Alcántara-Manzanares, J.A. Olmedo-Cobo y E. Martínez-Ibarra. 2015. La sistematización del clima mediterráneo: identificación, clasificación y caracterización climática de Andalucía (España). *Revista de Geografía Norte Grande* 61: 161-180.
- Gulick, S.H., D.W. Grimes, D.S. Munk and D.A. Goldhamer. 1994. Cover-crop-enhanced water infiltration of a slowly permeable fine sandy loam. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1539-1546.
- Hansen, S., P. Abrahamsen, C.T. Petersen, M. Styczen. 2012. DAISY: model use, calibration and validation. *Transaction of American Society of Agricultural and Biological Engineers* 55(4): 1315-1333.
- Heng, L.K., T. Hsiao, S. Evett, T. Howell and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal* 101: 488-498.
- Hillel, D. 2012, *Soil and water: physical principles and processes*. 6<sup>th</sup> ed. Academic Press, Inc. Nueva York. 287 p.
- Hobbins, M. T., J. A. Ramirez, and T. C. Brown. 2001. The complementary relationship in estimation of regional evapotranspiration: An enhanced Advection-Aridity model: *Water Resources Research* 37(5): 1389-1403.
- Howell, T.A., S.R. Evett, J.A. Tolk and A.D. Schneider. 2004. Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dryland cotton on the northern Texas high plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 130: 277-285.
- Hubbard, R. K., T. C. Strickland, and S. Phatak. 2013. Effects of cover crop systems on soil physical properties and carbon/nitrogen relationships in the coastal plain of southeastern USA. *Soil & Tillage Research* 126: 276-283.
- Isidoro, D., D. Quilez and R. Aragues. 2006. Environmental impact of irrigation in La Violada District (Spain): II. Nitrogen fertilization and nitrate export patterns in drainage water. *Journal of Environmental Quality* 35: 776-785.
- Jensen, M. E., and R. G. Allen. 2016. *Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements*. 2<sup>nd</sup> ed. USA: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 744 p.
- Kane, D. L., y Yang, D. 2004. *Northern Research Basins Water Balance*: International Association of Hydrological Science (IAHS). Holanda: 281 p.
- Krüger, H.R. 1993. Barbecho para cultivo de verano y humedad del suelo en Bordenave (Pcia. de Bs. As.). pp. 295-296. In: XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mendoza. Argentina.
- Lu, Y.C., K.B. Watkins, J.R. Teasdale and A.A. Abdul-Baki. 2000. Cover crops in sustainable food production. *Food Reviews International* 16: 121-157.

- Martinez-Cob, A. 2008. Use of thermal units to estimate corn crop coefficients under semiarid climatic conditions. *Irrigation Science* 26: 335-345.
- McGuire, A.M., D.C. Bryant and R.F. Denison. 1998. Wheat yields, nitrogen uptake, and soil moisture following winter legume cover crop vs. fallow. *Agronomy Journal* 90: 404-410.
- Mitchell, J.P., D.W. Peters and C. Shennan. 1999. Changes in soil water storage in winter fallowed and cover cropped soils. *Journal of Sustainable Agriculture* 15: 19-31.
- Monzón, J.P., V.O. Sadras and F.H. Andrade. 2006. Fallow soil evaporation and water storage as affected by stubble in sub-humid (Argentina) and semi-arid (Australia) environments. *Field Crops Research* 98: 83-90.
- Moreno, F., J. A. Cayuela, J. E. Fernandez, E. FernandezBoy, J. M. Murillo, and F. Cabrera. 1996. Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain: *Agricultural Water Management* 32(1): 71-83.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50, 885–900.
- Munoz-Carpena, R., A. Ritter, D. D. Bosch, B. Schaffer, and T. L. Potter. 2008. Summer cover crop impacts on soil percolation and nitrogen leaching from a winter corn field: *Agricultural Water Management* 6 (95): 633-644.
- Najera, F., Y. Tapia, C. Baginsky, V. Figueroa, R. Cabeza and O. Salazar. 2015. Evaluation of soil fertility and fertilisation practices for irrigated maize (*Zea mays* L.) under Mediterranean conditions in central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 15: 84-97.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.
- Nielsen, D.C., D.J. Lyon, G.W. Hergert, R.K. Higgins, F.J. Calderón and M.F. Vigil. 2015. Cover crop mixtures do not use water differently than single-species plantings. *Agronomy Journal* 107: 1025-1038.
- Nielsen, D.C. and M.F. Vigil. 2005. Legume green fallow effect on soil water content at wheat planting and wheat yield. *Agronomy Journal* 97: 684-689.
- Nimmo, J.R., K.M. Schmidt, K.S. Perkins and J.D. Stock. 2009. Rapid measurement of field-saturated hydraulic conductivity for areal characterization. *Vadose Zone Journal* 8: 142-149.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile. 2017. Ficha Nacional: Información Nacional 2018. Santiago, Chile: ODEPA. 18 p.
- Puriccelli, C.A. 1977. Eficiencia hídrica de los barbechos y sus efectos sobre los rendimientos de los cultivos en un sector de la República Argentina. Comisión Nacional para la conferencia de las Naciones Unidas sobre el agua. INTA, EERA, Marcos Juárez – Córdoba. Reuniones técnicas y Científicas. Mar del Plata, 14 al 25 de marzo. 18 p.

- Poulovassilis, A., M. Anadranistakis, A. Liakatas, S. Alexandris and P. Kerkides. 2001. Semi-empirical approach for estimating actual evapotranspiration in Greece. *Agricultural Water Management* 51: 143-152.
- Quemada, M., M. Baranski, M.N.J. Nobel-de Lange, A. Vallejo and J.M. Cooper. 2013. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 174: 1-10.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Fereres. 2009a. *AquaCrop. Reference Manual*. FAO, Rome, Italy. 218 p.
- Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao, and E. Fereres. 2009b. *AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description*. *Agronomy Journal* 101(3): 438-447.
- Reeves, D. 2017. Cover crops and rotations. pp. 125-172. In: *Crops residue management*. CRC Press. 230 p.
- Reynolds, W. and D. Elrick. 1990. Poned infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Science Society of America Journal* 54: 1233-1241.
- Rivas-Martínez, S. 2010. *Sinopsis bioclimática de la Tierra y mapas bioclimáticos de Suramérica: Lecturas singulares*. 100 p.
- Ruiz-Ramos, M., J.L. Gabriel, N. Vazquez and M. Quemada. 2011. Evaluation of nitrate leaching in a vulnerable zone: effect of irrigation water and organic manure application. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9: 924-937.
- Römken, M., S. Prasad and F. Whisler. 1990. Surface sealing and infiltration. pp. 127-172. In: (M.G. Anderson and T.P. Burt. Eds. ) *Process Studies in Hillslope Hydrology*. Wiley, Chichester. 539 p.
- Rossi, M. 2017. Efectos de la rotación *Z. mays* L.-cultivos cubierta y de la fertilización nitrogenada, en la lixiviación de carbono orgánico y nitrógeno disueltos.. Tesis Magister. en Manejo de Suelos y Agua, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile. 69 h
- Salazar, O., Nájera, F. 2011. Contaminación de las aguas por el uso de fertilizantes nitrogenados y enmiendas orgánicas. *Boletín de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 24 : 147–152.
- Salazar, O., J. Vargas, F. Nájera, O. Seguel, and M. Casanova. 2014. Monitoring of nitrate leaching during flush flooding events in a coarse-textured floodplain soil. *Agricultural Water Management* 146: 218-227.
- Salado-Navarro, L.R. and T.R. Sinclair. 2009. Crop rotations in Argentina: Analysis of water balance and yield using crop models. *Agricultural Systems* 102: 11-16.
- Salmeron, M., R. Isla and J. Cavero. 2011. Effect of winter cover crop species and planting methods on maize yield and N availability under irrigated Mediterranean conditions. *Field Crops Research* 123: 89-99.

Salmeron, M., J. Cavero, D. Quilez and R. Isla. 2010. Winter Cover Crops Affect Monoculture Maize Yield and Nitrogen Leaching under Irrigated Mediterranean Conditions. *Agronomy Journal* 102: 1700-1709.

Sánchez-Martin, L., A. Sanz-Cobena, A. Mejjide, M. Quemada and A. Vallejo. 2010. The importance of the fallow period for N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes and nitrate leaching in a Mediterranean irrigated agroecosystem. *European Journal of Soil Science* 61: 710-720.

Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de Análisis Físicos de Suelos. Universidad de Concepción, Publicaciones del Departamento de Suelos y Recursos Naturales N°. 5. Chillán, Chile. 80 p.

Santibáñez, F. y J.M. Uribe. 1990. Atlas Agroclimático de Chile. Regiones V y Metropolitana. Laboratorio de Agroclimatología, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 65 p.

Sahoo, B.C. and S.N. Panda. 2014. Rainwater harvesting options for rice maize cropping system in rainfed uplands through root-zone water balance simulation. *Biosystems Engineering* 124: 89-108.

Salton, J.C.; J. Mielniczuk. 1995. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um solo podzólico vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS). *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 19: 313-319.

Santibáñez, F. 2018. Atlas Agroclimático de Chile Tomo III Regiones de Valparaíso, Metropolitana, del Libertador Bernardo O'Higgins y del Maule.

Siri-Prieto, G., O. Ernst, J. Ingold, D. Feller & M. Bastos. 2006. Cover crop and maturity group effects on soil water content and soybean yield. In 17<sup>th</sup> Triennial Conference International Soil Tillage Research Organization.

Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101: 426-437.

Steduto, P., T. Hsiao, E. Fereres and D. Raes. 2012. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO) N° 66. 511 p.

Todorovic, M., R. Albrizio, L. Zivotic, M.-T.A. Saab, C. Stöckle and P. Steduto. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal* 10: 509-521.

Tomlin, A., M. Shipitalo, W. Edwards and R. Protz. 1995. Earthworms and their influence on soil structure and infiltration. pp. 159-184. In: *Earthworm ecology and biogeography in North America*. CRC Press, Boca Raton FL. 245 p.

Thorup-Kristensen, K., J. Magid, and L. S. Jensen, 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy* 79: 227-302.

Unger, P.W. and M.F. Vigil. 1998. Cover crop effects on soil water relationships. *Journal of Soil and Water Conservation* 53: 200-207.

Vazquez, N., A. Pardo, M.L. Suso and M. Quemada. 2005. A methodology for measuring drainage and nitrate leaching in unevenly irrigated vegetable crops. *Plant and Soil* 269: 297-308

Vazquez, N., A. Pardo, M.L. Suso and M. Quemada. 2006. Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112: 313-323.

Ward, P.R., K.C. Flower, N. Cordingley, C. Weeks and S.F. Micin. 2012. Soil water balance with cover crops and conservation agriculture in a Mediterranean climate. *Field Crops Research* 132: 33-39.

Xu, C. Y., and V. P. Singh. 2005. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions. *Journal of Hydrology* 308(1-4): 105-121.

Zalidis, G., S. Stamatiadis, V. Takavakoglou, K. Eskridge and N. Misopolinos. 2002. Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88: 137-146.

Zhang, Y.Q., Q. Yu, C.M. Liu, J. Jiang and X.Y. Zhang. 2004. Estimation of winter wheat evapotranspiration under water stress with two semiempirical approaches. *Agronomy Journal* 96: 159-168.

## ANEXOS

### Anexo 1. Descripción morfológica del sitio de estudio.

Comuna de La Pintana, Provincia de Santiago, Región Metropolitana (33° 34' S – 70° 37' O, altitud 454 msnm).

| Horizonte      | Profundidad<br>(cm) | Descripción morfológica  |
|----------------|---------------------|--|
| A <sub>p</sub> | 0–37                | Pardo oscuro (10 YR 3/3); franco arcillo limosa; muy plástico; muy adhesivo; bloques subangulares medios y gruesos moderados; poros finos y medios abundantes; raíces finas y medias comunes; gravas angulares y redondeadas escasas (<5%); fuerte reacción al HCl; límite lineal abrupto. |
| C              | 37–55               | Variegado; arenosa; no plástico; no adhesivo; bloques subangulares medios y finos débiles; poros muy finos abundantes; raíces finas y medias escasas; reacción moderada al HCl; límite lineal abrupto.   |
| 2C             | 55–65+              | Pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4); arcillo limosa; muy plástico; muy adhesivo; maciza; poros muy finos abundantes; raíces medias y finas comunes; fuerte reacción al HCl.   |

### Anexo 2. Caracterización de propiedades físicas del sitio de estudio (Rossi, 2017).

| Horizonte /<br>Profundidad | Propiedades físicas e hidráulicas del suelo <sup>1,2</sup> |      |      |                |                            |   |                               |             |             |             |                    |                  |
|----------------------------|--|------|------|----------------|----------------------------|---|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|------------------|
|                            | Textura  |      |      | Clase textural | Da                         | Dr  | Contenido volumétrico de agua |             |             |             |                    | K <sub>sat</sub> |
|                            | A  | L    | a    |                |                            |   | 33 kPa                        | 1500 kPa    | PDR         | PDL         | AA                 |                  |
| cm                         | --- % ---  |      |      |                | --- Mg m <sup>-3</sup> --- | -----cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ----- |                               |             |             |             | cm h <sup>-1</sup> |                  |
| A <sub>p</sub> (0–42)      | 20,9   | 44,7 | 34,4 | F              | 1,42 ± 0,02                | 2,40  | 0,30 ± 0,02                   | 0,15 ± 0,00 | 0,10 ± 0,02 | 0,06 ± 0,00 | 0,15 ± 0,02        | 11,88 ± 13,32    |
| C (42–70)                  | 5,3  | 26,9 | 77,8 | aF             | 1,38 ± 0,03                | 2,65  | 0,20 ± 0,02                   | 0,06 ± 0,01 | 0,21 ± 0,02 | 0,07 ± 0,00 | 0,14 ± 0,03        | 17,64 ± 13,32    |
| 2C (70–90)                 | 25,1   | 42,9 | 32,0 | F              | 1,31 ± 0,06                | 2,72  | 0,28 ± 0,02                   | 0,17 ± 0,01 | 0,12 ± 0,01 | 0,11 ± 0,00 | 0,11 ± 0,00        | –                |

<sup>1</sup> Valores corresponden a promedio ± error estándar (n = 3)

<sup>2</sup> Da, densidad aparente; Dr, densidad real; CC, capacidad de campo; PMP, punto de marchitez permanente; PDR, poros de drenaje rápido; PDL, poros de drenaje lento; AA, agua aprovechable; K<sub>sat</sub>, conductividad hidráulica a saturación (n = 13).

**Anexo 3.** Caracterización de propiedades químicas del sitio de estudio (Rossi, 2017).

| Horizonte /<br>Profundidad | Propiedades químicas del suelo |                    |                   |      |                     |        |       |     |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|------|---------------------|--------|-------|-----|
|                            | MO                             | CE                 | pH (1:2,5<br>p/v) |      | TDC                 | TOC    | TDN   | C:N |
|                            |                                |                    | H <sub>2</sub> O  | KCl  |                     |        |       |     |
| cm                         | %                              | dS m <sup>-1</sup> | -                 | -    | mg kg <sup>-1</sup> |        |       |     |
| Ap (0–22)                  | 1,12                           | 0,97               | 8,99              | 7,56 | 115,38              | 103,72 | 19,99 | 6   |
| C (42–70)                  | 0,19                           | 1,10               | 8,10              | 7,70 | 28,51               | 15,07  | 9,22  | 3   |
| 2C (70–90)                 | 0,52                           | 1,82               | 8,74              | 7,58 | 23,20               | 11,39  | 6,60  | 4   |

**Anexo 4.** Caracterización de propiedades químicas del sitio de estudio, continuación.

| Horizonte /<br>Profundidad | Propiedades químicas del suelo |      |      |                     |      |                  |                                      |                 |                |  |
|----------------------------|--------------------------------|------|------|---------------------|------|------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------|--|
|                            | Nutrientes disponibles         |      |      |                     |      |                  | Cationes de<br>intercambio           |                 |                |  |
|                            | Cu                             | Fe   | Mn   | P <sub>-Olsen</sub> | Zn   | Ca <sup>+2</sup> | Mg <sup>+2</sup>                     | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> |  |
| cm                         | mg kg <sup>-1</sup>            |      |      |                     |      |                  | cmol <sup>(+)</sup> kg <sup>-1</sup> |                 |                |  |
| Ap (0–22)                  | 4,04                           | 5,99 | 5,56 | 12,60               | 1,38 | –                | –                                    | 0,2             | 2,2            |  |
| C (42–70)                  | 0,8                            | 4,41 | 1,24 | 0,50                | 0,33 | 21,3             | 2,3                                  | 0,5             | 0,6            |  |
| 2C (70–90)                 | 2,06                           | 6,99 | 2,03 | 1,50                | 0,63 | 19,5             | 2,1                                  | 0,7             | 0,5            |  |

**Anexo 5.** Suministro parcializado y total de los fertilizantes utilizados en el ensayo (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O) según tratamientos y ensayo.

| Ensayo                          | Tratamiento      | Primera<br>aplicación |                               |                  | Segunda<br>aplicación |                               |                  | Total |                               |                  |
|---------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|------------------|-------|-------------------------------|------------------|
|                                 |                  | N                     | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N                     | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | N     | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |
| ----- kg ha <sup>-1</sup> ----- |                  |                       |                               |                  |                       |                               |                  |       |                               |                  |
| 1                               | B                | 0                     | 0                             | 10               | 0                     | 0                             | 0                | 0     | 10                            | 0                |
|                                 | Lm (0 N)         | 0                     | 10                            | 450              | 0                     | 0                             | 750              | 0     | 10                            | 1200             |
|                                 | Lm (150 N)       | 150                   | 10                            | 450              | 0                     | 0                             | 750              | 150   | 10                            | 1200             |
|                                 | Tr (0 N)         | 0                     | 10                            | 450              | 0                     | 0                             | 750              | 0     | 10                            | 1200             |
|                                 | Tr (150 N)       | 150                   | 10                            | 450              | 0                     | 0                             | 750              | 150   | 10                            | 1200             |
| 2                               | Zm–B (250 N)     | 0                     | 10                            | 450              | 250                   | 0                             | 750              | 250   | 10                            | 1200             |
|                                 | Zm–B (400 N)     | 150                   | 10                            | 450              | 250                   | 0                             | 750              | 400   | 10                            | 1200             |
|                                 | Zm–Lm (250 N)    | 0                     | 10                            | 450              | 250                   | 0                             | 750              | 250   | 10                            | 1200             |
|                                 | Zm–Lm (400 N)    | 150                   | 10                            | 450              | 250                   | 0                             | 750              | 400   | 10                            | 1200             |
|                                 | Zm–Tr (250 N)    | 0                     | 10                            | 450              | 250                   | 0                             | 750              | 250   | 10                            | 1200             |
|                                 | Zm–Tr (400 N)    | 150                   | 10                            | 450              | 250                   | 0                             | 750              | 400   | 10                            | 1200             |
|                                 | Zm–Lm+Tr (250 N) | 0                     | 10                            | 450              | 250                   | 0                             | 750              | 250   | 10                            | 1200             |
|                                 | Zm–Lm+Tr (400 N) | 150                   | 10                            | 450              | 250                   | 0                             | 750              | 400   | 10                            | 1200             |

**Anexo 6.** Conductividad hidráulica de las parcelas medidas con cilindro infiltrómetro.

| <b>Tratamiento</b>            | <b>Ks</b><br>--- cm h <sup>-1</sup> --- |
|-------------------------------|---|
| <b>F</b>                      | 9,54                                    |
| <b>Lm<sub>0</sub></b>         | 3,55                                    |
| <b>Lm<sub>150</sub></b>       | 16,02                                   |
| <b>Tr<sub>0</sub></b>         | 1,92                                    |
| <b>Tr<sub>150</sub></b>       | 4,39                                    |
| <b>Zm<sub>250</sub>-F</b>     | 6,23                                    |
| <b>Zm<sub>400</sub>-F</b>     | 6,23                                    |
| <b>Zm<sub>250</sub>-Lm</b>    | 6,41                                    |
| <b>Zm<sub>400</sub>-Lm</b>    | 6,41                                    |
| <b>Zm<sub>250</sub>-Tr</b>    | 18,76                                   |
| <b>Zm<sub>400</sub>-Tr</b>    | 18,76                                   |
| <b>Zm<sub>250</sub>-Lm+Tr</b> | 31,86                                   |
| <b>Zm<sub>400</sub>-Lm+Tr</b> | 2,42                                    |