

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



EFFECTO DE MICORRIZAS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ BAJO
CUATRO NIVELES DE RIEGO

FRANCO ANIBAL SANDOVAL PARADA

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

CHILLÁN-CHILE

2021

**EFFECTO DE MICORRIZAS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ BAJO
CUATRO NIVELES DE RIEGO**

Aprobado por:

Octavio Lagos Roa
Ingeniero Civil Agrícola, Ph.D.
Profesor Asociado

Profesor Guía

Camilo Souto Escalona
Ingeniero Civil Agrícola, Dr
Profesor Asistente

Profesor Asesor

Jerónimo Paredes Cáceres
Licenciado en Matemática, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, Ph.D.
Profesor Asistente

Directora de Departamento

María González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.
Profesora Asociada

Decana





La agricultura es la profesión propia del sabio, la más adecuada al sencillo y la ocupación más digna para todo hombre libre.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre que fue un pilar fundamental durante mi carrera universitaria, a mi núcleo familiar y otros familiares, amigos, compañeros y conocidos, todos que de alguna manera han aportado en mi vida de tal forma que me han hecho la persona que hoy soy.

Al profesor Octavio Lagos por la orientación, por el apoyo y confianza durante el proyecto, a Juan Navarro y Jorge Concha por el enorme apoyo en terreno, de la misma manera agradezco a la Universidad de Concepción, a la Facultad de Ingeniería Agrícola por los conocimientos entregados y por la dedicación de sus docentes.

Por otra parte, dar agradecimientos tanto a la empresa BAYER quien solicitó y facilitó información y los recursos necesarios para realizar este estudio, como a Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería CRHIAM (ANID/FONDAP/15130015) quien financió la instrumentación para esta investigación.

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	3
1 INTRODUCCIÓN.....	4
2 OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo general.....	7
2.2 Objetivos específicos	7
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	8
3.1 Riego y manejo del maíz.....	8
3.2 Riego por pivote central	10
3.3 Micorrizas.....	13
3.4 Índice de vegetación	15
4 METODOLOGÍA.....	16
4.1 Sitio de estudio	16
4.2 Marco de plantación.....	17
4.3 Descripción del sistema de riego por pivote central.....	19
4.4 Planificación del riego	22
4.5 Contenido de humedad en el suelo	23
4.6 Largo mazorca	25
4.7 Masa raíz adventicia	26
4.8 Imágenes multiespectrales	30
4.9 Producción de grano.....	31
4.10 Prueba de aplicación de riego.....	33
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
6 PRODUCCIÓN DE MAÍZ	53
7 CONCLUSIÓN.....	55
8 LITERATURA CITADA.....	57
9 ANEXO.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1	. Etapas de desarrollo fenológico de la planta de maíz.....	
Tabla 2	. Coeficiente de cultivo (kc) para la planta de maíz.....	9
Tabla 3	. Numero de boquilla seleccionada y caudal de la boquilla (Q boquilla), para el ensayo de maíz según los cálculos teóricos realizados para una reposición desde el 25% de la lámina de agua aplicada hasta el 100% programados en el control del pivote.....	21
Tabla 4	. Fecha de riego, evapotranspiración potencial (ET_0), etapa del cultivo de maíz, coeficiente de cultivo (Kc), evapotranspiración del cultivo (ETc) y lamina aplicada al cultivo.....	38
Tabla 5	. Lámina de agua aplicada a la fecha por el pivote al cultivo de maíz a lo largo de toda la temporada.....	39
Tabla 6	. Contenido de humedad gravimétrico (H. gravimétrico) del día 16/02/19 en 4 distintas profundidades de suelo, en un cultivo de maíz sin y con micorrizas y con una reposición del 100% de la ETc. (T7 y T8 respectivamente).....	44
Tabla 7	. Contenido de humedad gravimétrico (H. gravimétrico) del día 27/02/19 en 4 distintas profundidades de suelo, en un cultivo de maíz sin y con micorrizas y con una reposición del 25% y 100% de la ETc. (T1, T2, T7 y T8).....	45
Tabla 8	. Contenido de humedad gravimétrico (H. gravimétrico) del día 11/03/19 en distintas profundidades de suelo, en un cultivo de maíz sin y con micorrizas y con una reposición del 25% y 100% de la ETc. (T1, T2, T7 y T8).....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	. Estados fenológicos de la planta de maíz.....	9
Figura 2	. Disposición de superficies adecuadas al riego por pivote central. Fuente: Google Earth.....	10
Figura 3	. Ejemplo de un pivote central donde se divisa la estructura, tubería principal y aspersores.....	12
Figura 4	. Ubicación del predio donde se realizó el estudio. Fuente: Google Earth.....	16
Figura 5	. Diseño experimental del maíz regado por pivote. Fuente: Google Earth.....	17
Figura 6	. Esquema de la distribución de las unidades de tratamiento, donde los tratamientos impares no poseen injerto de micorrizas y los tratamientos pares poseen injerto de micorrizas. T1 y T2 tienen una reposición del 25% de la ETC., el nivel de reposición aumenta 25% en la siguiente fila (T3 y T4), hasta el 100% que serían T7 y T8.	19
Figura 7	. Esquema del segundo tramo del pivote utilizado para el ensayo. Fuente: Google Earth.....	20
Figura 8	. Esquema ubicación estación Santa Rosa INIA. Fuente: Google Earth.....	23
Figura 9	. Estratificación del suelo para monitorear el contenido de humedad por cuatro sensores por estación, hasta una profundidad de suelo de 100 cm.....	24
Figura 10	. Ejemplo de medición del largo de la mazorca principal para cada tratamiento del cultivo.....	25
Figura 11	. Ejemplo marco extracción de suelo establecido para medir la masa de raíz adventicia del cultivo.....	27

Figura 12 . Raíz de la planta de maíz extraída dentro de un marco de extracción de 15x15x30 cm de suelo, después de haber realizado el lavado con agua.....	28
Figura 13 . Muestras de raíz de las plantas de maíz extraídas dentro de un marco de extracción de 15x15x30 cm de suelo, antes de ser introducidas al horno 60°C por 48 horas.....	29
Figura 14 . Esquema puntos seleccionados para el seguimiento de NDVI para el cultivo de maíz, descargadas de la plataforma SpiderWebGIS, bajo el servidor Plas.....	30
Figura 15 . Mazorca de maíz que evidencia el avance de la línea de leche a la mitad del grano.....	31
Figura 16 . Cosecha de la mazorca principal de maíz realizada el día 24/05/19 dividida y rotulada en 3 repeticiones por tratamiento.....	32
Figura 17 . Disposición de los vasos recolectores para la prueba de aplicación de una lámina de agua de 40 mm en el pivote del ensayo.....	34
Figura 18 . Altura de agua recolectada por los vasos de prueba en una aplicación de 90 mm de agua en un pivote central.....	35
Figura 19 . Altura de agua recolectada por los vasos de prueba en una aplicación de 40 mm de agua en un pivote central.....	36
Figura 20 . Evolución de la tensión matricial del suelo (TMS) para el tratamiento de riego T1 a cuatro profundidades 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm, 87,5 cm. Capacidad de campo (CC), que representa la energía de retención de agua en el suelo de 33 cb.....	40
Figura 21 . Evolución de la tensión matricial del suelo (TMS) para el tratamiento de riego T7 a cuatro profundidades 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm, 87,5 cm. y capacidad de campo (CC), que representa la energía de retención de agua en el suelo de 33 cb.....	41

Figura 22 . Evolución de la tensión matricial del suelo (TMS) para el tratamiento de riego T2 a cuatro profundidades 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm, 87,5 cm. Capacidad de campo (CC), que representa la energía de retención de agua en el suelo de 33 cb.....	42
Figura 23 . Evolución de la tensión matricial del suelo (TMS) para el tratamiento de riego T8 a cuatro profundidades 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm, 87,5 cm. Capacidad de campo (CC), que representa la energía de retención de agua en el suelo de 33 cb.....	42
Figura 24 . NDVI del cultivo para los tratamientos T1 y T2 del ensayo de maíz a lo largo de toda la temporada.....	48
Figura 25 . NDVI para los tratamientos T7 y T8 del ensayo de maíz a lo largo de toda la temporada.....	49
Figura 26 . Promedio largo de mazorca principal para los distintos tratamientos de riego. Medidas con la misma letra en barra no representa diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p<0.05$).....	50
Figura 27 . Promedio masa raíz adventicia del maíz para los distintos tratamientos de riego. Medidas con la misma letra en barra no representa diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p<0.05$).....	52
Figura 28. Masa promedio de grano seco de maíz para cada tratamiento. Medidas con la misma letra en barra no representa diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p<0.05$).....	53

EFFECTO DE MICORRIZAS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ BAJO CUATRO NIVELES DE RIEGO

EFFECT OF MYCORRHIZES ON CORN PRODUCTION UNDER FOUR IRRIGATION LEVELS

Palabras claves: Riego por pivote, Micorrizas, Maíz

RESUMEN

El ensayo fue realizado en la Universidad de Concepción campus Chillán, comuna de Chillán, XVI Región de Chile, durante la temporada 2018-2019. El objetivo fue comparar el efecto de las micorrizas sobre la producción de maíz bajo cuatro niveles de riego realizado por pivote central. El área de estudio es de 1.574 m² maíz, divididos en dos, uno con una superficie de 705 m² sin la presencia de micorrizas y otro de 856 m² con la presencia de un consorcio de 4 cepas de hongos micorrizicos vivos (*Glamus intraradices*, *Glomus aggregatum*, *Glomus mosseae*, *Glomus etunicatum*). Los resultados obtenidos muestran que en cada nivel de riego no existe una diferencia significativa en la producción de grano. Sin embargo, se observa que, bajo estrés hídrico, el cultivo con presencia de micorrizas obtuvo una menor reducción en la producción. Con respecto a la masa de la raíz adventicia de la planta, los tratamientos T2, T4, T6 y T8 obtuvieron en promedio mayor masa. En el largo de la mazorca principal, los tratamientos T2, T4 y T8 obtuvieron en promedio mayor largo. Los datos de NDVI muestran que entre los tratamientos T1 y T2, T2 presenta valores más altos. Entre los tratamientos T7 y T8 no evidencian

una diferencia notoria en los valores de NDVI. La reducción en la aplicación de agua en la planta afecta negativamente en la producción, independiente del uso de micorrizas.



EFFECT OF MYCORRHIZES ON CORN PRODUCTION UNDER FOUR IRRIGATION LEVELS

Keywords: Pivot irrigation, mycorrhiza, corn

SUMMARY

The test was carried out at the Universidad de Concepción campus Chillán, commune of Chillán, XVI Region of Chile, during the 2018-2019 season. The objective was to compare the effect of mycorrhizae on corn production under four levels of central pivot irrigation. The study area is 1,574 m² corn, divided into two zones, one with an area of 705 m² without the presence of mycorrhizae and another of 856 m² with the presence of a consortium of 4 strains of live mycorrhizal fungi (*Glomus intraradices*, *Glomus aggregatum*, *Glomus mosseae*, *Glomus etunicatum*). The results obtained show that at each irrigation level there is no significant difference in grain production. However, it is observed that, under water stress, the crop with the presence of mycorrhizae obtained a lower reduction in production. Regarding the plant's adventitious root mass, T2, T4, T6 and T8 treatments obtained higher masses on average. In the length of the main ear, the treatments T2, T4 and T8 obtained in average more length. NDVI data show that between T1 and T2 treatments, T2 presents higher values. Between the T7 and T8 treatments, they do not show a notorious difference in the NDVI values. The reduction in water application in the plant negatively affects production, regardless of the use of mycorrhiza.

1 INTRODUCCIÓN

El clima es un sistema complicado que muestra muchos grados de libertad y complejo (no lineal, dinámico, sensible). Es una verdad que el clima siempre ha estado cambiando y siempre estará cambiando. En las últimas décadas, se ha llevado un debate sobre las causas del aumento de la temperatura del aire en la superficie de nuestro planeta, especialmente si se trata por actividades antropogénicas o de origen natural, realizándose distintos análisis sobre las cuestiones claves de la comprensión científica del cambio climático global contemporáneo (Christy et al. 2007). Actualmente en Chile por el efecto de la variabilidad climática existe un periodo prolongado de sequía. Las sequías causan grandes pérdidas de producción agrícola en todo el mundo. Durante 1964-2007, los desastres climáticos extremos causaron reducciones en el rendimiento a gran escala (maíz, arroz y trigo) en el mundo y se espera que el cambio climático exacerbe el fenómeno y provoque periodos de sequías más frecuentes e intensos, incluso en lugares donde se esperan aumentos en la precipitación general.

El estrés hídrico afecta negativamente al establecimiento de la planta y, posteriormente, al crecimiento y desarrollo. También reduce el crecimiento de las plantas al afectar diversos procesos fisiológicos y bioquímicos (Jaleel, 2008). En general, la sequía reduce tanto la absorción de nutrientes por parte de las raíces como el transporte desde las raíces hasta los brotes, debido a

las tasas de transpiración restringidas, al transporte activo y a la permeabilidad de la membrana.

Por otra parte, se sabe que la simbiosis de las raíces de las plantas con los hongos de Micorriza Arbuscular es una de las estrategias de plantas más antiguas y extendidas para mejorar la adquisición de nutrientes y para enfrentar el estrés ambiental (Brachmann y Parniske, 2006). La micorriza arbuscular (AM por sus siglas en inglés) es un hongo que se encuentra en la zona de las raíces de las plantas. Las esporas del hongo presentes en la rizosfera logran una comunicación química que hace germinar la espora de hongos y el crecimiento de las hifas hacia la raíz del huésped. Una vez que las hifas entran en contacto con la raíz, las células epidérmicas de la raíz forman un aparato de pre-penetración que guía las hifas para romper las células epidérmicas. El hongo luego crece intercelularmente, y finalmente, las hifas crecen en las células corticales de la raíz. Los arbusculos altamente ramificados proporcionan una gran interfaz para el intercambio de nutrientes. Los nutrientes como fósforo y nitrógeno, se transportan desde los hongos hasta la planta huésped. Recíprocamente los hongos se alimentan de los lípidos y azúcares sintetizados por la planta (Bonfante y Genre, 2010).

Se han realizado diversos estudios sobre la influencia de la micorriza en los cultivos. Por ejemplo, en la tolerancia a la sequía y la enfermedad de la pudrición carbonosa en el Caupí (Oyewole, 2017). También se ha estudiado los efectos de las micorrizas en la producción de grano, absorción de

nutrientes y contenido de aceite de girasol bajo estrés hídrico (Heidari, 2014) y en uso de micorrizas para atenuar el efecto de la compactación del suelo, además del aporte a la captación de nutrientes para un cultivo de maíz. Obteniéndose en todas las investigaciones resultados que indican que el uso de la AM contribuye a una mejor captación de nutrientes, agua y además mejora las condiciones físicas del suelo (Miransari, 2009).



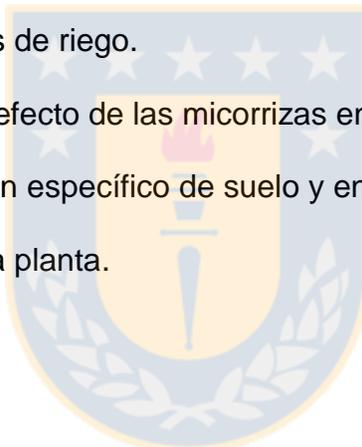
2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

El Objetivo de este trabajo es: Evaluar el efecto de las micorrizas sobre la producción de maíz (*Zea Mayz L.*) bajo cuatro niveles de riego.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de micorrizas sobre la dinámica temporal y espacial del índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).
- Comparar el efecto de las micorrizas sobre la producción de maíz con cuatro niveles de riego.
- Comparar el efecto de las micorrizas en la masa de raíces adventicias en un volumen específico de suelo y en el largo de la mazorca principal de la planta.

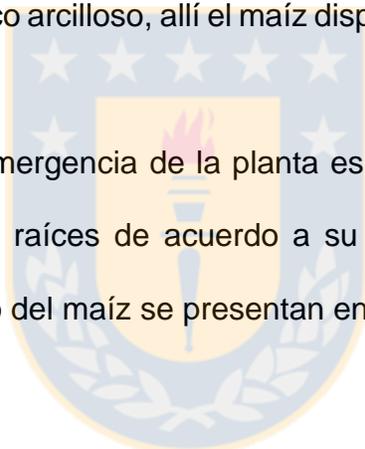


3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Riego y manejo del maíz

El maíz (*Zea Mays* L.) es una planta de clase C4, de la familia gramineae. En Chile, el cultivo de maíz se extiende desde la Región de Arica y Parinacota hasta la región de La Araucanía. Esta distribución regional evidencia a la planta una gran adaptación a diferentes tipos de suelo. La profundidad de raíz está en un rango entre 80 y 120 cm si las condiciones del suelo lo permiten (Allen et al., 1998). Los rendimientos más altos generalmente se logran en suelos franco o franco arcilloso, allí el maíz dispone de mayor cantidad de agua y nutrientes.

La germinación y emergencia de la planta es seguida de una fase la cual el maíz desarrolla sus raíces de acuerdo a su estructura foliar definitiva. Las etapas de desarrollo del maíz se presentan en la Figura 1 y Tabla 1 y 2.



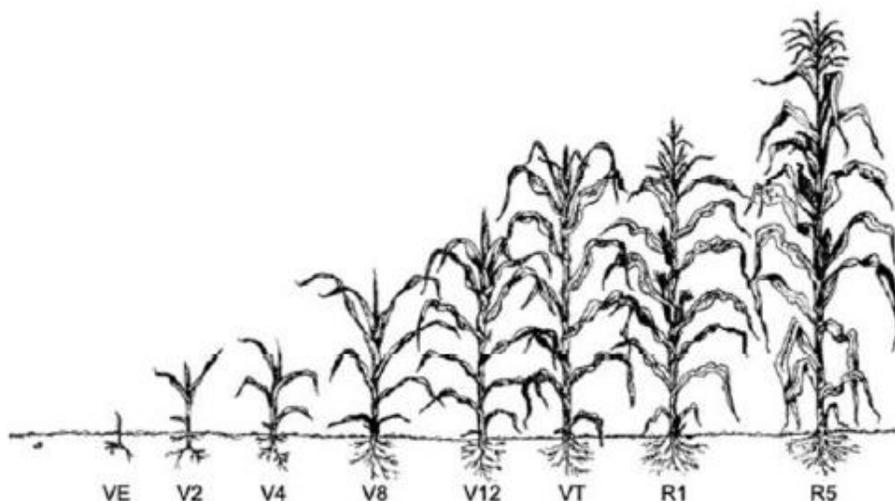


Figura 1. Estados fenológicos de la planta de maíz. Fuente: Boletín INIA – N°303.

Tabla 1. Etapas de desarrollo fenológico de la planta de maíz.

Etapa Vegetativa		Etapa Reproductiva	
VE	Emergencia	R1	Seda
V1	Primera hoja	R2	Ampollamiento
V2	Segunda hoja	R3	Grano lechoso
V(n)	n-enésima hoja	R4	Grano pastoso
VT	Espigadura	R5	Llenado de grano
		R6	Madurez fisiológica

Tabla 2. Coeficiente de cultivo (kc) para la planta de maíz.

Etapa del cultivo	kc	Etapa del cultivo	kc
V2	0,10	R1	
V4	0,18	R2	
V6	0,35	R3	1,10
V8	0,51	R4	
V10	0,69	R5	
V12	0,88	R6	
V14	1,01		
V16	1,10		

3.2 Riego por pivote central

El pivote central es un sistema de riego autopropulsado que consiste en un lateral único, montado sobre torres que giran sobre su eje, regando una superficie en forma de círculo o semi-círculo (Figura 2).

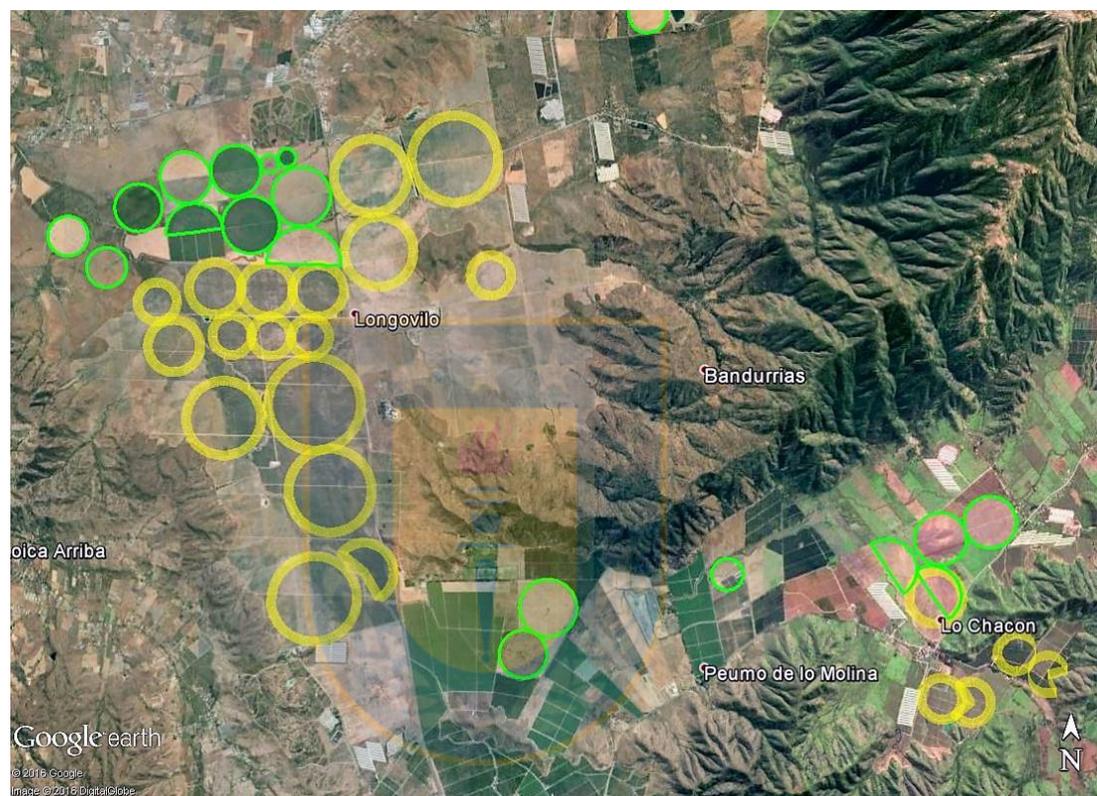


Figura 2. Disposición de superficies adecuadas al riego por pivote central.
Fuente: Google Earth.

Uno de los extremos del lateral está anclado a una estructura de soporte central, la que también supe de agua al equipo. El otro extremo, en tanto, se mueve libremente al mismo tiempo que aplica el riego. El agua es conducida a través de la estructura del pivote y entregada al cultivo mediante aspersores de tamaño variable, que pueden oscilar en tasas de aplicación entre 20 y 3402

$L h^{-1}$. Los aspersores van aumentando su caudal a medida que se alejan del centro del pivote para lograr un riego más uniforme, esto debido a la diferencia de velocidad lineal en cada punto a lo largo del equipo.

El conjunto formado por tuberías, estructura y aspersores entre dos torres se le denomina tramo y varía desde los 30 a 50 m de longitud (Figura 3). Al final del equipo, después de la última torre, se encuentra una tubería de diámetro menor, suspendida por cables, denominado voladizo, en cuyo extremo se ubica un cañón de riego, lo que permite aumentar el radio mojado y, por ende, el área de riego.

La región del Maule lidera a nivel nacional en términos de número de equipos, con 491 unidades, un 24,2% del total del país, la siguen la región de Ñuble, con 463 (22,8%), y la del Biobío, con 449 (22,1%). Entre las tres suman casi el 70% de los equipos instalados en Chile.

Actualmente estas máquinas se asocian a una cobertura de 96.712 hectáreas (ha). A diferencia de la distribución regional en número de equipos, es la región del Biobío la que lidera en superficie a nivel nacional, con 22.022 ha, un 22,8% del total del país. Luego se ubican Maule, con 21.238 ha (22%), y Ñuble, con 20.452 ha (21,1%); sumadas, representan casi un 66% del total en Chile.



Figura 3. Ejemplo de un pivote central donde se observa la estructura, la tubería principal y el paquete de aspersores. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Micorrizas

Los hongos micorrícicos arbusculares (AM) son biótrosos obligados que colonizan la corteza de la raíz y desarrollan un micelio externo que cubre el suelo que rodea las raíces de las plantas. Las estrigolactonas, liberadas por las raíces del hospedador, pueden inducir la germinación de esporas de hongos AM y el crecimiento de hifas; las hifas fúngicas ramificadas crecen hacia la raíz del huésped (Waters, 2017). Este micelio extraradical producido por la simbiosis entre la planta y la AM se ha encontrado que es 10 a 40 veces más extenso que las raíces (Giovannetti, 2001). La simbiosis entre el hongo AM funciona como un área de superficie de absorción adicional para la planta, aumenta su capacidad de buscar nutrientes más allá de la zona de agotamiento. Esta red de hifas representa, por lo tanto, una estrategia de adaptación para aumentar el suministro de nutrientes y minerales a la planta. Aunque el principal beneficio de la simbiosis AM es un estado mejorado de Fósforo de la planta. La colonización de la raíz por hongos AM a menudo resulta en una mayor absorción de otros nutrientes en el suelo, como nitrógeno, cobre y zinc (Smith, 2011). El establecimiento de la simbiosis de AM, por lo tanto, representa una innovación importante para la adaptación de la planta, y puede considerarse como el primer mecanismo desarrollado por la planta para hacer frente a la baja disponibilidad de Fósforo en los ecosistemas naturales. Es por eso que se sugirió que los hongos AM juegan un papel clave en la colonización de la tierra por las plantas. Esta asociación planta-hongo ha demostrado ser una estrategia evolutiva exitosa, ya que más del 80% de todas

las especies de plantas terrestres viven en simbiosis con hongos AM (Schüßler et al., 2001). Sin embargo, los beneficios para la planta no son gratuitos y la planta transfiere carbono fijo, azúcares y lípidos a los hongos AM (Bago y Pfeffer, 2000).

En la última década se han realizado diversas investigaciones que relacionan el hongo con plantas de interés comercial, con el objetivo que la producción no se vea afectada frente a diversas situaciones de estrés en la planta. Por ejemplo, un estudio reveló que el estrés hídrico hizo que disminuyera significativamente el rendimiento de grano de girasol, pero con la aplicación de micorrizas aumentó el rendimiento de grano y el contenido de aceite significativamente en comparación con el tratamiento de control. Entre dos especies de micorrizas, *G. etanicatum* tuvo el mayor efecto en aumentar el rendimiento de grano y el contenido de nutrientes del girasol (Heidari, 2014). Otro estudio indicó que la inserción de AM (*Glomus deserticola* y *Gigaspora gigantea*) da mejores posibilidades de tolerar el efecto sobre los cultivares de caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.) susceptibles a la sequía, así como la resistencia al patógeno (*Macrophomina phaseolina*) que es uno de los más destructivos en los trópicos y subtropicos (Oyewole, 2017). También se evaluó los efectos del uso de AM en un cultivo de maíz donde se concluyó que el uso del hongo alivia los efectos estresantes de la compactación del suelo mediante la mejora de absorción de nutrientes, se concluye también que la eficiencia de las AM en suelos muy compactados depende mucho de la competencia con otros microorganismos por los recursos, especialmente el oxígeno. Esto puede

cambiar la naturaleza de la relación entre AM y la planta huésped de simbiótica a parasitaria (Miransari, 2009). Las AM también ayudan al maíz en la absorción de Mercurio (Hg) y nutrientes presentes en un suelo contaminado, siendo la simbiosis entre el hongo y la planta un gran contribuyente al movimiento de Hg en el medio ambiente (Debeljak et al., 2018).

3.4 Índice de vegetación

Para el monitoreo de la vegetación, un VI ampliamente utilizado es el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI por sus siglas en inglés y generalmente suele ser aplicado a diferentes escalas local, regional y global. El NDVI se basa en la medición de intensidad de la radiación de la banda roja (R) que fluctúa entre 0,6 a 0,7 μm e infrarroja cercana (IRC) que fluctúa de 0,7 a 1,1 μm del espectro electromagnético. Este índice se calcula usando la Ecuación 1 y al estar normalizado, el NDVI fluctúa entre -1 y +1.

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad [1]$$

La aplicación del NDVI en agricultura de precisión comprende la evaluación general del estado de los cultivos, puede aplicarse entre otras cosas para identificación de la variabilidad espacial del desarrollo vegetativo, estrés y rendimiento de las plantas (Henik, 2012).

4 METODOLOGÍA

4.1 Sitio de estudio

El ensayo se realizó durante diciembre 2018 – abril 2019 en un predio perteneciente a la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción Campus Chillán de coordenadas UTM 760.668,00 m E, 5945932,05 m S, Huso 18, Datum WGS84, en la ciudad de Chillán, XVI Región, Chile. (Figura 4).



Figura 4. Ubicación del predio donde se realizó el estudio. Fuente: Google Earth.

En Chillán el clima es del tipo mediterráneo. Según la Dirección Meteorológica de Chile, la precipitación acumulada anual en el 2020 fue de 565,8 mm y la evapotranspiración potencial alcanza los 1.271 mm. La temperatura media

anual fluctúa entre los 13,5°C, con máximas que alcanzan los 37,2°C en verano y mínimas de hasta -2,5°C en invierno.

4.2 Marco de plantación

El sitio de estudio posee una superficie de 1.574 m² de maíz. El marco de plantación del cultivo es de 0,75 m entre hileras y 0,125 m sobre hilera.

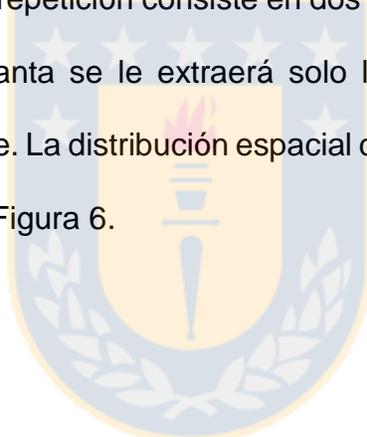
El cultivo de maíz está dividido en dos zonas (Figura 5), uno con una superficie de 705 m² sin la presencia de micorrizas y otro de 856 m² con la presencia de un consorcio de 4 cepas de hongos micorrizicos vivos (*Glomus intraradices*, *Glomus aggregatum*, *Glomus mosseae*, *Glomus etunicatum*) injertos al suelo al momento de sembrar semilla.



Figura 5. Diseño experimental del maíz regado por pivote. Fuente: Google Earth.

Ambas zonas están sometidos a un estrés hídrico que contempla 4 distintos niveles de riego. Estos niveles consisten en la reposición promedio del 25, 50, 75 y 100 por ciento de la altura de agua evapotranspirada del cultivo, a lo largo de toda la temporada.

Para cuantificar la producción, cada lote de cultivo posee 4 superficies de tratamiento denominados T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 Y T8 de superficie rectangular de 27 m², constituida por 6 hileras de 6 metros de largo, con un total de 288 plantas de maíz. Las unidades de tratamiento poseen 3 repeticiones y cada repetición consiste en dos hileras de 6 metros de largo (96 plantas), a cada planta se le extraerá solo la mazorca principal que es la mazorca más grande. La distribución espacial de los tratamientos se encuentra representada en la Figura 6.



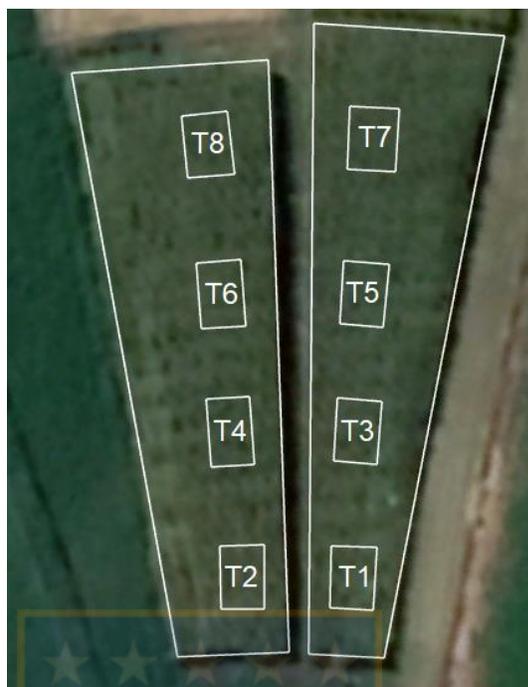


Figura 6. Esquema de la distribución de las unidades de tratamiento, donde los tratamientos impares no poseen injerto de micorrizas y los tratamientos pares poseen injerto de micorrizas. T1 y T2 tienen una reposición del 25% de la ETC., el nivel de reposición aumenta 25% en la siguiente fila (T3 y T4), hasta el 100% que serían T7 y T8. Fuente: Google Earth.

4.3 Descripción del sistema de riego por pivote central

El cultivo es regado por un pivote central marca Valley, el cual posee un largo total de 202 metros y está constituido por 3 tramos, del cual se ocupará solo el segundo (Figura 7). El sistema funciona con una bomba marca Weg W22 de 20 HP que entrega un caudal nominal de $84 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ a una presión de 1,3 bares a la entrada del pivote. Para el riego del maíz se utilizó el segundo tramo que tiene 62 metros de largo y posee 23 aspersores marca Senninger que entregan desde 152 hasta 1.663 L h^{-1} . La Tabla 3 presenta el detalle de las boquillas seleccionadas y su caudal correspondiente.



Figura 7. Esquema del segundo tramo del pivote utilizado para el ensayo.
Fuente: Google Earth.

La Tabla 3 muestra las boquillas seleccionadas según el caudal de diseño para cumplir los requerimientos de cada nivel de riego.

Tabla 3. Numero de boquilla seleccionada y caudal de la boquilla (Q boquilla), para el ensayo de maíz según los cálculos teóricos realizados para una reposición desde el 25% de la lámina de agua aplicada hasta el 100% programados en el control del pivote.

Aspersor	# Boquilla seleccionada	Q boquilla L h ⁻¹
1	5,5	152
2	6	180
3	7	248
4	7,5	286
5	8	325
6	8,5	362
7	9	411
8	9,5	459
9	10	509
10	10,5	561
11	11,5	675
12	11,5	675
13	12	736
14	12,5	799
15	13	865
16	13,5	933
17	14	1004
18	14,5	1077
19	15	1154
20	15,5	1231
21	15	1154
22	15,5	1231
23	18	1663

4.4 Planificación del riego

La planificación del riego se realizó semanalmente utilizando el coeficiente de cultivo (K_c) (Tabla 2) y datos de evapotranspiración de referencia (ET_0) entregados por la estación Santa Rosa INIA ubicada en las coordenadas UTM 238904,67 m E y 5952730,21 m S, Huso 19 Datum WGS84 (Figura 8). La evapotranspiración del cultivo se estimó utilizando la Ecuación 2, para luego introducir este dato en el panel de programación del pivote.

$$ET_c = \frac{ET_0 \times K_c}{\eta} \quad [2]$$

Donde ET_c corresponde a la evapotranspiración de cultivo (mm día^{-1}), ET_0 a la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}), K_c al coeficiente del cultivo y η a la eficiencia de aplicación del pivote central (0,85).

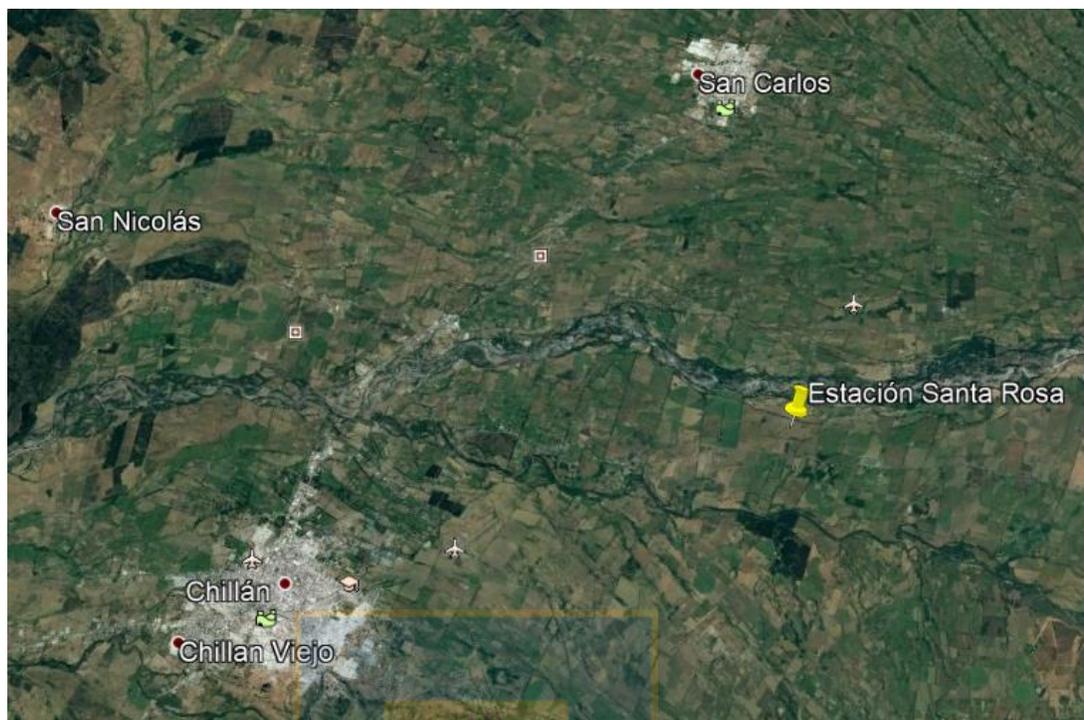


Figura 8. Esquema ubicación estación Santa Rosa INIA. Fuente: Google Earth.

4.5 Contenido de humedad en el suelo

El contenido de agua en el suelo se midió con los sensores de humedad modelo Watermark 200SS conectados a un Monitor Automático Watermark 900M, Irrrometer Company, Riverside, USA., con una frecuencia de medición de una hora.

En los tratamientos T1, T2, T7 y T8 se instaló una estación con el monitor y 4 sensores, los cuales fueron enterrados a una profundidad de 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm y 87,5 cm. Las mediciones de los sensores representan la humedad de una estrata de suelo de 25 cm, con un total de 1 metro de profundidad de estudio (Figura 9).

Con un barreno, se extrajeron muestras de suelo a las mismas profundidades de los sensores, que serían 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm y 87,5 cm. Las muestras fueron sacadas en un radio máximo de 1 metro de la estación.

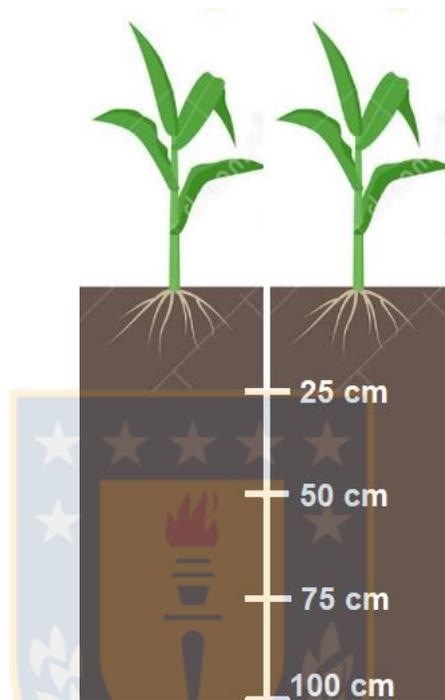


Figura 9. Estratificación del suelo para monitorear el contenido de humedad por cuatro sensores por estación, hasta una profundidad de suelo de 100 cm. Fuente: Elaboración propia.

4.6 Largo mazorca

La planta produce dos mazorcas, se considera como mazorca principal la que está más arriba en la planta y que a su vez es la más grande. Se extrajo un total de 20 mazorcas por tratamiento. Las mazorcas fueron extraídas de la hilera que está a continuación de la superficie de muestreo, ya que esas plantas serán utilizadas para medir la producción. El largo se considera desde la base hasta la punta de la mazorca, tal como se muestra en la siguiente figura (Figura 10).



Figura 10. Ejemplo de medición del largo de la mazorca principal para cada tratamiento del cultivo. Fuente: Elaboración propia.

4.7 Masa raíz adventicia

Las raíces adventicias son raíces gruesas, carnosas y de gran vigor que penetran, según el nudo en que se originen, a profundidades de entre 5 y 15 cm. Cumplen básicamente una función de sostén, permitiéndole a las plantas un mejor anclaje; además, y aunque limitadamente, participan de la absorción de agua y nutrientes.

Se extrajo 8 muestras de raíces por cada tratamiento, haciendo un total de 64 raíces. El criterio de selección consideró una altura de planta y diámetro del tallo similares entre los tratamientos T1 y T2, T3 y Y4, T5 y T6 y por ultimo T7 y T8. Para sacar las muestras, se estableció un marco de extracción de suelo (Böhm, 1979), el cual considera una distancia de 15 cm en dirección perpendicular al tallo para ambos lados y a una profundidad de 30 cms como se muestra en la Figura 11.

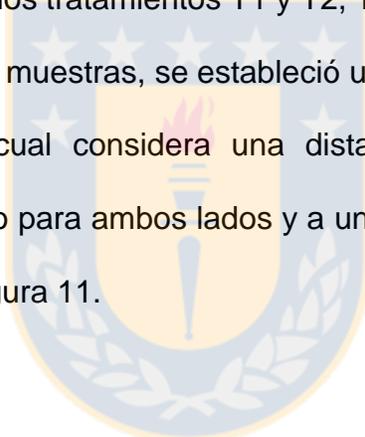




Figura 11. Ejemplo marco extracción de suelo establecido para medir la masa de raíz adventicia del cultivo. Fuente: Elaboración propia.

Luego se le realizó un lavado a la raíz para eliminar la tierra adherida a las raíces (Figura 12) para posteriormente introducirlas en recipientes (Figura 13), los cuales serán colocados en un horno a 60°C por 48 horas para no carbonizar las raíces. Una vez transcurridas las 48 horas se pesó el recipiente con la raíz y luego se pesó el recipiente vacío (Böhm, 1979).



Figura 12. Raíz de la planta de maíz extraída dentro de un marco de extracción de 15x15x30 cm de suelo, después de haber realizado el lavado con agua. Fuente: Elaboración propia.



Figura 13. Muestras de raíz de las plantas de maíz extraídas dentro de un marco de extracción de 15x15x30 cm de suelo, antes de ser introducidas al horno 60°C por 48 horas. Fuente: Elaboración propia.

4.8 Imágenes multiespectrales

La información de NDVI para el cultivo fue extraída de la plataforma SpiderWebGIS, en el servidor PLAS. Se estableció 4 puntos de interés, que corresponden a T1, T2, T7 y T8 (Figura 14). Los datos corresponden a los entregados por el satélite S2A con una resolución de 10 x 10 m.



Figura 14. Esquema puntos seleccionados para el seguimiento de NDVI para el cultivo de maíz. Fuente: SpiderWebGIS, servidor Plas.

4.9 Producción de grano

Cada tratamiento contempla 6 hileras de maíz de 6 metros de largo, resultando una superficie de 27 m².

Cuando el cultivo se encontraba en la fase R3 (Grano lechoso) como se muestra en la Figura 15, se extrajo la mazorca principal de cada planta (siendo esta la mazorca más alta de la planta).



Figura 15. Mazorca de maíz que evidencia el avance de la línea de leche a la mitad del grano. Fuente: Elaboración propia.

Para la cosecha, cada tratamiento se dividió 3 muestras de 2 hileras de 6 metros de largo, haciendo una suma de 3 muestras por tratamiento y 24 muestras en total, las cuales fueron almacenadas en mallas rotuladas (Figura 16) para luego ser transportadas a Bayer Chillán para luego ser desgranada y pesada.



Figura 16. Cosecha de la mazorca principal de maíz realizada el día 24/05/19 dividida y rotulada en 3 repeticiones por tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

4.10 Prueba de aplicación de riego

Se realizaron dos pruebas de aplicación de la lámina de riego para corroborar el cumplimiento de los porcentajes de reposición. Para ello se siguieron los mismos pasos establecidos para realizar una prueba de uniformidad en un pivote.

En la primera prueba se instalaron estacas con vasos cada 3 metros a una altura de 1,5 metros sobre el suelo y se aplicó una lámina de agua de 90 mm.

En la segunda prueba, como se muestra en la Figura 17, cada un metro se instaló un vaso a 1,5 metros de altura del suelo siguiendo una línea recta y se aplicó una lámina de agua de 40 mm.





Figura 17. Disposición de los vasos recolectores para la prueba de aplicación de una lámina de agua de 40 mm en el pivote del ensayo. Fuente: Elaboración propia.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Prueba de aplicación lámina de riego

Las Figura 18 y 19 representan la altura de agua recolectada por los vasos en las dos pruebas realizadas con una aplicación de 90 mm y 40 mm respectivamente. Se enumeraron las estacas comenzando por la que estaba más cerca al punto fijo del pivote.

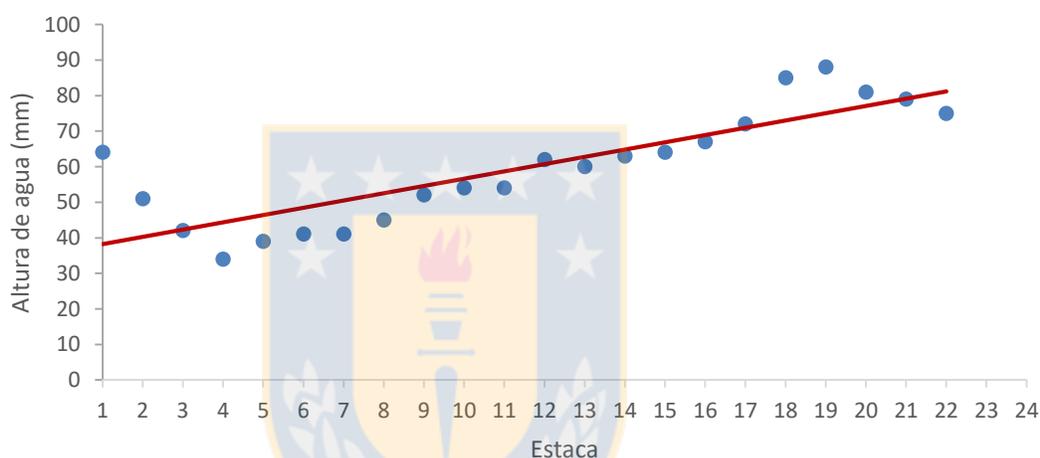


Figura 18. Altura de agua recolectada por los vasos de prueba en una aplicación de 90 mm de agua en un pivote central. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la primera prueba evidencian una aplicación aceptable de la lámina de riego, dado que el vaso con mayor cantidad de agua recolectada entrega una altura de 88 mm (estaca 19), lo cual es muy cercano a 90 mm que sería el 100% de aplicación. El vaso de la estaca 4 recolecta una altura de 34 mm, 12 mm más de lo esperado que serían 22,5 mm que corresponde al 25% de 90 mm. El aumento debe causarse por la influencia de los últimos aspersores de la primera torre, dado que estos tienen una tasa de aplicación

mayor al del primer aspersor de la segunda torre, hecho evidenciado por la altura de agua de los primeros 3 vasos. El viento fue esporádico y las ráfagas no superaron la velocidad de 3 m s^{-1} .

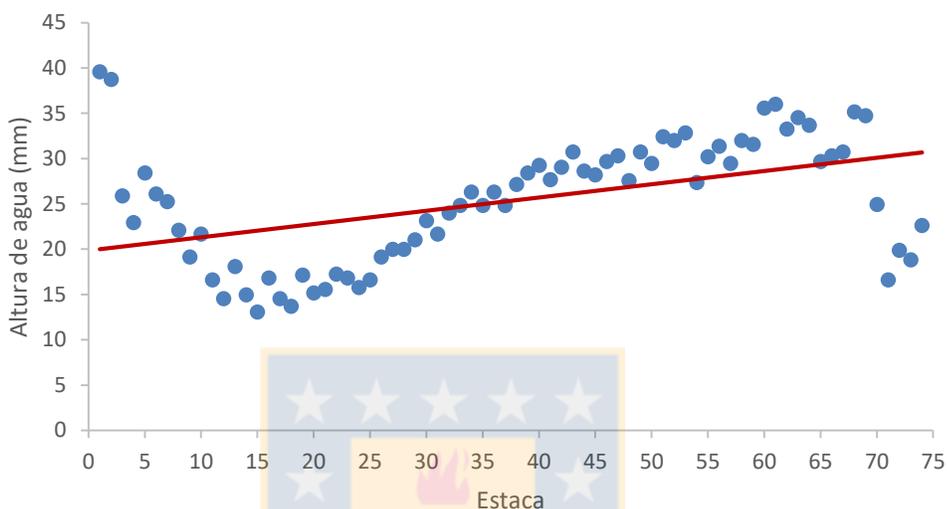


Figura 19. Altura de agua recolectada por los vasos de prueba en una aplicación de 40 mm de agua en un pivote central. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la Figura 19 el aumento en la precipitación de la segunda torre del pivote. El vaso con menor altura de agua es de 13 mm que corresponde a la estaca 15 y estaría por 3 mm por encima del 25% de 40 mm. Este aporte correspondería al viento que desplaza el agua en forma vertical de los últimos aspersores de la primera torre que tienen una precipitación más alta que los primeros aspersores de la segunda torre. Los siguientes vasos aumentan su nivel de agua a medida que se avanza a lo largo del ala del pivote hasta la estaca 61 que registra el mayor nivel de agua con 36 mm, 4 mm por

debajo del teórico programado en el panel del pivote. La diferencia entre la lámina aplicada en terreno y la lámina de agua teórica también se debe a la aproximación en los caudales de cada aspersor debido a la disponibilidad comercial de los aspersores.

5.2 Agua Aplicada

La Tabla 4 muestra la planificación del riego, las fechas de aplicación de agua, la evapotranspiración de referencia (ET_0), coeficiente de cultivo del maíz según su etapa vegetativa (K_c) y la lámina de agua aplicada en milímetros.

La cantidad de agua programada en el pivote en la temporada de riego para el terreno donde se realizó el estudio, fue de 341 mm, que comprende los meses de diciembre-2018 a marzo-2019, este representa el 100% de la lámina aplicada y corresponde al riego aplicado a los tratamientos T7 y T8. Los tratamientos T1 y T2 les correspondió 85,3 mm temporada⁻¹, T3 y T4 170,5 mm temporada⁻¹ y finalmente T5 y T6 con 255,8 mm temporada⁻¹ (Tabla 5).

Tabla 4. Fecha de riego, evapotranspiración de referencia (ET_0), etapa del cultivo de maíz, coeficiente de cultivo (K_c), evapotranspiración del cultivo (ET_c) y lamina aplicada al cultivo.

Fecha	ET_0 (mm semana ⁻¹)	Etapa	K_c	ET_c (mm día ⁻¹)	Lamina aplicada (mm)			
					100%	75%	50%	25%
21-12-2018	36,2	V4	0,18	7,7	12	9,0	6,0	3,0
28-12-2018	36,7	V6	0,35	15,1	24	18,0	12,0	6,0
02-01-2019	24,9	V8	0,51	14,9	15	11,3	7,5	3,8
18-01-2019	75	V12	0,88	77,6	40	30,0	20,0	10,0
28-01-2019	55,2	v14	1,01	65,6	50	37,5	25,0	12,5
04-02-2019	38,7	V16	1,1	50,1	50	37,5	25,0	12,5
12-02-2019	40,2	V16	1,1	52,0	50	37,5	25,0	12,5
23-02-2019	43	R1	1,1	55,6	50	37,5	25,0	12,5
12-03-2019	70,9	R3	1,1	91,8	50	37,5	25,0	12,5

Tabla 5. Lámina de agua aplicada a la fecha por el pivote al cultivo de maíz a lo largo de toda la temporada.

Fecha	Lamina aplicada (mm/temp)			
	100%	75%	50%	25%
21-12-2018	12,0	9,0	6,0	3,0
28-12-2018	36,0	27,0	18,0	9,0
02-01-2019	51,0	38,3	25,5	12,8
18-01-2019	91,0	68,3	45,5	22,8
28-01-2019	141,0	105,8	70,5	35,3
04-02-2019	191,0	143,3	95,5	47,8
12-02-2019	241,0	180,8	120,5	60,3
23-02-2019	291,0	218,3	145,5	72,8
12-03-2019	341,0	255,8	170,5	85,3

5.3 Humedad del suelo

La humedad del suelo no varía de forma homogénea por distintos factores, como la distribución espacial de las raíces, la heterogeneidad del suelo y en la aplicación de lámina de riego. Las Figuras muestran la evolución de la tensión matricial del suelo a lo largo de toda la temporada para T1, T2, T7 y T8 a profundidades de 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm, 87,5 cm.

Los sensores seleccionados tienen un rango de uso hasta los 239 cb de tensión matricial del suelo, lo cual no cubre con los requerimientos de las pruebas, ya que, al realizar el estrés hídrico, la TMS sobrepasa los 239 cb, cabe considerar que el punto de marchitez permanente son 1500 cb. Esto produjo problemas de lecturas en extensiones considerables de tiempo, debido a que, si el suelo se seca, se aísla el sensor y la probabilidad de que vuelva a tener una buena lectura es baja. No obstante, existen longitudes de

tiempo en los cuales hubo sensores registrando datos que sirven para monitorear indirectamente el comportamiento de la humedad del suelo y a su vez compararlos con otros tratamientos.

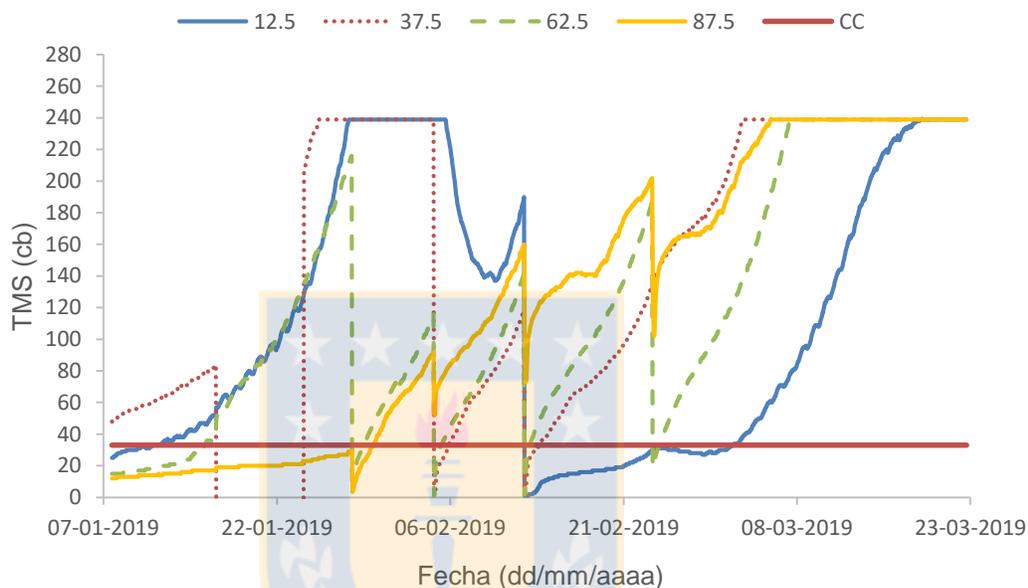


Figura 20. Evolución de la tensión matricial del suelo (TMS) para el tratamiento de riego T1 a cuatro profundidades 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm, 87,5 cm. Capacidad de campo (CC), que representa la energía de retención de agua en el suelo de 33 cb. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las TMS para el tratamiento sin micorrizas y con una reposición del 25% de su evapotranspiración presentado en la Figura 20. El sensor ubicado a una profundidad de 87,5 cm es el que mejor evidencia el comportamiento de la humedad en el suelo ya que es consecuente en el tiempo, este sensor muestra los días de riego, que corresponden a las bajas abruptas en la TMS y se observa como la lámina de riego aplicada no alcanza

la totalidad de su reposición, lo cual es esperable para el tratamiento T1 que consiste en la reposición del 25% de la ETc.



Figura 21. Evolución de la tensión matricial del suelo (TMS) para el tratamiento de riego T7 a cuatro profundidades 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm, 87,5 cm. y capacidad de campo (CC), que representa la energía de retención de agua en el suelo de 33 cb. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 21 representa el tratamiento sin micorrizas y con una reposición del 100% de la ETc (T7). Las TMS de las profundidades 12,5 y 37,5 cm pudieron evidenciar dos riegos el del día 28/01/19 y 12/03/19, esto se puede observar por las caídas abruptas de las líneas de TMS.

El riego por pivote con aspersores dentro de la canopia no es el mejor riego para el maíz, dado que, si no se aumenta la altura del aspersor, estos comienzan a chocar con las plantas y se altera la trayectoria y/o la tasa de aplicación, alterando la uniformidad del riego. Es lo que pudo suceder en los otros riegos que no fueron registrados por los sensores.

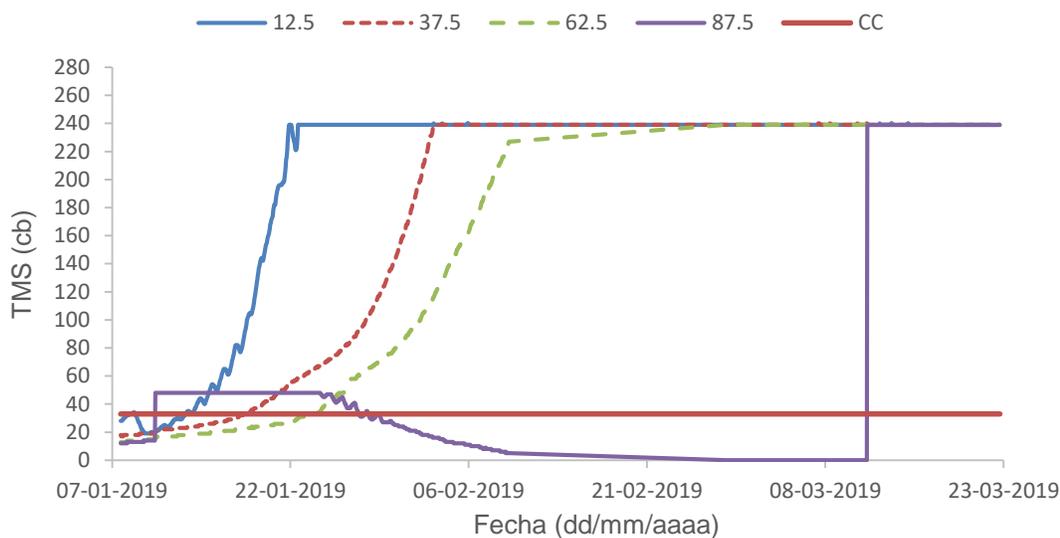


Figura 22. Evolución de la tensión matricial del suelo (TMS) para el tratamiento de riego T2 a cuatro profundidades 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm, 87,5 cm. Capacidad de campo (CC), que representa la energía de retención de agua en el suelo de 33 cb. Fuente: Elaboración propia.

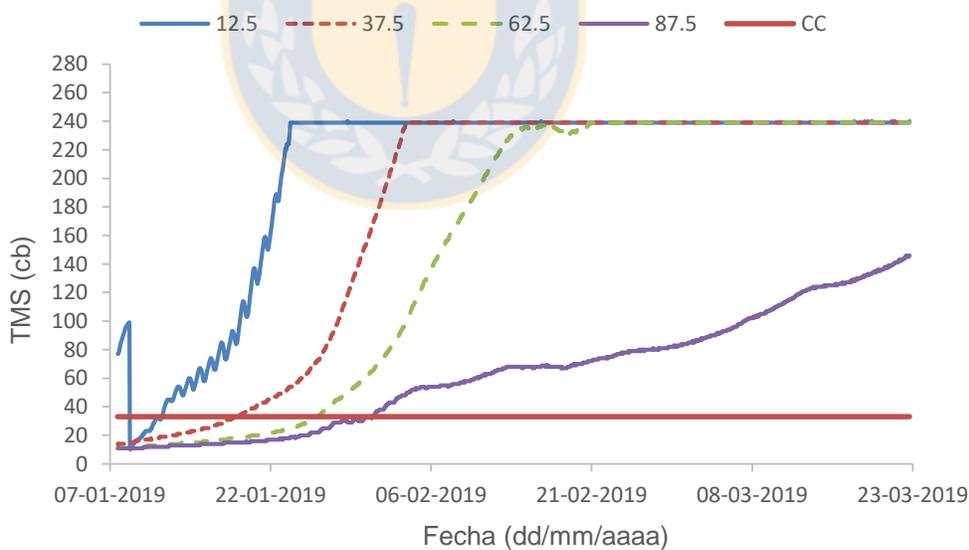


Figura 23. Evolución de la tensión matricial del suelo (TMS) para el tratamiento de riego T8 a cuatro profundidades 12,5 cm, 37,5 cm, 62,5 cm, 87,5 cm. Capacidad de campo (CC), que representa la energía de retención de agua en el suelo de 33 cb. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 22 y 23 representan el tratamiento con micorrizas y con una reposición del 25% y 100% de la ETc T2 y T8 respectivamente. Los sensores de las estaciones no muestran ningún tipo de información relevante, solo muestra la curva de desorción en la estrata de suelo, hasta quedar constante en el punto máximo de registro (239 cb).

En la Figura 23 se puede observar que, a más profundidad en el suelo, el movimiento del agua es más lento.

Las Tablas 6, 7 y 8 muestran la cantidad de agua retenida en el suelo que fueron sacadas en terreno con uso de un barreno.



Tabla 6. Contenido de humedad gravimétrica (H. gravimétrica) del día 16/02/19 en 4 distintas profundidades de suelo, en un cultivo de maíz sin y con micorrizas y con una reposición del 100% de la ETc. (T7 y T8 respectivamente).

Tratamiento	Profundidad (cm)	Peso húmedo (g)	peso seco (g)	Peso capsula (g)	Peso suelo seco (g)	H. gravimétrica (g/g)	Promedio (g/g)
T7	12,5	97,74	88,75	43,26	45,49	0,198	0,221
	37,5	95,92	85,46	42,69	42,77	0,245	
	62,5	94,07	84,29	41,93	42,36	0,231	
	87,5	105,54	94,59	43,04	51,55	0,212	
T8	12,5	111,88	98,39	40,79	57,6	0,234	0,240
	37,5	109,96	95,03	41,45	53,58	0,279	
	62,5	102,32	91,97	43,5	48,47	0,214	
	87,5	129,84	113,44	43,66	69,78	0,235	

La Tabla 6 muestra que en el tratamiento 7 la mayor cantidad de agua para la planta se encuentra en la segunda y tercera estrata, donde eventualmente se encuentra el mayor porcentaje de las raíces de la planta. Con respecto al tratamiento 8, no ocurre lo mismo, pero dispone de mayor contenido de agua en la primera estrata, en la cual también existe extracción de agua por las raíces. Se puede observar que en la tercera estrata de T8 dispone de menos agua para la planta que T7. El tratamiento T7 promedia 0,221 g/g de contenido de humedad, mientras que T8 promedia 0,240 g/g.

A continuación, la Tabla 7 presenta el contenido de agua en el suelo en un control realizado el día 27/02/2019.

Tabla 7. Contenido de humedad gravimétrico (H. gravimétrico) del día 27/02/19 en 4 distintas profundidades de suelo, en un cultivo de maíz sin y con micorrizas y con una reposición del 25% y 100% de la ETC. (T1, T2, T7 y T8).

Tratamiento	profundidad (cm)	peso humedo (g)	peso seco (g)	peso capsula (g)	peso suelo seco (g)	Humedad gravimétrica (g/g)	Promedio (g/g)
T1	12,5	85,58	78,12	41,96	36,16	0,206	0,215
	37,5	82,13	73,87	41,48	32,39	0,255	
	62,5	90,37	82,05	44,28	37,77	0,220	
	87,5	78,02	72,64	42,73	29,91	0,180	
T2	12,5	93,76	85,09	43,72	41,37	0,210	0,214
	37,5	97,21	86,51	40,44	46,07	0,232	
	62,5	106,04	94,95	45,00	49,95	0,222	
	87,5	86,00	78,73	40,83	37,90	0,192	
T7	12,5	91,3	81,7	41,34	40,36	0,238	0,237
	37,5	105,75	92,06	39,28	52,78	0,259	
	62,5	122,5	106,95	45,75	61,20	0,254	
	87,5	118,05	105,28	40,73	64,55	0,198	
T8	12,5	86,34	79,21	43,52	35,69	0,200	0,217
	37,5	96,32	86,38	42,59	43,79	0,227	
	62,5	84,89	77,84	43,28	34,56	0,204	
	87,5	101,31	90,12	43,06	47,06	0,238	

De la Tabla 7 se observa que la diferencia de los promedios de contenido de agua en el suelo entre T1 y T2 es de 0,001 g/g, lo que se podría considerar como despreciable. El contenido de humedad gravimétrico en el suelo de T7 está 0,020 g/g por sobre T8. Se esperaba que el promedio de T8 estuviese cercano a T7 dada las mismas condiciones de riego. Se observa que al igual que la Tabla 6, el mayor contenido de agua se encuentra en la segunda y tercera estrata del suelo en todos los tratamientos.

La Tabla 8 muestra el contenido de agua en el suelo en un control realizado el día 11/03/19.



Tabla 8. Contenido de humedad gravimétrico (H. gravimétrico) del día 11/03/19 en distintas profundidades de suelo, en un cultivo de maíz sin y con micorrizas y con una reposición del 25% y 100% de la ETc. (T1, T2, T7 y T8).

Tratamiento	profundidad (cm)	peso capsula (g)	peso humedo (g)	peso seco (g)	humedad (g/g)	Humedad gravimétrica (g/g)	Promedio (g/g)
T1	12,5	43,56	72,86	68,59	0,171	0,242	0,252
	37,5	41,98	89,1	81,57	0,190	0,270	
	62,5	40,87	92,6	85,03	0,171	0,243	
T2	12,5	42,75	80,1	75,04	0,157	0,223	0,233
	37,5	43,25	119,2	106,72	0,197	0,279	
	62,5	43,21	64,82	62,19	0,139	0,197	
T7	12,5	43,77	86,77	80,56	0,169	0,240	0,293
	37,5	44,28	95,91	86,73	0,216	0,307	
	62,5	45,78	87,4	79,93	0,219	0,311	
	87,5	43,04	102,9	92,09	0,220	0,313	
T8	12,5	45,05	95,84	88,52	0,168	0,239	0,276
	37,5	40,67	82,49	75,06	0,216	0,307	
	62,5	39,27	76,6	70,39	0,200	0,283	
	87,5	41,51	72,41	67,39	0,194	0,275	

La Tabla 8 muestra que los tratamientos T1 y T2 tienen en promedio menor cantidad de agua disponible para la planta, tal como se espera dado su nivel de riego (reposición del 25% de la ETc). El tratamiento T7 dispone en promedio

mayor contenido de agua en el suelo. En T7 y T8 el contenido de agua se concentra más en las últimas tres estratas, dado que la primera estrata está más propensa a la evaporación del agua.

5.4 NDVI en las distintas etapas

En la Figura 24 se muestra la comparación de los datos de NDVI obtenidos de la plataforma para los tratamientos T1 y T2.

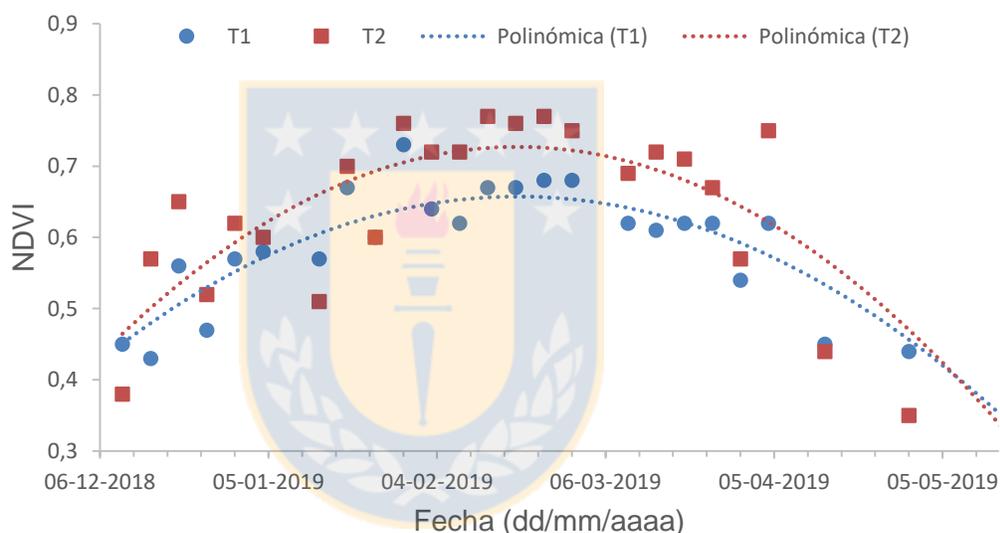


Figura 24. NDVI del cultivo para los tratamientos T1 y T2 del ensayo de maíz a lo largo de toda la temporada. Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los datos de NDVI de T1 y T2 entregados por la plataforma PLAS mostrados en la Figura 24, se puede observar que los datos de T2 están generalmente por sobre los de T1, esto queda ratificado si analizamos la línea de tendencia que se proyecta por sobre la línea de tendencia de T1.

En la Figura 25 se muestran los datos de NDVI y las líneas de tendencia polinómicas de grado 2 que representan los tratamientos T7 y T8

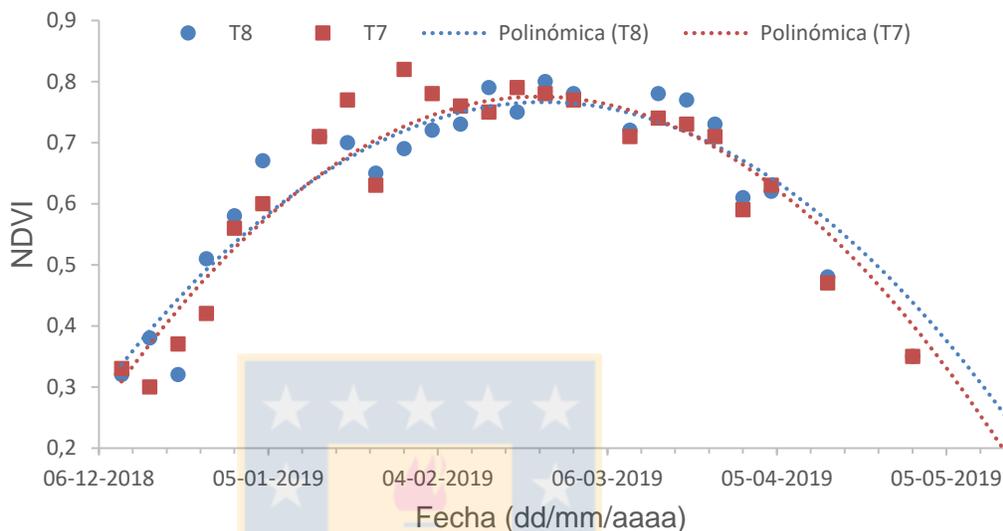


Figura 25. NDVI para los tratamientos T7 y T8 del ensayo de maíz a lo largo de toda la temporada. Fuente: elaboración propia.

Al comparar los datos de NDVI de T7 y T8 mostrados en la Figura 25, se observa que la diferencia del índice entre ambos tratamientos no es significativa, dado que, en la etapa vegetativa, los datos de T8 están por sobre los de T7. Luego existe un punto donde los datos de T7 están por sobre los de T8 y sería en la etapa reproductiva de la planta, finalmente los datos de NDVI de T7 vuelven a caer por debajo de T8, las líneas de tendencias polinómicas de grado 2 pueden evidenciar el comportamiento recién descrito dado sus dos puntos de intersección antes y después del vértice de la curva.

5.5 Largo mazorca

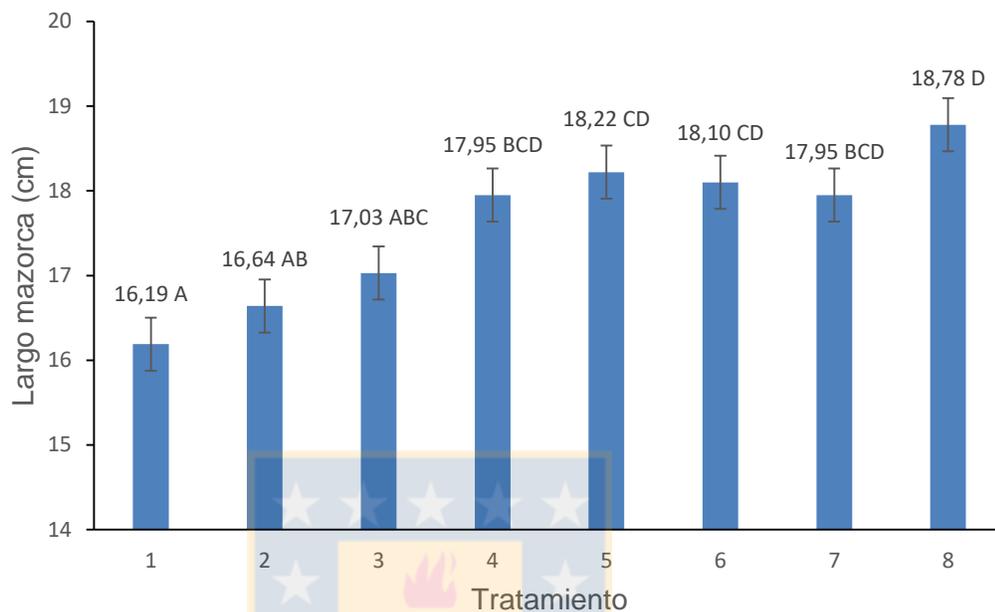


Figura 26. Promedio largo de mazorca principal para los distintos tratamientos de riego. Medidas con la misma letra en barra no representa diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p < 0.05$). Fuente: Elaboración propia.

Al realizar las interacciones del largo promedio de la mazorca principal de la planta de maíz tal como muestra la Figura 26, se observa que entre en tratamiento T1 y T2 no existe una diferencia significativa ($p > 0,05$), T2 tuvo aumento en el promedio de 0,45 cm por sobre T1. Entre T3 y T4 no hubo diferencia significativa, pero T4 tuvo un aumento de 0,92 cm en el promedio. El promedio del largo de mazorca entre T5 y T6 no tuvo diferencia significativa y se observa una diferencia de 0,12 cm a favor de T5 que es un tratamiento sin presencia de micorrizas. Las plantas con reposición del 75% y 100% de su

evapotranspiración, poseían un tamaño de planta similar y de aspecto frondoso, por lo que no es raro encontrar un promedio mayor en el largo de mazorca en un tratamiento sin micorrizas. Entre T7 y T8 no existe diferencia significativa, sin embargo, se observa un aumento de 0.83 cm en el promedio del largo de mazorca en T8. Para los tratamientos con una reposición del 25% de la ETc, T2 no presentó diferencias significativas con respecto a T7 que representa las condiciones de un cultivo normal, en cambio T1 que es el tratamiento sin micorrizas si presenta diferencia significativa con T7. T8 registra el mayor promedio del largo de la mazorca principal.



5.6 Masa raíz adventicia

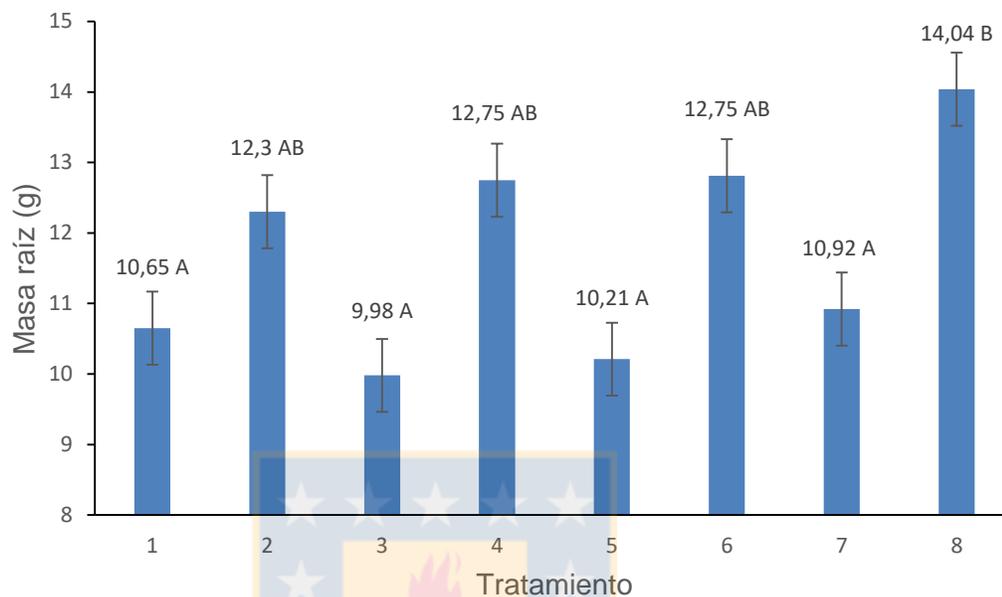


Figura 27. Promedio masa raíz adventicia del maíz para los distintos tratamientos de riego. Medidas con la misma letra en barra no representa diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p < 0,05$). Fuente: Elaboración propia.

Al comparar la masa de raíz adventicia de la planta de maíz mostrados en la Figura 27, se observa que existe una diferencia significativa entre el tratamiento T1 y T8, esta diferencia se cumple dado que T1 presenta las condiciones más desfavorables del ensayo para el desarrollo en general de la planta, en cambio T8 presenta las condiciones más favorables del ensayo. Entre T1 y T2 no presenta diferencia significativa, pero si se observar un leve aumento en la masa promedio de 1,65 gramos. El promedio entre T3 y T4 no presentó una diferencia significativa, pero también se registra una diferencia

de 2,77 gramos a favor del tratamiento con presencia de micorrizas. T5 y T6 no presenta diferencia significativa y T6 tiene un promedio de 2,54 gramos por sobre T5. Finalmente, entre T7 y T8 no existe diferencia significativa, pero también se observa un aumento de 3,12 gramos en el promedio de masa de raíz en el tratamiento T8.

5.7 Producción de maíz

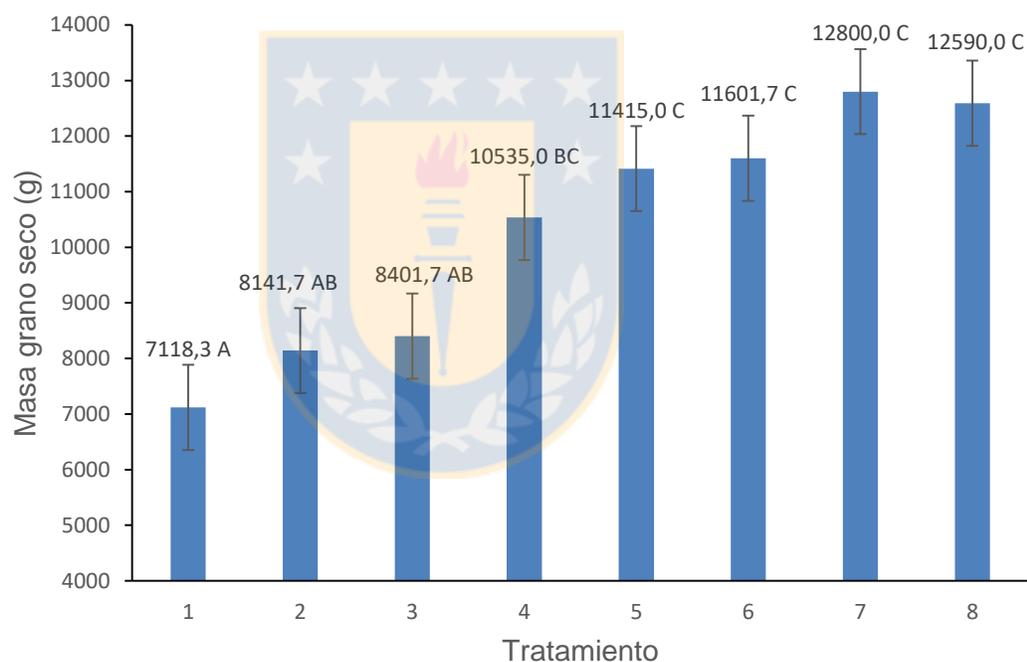


Figura 28. Masa promedio de grano seco de maíz para cada tratamiento. Medidas con la misma letra en barra no representa diferencias significativas de acuerdo con el test de Tukey ($p < 0,05$). Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 28, se observa que T7 fue el tratamiento con mayor producción de grano seco con 12.800 gramos, luego sigue el tratamiento T8 con 12.590 gramos de grano seco, en ambos tratamientos la lámina de riego reponía el 100% de la ETc. La producción entre los tratamientos 1 y 2 no presentan diferencias significativas, la diferencia entre ambos fue de 1023,4 g a favor de T2. Entre T3 y T4 no registra diferencias significativas, se observa que el tratamiento 4 aumentó en 2133,3 gramos. Entre T5 y T6 no existe diferencias significativas, la diferencia entre ambos tratamientos es de 186,7 gramos a favor de T6. Una reposición del 50% de la ETc a lo largo de toda la temporada afecta significativamente la producción de grano, pero según el ensayo aplicar micorrizas al cultivo evitaría pérdidas significativas en la producción. Si el riego repone el 25% de la evapotranspiración del cultivo, la producción se reduce significativamente con o sin presencia de micorrizas, no obstante, la reducción en la producción es menor en el tratamiento T2. Una reposición del 75% de la ETc. reduce la producción, pero no significativamente según el test de tukey con un nivel de confianza de 95%. La reducción de la lámina de riego afecta negativamente a la producción en mayor o menor grado, independiente del uso de micorrizas.

6 CONCLUSIÓN.

Los antecedentes de esta investigación permiten concluir que:

Los valores de NDVI del tratamiento T2 estuvieron por encima de T1 por toda la temporada, lo que implica que el tratamiento 2 tuvo mayor área foliar. Entre T7 y T8 no se destaca una diferencia apreciables en los índices de NDVI.

La presencia de micorrizas en el cultivo no genera un aumento estadísticamente considerable en la producción de grano. Sin embargo, se pudo observar que en los tratamientos que fueron sometidos a estrés hídrico, la presencia de micorrizas redujo la pérdida en la producción.

En cada nivel de riego, el tratamiento con presencia de micorrizas obtuvo una mayor masa promedio de raíz adventicia. Sin embargo, solo entre los tratamientos T7 y T8 se obtuvo una diferencia estadísticamente significativa, donde T8 registra 14,04 (g), promediando 3,12 (g) más que T7. Con respecto al largo de la mazorca principal, ningún nivel de riego obtuvo una diferencia estadísticamente significativa. No obstante, se pudo observar que entre los tratamientos T5 y T6 (ambos con una reposición del 75% de la ETc), T5 registró un promedio de 18,22 cm, 0,12 cm más por sobre T6 que es el cultivo con micorrizas, pero en los otros niveles de riego, el tratamiento con micorriza presenta mayor largo de mazorca principal.

La reducción en la reposición de la altura de agua evapotranspirada por el cultivo afecta negativamente en el desarrollo de las raíces, en el desarrollo vegetativo y en la producción del cultivo de maíz.

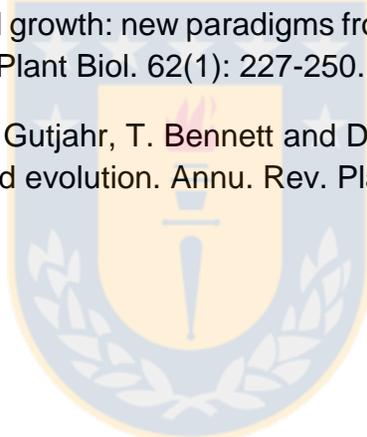


7 LITERATURA CITADA.

1. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evaporation – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N°56. FAO. Rome, Italy.
2. Bago, B., P.E. Pfeffer. 2000. Carbon metabolism and transport in arbuscular micorrizas. *Plant Physiol.* 124(3): 949-958.
3. Böhm, W. 1979. Methods of studying root systems. Vol. 33. Springer. Berlin, Germany.
4. Bonfante, P., A. Genre. 2010. Mechanisms underlying beneficial plant-fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nat. Commun.* 1(48): 1-48.
5. Brachmann, A., M. Parniske. 2006. The most important symbiosis on earth [en línea]. *PLoS Biol.* 4(7): 239. (Art. No.). <<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040239>>. [Consulta: 17 diciembre 2020].
6. Christy, J.R., W.B. Norris, R.W. Spencer and J.J. Hnilo. 2007. Tropospheric temperature change since 1979 from tropical radiosonde and satellite measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.* 112: 148-227.
7. Debeljak, M., J.T. van Eleren, A. Spruk, A. Izmer, F. Vanhaecke and K. Vogel-Mikus. 2018. The role of arbuscular mycorrhiza in mercury and mineral nutrient uptake in maize. *Chemosphere* 212: 1076-1084
8. Giovannetti, M., P. Fortuna, A.S. Citernesi, S. Morini and M.P. Nuti. 2001. The occurrence of anastomosis formation and nuclear exchange in intact arbuscular mycorrhizal networks. *New Phytol.* 151(3): 717-724.
9. Heidari, M., V. Karami. 2014. Effects of different mycorrhiza species on grain yield, nutrient uptake and oil content of sunflower under water stress. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 13(1): 9-13.
10. Henik, J.J. 2012. Utilizing NDVI and remote sensing data to identify spacial variability in plant stress and influenced by management. Thesis, Master of Science. Iowa State University. Ames, USA.
11. Jaleel, C.A., R. Gopi, B. Sankar, M. Gomathinayagam and R. Panneerselvam. 2008. Differential responses in water use efficiency in

two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress. *Comp. Rend. Biol.* 331(3): 42-47.

12. Miransari, M., H. A. Bahrami, F. Rejali and M. J. Malakouti. 2009. Effects of soil compaction and arbuscular mycorrhiza on corn (*Zea mays* L.) nutrient uptake. *Soil Tillage Res.* 103(2): 282-290.
13. Oyewole, B.O., O.J. Olawuyi, A.C. Odebode and M. A. Abiala. 2017. Influence of Arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) on drought tolerance and charcoal rot disease of cowpea. *Biotechnol. Rep.* 14: 8-15.
14. Schüßler, A., D. Schwarzott and C. Walker. 2001. A new fungal phylum, the Glomeromycota: Phylogeny and evolution. *Mycol Res.* 105(12): 1413-142.
15. Smith, S.E., A. Smith. 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annu. Rev. Plant Biol.* 62(1): 227-250.
- 16 Waters, M.T., C. Gutjahr, T. Bennett and D.C. Nelson. 2017. Strigolactone signaling and evolution. *Annu. Rev. Plant Biol.* 68(1): 291-322.



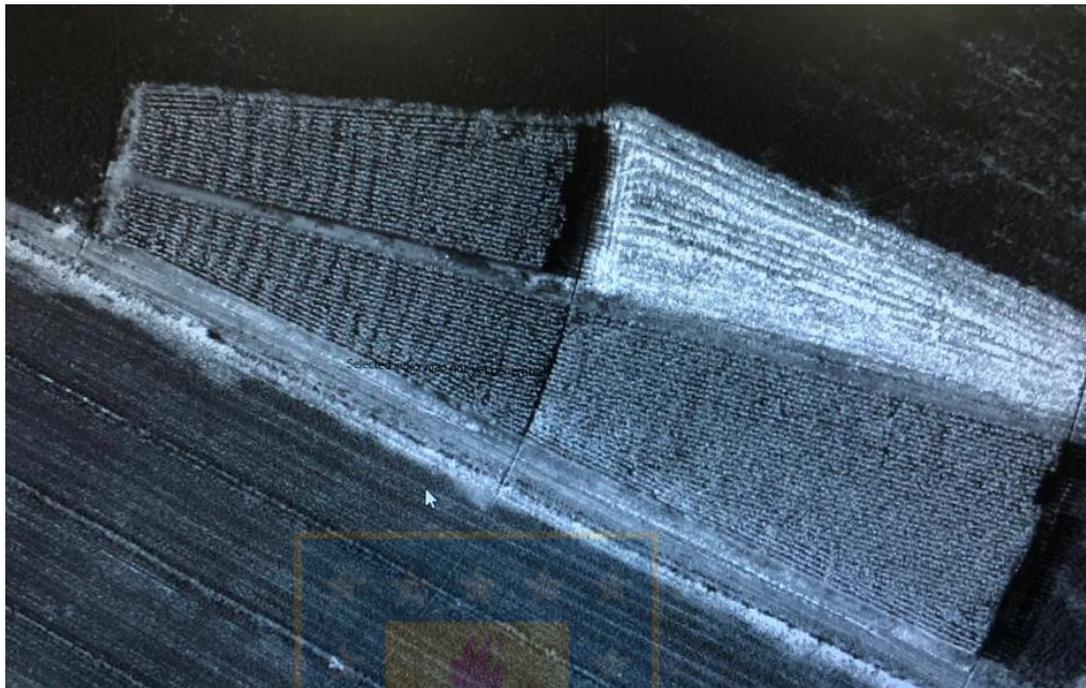
8 ANEXO.

Figura 29. Fotografía del ensayo de maíz tomada desde vuelo de dron.

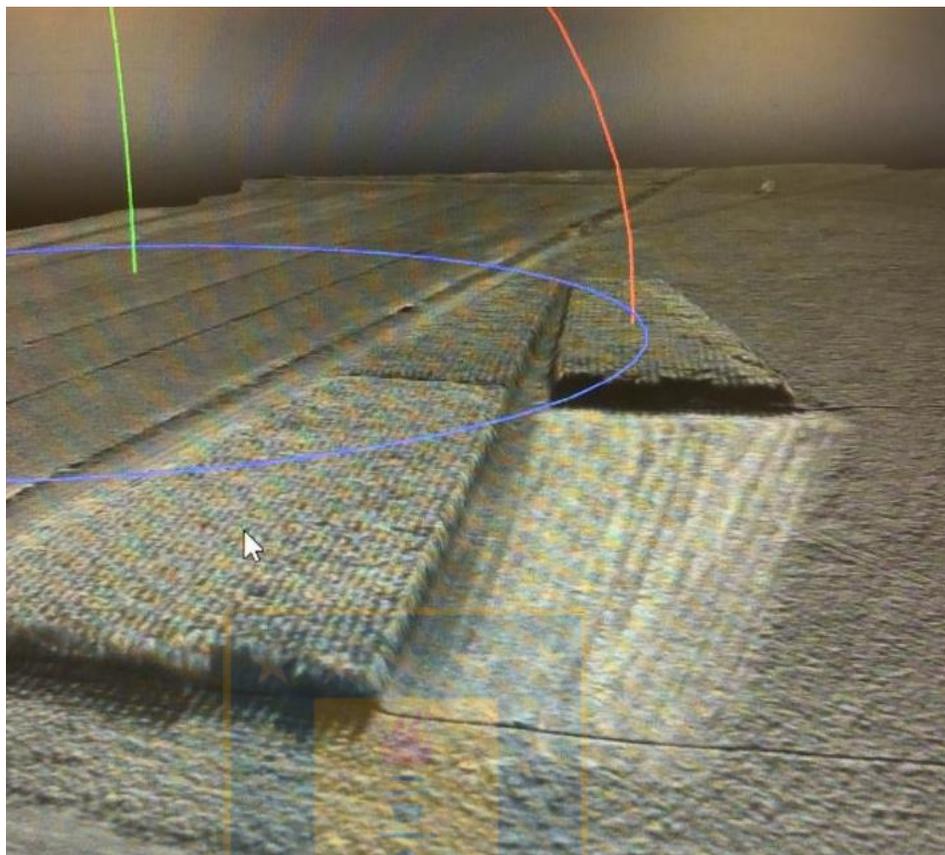


Figura 30. Fotografía del ensayo de maíz desde vuelo de dron.

Tabla 9. Numero de aspersor (Aspersor), número de boquilla (N° Boquilla) , distancia del aspersor (Dist.), perímetro que recorre el aspersor, área correspondiente al aspersor (Ancho de banda), caudal teórico (Q teórico), Caudal real (Q real), fracción de riego asignado al aspersor, caudal teórico aspersor modificado (Q teórico mod.) del segundo tramo del pivote utilizado para el riego del ensayo.

Aspersor	N° Boquilla	Dist. (m)	Perímetro (m)	Ancho banda (m)	Área m ²	Q teórico L h ⁻¹	Q real L h ⁻¹	Fracción de Riego	Q teórico mod. L h ⁻¹
Inicio tramo 2		58,80							
1	11,5	61,60	387,04	2,45	948,3	621,4	675	0,250	155,3
2	10,5	63,70	400,24	2,5	1000,6	655,7	561	0,275	180,6
3	11,5	66,60	418,46	2,9	1213,5	795,2	675	0,311	247,1
4	12	69,50	436,68	2,85	1244,5	815,5	736	0,346	282,1
5	12	72,30	454,27	2,85	1294,7	848,4	736	0,380	322,3
6	12,5	75,20	472,50	2,9	1370,2	897,9	799	0,415	372,7
7	12,5	78,10	490,72	2,9	1423,1	932,5	799	0,450	419,9
8	12,5	81,00	508,94	2,875	1463,2	958,8	799	0,485	465,4
9	13	83,85	526,85	2,85	1501,5	983,9	865	0,520	511,7
10	13	86,70	544,75	2,875	1566,2	1026,3	865	0,555	569,2
11	13,5	89,60	562,97	2,9	1632,6	1069,8	933	0,590	631,0
12	13,5	92,50	581,19	2,85	1656,4	1085,4	933	0,625	678,4
13	14	95,30	598,79	2,85	1706,5	1118,3	1004	0,659	736,9

Tabla 10. Numero de aspersor (Aspersor), número de boquilla (N° Boquilla), distancia del aspersor (Dist.), perímetro que recorre el aspersor, área correspondiente al aspersor (Ancho de banda), caudal teórico (Q teórico), Caudal real (Q real), fracción de riego asignado al aspersor, caudal teórico aspersor modificado (Q teórico mod.) del segundo tramo del pivote utilizado para el riego del ensayo.

Asp.	N° Boquilla	Dist. (m)	Perímetro (m)	Ancho banda (m)	Área m ²	Q Teórico L h ⁻¹	Q Real L h ⁻¹	Fracción de Riego	Q Teórico Mod. L h ⁻¹
14	14	98,20	617,01	2,85	1758,5	1152,3	1004	0,694	799,9
15	14	101,00	634,60	2,85	1808,6	1185,1	1004	0,728	863,0
16	14,5	103,90	652,82	2,9	1893,2	1240,6	1077	0,763	947,0
17	15	106,80	671,04	2,9	1946,0	1275,2	1154	0,799	1018,3
18	14,5	109,70	689,27	2,85	1964,4	1287,2	1077	0,834	1073,2
19	15	112,50	706,86	2,825	1996,9	1308,5	1154	0,868	1135,4
20	15,5	115,35	724,77	2,85	2065,6	1353,5	1231	0,902	1221,3
21	15	118,20	742,67	2,625	1949,5	1277,5	1154	0,937	1196,9
22	15,5	120,60	757,75	2,6	1970,2	1291,0	1231	0,966	1247,1
23	17	123,40	775,35	3,3	2558,6	1676,6	1483	1,000	1676,6

Tabla 11. Caudal teórico acumulado (Q Teórico Acum), número de boquilla modificada, caudal boquilla modificada (Q Boquilla Mod) y caudal modificado acumulado (Q Mod Acum) del segundo tramo del pivote utilizado para el riego del ensayo.

Aspersor	Q Teórico Acum. L h⁻¹	N° Boquilla Modificada	Q Boquilla Mod L h⁻¹	Q Mod Acum L h⁻¹
1	1,0	5,5	152	152
2	3,0	6	180	332
3	6,0	7	248	580
4	10,0	7,5	286	866
5	15,0	8	325	1191
6	21,0	8,5	362	1553
7	28,0	9	411	1964
8	36,0	9,5	459	2423
9	45,0	10	509	2932
10	55,0	10,5	561	3493
11	66,0	11,5	675	4168
12	78,0	11,5	675	4843
13	91,0	12	736	5579

Tabla 12. Caudal teórico acumulado (Q teórico acum), número de boquilla modificada, caudal boquilla modificada (Q boquilla mod) y caudal modificado acumulado (Q mod acum) del segundo tramo del pivote utilizado para el riego del ensayo.

Aspersor	Q teórico acum. L h⁻¹	N° Boquilla Modificada	Q Boquilla Mod. L h⁻¹	Q Mod Acum L h⁻¹
14	105,0	12,5	799	6378
15	120,0	13	865	7243
16	136,0	13,5	933	8176
17	153,0	14	1004	9180
18	171,0	14,5	1077	10257
19	190,0	15	1154	11411
20	210,0	15,5	1231	12642
21	231,0	15	1154	13796
22	253,0	15,5	1231	15027
23	276,0	18	1663	16690

