



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**Escuela de Postgrado**

**EFFECTO DEL RIEGO DEFICITARIO TERMINAL Y LA APLICACIÓN DE  
ÁCIDOS FÚLVICOS SOBRE LA DINÁMICA DE LA CONDUCTIVIDAD  
ELÉCTRICA DEL SUELO Y LA CONCENTRACIÓN DE LICOPENO DEL  
TOMATE INDUSTRIAL**

**EFFECT OF TERMINAL DEFICIT IRRIGATION AND APPLICATION OF FULVIC  
ACIDS ON DYNAMICS OF SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND  
CONCENTRATION OF LYCOPENE OF INDUSTRIAL TOMATO**

Tesis para optar al grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

Ingeniero Agrónomo  
**MARCELO ANDRÉS VIDAL SALGADO**

**Director de Tesis**  
ÓSCAR SEGUEL S.

**Profesores Consejeros**  
YASNA TAPIA F.  
RODRIGO CALLEJAS R.

**Evaluador Externo**  
ALEJANDRO ANTÚNEZ B.

SANTIAGO, CHILE  
2022

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
Facultad de Ciencias Agronómicas  
Escuela de Postgrado

**EFECTO DEL RIEGO DEFICITARIO TERMINAL Y LA APLICACIÓN DE  
ÁCIDOS FÚLVICOS SOBRE DINÁMICA DE LA CONDUCTIVIDAD  
ELÉCTRICA DEL SUELO Y LA CONCENTRACIÓN DE LICOPENO DEL  
TOMATE INDUSTRIAL**

**EFFECT OF TERMINAL DEFICIT IRRIGATION AND APPLICATION OF FULVIC  
ACIDS ON DYNAMICS OF SOIL ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND  
CONCENTRATION OF LYCOPENE OF INDUSTRIAL TOMATO**

Tesis para optar al grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

**MARCELO ANDRES VIDAL SALGADO**

<b>DIRECTOR DE TESIS</b>	<b>Calificaciones</b>
Óscar Seguel Seguel Ingeniero Agrónomo, Dr.	68
<b>PROFESORES CONSEJEROS</b>	
Yasna Tapia Fernández Ingeniera en Alimentos, Dra.	65
Rodrigo Callejas Rodríguez Ingeniero Agrónomo, Dr. agr.sc.	65
<b>EVALUADOR EXTERNO</b>	
Alejandro Antúnez Barría Ingeniero Agrónomo, Ph.D	

Santiago, Chile  
2022

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
Importancia del tomate en la alimentación .....	3
Estrategias de riego en tomate.....	4
Cambio climático y salinización del suelo.....	5
Efecto de la salinidad en las propiedades del suelo .....	7
Efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y la producción de licopeno.....	7
Estrategias de manejo de suelos afectados por sales.....	9
Lavado de suelos.....	9
Uso de enmiendas orgánicas .....	9
Uso de cultivos tolerantes a la salinidad .....	10
HIPÓTESIS Y OBJETIVOS .....	12
Hipótesis.....	12
Objetivos .....	12
Objetivo general .....	12
Objetivos específicos .....	12
MATERIALES Y MÉTODO .....	13
Ubicación del estudio.....	13
Materiales .....	14
Método .....	15
Diseño experimental.....	15
Tratamientos.....	15
Unidad experimental y unidad de observación .....	16

Manejo del cultivo.....	17
Evaluaciones de suelo .....	17
Evaluación del contenido de agua y la conductividad eléctrica.....	17
Resistencia a la penetración .....	18
Interpolación de datos y generación de isolíneas .....	18
Distribución de tamaño de poros y densidad aparente.....	18
Velocidad de infiltración y conductividad hidráulica del suelo.....	18
Evaluaciones en la planta y frutos.....	19
Rendimiento del cultivo .....	19
Determinación de la concentración de licopeno .....	19
Cuantificación de la concentración de clorofila en hojas.....	19
Análisis estadístico.....	20
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>21</b>
Caracterización inicial del suelo .....	21
Condiciones climáticas y balance hídrico .....	21
Dinámica de la humedad del suelo.....	22
Isolíneas del contenido volumétrico de agua en el perfil del suelo.....	23
Dinámica de la conductividad eléctrica (CE) del suelo .....	26
Conductividad eléctrica aparente (CEa) en el perfil del suelo en tres épocas a lo largo del ciclo de cultivo .....	26
Relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\theta\%$ ) y la conductividad eléctrica aparente (CEa) del lugar de estudio.....	33
Relación entre la conductividad eléctrica aparente del suelo y la conductividad eléctrica del extracto saturado .....	34
Otras propiedades de suelo .....	35
Resistencia a la penetración en distintos puntos del perfil.....	35
Densidad aparente .....	38

Distribución de tamaño de poros .....	38
Estabilidad de microagregados .....	41
Velocidad de infiltración del suelo .....	42
Resultados del cultivo de tomate.....	43
Rendimiento y licopeno en la fruta .....	43
Concentración de clorofila en hojas de tomate .....	45
CONCLUSIONES .....	47
LITERATURA CITADA.....	48
Apéndices .....	55

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Retención de agua del suelo (gravimétrica, %) donde se realizó el estudio. fuente: Inia .....	14
Cuadro 2. Propiedades químicas del suelo donde se realizó el estudio. fuente: Inia.....	14
Cuadro 3. Composición (masa/masa) de elementos de la enmienda utilizada (fuente: humintech).....	14
Cuadro 4. Análisis del agua de riego utilizada en el ensayo.....	15
Cuadro 5. Textura y clase textural del suelo del lugar de estudio*.....	21
Cuadro 6. Periodo de riego, evapotranspiración de referencia y el agua aplicada por tratamiento en el cultivo de tomate.....	21
Cuadro 7. Conductividad eléctrica aparente del suelo ( $ce_a$ , $ds\ m^{-1}$ , promedio $\pm ee$ ) de los tratamientos de enmienda de suelo en distintos puntos del perfil luego de dos meses de aplicada la enmienda.....	26
Cuadro 8. Conductividad eléctrica aparente del suelo ( $ds\ m^{-1}$ , promedio $\pm ee$ ) de los distintos tratamientos y posiciones en el perfil al cabo de 104 días de ensayo.....	28
Cuadro 9. Conductividad eléctrica aparente del suelo ( $ds\ m^{-1}$ , promedio $\pm ee$ ) de los distintos tratamientos en distintos puntos del perfil al momento de la cosecha.....	30
Cuadro 10. Resistencia a la penetración del suelo ( $n$ , promedio $\pm ee$ ) con y sin la aplicación de ácidos fúlvicos.....	35
Cuadro 11. Resistencia a la penetración( $n$ , promedio $\pm ee$ ) de distintos puntos en el suelo al momento de la cosecha.....	36
Cuadro 12. Densidad aparente ( $mg\ m^{-3}$ , promedio $\pm ee$ ) de los distintos tratamientos a dos profundidades y tres posiciones sobre el suelo.....	38
Cuadro 13. Contenido de poros drenaje rápido ( $pdr$ , $>50\mu m$ ) (% base volumen, promedio $\pm ee$ ) de los tratamientos evaluados a dos profundidades y tres posiciones sobre el suelo...	39
Cuadro 14. Contenido de poros de drenaje lento ( $pdl$ , $10-50\ \mu m$ ) (% base volumen, promedio $\pm ee$ ) de los tratamientos evaluados a dos profundidades y tres posiciones sobre la hilera.....	39
Cuadro 15. Contenido de poros de agua útil ( $pau$ , $0,2-10\ \mu m$ ) (promedio $\pm ee$ ) de los tratamientos evaluados en tres puntos sobre el suelo y dos profundidades.....	40
Cuadro 16. Efectos de los tratamientos de riego y aplicación de ácidos fúlvicos sobre la calidad física del suelo según reynolds et al. (2009).....	40

Cuadro 17. Relación de dispersión (rd, % promedio $\pm$ ee) para microagregados en los distintos tratamientos. ....	42
Cuadro 18. Velocidad de infiltración del suelo en distintas posiciones desde la hilera de plantación (promedio $\pm$ ee) con y sin la aplicación de ácidos fúlvicos bajo riego normal. ..	42
Cuadro 19. Concentración de licopeno en la fruta, rendimiento comercial y producción de licopeno por superficie según tratamiento. ....	43
Cuadro 20. Concentración de clorofila ( $\text{mg kg}^{-1}$ , promedio $\pm$ ee) en las hojas de tomate bajo distintos tratamientos al momento de la cosecha. ....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona donde se realizó el estudio y detalle del predio. ..	13
Figura 2. Esquema de la distribución de los tratamientos y de la ubicación de las unidades de observación.....	16
Figura 3. Contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) durante el periodo de aplicación del déficit hídrico terminal. las líneas punteadas verde y anaranjada representan, respectivamente, la retención de agua a 33 kpa (cc) y a 1500 kpa (pmp).....	22
Figura 4. Isolíneas del contenido volumétrico de agua del suelo en el perfil, con la aplicación de ácido fúlvico (izquierda) y sin la aplicación de ácido fúlvico (derecha). .....	23
Figura 5. Isolíneas del contenido volumétrico de agua del suelo en el perfil bajo tratamientos de riego deficitario (arriba) y normal (abajo), sin ácido fúlvico (izquierda) y con ácido fúlvico (derecha). .....	24
Figura6. Isolíneas del contenido volumétrico de agua del suelo en el perfil bajo tratamientos de riego deficitario (arriba) y normal (abajo), sin ácido fúlvico (izquierda) y con ácido fúlvico (derecha) al momento de la cosecha. ....	25
Figura 7. Diagrama de isolíneas de la conductividad eléctrica aparente del suelo sin la aplicación de ácido fúlvico (izquierda) y con la aplicación de ácido fúlvico (derecha) después de dos meses de aplicada la enmienda. ....	27
Figura8. Isolíneas de la conductividad eléctrica aparente del suelo bajo riego deficitario (arriba) y bajo riego normal (abajo) sin la aplicación de ácido fúlvico (izquierda) y con la aplicación de ácido fúlvico (derecha). ....	29
Figura 9. Isolíneas de la conductividad eléctrica aparente del suelo bajo riego deficitario (arriba) y bajo riego normal (abajo) sin la aplicación de ácido fúlvico (izquierda) y con la aplicación de ácido fúlvico (derecha). ....	31
Figura 10. Relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\theta\%$ ) y la conductividad eléctrica aparente (cea). .....	33
Figura 11. Relación entre la conductividad eléctrica aparente y la conductividad eléctrica del extracto saturado. ....	34
Figura 12. Isolíneasde resistencia a la penetración horizontal del suelo bajo riego deficitario (arriba) y bajo riego normal (abajo) sin la aplicación de ácido fúlvico (izquierda) y con la aplicación de ácido fúlvico (derecha). ....	37
Figura 13. Isolíneas de rd del suelo bajo tratamientos de enmienda orgánica sin la aplicación de ácidos fúlvicos (izquierda) y con la aplicación de ácidos fúlvicos (derecha), bajo riego deficitario (arriba) y riego normal (abajo). ....	41

## AGRADECIMIENTOS

A todos lo que de alguna forma colaboraron en la realización de este proyecto. A los profesores del Departamento de Ingeniería y Suelos de la Universidad, en especial al Dr. Óscar Seguel Seguel por su ayuda en la ejecución de presente proyecto y por todo lo vivido y aprendido en los terrenos y el Laboratorio de Física de Suelos de la Facultad (Nace otro hijo de Seguel).

También, agradecer al Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), en especial al Investigador Ph.D Alejandro Antúnez Barría, por darme la oportunidad de trabajar y todo el apoyo recibido durante estos años. Agradecer al proyecto (Núcleo de INIA) que financió esta investigación.

Finalmente, este documento y el grado académico es un logro personal, es el cierre de un ciclo que tuvo un comienzo oscuro producto de una depresión y angustia y que he transformado en un final brillante y lleno de expectativas. ¡Así que quiero agradecer a MÍ!

Suelo como profesión y geomorfología como afición es la mejor combinación. A trabajar y viajar...

## RESUMEN

Con el aumento de las temperaturas y las menores precipitaciones hay un aumento del riesgo de salinización de suelos; por otra parte, los estreses hídrico y salino han demostrado ser beneficiosos para la concentración de metabolitos en cultivos como el tomate. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto del stress hídrico terminal y la aplicación de ácidos fúlvicos (AF) sobre la conductividad eléctrica (CE) del suelo y la producción de licopeno del fruto de tomate industrial. Se trabajó en un suelo de origen fluvial, con agua de riego de salinidad ligera y tomate tipo Pomodora, variedad "Plum Regal". El ensayo se realizó con un diseño de bloques al azar con estructura de parcela dividida y tres repeticiones, donde la parcela principal corresponde a dos niveles de tiempo de riego en la etapa terminal del cultivo y la subparcela corresponde a dos niveles de AF (con y sin). Los resultados muestran un incremento de la CE aparente por efecto del riego deficitario, aunque a niveles menores a  $4 \text{ dS m}^{-1}$  equivalentes a CE en pasta saturada. La aplicación de AF disminuye la CE, en particular hacia el hombro de la platabanda de cultivo, sin afectar la resistencia a la penetración; por su parte, la velocidad de infiltración del suelo tuvo una leve disminución bajo línea de goteo cuando se aplica AF. El rendimiento no se afectó, aunque los niveles de clorofila b y la concentración de licopeno en la fruta presentaron una interacción entre los factores, maximizándose cuando hay déficit hídrico sin la aplicación AF.

**Palabras claves:** salinidad, riego, *Solanum lycopersicum* L, estrés hídrico, estrés salino.

**ABSTRACT**

With the increase in temperatures and decrease of rainfall, there is an increased risk of soil salinization. On the other hand, water and saline stresses have been shown to be beneficial for the concentration of metabolites in crops such as tomato. The objective of the study was to evaluate the effect of terminal water stress and the application of fulvic acids (FA) on soil electrical conductivity (EC) and lycopene production of industrial tomato fruit. We worked on soil of fluvial origin, with irrigation water of light salinity and Pomodora-type tomato, variety "Plum Regal". The trial was carried out with a randomized block design with a divided plot structure and three replicates, where the main plot corresponds to two levels of irrigation time in the terminal stage of the crop and the subplot corresponds to two levels of AF (with and without). The results showed an increase in bulk EC due to the effect of deficit irrigation, although at levels lower than  $4 \text{ dS m}^{-1}$  equivalent to EC in saturated paste. The application of AF decreases the EC, in particular towards the shoulder of the ridge plowing, without affecting the penetration strength; on the other hand, the soil infiltration rate had a slight decrease under the drip line when AF is applied. The yield was not affected, although the levels of chlorophyll b and the concentration of lycopene in the fruit showed an interaction between the factors, maximizing when there is water deficit and AF is not applied.

**Keywords:** salinity, irrigation, *Solanum lycopersicum L*, hydric stress, saline stress.

## INTRODUCCIÓN

### Importancia del tomate en la alimentación

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta altamente cultivada alrededor del mundo y moderadamente sensible a la salinidad; su fruto es una baya muy coloreada cuando madura, típicamente de tonos que van del amarillento al rojo, debido a la presencia de los pigmentos licopeno y caroteno (Castellanos, 2009).

A nivel mundial, la producción de tomate fresco alcanza los 160 millones de toneladas, se cultiva tres veces más tomates que papas y seis veces más que arroz en todo el mundo; de ese total de producción, la cuarta parte se procesa y destina a la elaboración de pasta, salsas, ketchup y tomate en conserva, lo cual deja al tomate como líder indiscutido entre los vegetales de uso industrial, con aproximadamente 35 millones de toneladas de tomate procesados anualmente (ODEPA, 2018). Chile está séptimo en el ranking mundial de países exportadores de pasta de tomate; durante el año 2017, hizo envíos de 131 mil toneladas, por un monto total de 117 millones de dólares, siendo considerado el proveedor natural de Sudamérica, ya que es el que mantiene la mayor producción en esta parte del continente (ODEPA, 2018).

En la actualidad, el consumidor es cada vez más consciente de la necesidad de consumir alimentos que sean un aporte en aspectos nutricionales, que apunten a la prevención y protección contra enfermedades degenerativas y crónicas como el cáncer, enfermedades cardiovasculares y enfermedad de Parkinson (Navarro y Periago, 2016), lo que se conoce como alimentos funcionales (Adalid *et al.*, 2010).

El tomate es considerado un alimento funcional debido a las propiedades beneficiosas sobre la salud que le han sido imputadas, este efecto protector, se ha atribuido principalmente al licopeno (Ried y Fakler, 2011; George *et al.*, 2004), componente bioactivo que juega un rol importante en la prevención de enfermedades cuando se presenta un consumo regular (Castellanos, 2009).

El color rojo del tomate es proporcionado por el licopeno, el cual constituye aproximadamente el 80-90% del contenido total de los carotenoides presentes en la fruta (García Closas *et al.*, 2004),

El contenido de licopeno en el tomate está influenciado por varios factores, como son la nutrición de la planta, factores ambientales y el genotipo de la planta, que en conjunto pueden afectar significativamente la biosíntesis de carotenoides (George *et al.*, 2004). La cantidad de licopeno en el tomate puede variar de 18 a 65 mg kg<sup>-1</sup> de peso fresco (Martínez Valverde *et al.*, 2002). El contenido en nutrientes y sustancias bioactivas en los alimentos es controlado por la interacción entre factores genéticos, ambientales y de manejo agronómico, siendo la concentración de nutrientes del suelo y la salinidad del agua de riego de gran influencia en el rendimiento y la calidad de la fruta (Dorais y Papadopoulos, 2000).

## Estrategias de riego en tomate

Diferentes estudios han encontrado importantes diferencias en el contenido en licopeno entre cultivares de tomate, los que varían según las condiciones ambientales y las prácticas agronómicas como el riego (Binoy *et al.*, 2004). Los factores ambientales que más influyen en la concentración de licopeno en el fruto maduro son la disponibilidad de agua, nutrientes, temperatura y la iluminación (Dumas *et al.*, 2003). Se ha demostrado que la aplicación de un estrés salino moderado a plantas de tomate aumenta el contenido de licopeno y otros antioxidantes en el fruto, con respuestas en un rango del 30 al 85% de incremento en comparación con las plantas no estresadas (Martínez *et al.*, 2010).

Por otra parte, una reducción de la cantidad de agua aportada al cultivo de tomate generalmente se traduce en una disminución del rendimiento comercial y un menor peso del fruto, pero en un aumento de los sólidos solubles y un mayor contenido en licopeno (Macua *et al.*, 2010). En este sentido, Sándor *et al.*, (2020), señalan que el mayor rendimiento de tomate se alcanza con el nivel más bajo de estrés hídrico (100% ETc) con una aplicación de 392 mm de agua, sin embargo, en la concentración y el rendimiento de licopeno, los tratamientos de estrés hídrico (75% y 50% ETc), resultan con una concentración significativamente más alta, lo que podría compensar el menor rendimiento comercial. En la misma línea, Lahoz *et al.*, (2016), encontraron diferencias en el rendimiento, pero no, en contenido de licopeno entre el testigo (100% ETc) y el riego deficitario (75% ETc). Mientras que el exceso de riego (125% ETc) tuvo un efecto de dilución en los niveles de licopeno de la fruta. También González-Meza y Hernández-Leos (2000), reportan que con la aplicación de 434 mm de agua se alcanza el mayor rendimiento, lo que significa un incremento de un 40 % en relación a una aplicación de 347 mm de agua.

Por otra parte, es importante la época donde se aplica del déficit hídrico. En esta línea, Valcárcel *et al.*, (2020), indican que cuando se aplicó un déficit hídrico moderado de un 75% de la ETc a partir de pinta, no se produjeron diferencias en el rendimiento comercial en comparación a plantas sin déficit. Pero al aplicar un déficit severo de 50% de la ETc, el rendimiento comercial se reduce y la concentración de sólidos solubles aumenta. Helyes *et al.*, (2012), señalan que el rendimiento comercial se efecto negativamente al suspender el riego 30 días antes de la cosecha, sin afectar la concentración de licopeno en la fruta.

Los efectos del estrés hídrico sobre la evapotranspiración del cultivo se reflejan en la reducción del valor del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ), afectado por el coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ). Este es un factor adimensional de reducción de la transpiración y describe el efecto de la reducción hídrica en la planta, en función de la cantidad de agua disponible en el suelo (Allen *et al.*, 2006). Los diferentes niveles de  $K_s$  inducen a que la planta tenga una tasa de transpiración menor que la óptima, por lo que el rendimiento comienza a disminuir (López *et al.*, 2009). Desde el punto de vista agronómico, lo más importante del  $K_s$  es la oportunidad de realizar la gestión del riego con miras a tener un efecto sobre la calidad de la producción (Allen *et al.*, 2006).

De los tipos de tomate cultivados, los tomates industriales determinados presentan un color rojo intenso y sus subproductos son las fuentes más ricas en licopeno (Tanaka *et al.*, 2012).

Por otra parte, se desconoce en detalle el efecto de las prácticas de riego deficitarias sobre la acumulación de sales o contaminantes en el suelo y su efecto en los metabolitos de los cultivos; sumado al cambio climático, estas prácticas fomentarían los procesos de salinización secundaria del suelo. En los suelos bajo riego, en la medida que el agua agregada sea consumida por la vegetación y evaporada y las precipitaciones no sean suficientes para lixiviar las sales, el proceso de salinización es inevitable, ya que las sales no se evaporan y se acumulan en el perfil (Bui, 2013). Los cultivos agrícolas pueden requerir montos de riego por temporada en rangos de 4.000 a 10.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, y aunque el agua de riego sea de buena calidad (< 1 dS m<sup>-1</sup>), la cantidad aportada de sales puede ser superior a 7 Mg ha<sup>-1</sup> anuales en el rango alto de riego (Sadzawka *et al.*, 1992), lo que generará un efecto acumulado en el tiempo, en particular bajo condiciones semiáridas.

### **Cambio climático y salinización del suelo**

En la mayoría de los escenarios de cambio climático proyectados para América del sur, hay una alta probabilidad que se produzca una disminución en los rendimientos de los cultivos, debido al aumento de las temperaturas y las menores precipitaciones, generándose eventos cada vez más seguidos de noches cálidas, precipitaciones intensas y sequías (Ortiz, 2012). En Chile, las predicciones basadas en estudios de series de tiempo permiten concluir que en todo el país se experimentará un aumento de las temperaturas de forma general, con un mayor incremento en la zona norte (Santibáñez *et al.*, 2014). Hacia el año 2030, habría un aumento de a lo menos 0,5°C para las zonas sur - austral y de 1,5°C para el norte grande y el altiplano (MMA, 2017).

Los efectos del calentamiento global se manifiestan por medio del incremento en la temperatura, disminución de las precipitaciones y disponibilidad de agua de riego, lo que, de acuerdo a Pulido Madrigal (2016) genera el aumento en la concentración de sales en el agua de riego, aumentando el riesgo desalinización de suelos agrícolas. Este mismo autor indica que, con el calentamiento global, los problemas de salinidad del suelo se incrementaron 24,1% y 15,8% a 30 y 60 cm de profundidad respectivamente en el periodo 1970-2001, con un impacto que significó una reducción del 15,2% de la producción agrícola mundial.

El clima es el principal factor que afecta el desempeño de los cultivos frente a las condiciones salinas. La mayoría de los cultivos pueden tolerar altos niveles de estrés a la salinidad si el clima es frío y húmedo en comparación con un clima cálido y seco (Rhoades, 1990). Por otra parte, se ha visto que es prácticamente seguro que, en un futuro cercano, en la mayoría de las zonas continentales se produzcan temperaturas extremas altas más frecuentemente, por lo cual es probable que las olas de calor se presenten con mayor frecuencia y de manera más duradera, lo que podría generar degradación del suelo por aumento de la concentración salina. La salinización del suelo en las áreas de regadío se explica por el uso de aguas salinas para riego, junto a técnicas de producción intensivas combinadas con un uso poco eficiente del agua y condiciones crecientes de aridización (OCDE y CEPAL, 2005). Las sales precipitan cuando se excede su solubilidad, y esto ocurre generalmente cuando la solución se concentra en el suelo por la evapotranspiración

(ET). En suelos bien drenados y con abundantes precipitaciones, donde la lixiviación es mayor que la evapotranspiración potencial ( $ET_0$ ), las sales no se acumulan, porque los iones se lixivian al agua subterránea; por otro lado, las sales se acumulan cuando la lixiviación es mínima (Sadzawka *et al.*, 1992).

Los procesos de salinización del suelo se clasifican de acuerdo con el origen de las sales: a) si las sales provienen del material parental del suelo, se trata de “salinización primaria”, mientras que, b) si las sales provienen de una fuente distinta (riego, minería) corresponde a “salinización secundaria” (Sadzawka, 2006), tratándose en este último caso de un proceso de degradación de suelo (Porta *et al.*, 2014). A nivel mundial, se estima que un área de  $8,31 \times 10^6$  km<sup>2</sup> de suelos tienen problemas de salinidad, lo que equivale a cerca del 7% de los suelos del planeta (Zhao *et al.*, 2016). De estos, dos tercios están degradados por salinización secundaria (Rengasamy, 2010).

Respecto a la salinización secundaria, varias son las causas vinculadas a este problema, entre las cuales es posible destacar un excesivo uso de fertilizantes, uso de agua de mala calidad (salina), mal drenaje y tala de vegetación arbórea (Tanwar, 2003). La salinización secundaria se ve acentuada en zonas donde existen pocas precipitaciones capaces de disolver sales y arrastrarlas en profundidad; en estas regiones, el balance hídrico es negativo, normalmente con una razón entre precipitación y evaporación menor a 0,75 (Sadzawka, 2006). La alta ET favorece el afloramiento de las sales en superficie por fenómenos de capilaridad, aunque igual de importante resulta la calidad del agua de riego (Qadir y Oster, 2004) ya que, si posee gran cantidad de solutos disueltos, se desencadenará la acumulación de sales en el suelo, producto del desbalance en la entrada y la salida de ellas en el perfil (Rengasamy, 2010).

Las sales en el suelo pueden ser redistribuidas por las precipitaciones, el agua del suelo, el agua subterránea y el agua de riego; esta última es significativa bajo condiciones de poca precipitación y alta evapotranspiración (Pankova *et al.*, 2015). De esta forma, el riego se vuelve un factor fundamental, debido a que al proveer agua al suelo disminuye el estrés salino para la planta, siendo crucial la calidad del agua a utilizar, la frecuencia y el método de riego (Rhoades *et al.*, 1992, Qadir y Oster, 2004). En zonas donde la lluvia es insuficiente, la salinidad del suelo a largo plazo limita el desarrollo agropecuario y a corto plazo, las sales pueden concentrarse en las zonas de raíces y disminuir la producción de los cultivos (Dudley, 2008). Rhoades *et al.*, (1992) señalan que la pérdida anual de suelo por salinización secundaria, supera a la incorporación de nuevos suelos bajo riego, por lo que se hace necesaria la toma de medidas para la recuperación de estos suelos. En Chile, la zona potencialmente sujeta a problemas de salinidad es aquella ubicada desde la VI Región al norte. Hacia el sur, las posibilidades disminuyen ostensiblemente, debido a la mayor precipitación y al menor contenido de sales en las aguas de riego (Razeto, 1995). Conocer su dinámica y las estrategias para prevenir procesos de salinización intensos es crucial para una producción agropecuaria sustentable en el tiempo.

## **Efecto de la salinidad en las propiedades del suelo**

La concentración y el tipo de las sales influyen en el comportamiento físico y las propiedades químicas de los suelos en los que se encuentran. El yeso y las sales más solubles se acumulan en suelos donde la evapotranspiración excede en gran medida a la lixiviación, en tanto la composición y concentración de sales solubles puede influir en el comportamiento físico de las partículas del suelo debido al efecto que tienen sobre la dispersión y floculación de las partículas (Larry y Larry, 2012). En general, las altas concentraciones de electrolitos mantienen los suelos floculados, mientras que la dispersión coloidal ocurre cuando la concentración de electrolitos es baja y el sodio predomina en los sitios de intercambio. Las sales de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^+$  son 100 veces más solubles en agua que la calcita y el yeso, y se mueven fácilmente con flujo de agua saturada e insaturada en el suelo (Larry y Larry, 2012).

Los procesos de salinización y alcalinización aportan al suelo elementos químicos y características físicas, que pueden tener un efecto profundo en el ecosistema. El exceso de sodio intercambiable y el alto pH como resultado de la acumulación de sales, generan la pérdida de la estructura del suelo, disminución de la conductividad hidráulica y la tasa de infiltración de los suelos, con efectos negativos sobre los cultivos, ya sea por efecto químico (intoxicación por exceso de  $\text{Na}^+$ ) como físico (por mala relación agua/aire) al encontrarse el suelo en un estado disperso (Lauchli y Epstein, 1990).

La velocidad de infiltración del agua es especialmente afectada por la combinación de sodicidad y salinidad (Sadzawka, 2006). Un manejo agrícola apropiado puede depender de un conocimiento adecuado de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo; por tal motivo, la estimación de la velocidad de infiltración y la lámina de agua acumulada es de mucha importancia, ya que permiten cuantificar la escorrentía superficial, erosión, capacidad de recarga de acuíferos y mejorar el manejo del riego (Machiwal *et al.*, 2006).

## **Efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y la producción de licopeno**

Las principales sales que afectan a los vegetales y que se encuentran en el suelo o el agua, corresponden a cloruros y sulfatos de sodio, calcio, magnesio y potasio, siendo para las plantas los principales iones tóxicos el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  y  $\text{Na}^+$  (Chinnusamy *et al.*, 2005).

Aunque el tomate es relativamente tolerante a la salinidad, su productividad en condiciones de campo se ve afectada por la salinidad del suelo (Giorgi y Lionello, 2008), con un nivel máximo tolerado de CE de  $2,5 \text{ dS m}^{-1}$  sin reducción en el rendimiento (Campos *et al.*, 2006). El uso de agua de riego con CE 1,7; 2,3; 3,4 y  $5,0 \text{ dS m}^{-1}$  condujo a reducciones en el rendimiento de tomate en 0, 10, 25 y 50%, respectivamente (Boamah *et al.*, 2011), esto debido a que el estrés salino provoca un estrés osmótico en las raíces de las plantas, resultando en una reducción en el crecimiento de hojas y brotes; en condiciones extremas, el estrés generado por la salinidad conduce a un desequilibrio iónico que causa necrosis y muerte prematura de hojas viejas (Julkowska y Testerink, 2015).

Los efectos de la salinidad en el tomate pueden ser negativos, debido a la reducción del rendimiento y el aumento de la pudrición del final de la flor, o beneficioso, ya que aumenta la concentración de sólidos solubles en los frutos y la acidez (De Pascale *et al.*, 2001). El cultivo del tomate en zonas con problemas de salinidad genera en las plantas efectos fisiológicos, morfológicos y bioquímicos, tales como: a) disminución de la fotosíntesis, b) menor peso de los frutos y c) cambios cuantitativos y cualitativos en la síntesis de proteínas por cambios en la expresión de genes (Singh y Chatrath, 2001). Los frutos se afectan negativamente en su peso fresco, pero positivamente en cuanto a algunos atributos organolépticos y/o de interés para la agroindustria, puesto que presentan un mayor contenido de compuestos solubles, sólidos totales, acidez titulable, carotenoides y licopeno (Grainferberg *et al.*, 2000).

Aunque no hay una tendencia clara en la respuesta de las plantas de tomate a producir carotenoides cuando son sometidas a estrés salino, investigaciones referentes a este pigmento, en las cuales se sometieron plantas de tomates a tratamientos con aguas salinizadas, señalan que las concentraciones de carotenoides totales y licopeno se incrementan gradualmente desde los niveles más bajos de CE ( $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) hasta alcanzar los  $4,4 \text{ dS m}^{-1}$ , valor umbral por sobre el cual comenzaba a decrecer su concentración (Maggio *et al.*, 2001). Así, es necesario tener en cuenta que un estrés salino ligero (asociado a un estrés hídrico) favorece la síntesis de licopenos, sin embargo, un estrés excesivo afectará negativamente su rendimiento, impidiendo lograr el objetivo de producir un alimento saludable en altas cantidades (Singh y Chatrath, 2001).

También es importante la etapa de crecimiento del cultivo en la que se encuentra cuando ocurre el estrés salino. Minhas (1996), indica que la aplicación de agua no salina en una etapa sensible y agua salina en una etapa relativamente tolerante podría minimizar la reducción en rendimiento por salinidad. En este sentido, Mizrahi *et al.*, (1988) señalan que el rendimiento general de plantas de tomate regadas con  $3 \text{ dS m}^{-1}$ , aplicadas en una etapa tardía del desarrollo no fue significativamente diferente al control de plantas, mientras que la calidad del fruto mejoró significativamente, aumentando el contenido de carotenoides. Por su parte, Del Amor *et al.*, (2001) indican que la tolerancia a la salinidad de las plantas de tomate aumenta cuando la aplicación del estrés salino se retrasa, mientras que la calidad de la fruta se mejora sin afectar el rendimiento.

Nichols *et al.*, (1995) muestran que a mayores niveles de estrés se mejora la calidad de los frutos, al aumentar la concentración de sólidos solubles. Experiencias similares con tomates Cherry regados con soluciones con CE de 3, 5 y  $8 \text{ dS m}^{-1}$  y sometidos a una evaluación sensorial, mostraron preferencia por parte de un panel entrenado por los tomates tratados con una CE de  $5 \text{ dS m}^{-1}$  en el agua de riego, resultados que estarían vinculados a una relación sólidos solubles/acidez y aroma que expresaron los frutos a esa CE del agua de riego. Es decir, el riego con agua salina puede tener efectos positivos en los frutos de tomate, que en el caso de los sólidos solubles y los carotenoides constituyen un atributo de interés o deseable para la agroindustria (Gough y Hobson, 1990).

## Estrategias de manejo de suelos afectados por sales

Hay por lo menos tres estrategias para disminuir el efecto negativo de la salinización del suelo.

**Lavado de suelos.** Los suelos con niveles excesivos de salinidad pueden recuperarse aplicando suficiente agua para lavar las sales más allá de la zona radical. Previo al lavado, deben realizarse trabajos que mejoren permanentemente las condiciones físicas del suelo para facilitar el drenaje (Sadzawka, 2006). Cuando la acumulación de sales en el suelo es alta, estas pueden ser lixiviadas aplicando más agua de la requerida por los cultivos. Esta agua extra, arrastraría una porción de sales bajo la zona de las raíces (Ayers y Westcot, 1994), constituyendo la fracción de lavado del agua de riego.

El mejoramiento del drenaje interno y la lixiviación, como medidas para reducir la acumulación de sales en el suelo, pueden generar mayores volúmenes de agua percolada, que al ser descargados en los cauces o en los acuíferos, ocasiona problemas de degradación ambiental. Por tal motivo, estas prácticas deben ser rigurosamente controladas (Rhoades *et al.*, 1992).

**Uso de enmiendas orgánicas.** La recuperación de suelos afectados por sales requiere de la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas. La aplicación de materia orgánica es recomendada para la rehabilitación de suelos con problemas de salinidad, existiendo varios mecanismos que actúan en el aumento de la tolerancia o la disminución de la salinidad (Melero *et al.*, 2007). La incorporación en forma regular al suelo de materia orgánica, como rastrojos de cultivo, compost o abonos verdes, entre otros beneficios, mejora la estructura del suelo y la infiltración del agua, lo cual proporciona una defensa contra los efectos adversos de las sales (Munns *et al.*, 2005).

La materia orgánica es un componente importante para mejorar las propiedades químicas y físicas del suelo (Diacono y Montemurro, 2010). Para mejorar un suelo con problemas de sales hay que reducir el pH y el potencial osmótico de la solución del suelo, promoviendo buenas condiciones para la disminución de la dispersión de las fracciones coloidales (Raychev *et al.*, 2001).

Las diferentes fracciones de la materia orgánica pueden mejorar las condiciones físicas, químicas o biológicas que propician el crecimiento vegetal en suelos salinos. Las sustancias húmicas del suelo, como el ácido húmico y el ácido fúlvico, derivan principalmente de la biodegradación química de los residuos vegetales, animales y de la actividad sintética de los microorganismos (Gulser *et al.*, 2010). La fracción activa de la molécula orgánica ( $\text{COO}^-$ ) es capaz de formar quelatos, arrastrándolos consigo a capas más profundas del suelo en el caso de ácidos de menor peso molecular, o capturando los cationes de la solución suelo en el caso de ácidos de mayor peso molecular (Osman y Ewees, 2008).

Los ácidos húmicos ayudan a disminuir el  $\text{Na}^+$ , la CE y el pH del suelo, debido probablemente al aporte de  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^+$ , los cuales se mantienen en los sitios de intercambio catiónico, minimizando la adsorción de  $\text{Na}^+$  y permitiendo su lixiviación

durante los eventos de precipitaciones (Lakhdar *et al.*, 2009). Por su parte, los ácidos fúlvicos, al ser solubles en agua en todo el rango de pH, actúan como un quelante natural de minerales y metales en suelos (Eyheraguibel *et al.*, 2008). Así, los ácidos fúlvicos en el suelo favorecen la disponibilidad y movilización de cationes para las plantas, además de dar estabilidad a los agregados del suelo, mejorando la retención de agua y aireación del suelo (Bronick y Lal, 2005).

Ambos grupos orgánicos influyen en la estabilidad de los agregados, la capacidad amortiguadora de pH, la sorción de compuestos orgánicos hidrofóbicos y transporte, biodisponibilidad y complejación de metales presentes en el medio ambiente (Rosa *et al.*, 2005). Sin embargo, con el objeto de movilizar sales dentro del perfil, los ácidos fúlvicos han mostrado una mayor efectividad que los ácidos húmicos (Eyheraguibel *et al.*, 2008).

El estrés hídrico (y eventual estrés salino) aumentaría producción de licopenos en la fruta, pero con menor rendimiento. Por otra parte, un estrés salino excesivo (derivado por el estrés hídrico) puede afectar fuertemente el desarrollo del cultivo, por lo que el uso de ácido fúlvico se plantea como una solución para realizar estreses hídricos moderados, sin afectar el rendimiento y la producción de licopenos en el cultivo de tomate (Eyheraguibel *et al.*, 2008).

**Uso de cultivos tolerantes a la salinidad.** Hay dos grupos de plantas de acuerdo al mecanismo de adaptación a la salinidad: a) plantas que impiden el ingreso de los iones presentes en la solución del suelo al interior de sus tejidos o sitios más activos (yemas y hojas en expansión) definidas como "excluyentes de iones" y, b) plantas que acumulan los iones al interior de la misma planta o en órganos especiales, llamadas "incluyentes de iones" (Cantore y Musacchi, 2000).

Las plantas para enfrentar la salinidad producen solutos compatibles de manera de disminuir internamente su potencial osmótico (osmorregulación), ya sea con sales minerales inorgánicas absorbidas desde la solución del suelo o con compuestos orgánicos solubles producidos por la propia planta, pudiendo ser azúcares, alcoholes, compuestos de azufre ternario y compuestos de amonio cuaternario como prolina y glicina (Flagella *et al.*, 1999). Dentro de los tomates silvestres, de gran interés para el mejoramiento genético de la especie cultivada, son las especies *Lycopersicon chilense*, *L. peruvianum*, *L. pennellii*, *L. cheesmanii* y *L. pimpinellifolium*, a las que se les han detectado accesiones con tolerancia a salinidad (Rick, 1982). En cuanto a la tolerancia a salinidad entre distintas especies, investigaciones que evaluaron 20 accesiones de *L. peruvianum*, 2 accesiones de *L. pimpinellifolium* y 6 de *L. esculentum* empleando NaCl, señalan la existencia de un potencial genético para tolerancia a salinidad en el germoplasma silvestre de estas especies (Srinivas, 2001).

Para superar los problemas de absorción de agua generado por la salinidad, las plantas requieren acumular solutos compatibles a nivel de citosol y organelos, sin afectar la actividad de las enzimas, logrando así disminuir el potencial osmótico, hecho que facilita el movimiento del agua hacia el interior de las células de las raíces (Yokoi *et al.*, 2002). Este comportamiento, en el caso del tomate, desencadena cambios que potencialmente pueden ser positivos para la síntesis de metabolitos de interés nutricional, pero es necesario

entender bien la dinámica de las sales durante el desarrollo del cultivo, y cómo esta se afecta en función de los estreses hídricos y salinos a los que el cultivo es sometido.

## **HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

### **Hipótesis**

La aplicación de ácido fúlvico reduciría el aumento de la conductividad eléctrica del suelo generada por el riego deficitario con agua levemente salina, sin afectar la producción de licopeno.

### **Objetivos**

#### **Objetivo general**

Evaluar el efecto del estrés hídrico terminal y la aplicación de ácidos fúlvicos sobre la conductividad eléctrica del suelo y la producción de licopeno del fruto de tomate industrial.

#### **Objetivos específicos**

Determinar el efecto de los tratamientos de riego y el uso de ácido fúlvico sobre la conductividad eléctrica y algunas propiedades físicas del suelo.

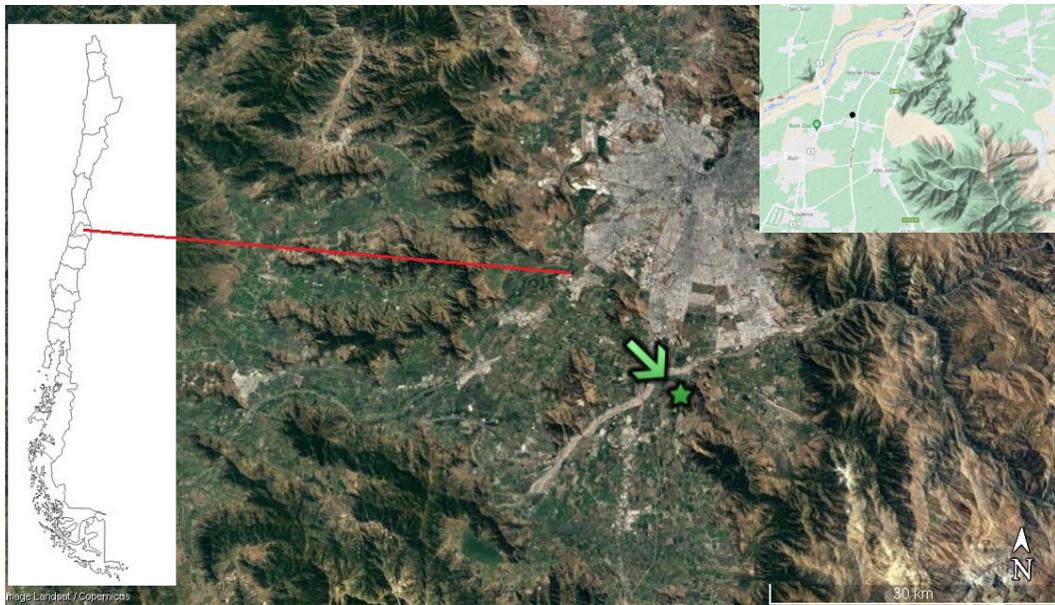
Analizar la distribución espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de agua del suelo según los tratamientos.

Determinar el efecto de los tratamientos en el rendimiento del cultivo, el contenido de clorofila en hojas y la producción de licopeno.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Ubicación del estudio

El ensayo de campo se realizó entre los meses de noviembre y marzo de la temporada 2020/2021 en el Centro de Investigación “Los Tilos”, perteneciente al Centro Regional de Investigación INIA La Platina, ubicado en la Comuna de Buin ( $33^{\circ}42'17,29''$  S,  $70^{\circ}42'05,72''$  O), sobre un suelo de origen fluvial. En la figura 1 se presenta una imagen donde se señala el sector donde se realizó el estudio. La analítica de laboratorio se realizó en los laboratorios de Física de Suelos (Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas) y de Química de Suelos (INIA La Platina).



**Figura 1.** Mapa de ubicación de la zona donde se realizó el estudio y detalle del predio.

El clima de la zona corresponde al tipo templado mediterráneo, con estación seca prolongada y corto invierno lluvioso. La temperatura media anual es de  $14^{\circ}\text{C}$ , el mes más cálido corresponde a enero, con una temperatura media máxima de  $22^{\circ}\text{C}$ , y el mes más frío es julio, con un promedio de  $7^{\circ}\text{C}$  de temperatura mínima. Las precipitaciones presentan gran irregularidad, debido a que un año puede ser muy lluvioso y el siguiente muy seco, registrándose un promedio de lluvia anual de 350 mm (Inzunza, 2019). Según datos obtenidos desde la estación agroclimática (Agromet-INIA) ubicada en el lugar del estudio, la evapotranspiración de referencia máxima mensual es de 148 mm, lo que se da en el mes de diciembre. Mientras que, la evapotranspiración de referencia de la temporada de crecimiento del tomate es de 591 mm.

El suelo del área de estudio pertenece, de acuerdo a CIREN (1996), a la Serie Buin (Fase BUIN-1), profundo, plano, de clase textural franca, con bloques subangulares, bien drenado

y sin limitaciones para la actividad agrícola. En los cuadros 1 y 2 se presentan la retención de agua y los niveles de fertilidad del suelo.

**Cuadro 1.** Retención de agua del suelo (gravimétrica, %) donde se realizó el estudio.

Fuente: INIA

Profundidad) (cm)	Retención de agua		Agua aprovechable	Densidad aparente Mg m <sup>-3</sup>
	33 kPa	1500 kPa		
0 - 35	10,51	7,02	3,49	1,40
35 - 60	11,78	8,03	3,75	1,45

**Cuadro 2.** Propiedades químicas del suelo donde se realizó el estudio. Fuente: INIA

Profundidad (cm)	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	MO %	Nitrógeno disponible	Fósforo disponible mg kg <sup>-1</sup>	Potasio disponible
0 - 35	7,8	1,2	1,2	26	9	179
35 - 60	8,1	1,3	1,1	22	4	144

## Materiales

Se trabajó con 1.000 plantas de tomate industrial tipo Pomodora, variedad “Plum Regal”, de crecimiento determinado. Las plantas se sembraron en almácigo bajo invernadero en condiciones controladas y se trasplantaron al inicio del ensayo al estado de 3 a 4 hojas verdaderas, en un marco de plantación de 1,40 m entre hileras y 0,25 m en la sobre hilera.

Se utilizó el producto comercial “Fulvital Plus WSP”. Este es un bioestimulante compuesto de sustancias concentradas de ácidos fúlvicos derivados de la leonardina, más oligoelementos esenciales. El detalle de la composición se presenta en el cuadro 3.

**Cuadro 3.** Composición (masa/masa) de elementos de la enmienda utilizada (Fuente: Humintech).

Componente	Composición (%)
Ácidos fúlvicos	70,0
Mg	5,0 a 6,0
S	6,0
Fe	4,0
Zn	2,5
Mn	2,5
Cu	1,0

El agua de riego se aplicó a través de cintas de riego de caudal nominal de 5 L h<sup>-1</sup> por metro; cada hilera tuvo una línea de riego, la que se ubicó 5 cm al lado de la hilera de plantación. El cultivo se regó con agua proveniente del río Maipo que según el análisis

presentado en el cuadro 4, es catalogada como moderadamente salina y que puede inducir efectos perjudiciales en cultivos sensibles.

**Cuadro 4.** Análisis del agua de riego utilizada en el ensayo.

pH	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	Complejo iónico ( $\text{mmol}^+/\text{L}$ )								RAS	Na%
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>		
7,89	1410	6,82	1,34	5,68	0,07	ND	1,14	6,10	5,51	2,8	40,9

El monitoreo y registro de las condiciones de humedad de suelo se realizó por medio de sensores FDR con datalogger telemétrico modelos GS1 y GS3 (Decagon, Pulman, WA, EUA). También mediante un TDR portátil Field Scout modelo 150 se evaluó el contenido volumétrico del agua y la CE aparente del suelo (CEa); todo lo anterior se complementó con muestreos directos de suelo para determinar el contenido volumétrico de agua (mediante cilindros) y la CE del extracto de saturación (CEe). El monitoreo de las variables climáticas como la ET<sub>0</sub>, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar incidente, fueron registrados por medio de la estación agroclimática Los Tilos, perteneciente a la red AGROMET-INIA.

## Método

### Diseño experimental

El ensayo se realizó con un diseño de bloques completos al azar con estructura de parcela dividida, donde en la parcela principal se aplicaron dos niveles de riego (F0 y F1) y en las sub parcelas se aplicaron dos niveles de ácidos fúlvicos (con y sin), según se detalla a continuación.

### Tratamientos

Los niveles de riego se aplicaron en la parcela principal, alterando el tiempo de riego del cultivo en función de un coeficiente estrés objetivo (Ks), correspondiendo a:

- F0: Un solo tiempo de riego durante todo el ciclo del cultivo (Ks=1).
- F1: Mismo tiempo de riego durante la etapa vegetativa del cultivo (Ks=1) y posterior estrés hídrico (Ks=0,5) a partir de punta, correspondiente a la mitad del agua requerida, proporcionada en base a la mitad del tiempo de riego de F0.

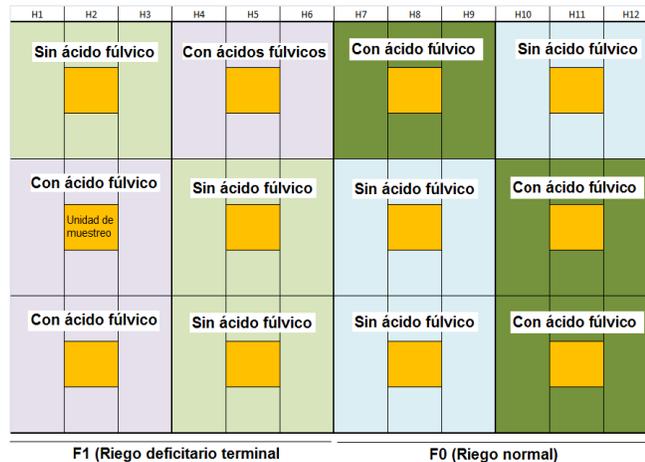
La frecuencia de riego se determinó a través de los sensores de humedad, fijando como humedad de déficit mínimo un 19%  $\theta_v$  a 15 cm de profundidad. Mientras que el tiempo de riego se fijó como el tiempo en aumentar la humedad desde el déficit mínimo hasta capacidad de campo.

Las variables aplicadas en las sub parcelas fueron distribuidas al azar dentro de las parcelas principales y corresponden a:

- T0AF: Aplicación de una dosis comercial de 20 kg ha<sup>-1</sup> de ácido fúlvico (Fulvital Plus, WSG) diluido en agua. La dosis correspondiente al tamaño de la unidad experimental se diluyó en 20 litros de agua y se aplicó sobre la línea de goteros, dando un riego inmediatamente después. Se realizaron dos aplicaciones durante la temporada, la primera a los 23 días después de transplante, una vez que las plantas se establecieron bien en el campo, y la segunda a los 90 días después de transplante. Ambas aplicaciones totalizan una dosis de 40 kg ha<sup>-1</sup>.
- T2: Sin aplicación de ácido fúlvico.

### Unidad experimental y unidad de observación

Cada unidad experimental estuvo compuesta por tres hileras de 1,40 m de ancho y 8 m de largo, con aproximadamente 32 plantas de tomate en cada hilera. La unidad de observación fue la hilera central de cada unidad experimental, considerándose las hileras laterales como bordes. En la figura 2 se presenta un esquema de cómo se montó el ensayo y la asignación al azar de los tratamientos.



**Figura 2.** Esquema de la distribución de los tratamientos y de la ubicación de las unidades de observación (el color corresponde a una unidad experimental con su respectiva unidad de observación de color amarillo en el centro).

En cada unidad de observación, ubicada en el centro de cada unidad experimental, se realizaron las evaluaciones de las propiedades en el fruto de tomate y calicatas para el muestreo de suelo según metodologías detalladas más adelante.

## Manejo del cultivo

Previo al trasplante, se preparó el suelo con rastras para dejarlo mullido y en condiciones físicas adecuadas para el establecimiento de la planta. Con este objetivo, se formaron mesas de 10 cm de altura y 40 cm de ancho con un melgador, espaciadas a 1,40 m.

En cada unidad experimental, se trasplantó tomate tipo pomodora, variedad Plum Regal, al estado de 3 a 4 hojas verdaderas. La distancia de plantación fue de 1,40 m entre hileras y 0,25 m sobre la hilera.

Como manejo de la fertilización, se aplicaron 30 unidades de Basf foliar (10-4-7) en el estado de 6 a 7 hojas, más los equivalentes por hectárea de 300 unidades de nitrógeno (urea granulada), 200 unidades de fósforo (ácido fosfórico) y 250 unidades potasio (sulfato de potasio), todo a través del fertirriego, parcializado entre los meses de diciembre y febrero.

## Evaluaciones de suelo

Antes del inicio del ensayo, con el objetivo de corroborar la homogeneidad del sitio de estudio, se realizó un análisis de suelo a nivel de parcela principal, evaluando por horizonte genético en tres calicatas de 60 cm de profundidad las siguientes propiedades:

- a) Descripción morfológica del perfil de suelo.
- b) Clase textural, mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos (Sandoval *et al.*, 2012).
- c) Retención de agua (33 y 1500 kPa), mediante olla y plato de presión (Sandoval *et al.*, 2012).
- d) Densidad aparente por el método del cilindro (Sandoval *et al.*, 2012).
- e) Conductividad eléctrica (CEe), pH y contenido de materia orgánica, todos detallados por Sadzawka *et al.* (2006).

## Evaluación del contenido de agua y la conductividad eléctrica

El contenido de agua y la conductividad eléctrica (CE) del suelo se determinaron través de un equipo TDR-150 (Field Scout) en cada unidad de observación presentada en la figura 2. Se consideraron tres épocas de muestreo: 1<sup>er</sup> muestreo durante el ciclo vegetativo del cultivo, 2<sup>do</sup> muestreo, antes de cambiar los tiempos de riego y el 3<sup>er</sup> muestreo, después de la cosecha; en cada fecha la evaluación se realizó uno a dos días después del riego. Para analizar la distribución espacial de las propiedades, se realizaron las evaluaciones en una grilla de muestreo en el perfil del suelo de 40x40 cm<sup>2</sup>, formada por cuatro profundidades: 10, 20, 30 y 40 cm y cuatro distancias desde la hilera de plantación: hilera de plantas, bajo línea de goteros, 25 cm y 40 cm desde la hilera de plantación.

Complementariamente, el contenido de agua del suelo fue monitoreado de manera continua con sensores GS1 y GS3 (Decagon, Pullman, USA), los que se instalaron a dos

profundidades (0-15 cm y 15-30 cm) en las parcelas principales (tratamientos de riego) de las unidades sin aplicación de ácido húmico.

Para calibrar el valor de CE medido con el TDR, en la segunda época de muestreo se tomaron muestras de suelo a capacidad de campo para determinar la CE mediante pasta saturada (Sadzawka *et al.*, 2006), con las que se realizó una regresión entre los valores de CE del método de laboratorio (CE del extracto) y el determinado con la sonda TDR (CE aparente).

### **Resistencia a la penetración**

La resistencia a la penetración se midió mediante un medidor de fuerza digital (Extech, modelo FHT 200), al inicio y al final de la aplicación del tratamiento de riego en la misma grilla donde se midió la CE.

### **Interpolación de datos y generación de isolíneas**

A partir de los datos obtenidos de contenido de agua, conductividad eléctrica y resistencia a la penetración, se procedió a interpolar los datos espacialmente mediante kriging con el uso del software Surfer 13, de manera de visualizar con isolíneas la dinámica espacial (2D) de las propiedades al interior del perfil con cada criterio de riego y enmienda aplicada.

### **Distribución de tamaño de poros y densidad aparente**

Se realizó al final del ensayo, en una grilla de muestreo en el perfil del suelo de 30x30 cm<sup>2</sup>, formada por tres profundidades: 10, 20 y 30 cm y cuatro puntos desde la hilera de plantación: hilera de plantas, bajo línea de goteros, 20 cm y 30 cm desde la hilera de plantas. En cada punto se tomaron muestras de suelo con cilindros de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro, con los cuales se determinó la densidad aparente y la curva característica, a partir de la cual se derivó la distribución de tamaño de poros según lo descrito por Sandoval *et al.*, (2012).

### **Velocidad de infiltración y conductividad hidráulica del suelo**

La velocidad de infiltración se midió en la superficie del suelo en tres puntos: bajo el gotero, a los 15 y 30 cm desde la hilera de plantación, a través del método del minidisco infiltrómetro descrito por Angulo-Jaramillo *et al.* (1997). Según metodología descrita por Zhang (1997), se calcula la conductividad hidráulica no saturada (Kns) en función de la tensión de suministro, a partir de la cual se calcula la conductividad hidráulica saturada mediante una interpolación lineal a tensión cero.

## Evaluaciones en la planta y frutos

### Rendimiento del cultivo

La cosecha se realizó al momento en que el cultivo alcanzó un 80% de fruta color rojo y se determinó por unidad de superficie, pesando toda la fruta cosechada en un metro lineal de la unidad de observación, por tratamiento y repetición.

### Determinación de la concentración de licopeno

La determinación del contenido de licopeno en frutos se realizó de acuerdo con la técnica descrita por Biehler *et al.* (2010), en la que se utilizó un espectrofotómetro (V-700, JASCO, Japón), a una longitud de onda de 450 nm. La concentración de licopeno se calculó de acuerdo con la ecuación 1.

$$C \left( \frac{\mu g}{ml} \right) = A_{m\acute{a}x} \times M \times \frac{1000}{\epsilon} \times \delta \quad (Ec. 1)$$

Donde C es el contenido de licopeno en  $\mu g \times mL^{-1}$ ,  $A_{m\acute{a}x}$  es la absorción determinada a la longitud de onda de 450 nm, M es la masa molecular de licopeno ( $537g \text{ mol}^{-1}$ ),  $\epsilon$  es el coeficiente de extinción molar del licopeno en acetona ( $120.600L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) y  $\delta$  el camino óptico (cm).

### Cuantificación de la concentración de clorofila en hojas

La determinación del contenido clorofila en hojas se realizó de acuerdo con la técnica descrita por Wellburn (1994), en la que se utilizó un espectrofotómetro (V-700, JASCO, Japón), evaluando la absorbancia (A) a longitudes de onda de 653 nm ( $A_{653}$ ) y 666 nm ( $A_{666}$ ). La concentración de clorofila a y b se calculó de acuerdo con la ecuación 2 y 3 respectivamente:

$$Chla \left( \frac{\mu g}{ml} \right) = 15,65 A_{666} - 7,34 A_{653} \quad (Ec. 2)$$

$$Chlb \left( \frac{\mu g}{ml} \right) = 27,05 A_{653} - 11,21 A_{666} \quad (Ec. 3)$$

### Análisis estadístico

De manera preliminar, los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva para obtener la media, mediana, máximos y mínimos y el error estándar.

Para comparar el efecto de los tratamientos, los datos fueron analizados mediante modelos lineales mixtos. En caso de encontrar significancia en la interacción de los factores (monto de riego y enmienda de suelo) o, en su defecto, entre los factores analizados de manera independiente, se realizó la prueba de comparación múltiple de Fisher. El modelo matemático se presenta en la siguiente ecuación:

$$y(x) = \text{mediam} + FR + Afúlv + FRxAfúlv + PP + BL + error \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde FR es el factor frecuencia de riego, Afúlv es el factor enmienda de ácidos fúlvicos, FRxAfúlv es la interacción de los factores, PP es la parcela principal y BL es el efecto bloque.

Finalmente, se realizó un análisis de correlación lineal de Pearson, con el objetivo de identificar la correlación entre los parámetros de CE aparente y CE del extracto saturado, además de otras correlaciones entre propiedades de suelo, como el contenido de agua con la CE aparente, y la Kns con la tensión de suministro, en la prueba de infiltrometría. Esta información se procesó mediante el software estadístico Infostat y el lenguaje de programación R.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización inicial del suelo

El suelo del lugar corresponde a la Serie BUIN, de clase textural franca hasta los 50 cm de profundidad, presentando una alta homogeneidad en todo el perfil evaluado, en el cuadro 5 se presentan la textura y la clase textural.

**Cuadro 5.** Textura y clase textural del suelo del lugar de estudio\*.

Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Clase textural
0 a 10	29	35	36	Franco
10 a 30	28	35	37	Franco
30 a 50	30	38	32	Franco

\*Promedio de tres calicatas.

### Condiciones climáticas y balance hídrico

El periodo de riego, la evapotranspiración potencial y el agua aplicada por tratamiento en el cultivo de tomate, se presenta en el cuadro 6.

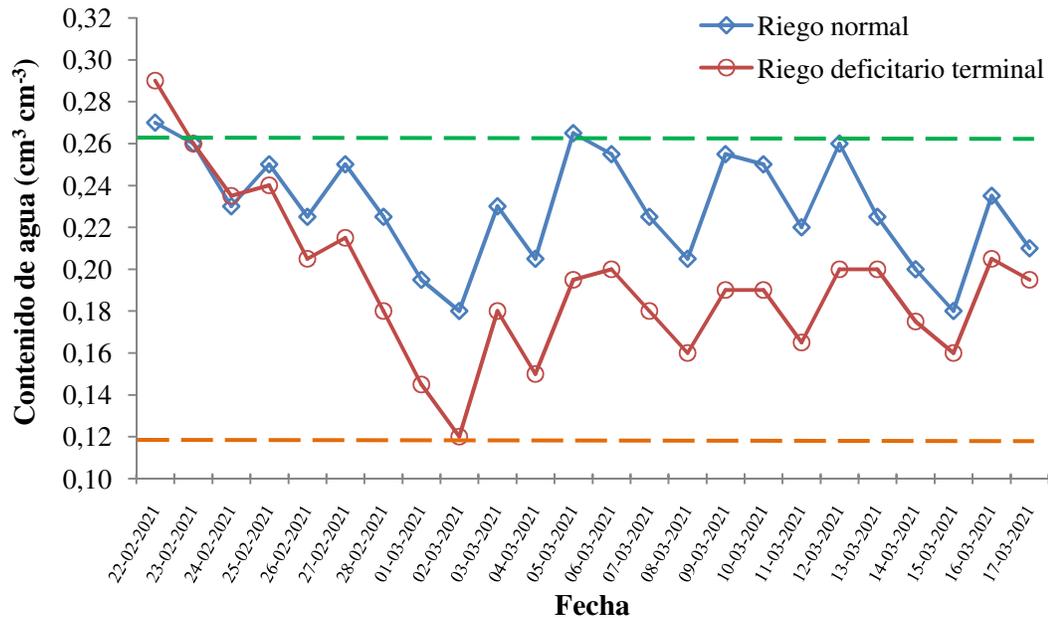
**Cuadro 6.** Periodo de riego, evapotranspiración de referencia y el agua aplicada por tratamiento en el cultivo de tomate.

Etapa	Periodo de riego	Días	ETc (mm)	Precipitación (mm)	Agua aplicada (mm)	
					Riego normal	Riego deficitario
Vegetativa/Maduración	16/11 al 19/2	101	275,1	48,4	264,6	264,6
Maduración/Cosecha	22/2 al 17/3	26	52,7	0	71,4	32,1
	Total	127	327,9	48,4	336,1	296,8

Como se presenta en el cuadro 6, se aplicó la misma lámina de agua (264,6 mm) en ambos tratamientos (con y sin aplicación de ácidos fúlvicos), en un período de 101 días desde el transplante del cultivo. El tratamiento de riego deficitario se aplicó a partir de los 101 días, con una duración de 26 días. El volumen de agua aplicada para el tratamiento de riego normal fue de  $3.361 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , mientras que para el riego deficitario fue de  $2.968 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , equivalente a un 12% de déficit sobre el riego de la temporada. Cabe destacar la precipitación ocurrida el 31 de enero, la que llevó a definir la necesidad de una segunda aplicación de enmienda de suelo, en caso que se hubiese provocado una homogenización de la distribución de sales en el perfil.

### Dinámica de la humedad del suelo

En la figura 3 se presenta la evolución del contenido de agua del suelo a los 15 cm de profundidad, durante la primera, segunda y tercera semana desde que se aplicó el tratamiento de riego deficitario terminal.



**Figura 3.** Contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) durante el periodo de aplicación del déficit hídrico terminal. Las líneas punteadas verde y anaranjada representan, respectivamente, la retención de agua a 33 kPa (CC) y a 1500 kPa (PMP).

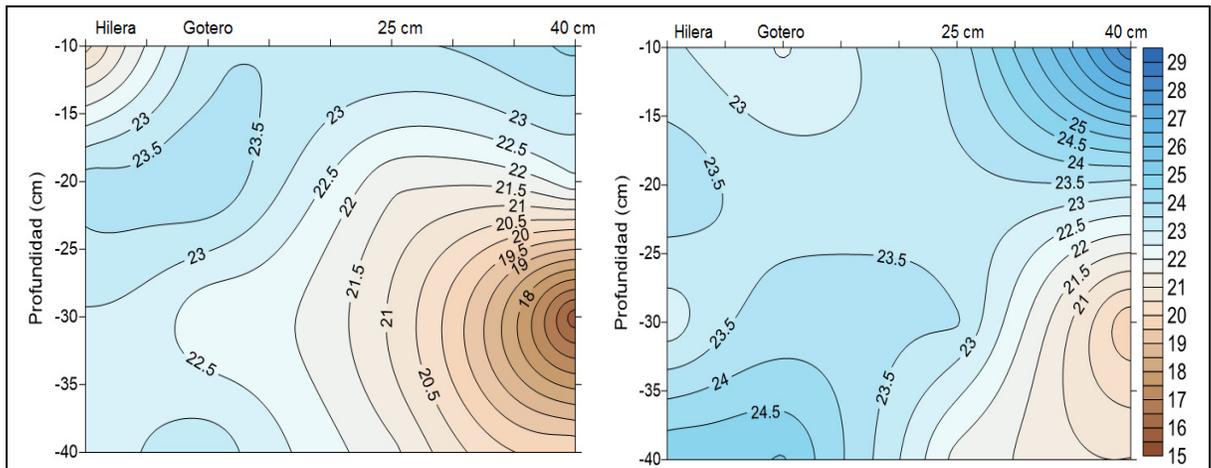
Se puede observar que inicialmente el suelo de ambos tratamientos registró un contenido de agua similar, cercano al 28%, y comienzan a diferenciarse a partir del día en que realizó el primer evento de riego con tiempos diferenciados (día 4), alcanzando la máxima diferencia a los 9 días después de iniciar el déficit de riego, donde el tratamiento de riego normal presentó una humedad cercana al 18% y el tratamiento de riego deficitario terminal presentó un valor cercano al punto de marchitez permanente (12%).

El agotamiento inicial del agua del suelo a 15 cm de profundidad responde a una activa absorción por parte del cultivo con el objetivo de mantener la turgencia de la planta (Castellanos, 2009). Sin embargo, a medida que el tiempo pasa, se genera una disminución de la absorción de agua, ya sea por encogimiento de raíces o resistencia al crecimiento (Castellanos, 2009), como se observa en la figura 3 a partir de los primeros días de marzo, donde la curva roja alcanza los menores valores de contenido de agua del suelo. Finalmente, dentro de la primera quincena de marzo, el contenido de agua del suelo comienza a recuperarse y los tratamientos de riego diferenciado tienden a igualarse, lo que se puede deber a una menor necesidad hídrica del tratamiento estresado por efecto de una disminución en el volumen aéreo del cultivo (Seguel et al., 2020).

### Isolíneas del contenido volumétrico de agua en el perfil del suelo

**Muestreo 1.** La distribución del contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) presente en el perfil del suelo en la primera época de muestreo (85 días después del trasplante y de la aplicación del ácido fúlvico), se presenta en la figura 4.

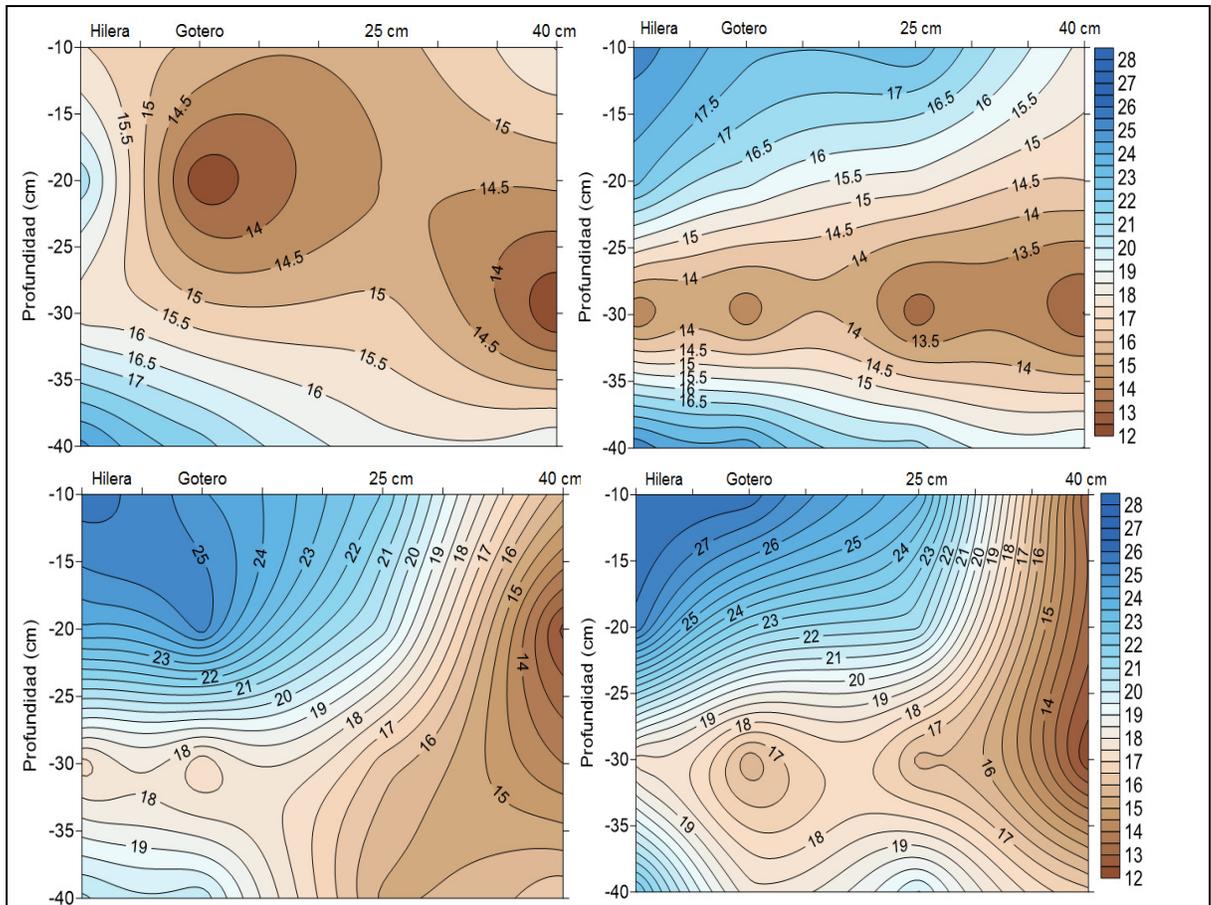
Para el tratamiento con la aplicación de ácidos fúlvicos, la humedad del suelo varió entre un 15% y 24%, mientras que, sin la aplicación de ácidos fúlvicos, la humedad del suelo varió entre 19,5% y 28%, aunque sin diferencias entre tratamientos de enmienda (apéndice 1). Cabe mencionar que en esta etapa del ensayo aún no comenzaban los tratamientos diferenciados de riego (cuadro 1).



**Figura 4.** Isolíneas del contenido volumétrico de agua del suelo en el perfil, con la aplicación de ácido fúlvico (izquierda) y sin la aplicación de ácido fúlvico (derecha).

Como se observa en la figura 4, si bien ambos tratamientos registran similar humedad promedio, la distribución del agua en el perfil es diferente y podría deberse a la aplicación de los ácidos fúlvicos. En el caso del testigo (figura 4, derecha), la humedad del suelo se concentra en extremo superior del bulbo de mojado (40 cm desde la hilera hasta los 20 cm de profundidad) y presenta el bulbo de mojado más grande pero con similar humedad que el tratamiento con la aplicación de ácidos fúlvicos, en cuyo caso se observa un menor movimiento lateral del agua y dos sectores con baja humedad, que se presentan en el extremo distal del bulbo (40 cm desde la hilera a 30 cm de profundidad) y bajo la hilera de las plantas en superficie. Esta distribución podría ser un indicador de la actividad específica de raíces, donde en el tratamiento con ácido húmico habría una mayor actividad y mayor absorción por efecto de la enmienda sobre el suelo, tal como lo demostraron Seguel et al., (2020) para frutales sometidos a estrés hídrico.

**Muestreo 2.** El contenido volumétrico de agua ( $\theta\%$ ) del suelo en la segunda época de muestreo (104 días después de transplante, ya iniciados el tratamiento de riego diferenciado), se presenta en la Figura 5.



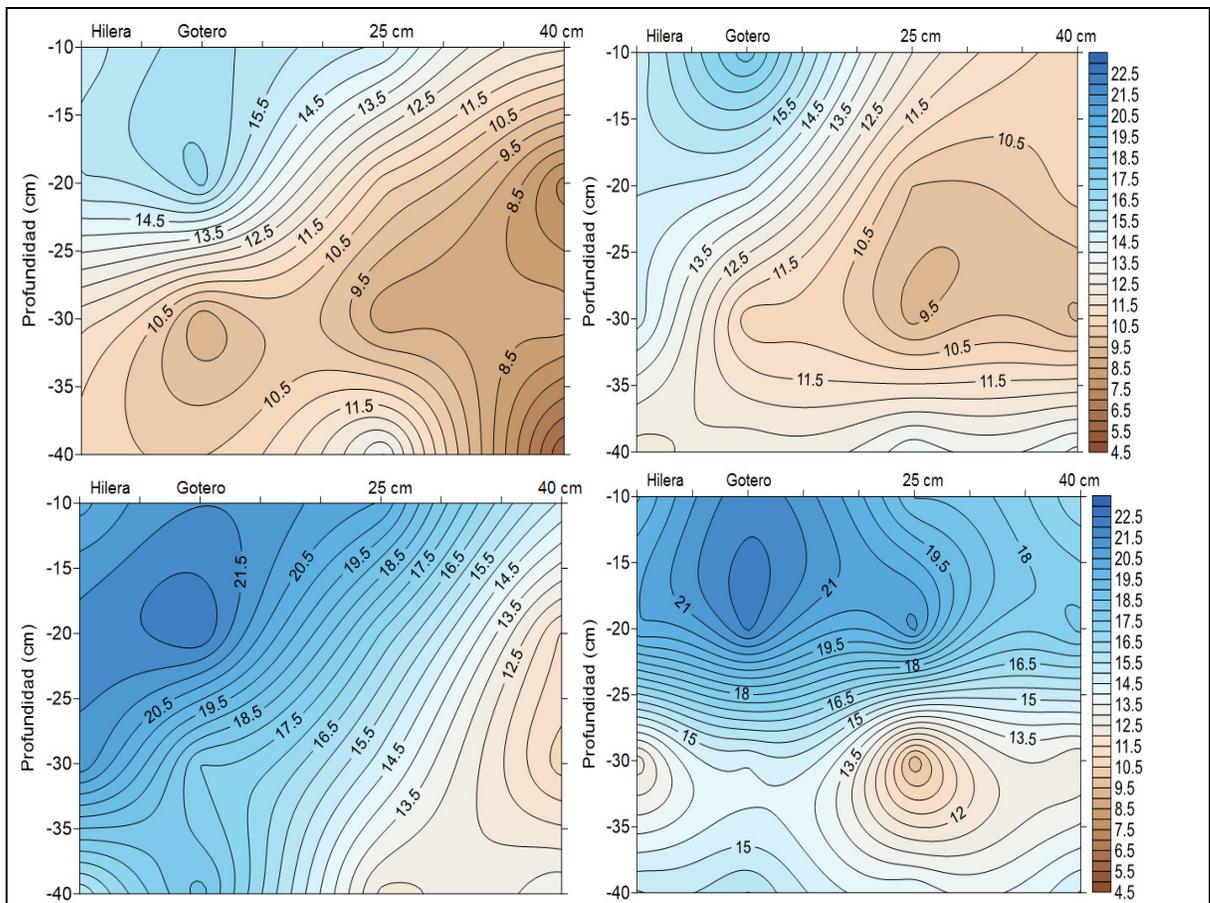
**Figura 5.** Isolíneas del contenido volumétrico de agua del suelo en el perfil bajo tratamientos de riego deficitario (arriba) y normal (abajo), sin ácido fúlvico (izquierda) y con ácido fúlvico (derecha).

Como se observa en la figura 5, hay diferencias claras en la humedad promedio de ambos tipos de riego, con niveles menores en los tratamientos con riego deficitario, tal como era esperable. Además, en la parcela bajo riego deficitario (arriba) se observa una distribución de la humedad distinta entre los tratamientos de enmiendas, donde el suelo bajo el tratamiento sin la aplicación de ácidos fúlvicos se presenta más seco en casi todo el perfil. Aún así no se generaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos de enmienda (apéndice 2). En todos los casos se observa una discontinuidad a los 30 cm, producto de la profundidad de aradura, lo que afecta la continuidad porosa y la distribución del agua (Dexter, 2004).

Por otra parte, bajo riego normal (figura 5, abajo) no se observa una marcada diferencia en las isolíneas entre los tratamientos de enmienda de suelo, pero sí un mayor nivel de humedad en el suelo donde se aplicaron ácidos fúlvicos (ver detalles enapéndice 2), aunque sin diferencias estadísticas significativas.

Los riegos deficitarios generan un cambio en el contenido y distribución del agua del suelo (Sepaskhah et al., 2010), aunque no necesariamente afectan el rendimiento, por cuanto el factor clave es el momento del desarrollo fenológico del cultivo en que se genera el estrés (Romero et al., 2016). Por otra parte, las enmiendas que contienen altos niveles de ácidos orgánicos promueven el incremento del agua aprovechable, pero a la vez generan un estímulo al desarrollo de raíces y parte aérea del cultivo, pudiendo en algunos casos promover un mayor consumo de agua, lo que no necesariamente es bueno cuando se tienen restricciones hídricas (Seguel et al., 2003).

**Muestreo 3.** En la figura 6 se presentan los niveles de humedad del suelo al momento de la cosecha de tomates (127 días después del transplante) y tras una segunda aplicación de ácidos fúlvicos.



**Figura 6.** Isolíneas del contenido volumétrico de agua del suelo en el perfil bajo tratamientos de riego deficitario (arriba) y normal (abajo), sin ácido fúlvico (izquierda) y con ácido fúlvico (derecha) al momento de la cosecha.

En general, el tratamiento de riego deficitario resultó con menor contenido de agua en todo el perfil para ambos niveles de enmienda, incluso con valores menores al punto de marchitez permanente, como se presenta en la figura 6 (arriba). Bajo este criterio de riego, la aplicación de ácidos fúlvicos generó mayores niveles de humedad en los puntos del suelo

ubicados bajo el gotero y la hilera de plantación. También se observan puntos más secos en el extremo del bulbo cuando no se aplicó ácidos fúlvicos.

Respecto a la parcela bajo riego normal (figura 6, abajo), no se generan diferencias en la humedad del suelo bajo el gotero y en la hilera de plantación entre los tratamientos con la aplicación de los ácidos fúlvicos, más bien se observa una distribución uniforme de la humedad del suelo.

En definitiva, la aplicación de ácidos fúlvicos no generó mayores niveles de contenido de agua en el suelo, resultados que difieren a lo señalado por Bronick y Lal (2005), quienes indican que los ácidos fúlvicos en el suelo generarían una mayor estabilidad de los agregados, mejorando la retención de agua y la aireación del suelo.

### Dinámica de la conductividad eléctrica (CE) del suelo

#### Conductividad eléctrica aparente (CEa) en el perfil del suelo en tres épocas a lo largo del ciclo de cultivo

**Muestreo 1.** Esta medición de la conductividad eléctrica del suelo se realizó a los 85 días después de transplante y a los 62 días después de la primera aplicación de los ácidos fúlvicos. Solo se realizaron mediciones para el factor enmienda de suelo, ya que aún no se iniciaba el tratamiento de déficit hídrico terminal. En el cuadro 7 se presenta la CEa en distintos puntos del perfil del suelo, durante el periodo vegetativo del cultivo, donde se puede observar que hubo efectos significativos por efecto de la enmienda en el borde del camellón (a los 25 y 40 cm desde la hilera de plantas) y en la máxima profundidad bajo la hilera de plantas.

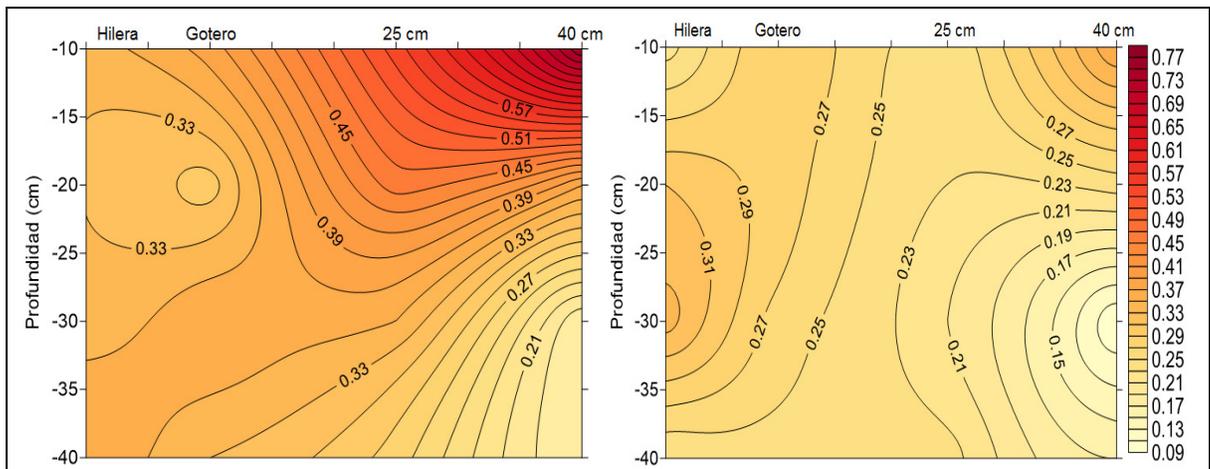
**Cuadro 7.** Conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa,  $\text{dS m}^{-1}$ , promedio  $\pm$  EE) de los tratamientos de enmienda de suelo en distintos puntos del perfil luego de dos meses de aplicada la enmienda.

Tratamientos	Prof. (cm)	Hilera	Gotero	25 cm	40 cm
		Plantas	(10 cm)	CEa ( $\text{dS m}^{-1}$ )	
Con ácido fúlvico	10	0,22 $\pm$ 0,06	0,29 $\pm$ 0,08	0,23 $\pm$ 0,10 a	0,37 $\pm$ 0,14 a
	20	0,31 $\pm$ 0,03	0,28 $\pm$ 0,05	0,23 $\pm$ 0,09 a	0,24 $\pm$ 0,04 a
	30	0,34 $\pm$ 0,04	0,26 $\pm$ 0,04	0,21 $\pm$ 0,05 a	0,09 $\pm$ 0,03 a
	40	0,23 $\pm$ 0,03 a	0,24 $\pm$ 0,04	0,24 $\pm$ 0,04	0,17 $\pm$ 0,03
Sin ácido fúlvico	10	0,34 $\pm$ 0,06	0,38 $\pm$ 0,08	0,54 $\pm$ 0,10 b	0,77 $\pm$ 0,14 b
	20	0,33 $\pm$ 0,03	0,30 $\pm$ 0,05	0,46 $\pm$ 0,09 b	0,37 $\pm$ 0,04 b
	30	0,34 $\pm$ 0,04	0,37 $\pm$ 0,04	0,35 $\pm$ 0,05 b	0,17 $\pm$ 0,03 b
	40	0,37 $\pm$ 0,03 b	0,33 $\pm$ 0,04	0,28 $\pm$ 0,04	0,17 $\pm$ 0,03

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos de enmienda por profundidad de suelo.

Como se presenta en el cuadro 7, solo se encontraron diferencias significativas en algunos puntos del perfil: bajo la hilera de las plantas, se generaron diferencias a los 40 cm de profundidad, resultando con menores valores el tratamiento con la aplicación de ácidos fúlvicos, tendencia que se mantuvo bajo la línea de goteo, aunque sin diferencias estadísticas significativas. A los 25 y 40 cm desde la hilera de las plantas, se generaron diferencias significativas hasta los 30 cm de profundidad, resultando el tratamiento con ácido fúlvico con menores valores de CEa.

Según estos resultados, la aplicación de ácidos fúlvicos reduciría la acumulación de sales en el hombro de la platabanda de cultivo, tal como se muestra en la figura 7.



**Figura 7.** Diagrama de isolíneas de la conductividad eléctrica aparente del suelo sin la aplicación de ácido fúlvico (izquierda) y con la aplicación de ácido fúlvico (derecha) después de dos meses de aplicada la enmienda.

Los menores valores de CEa en el hombro de la platabanda, cuando se aplicaron ácidos fúlvicos (AF), se deberían a que los AF atrapan y mueven iones junto con el agua, arrastrándolos en profundidad fuera de la zona de raíces (Ouni et al., 2014). Por otra parte, cuando no se aplicaron ácidos fúlvicos, la mayor concentración salina se generó en la superficie producto del acenso capilar, consecuencia de la evaporación del suelo.

**Muestreo 2.** Esta medición se realizó a los 104 días después de transplante de los tomates y a 81 y 14 días después de las aplicaciones de los ácidos fúlvicos y 2 días después del primer evento de riego deficitario terminal. En el cuadro 8 se presenta la conductividad eléctrica aparente del suelo en distintos puntos del perfil, bajo los tratamientos con y sin ácidos fúlvicos con dos niveles de riego al momento de pintar de la fruta.

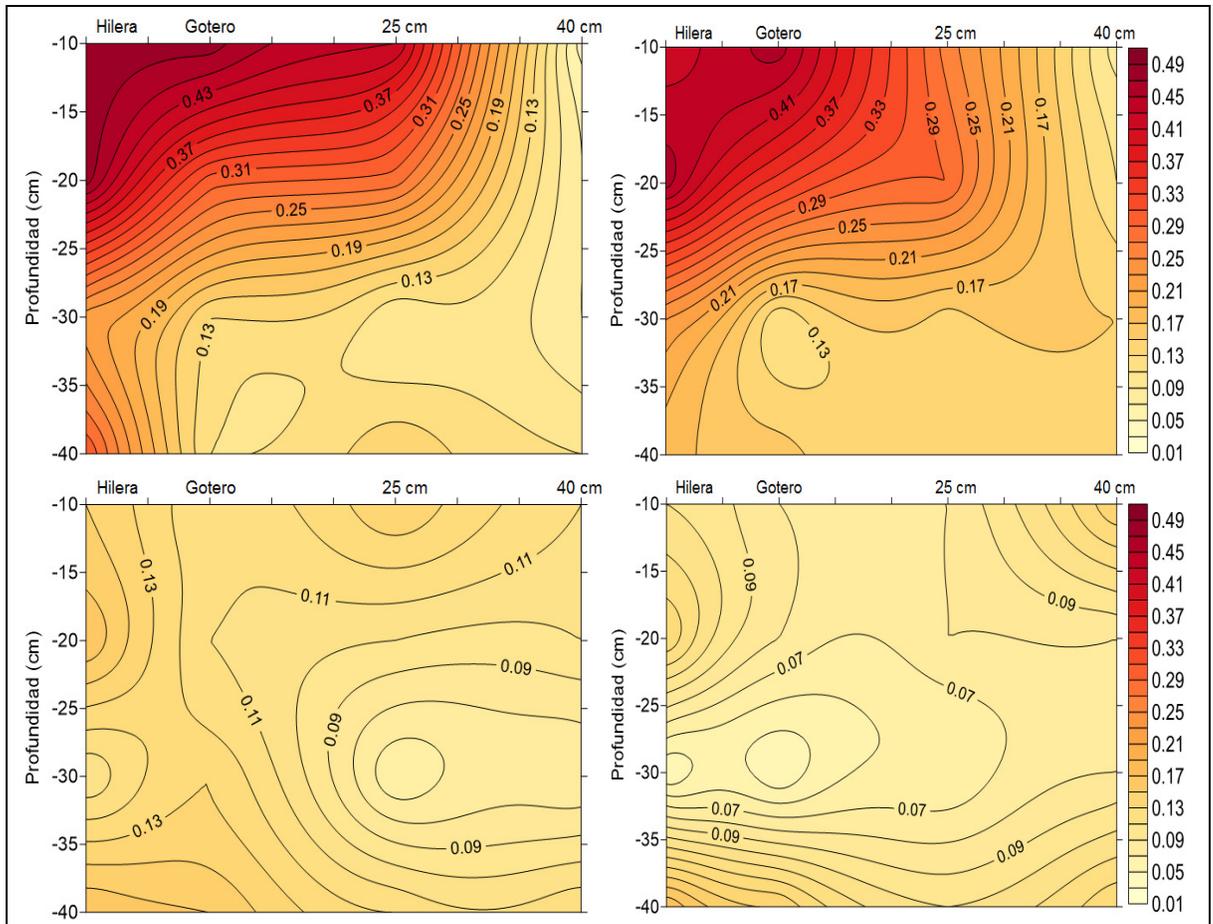
**Cuadro 8.** Conductividad eléctrica aparente del suelo ( $\text{dS m}^{-1}$ , promedio  $\pm\text{EE}$ ) de los distintos tratamientos y posiciones en el perfil al cabo de 104 días de ensayo.

Tratamiento	Prof. (cm)	Hilera Plantas	Gotero (10 cm)	25 cm	40 cm	Promedio del perfil
<b>CEa (<math>\text{dS m}^{-1}</math>)</b>						
Riego deficitario						
Con ácido fúlvico	10	0,41 $\pm$ 0,05	0,46 $\pm$ 0,08	0,26 $\pm$ 0,10 a	0,04 $\pm$ 0,03 a	0,23 $\pm$ 0,03 A
	20	0,46 $\pm$ 0,09	0,34 $\pm$ 0,05	0,29 $\pm$ 0,10	0,11 $\pm$ 0,03	
	30	0,23 $\pm$ 0,10	0,11 $\pm$ 0,08	0,14 $\pm$ 0,04	0,15 $\pm$ 0,05	
	40	0,18 $\pm$ 0,05 a	0,16 $\pm$ 0,06	0,15 $\pm$ 0,08	0,14 $\pm$ 0,05	
Sin ácido fúlvico	10	0,48 $\pm$ 0,05	0,48 $\pm$ 0,08	0,43 $\pm$ 0,10 b	0,08 $\pm$ 0,03 b	0,24 $\pm$ 0,03 A
	20	0,48 $\pm$ 0,09	0,30 $\pm$ 0,05	0,28 $\pm$ 0,10	0,07 $\pm$ 0,03	
	30	0,22 $\pm$ 0,10	0,13 $\pm$ 0,08	0,09 $\pm$ 0,04	0,07 $\pm$ 0,05	
	40	0,31 $\pm$ 0,05 b	0,11 $\pm$ 0,06	0,15 $\pm$ 0,08	0,11 $\pm$ 0,05	
Riego normal						
Con ácido fúlvico	10	0,10 $\pm$ 0,05	0,08 $\pm$ 0,08	0,08 $\pm$ 0,10	0,14 $\pm$ 0,03	0,09 $\pm$ 0,03 B
	20	0,13 $\pm$ 0,09	0,08 $\pm$ 0,05	0,08 $\pm$ 0,10	0,08 $\pm$ 0,03	
	30	0,04 $\pm$ 0,10	0,04 $\pm$ 0,08	0,06 $\pm$ 0,04	0,08 $\pm$ 0,05	
	40	0,17 $\pm$ 0,05	0,14 $\pm$ 0,06	0,10 $\pm$ 0,08	0,13 $\pm$ 0,05	
Sin ácido fúlvico	10	0,14 $\pm$ 0,05	0,11 $\pm$ 0,08	0,14 $\pm$ 0,10	0,11 $\pm$ 0,03	0,12 $\pm$ 0,03 B
	20	0,16 $\pm$ 0,09	0,11 $\pm$ 0,05	0,10 $\pm$ 0,10	0,10 $\pm$ 0,03	
	30	0,10 $\pm$ 0,10	0,13 $\pm$ 0,08	0,06 $\pm$ 0,04	0,07 $\pm$ 0,05	
	40	0,16 $\pm$ 0,05	0,15 $\pm$ 0,06	0,12 $\pm$ 0,08	0,12 $\pm$ 0,05	

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos de enmiendas por profundidad de suelo y tipo de riego.

Como se presenta en el cuadro 8, en general, los valores de CEa del suelo son mayores significativamente en el sector donde se aplicó el tratamiento de riego deficitario, incluso habiendo aplicado tan solo un evento de riego diferenciado al momento de la evaluación.

Solo se generaron diferencias significativas entre los tratamientos de aplicación de ácidos fúlvicos en el sector donde se aplicó el riego deficitario terminal. Como se aprecia en la figura 8 (arriba), la aplicación de ácidos fúlvicos generó una menor CEa en el extremo del bulbo (cuadro 8). Si bien en ambos tratamientos hay una mayor concentración de sales bajo el gotero y la hilera de plantas, con la aplicación de ácidos fúlvicos se observa una menor área afectada. Las diferencias tienden a generarse en el borde del bulbo de mojamiento, principalmente en el sector proximal al goteo, zona en que el tratamiento sin aplicación de ácido fúlvico registró la mayor conductividad eléctrica.



**Figura 8.** Isolíneas de la conductividad eléctrica aparente del suelo bajo riego deficitario (arriba) y bajo riego normal (abajo) sin la aplicación de ácido fúlvico (izquierda) y con la aplicación de ácido fúlvico (derecha).

En la zona donde se aplicó riego normal (figura 8, abajo), no se generaron diferencias significativas entre los tratamientos de ácidos fúlvicos después del evento de riego, y ambos tratamientos tienen similar nivel de CEa y distribución de isolíneas en el perfil. También hay que considerar que se generó una lluvia de 48 mm 19 días antes de la medición, lo que podría haber influido en los valores de CEa por un posible lavado de sales.

**Muestreo 3.** En el cuadro 9, se presenta la conductividad eléctrica aparente al momento de la cosecha en distintos puntos del perfil del suelo, bajo los tratamientos con y sin ácidos fúlvicos y dos niveles de riego. Este muestreo se realizó a los 127 días después del transplante y a los 26, 104 y 37 días desde que se aplicó el tratamiento de déficit hídrico y las dos aplicaciones de ácidos fúlvicos respectivamente.

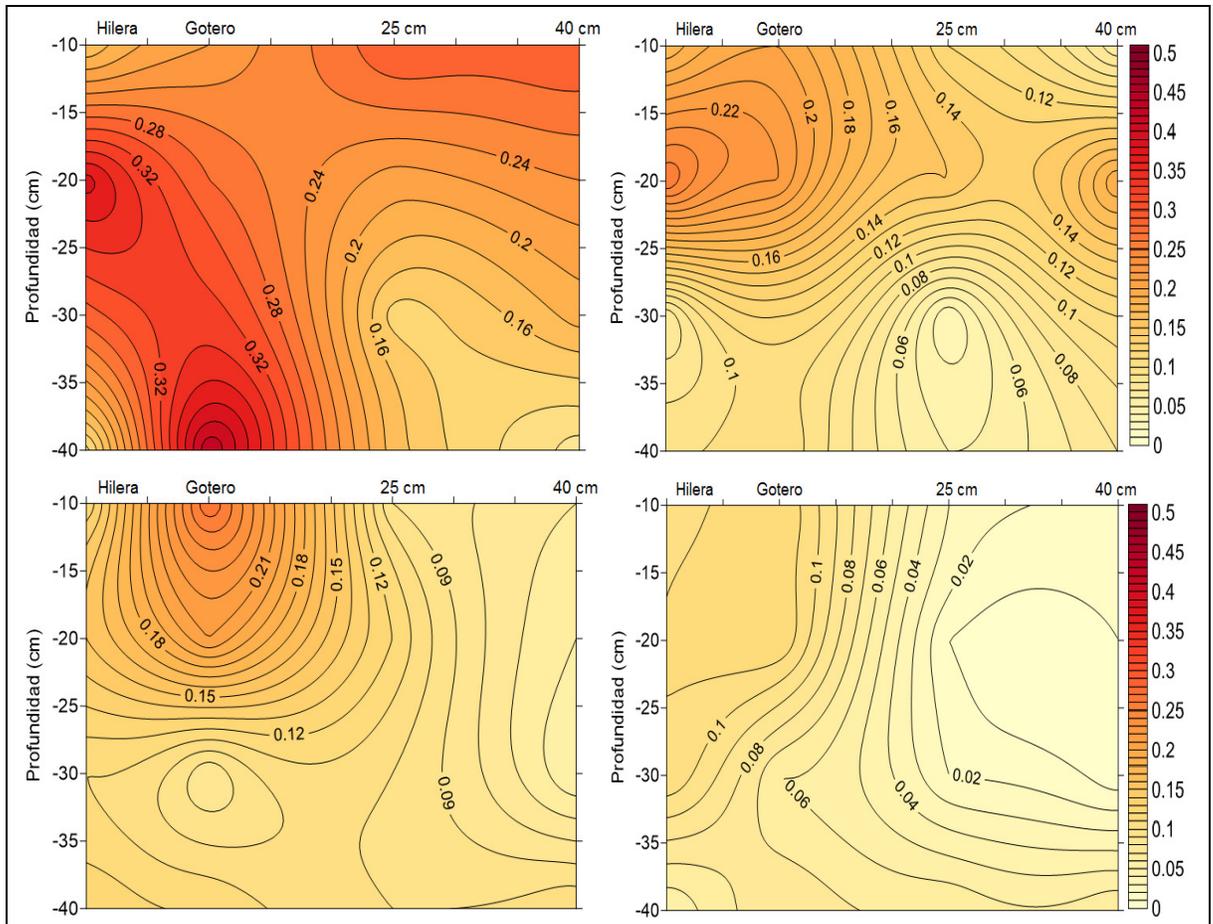
**Cuadro 9.** Conductividad eléctrica aparente del suelo ( $\text{dS m}^{-1}$ , promedio  $\pm\text{EE}$ ) de los distintos tratamientos en distintos puntos del perfil al momento de la cosecha.

Tratamientos	Prof. (cm)	Hilera Plantas	Gotero (10 cm)	25 cm	40 cm	Promedio del perfil
<b>CEa (<math>\text{dS m}^{-1}</math>)</b>						
<b>Riego Deficitario</b>						
Con ácido fúlvico	10	0,17 $\pm$ 0,03	0,20 $\pm$ 0,04	0,12 $\pm$ 0,03 a	0,06 $\pm$ 0,04 a	0,13 $\pm$ 0,01 B
	20	0,26 $\pm$ 0,09	0,22 $\pm$ 0,02 a	0,15 $\pm$ 0,03 a	0,19 $\pm$ 0,02 a	
	30	0,07 $\pm$ 0,04 a	0,12 $\pm$ 0,03 a	0,03 $\pm$ 0,04 a	0,11 $\pm$ 0,03 a	
	40	0,10 $\pm$ 0,04	0,11 $\pm$ 0,04 a	0,05 $\pm$ 0,01 a	0,08 $\pm$ 0,02	
Sin ácido fúlvico	10	0,16 $\pm$ 0,03	0,22 $\pm$ 0,04	0,30 $\pm$ 0,03 b	0,30 $\pm$ 0,04 b	0,24 $\pm$ 0,01 A
	20	0,39 $\pm$ 0,09	0,28 $\pm$ 0,02 b	0,22 $\pm$ 0,03 b	0,24 $\pm$ 0,02 b	
	30	0,29 $\pm$ 0,04 b	0,33 $\pm$ 0,03 b	0,13 $\pm$ 0,04 b	0,19 $\pm$ 0,03 b	
	40	0,11 $\pm$ 0,04	0,44 $\pm$ 0,04 b	0,17 $\pm$ 0,01 b	0,09 $\pm$ 0,02	
<b>Riego Normal</b>						
Con ácido fúlvico	10	0,10 $\pm$ 0,03	0,12 $\pm$ 0,04 a	0,03 $\pm$ 0,03	0,02 $\pm$ 0,04	0,06 $\pm$ 0,01 C
	20	0,11 $\pm$ 0,09	0,12 $\pm$ 0,03 a	0,01 $\pm$ 0,03 a	0,01 $\pm$ 0,04	
	30	0,11 $\pm$ 0,04	0,06 $\pm$ 0,03	0,02 $\pm$ 0,04	0,00 $\pm$ 0,03 a	
	40	0,05 $\pm$ 0,04	0,08 $\pm$ 0,04	0,07 $\pm$ 0,01 a	0,07 $\pm$ 0,01 a	
Sin ácido fúlvico	10	0,12 $\pm$ 0,03	0,27 $\pm$ 0,04 b	0,09 $\pm$ 0,03	0,07 $\pm$ 0,04	0,12 $\pm$ 0,01 B
	20	0,15 $\pm$ 0,09	0,21 $\pm$ 0,03 b	0,12 $\pm$ 0,03 b	0,06 $\pm$ 0,04	
	30	0,11 $\pm$ 0,04	0,08 $\pm$ 0,03	0,10 $\pm$ 0,04	0,05 $\pm$ 0,03 b	
	40	0,13 $\pm$ 0,04	0,12 $\pm$ 0,04	0,10 $\pm$ 0,01 b	0,11 $\pm$ 0,01 b	

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos de enmiendas por profundidad de suelo y tipo de riego. Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas de la interacción riego x enmienda.

Como se presenta en el cuadro 9 y la figura 9, se observa un efecto diferenciado por el riego en los niveles y distribución de la CEa del suelo.

Bajo el tratamiento de riego deficitario, se generaron diferencias significativas entre los tratamientos de enmienda de suelo en los siguientes puntos: a 30 cm de profundidad bajo la hilera de plantas; desde los 20 cm de profundidad bajo la línea de goteros; en todas las profundidades a los 25 cm desde la hilera de plantación y, finalmente, hasta los 30 cm de profundidad a 40 cm desde la hilera de plantación. En la mayoría de los casos, con ácidos fúlvicos se genera un menor valor de CEa que sin la enmienda, lo que se observa de manera gráfica en la figura 9 (arriba), donde con la aplicación de ácidos fúlvicos se observan colores más claros.



**Figura 9.** Isolíneas de la conductividad eléctrica aparente del suelo bajo riego deficitario (arriba) y bajo riego normal (abajo) sin la aplicación de ácido fúlvico (izquierda) y con la aplicación de ácido fúlvico (derecha).

Bajo el riego normal (cuadro 9, figura 9, abajo) se mantiene la tendencia anterior, nuevamente con los menores valores de CE bajo aplicación de ácidos fúlvicos. Los puntos en el perfil donde se generaron diferencias estadísticamente significativas son: hasta los 20 cm de profundidad bajo la línea de riego; a los 20 y 40 cm de profundidad a los 25 cm al lado de la hilera de la plantación; y finalmente por debajo de 30 cm a los 40 cm desde la hilera de plantación.

En todas las fechas de evaluación, la aplicación de ácidos fúlvicos generó un menor valor de CEa que al no aplicar la enmienda orgánica. Este efecto se ve influenciado por los niveles de agua aplicada, dado por los montos de riego que determinan la distribución de sales en el perfil del suelo. Como lo señalan Jury y Horton (2004), los suelos salinos se caracterizan por una distribución irregular de las sales dentro del perfil, debido a que éstas se mueven de acuerdo al movimiento del agua (figura 9) y a gradientes de concentración, generando una gran variación en su distribución debido a la anisotropía del sistema poroso.

Considerando que el movimiento de sales al interior del suelo ocurre por movimiento convectivo (flujo de masa) y por procesos de difusión (Rhoades *et al.*, 1992), el uso de

riego por goteo presenta la desventaja de acumular las sales aportadas por el riego en el perímetro del bulbo húmedo (Zhang *et al.*, 2014); sin embargo, las isolíneas de CEa de este trabajo presentan gradientes inversos, con mayores concentraciones salinas hacia el interior del bulbo, ya que la medición corresponde a la masa de suelo.

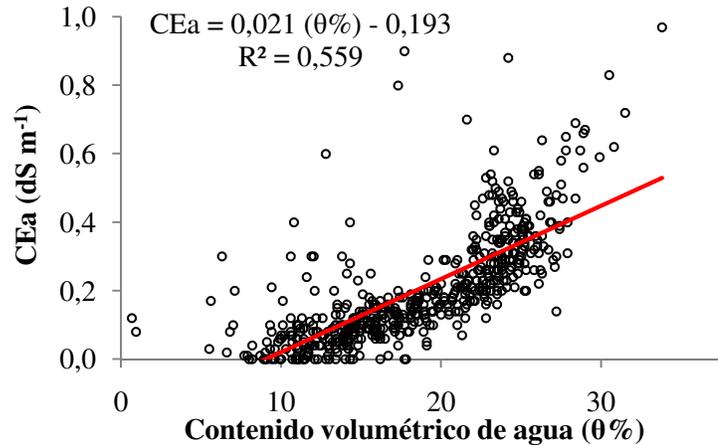
Según Stevenson (1994) y Schnitzer (1990), los ácidos fúlvicos contienen un mayor número de grupos funcionales de carácter ácido que los ácidos húmicos, particularmente carboxilos y fenoles como  $\text{COOH}$ ,  $\text{OH}^-$  ó  $\text{C}=\text{O}^-2$ , además de ser mayores en carga negativa y polaridad. Este hecho se traduce en un mayor contenido en grupos funcionales oxigenados, que podrían ser potenciales retenedores de cationes como el  $\text{Na}^+$ . Como lo señala Osman y Ewees (2008), la fracción activa de la molécula orgánica ( $\text{COOH}^-$ ) es capaz de formar quelatos, arrastrándolos consigo junto con el agua a capas más profundas del suelo, en el caso de ácidos de menor peso molecular, como los ácidos fúlvicos. También, al ser solubles en agua todo el rango de pH, actúan como un quelante natural de minerales y metales en suelos (Eyheraguibel *et al.*, 2008).

Estos resultados son similares a los publicados por Kremer *et al.* (2021), quienes encontraron una disminución más rápida de la CE por acción del riego cuando éste se complementó con ácidos fúlvicos, y podría ser explicado por su capacidad para generar complejos organominerales solubles. Según Singh y Pandeya (1998), la causa más evidente del movimiento de sales corresponde a la neutralización de las cargas. También Ettler *et al.* (2009) encontraron complejos órgano-minerales en los lixiviados del suelo después de la aplicación de ácidos orgánicos, lo que sugiere que los ácidos orgánicos de bajo peso molecular (ácidos cítrico, acético, málico) y los de alto peso molecular (ácidos fúlvicos y húmicos) podrían incrementar la movilidad de cationes en el suelo, liberando aniones.

Dado que las raíces de las plantas crecen más activamente en aquellas zonas desalinizadas, aumentando su densidad allí (Zhang *et al.*, 2015), es posible que bajo el tratamiento de riego deficitario sin la aplicación de ácidos fúlvicos se hubiese generado la peor condición para el crecimiento de raíces, esto debido a que el estrés salino provoca un estrés osmótico en las raíces de las plantas, resultando en una reducción en el crecimiento de hojas y brotes; en condiciones extremas, el estrés generado por la salinidad conduce a un desequilibrio iónico que causa necrosis y muerte prematura de hojas viejas (Julkowska y Testerink, 2015). En este sentido, la aplicación de ácidos orgánicos viene a constituir una solución para evitar el estrés generado por las sales del suelo, en particular bajo condiciones de restricción hídrica, aunque no necesariamente contribuye al incremento de metabolitos deseados en el fruto, aspecto central de la producción de tomate industrial.

### Relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\theta\%$ ) y la conductividad eléctrica aparente (CEa) del lugar de estudio

En la figura 10 se presenta la curva de regresión que relaciona el valor de conductividad eléctrica aparente y el contenido de agua del suelo al momento de la medición.



**Figura 10.** Relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\theta\%$ ) y la conductividad eléctrica aparente (CEa).

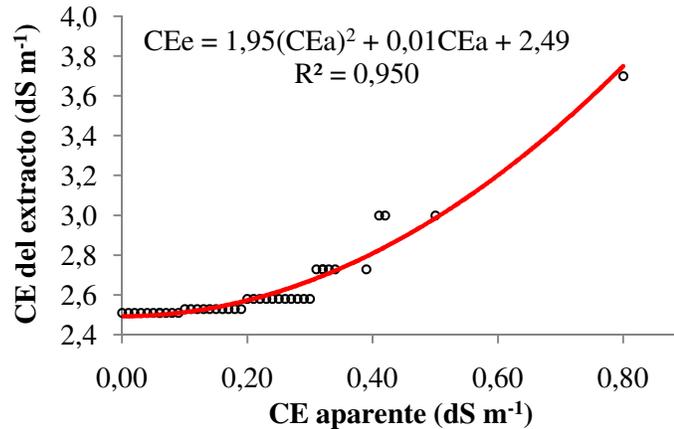
Según el análisis de regresión de la figura 10, la CEa se relaciona positiva y significativamente ( $p < 0,0001$  y  $n = 574$ ) con el contenido volumétrico de agua en el suelo. La función que relaciona estas variables corresponde a un ajuste lineal, donde el 55,9 % de la variabilidad es explicada por la ecuación.

Similares resultados encontraron Clay et al. (2001), quienes midieron la CEa y contenido de agua del suelo en dos temporadas, encontrando que estas variables estaban altamente correlacionadas ( $R^2 = 0,93$ ), al igual que Hanson y Kaita (1997), quienes también obtuvieron ecuaciones lineales. Por otra parte, Wang et al. (2020) reportan correlaciones positivas y altas entre la CEa y la humedad del suelo *in situ*, donde la humedad del suelo explicó el 90,7% de la variabilidad y la CEa el 74,6%, esta vez utilizando modelos polinomiales.

Cuando el suelo tiene humedad, las sales se solubilizan, disminuyendo el potencial osmótico (más negativo), generando un estrés osmótico; esto se debería a que se afecta el potencial de presión que se desarrolla en el interior de la célula de la raíz, afectando la tasa de elongación celular (Adiku et al., 2000; Acevedo, 1979; Porta et al., 2003). Para que se pueda absorber agua, se requiere que la presión osmótica al interior de las células sea superior a la del suelo, lo que se regula mediante la concentración de solutos en la vacuola de las células; en el caso del tomate, se han observado ajustes osmóticos cercanos a  $-0,21$  MPa en relación a plantas bien regadas (Katerji et al., 2003). Por otra parte, el impedimento mecánico que el suelo presenta al crecimiento radicular aumenta al disminuir el contenido de agua de éste (Bengough, 2012), lo que se ve acrecentado cuando existe una acción cementante de las sales del suelo (Zhang et al., 2022).

### Relación entre la conductividad eléctrica aparente del suelo y la conductividad eléctrica del extracto saturado

La relación entre la conductividad eléctrica aparente (CEa) y la conductividad eléctrica del extracto saturado (CEe) del suelo se presenta en la figura 11.



**Figura 11.** Relación entre la conductividad eléctrica aparente y la conductividad eléctrica del extracto saturado.

La conductividad eléctrica del extracto (CEe) tiene una relación cuadrática, directa y significativa ( $p < 0,05$  y  $n = 84$ ) con la conductividad eléctrica aparente (CEa). Rysan y Sarec (2008) señalan que esto ocurre porque la CEe es un estimador de la concentración de sales del suelo y estas afectan considerablemente los valores de la CEa, ya que su valor es dependiente del contenido de agua en el suelo al momento de la medición.

El valor mínimo de CEe es de  $2,49 \text{ dS m}^{-1}$  correspondiente al valor 0 de CEa, nivel catalogado dentro de un rango levemente salino (Sadzawka, 2006). Este valor es el nivel mínimo de salinidad del suelo (valor umbral) tolerado por el tomate sin reducción en el rendimiento (Campos *et al.*, 2006), por lo que, considerando que en campo la condición de suelo estuvo por sobre este umbral, el rendimiento comercial pudo ser afectado por la CE del suelo. Sin embargo, Maas y Hoffman (1977) señalan que el tomate tiene una pérdida de rendimiento del 9,9% por cada  $\text{dS m}^{-1}$  por sobre un umbral de tolerancia que puede situarse en valores entre 5 a  $7 \text{ dS m}^{-1}$  en extracto de saturación, el cual depende de la variedad, desarrollo de la planta, condiciones de manejo y del tipo de injerto, entre otros (Cuartero y Fernández Muñoz, 1999).

## Otras propiedades de suelo

### Resistencia a la penetración en distintos puntos del perfil

**Muestreo 1.** En el Cuadro 10 se presentan los valores de resistencia a la penetración del suelo con y sin la aplicación de los ácidos fúlvicos a los 85 días después del transplante.

**Cuadro 10.** Resistencia a la penetración del suelo (N, promedio  $\pm$ EE) con y sin la aplicación de ácidos fúlvicos.

Tratamientos	Prof. (cm)	Hilera Plantas	Gotero (10 cm)	Fuerza (N)	
				25 cm	40 cm
Con ácido fúlvico	10	166,0 $\pm$ 25,4	145,7 $\pm$ 28,2	103,6 $\pm$ 14,3	112,0 $\pm$ 13,2
	20	122,3 $\pm$ 24,0	129,7 $\pm$ 21,0	131,3 $\pm$ 23,5	137,3 $\pm$ 27,1
	30	135,0 $\pm$ 25,2	169,7 $\pm$ 34,2	190,0 $\pm$ 31,2	176,8 $\pm$ 32,1
	40	472,0 $\pm$ 19,5	420,3 $\pm$ 30,8	459,6 $\pm$ 35,6	465,3 $\pm$ 27,5
Sin ácido fúlvico	10	166,7 $\pm$ 25,4	167,0 $\pm$ 28,2	125,6 $\pm$ 14,3	119,0 $\pm$ 13,2
	20	121,3 $\pm$ 24,0	120,3 $\pm$ 21,0	117,6 $\pm$ 23,5	164,0 $\pm$ 27,1
	30	136,0 $\pm$ 25,2	179,7 $\pm$ 34,2	146,0 $\pm$ 31,2	199,6 $\pm$ 32,1
	40	451,0 $\pm$ 19,5	420,0 $\pm$ 30,8	496,3 $\pm$ 35,6	513,3 $\pm$ 27,5

Sin diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ , Test de Fisher) entre tratamientos por profundidad de suelo.

La tendencia de la resistencia a la penetración del suelo es a aumentar en profundidad para ambos tratamientos, marcando claramente la zona a la cual llegó la preparación de suelo (30 cm), a partir de lo cual la resistencia aumenta por posible presencia de pie de arado (Keller *et al.*, 2019). Por otra parte, no se produjeron diferencias significativas en la resistencia a la penetración por efecto de la enmienda en ningún punto del perfil, lo que responde al poco tiempo de acción y la baja dosis de aplicación de la enmienda (Seguel *et al.*, 2020).

Finalmente, no se encontró una relación entre el contenido de agua y la resistencia del suelo (datos no mostrados), ya que esta última propiedad depende de múltiples factores (textura, estructura, contenido de agua, agentes cementantes), por lo que una condición de alta humedad post riego podría estar reflejando un estado de compactación que dificulta el drenaje del agua, así como un estado de alta friabilidad promovido por la estructuración dependiente de la materia orgánica del suelo (Stock y Downes, 2008).

En la segunda fecha de evaluación no se evaluó la resistencia del suelo, ya que es una propiedad que tiende a cambiar poco en el tiempo a un mismo estado energético del agua del suelo, por lo que se presentan inmediatamente los resultados del tercer periodo de muestreo.

**Muestreo 3.** En el cuadro 11, se presenta la resistencia a la penetración del suelo al momento de la cosecha (127 días después del transplante), esta vez considerando los factores enmienda de suelo y regímenes de riego.

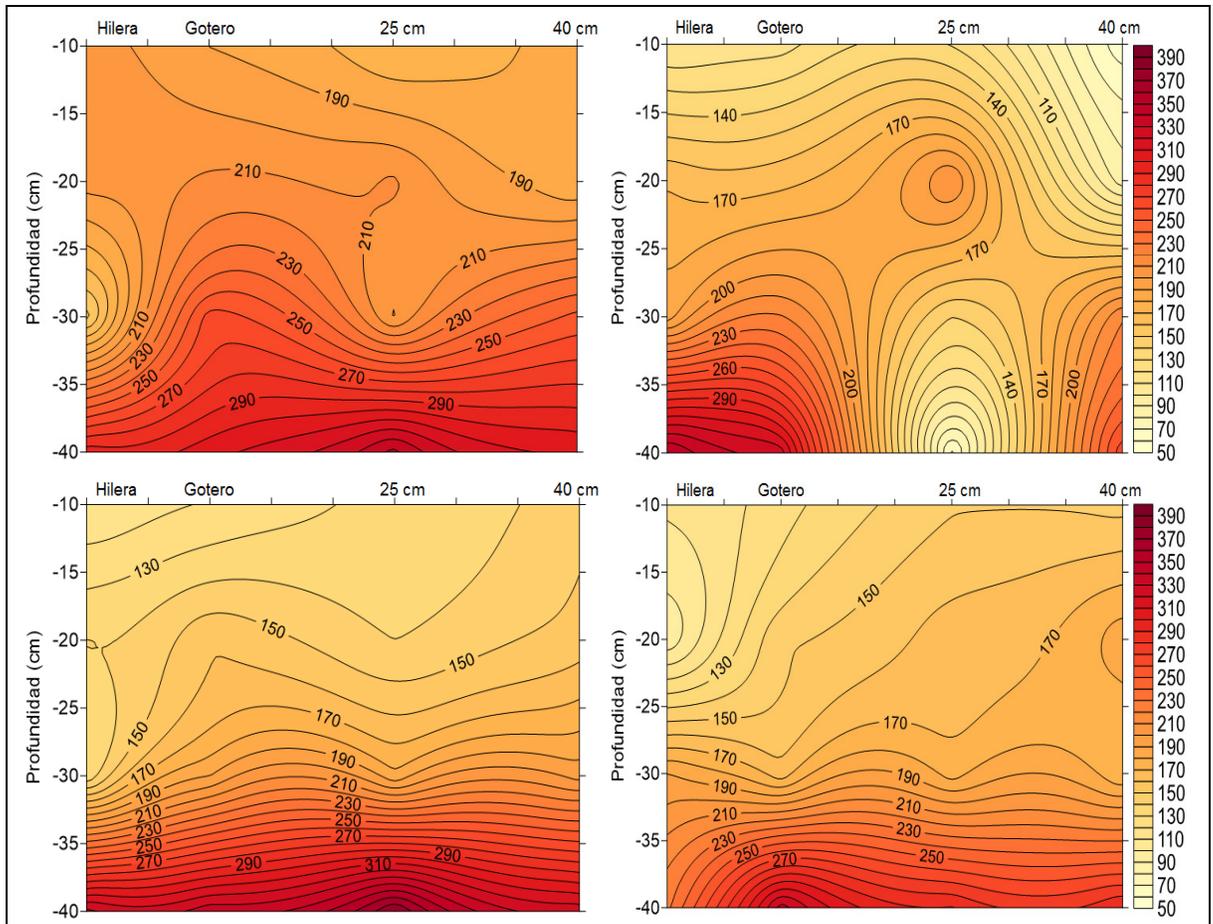
**Cuadro 11.** Resistencia a la penetración(N, promedio  $\pm$ EE) de distintos puntos en el suelo al momento de la cosecha.

Tratamientos	Prof. (cm)	Hilera Plantas	Gotero (10 cm)	25 cm		40 cm	Promedio del perfil
				Fuerza (N)			
Riego deficitario							
Con ácido fúlvico	10	110,6 $\pm$ 21,1 a	115,6 $\pm$ 21,8	129,2 $\pm$ 26,7	123,6 $\pm$ 14,0 a		
	20	168,5 $\pm$ 20,7	166,6 $\pm$ 32,2	210,4 $\pm$ 26,3	178,3 $\pm$ 26,9	175,3 $\pm$ 13,9	
	30	184,9 $\pm$ 34,4	221,0 $\pm$ 28,9	139,9 $\pm$ 34,6	219,0 $\pm$ 33,2	B	
	40	351,1 $\pm$ 59,6	325,6 $\pm$ 73,0	357,5 $\pm$ 40,5	266,8 $\pm$ 90,2		
Sin ácido fúlvico	10	205,1 $\pm$ 21,1 b	189,8 $\pm$ 21,8	170,7 $\pm$ 26,7	187,0 $\pm$ 14,0 b		
	20	204,2 $\pm$ 20,7	211,9 $\pm$ 32,2	211,7 $\pm$ 26,3	181,0 $\pm$ 26,9	229,8 $\pm$ 13,9	
	30	146,2 $\pm$ 34,4	263,9 $\pm$ 28,9	199,2 $\pm$ 34,6	252,8 $\pm$ 33,2	A	
	40	295,5 $\pm$ 59,6	306,0 $\pm$ 73,0	343,2 $\pm$ 40,5	308,1 $\pm$ 90,2		
Riego normal							
Con ácido fúlvico	10	111,9 $\pm$ 21,1	126,0 $\pm$ 21,8	148,9 $\pm$ 26,7	146,5 $\pm$ 14,0		
	20	132,4 $\pm$ 20,7	148,3 $\pm$ 32,2	165,9 $\pm$ 26,3	186,5 $\pm$ 26,9	185,5 $\pm$ 13,9	
	30	190,4 $\pm$ 34,4	163,5 $\pm$ 28,9	175,1 $\pm$ 34,6	170,2 $\pm$ 33,2	B	
	40	227,3 $\pm$ 59,6	335,1 $\pm$ 73,0	290,8 $\pm$ 40,5	290,3 $\pm$ 90,2		
Sin ácido fúlvico	10	111,0 $\pm$ 21,1	120,8 $\pm$ 21,8	135,6 $\pm$ 26,7	147,7 $\pm$ 14,0		
	20	140,3 $\pm$ 20,7	159,5 $\pm$ 32,2	139,9 $\pm$ 26,3	154,9 $\pm$ 26,9	199,2 $\pm$ 13,9	
	30	131,7 $\pm$ 34,4	189,8 $\pm$ 28,9	182,9 $\pm$ 34,6	196,0 $\pm$ 33,2	B	
	40	333,1 $\pm$ 59,6	337,2 $\pm$ 73,0	380,9 $\pm$ 40,5	326,4 $\pm$ 90,2		

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos por profundidad de suelo y tipo de riego. Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas de la interacción riego x enmienda.

Solo se generaron diferencias significativas con y sin la aplicación de ácidos fúlvicos en dos puntos del perfil evaluado bajo riego deficitario; los puntos son bajo la hilera de plantas y a los 40 cm de ésta, ambos a 10 cm de profundidad. Analizando la interacción entre los tratamientos en el promedio del perfil, la interacción entre el riego deficitario sin la aplicación de ácidos fúlvicos registró la mayor resistencia a la penetración, significativamente distinto a los otros tratamientos.

En la figura 12 se presentan las isolíneas de resistencia a la penetración horizontal del suelo bajo tratamientos de enmienda de suelo y monto de riego.



**Figura 12.** Isolíneas de resistencia a la penetración horizontal del suelo bajo riego deficitario (arriba) y bajo riego normal (abajo) sin la aplicación de ácido fúlvico (izquierda) y con la aplicación de ácido fúlvico (derecha).

Bajo riego normal (figura 12, abajo), las diferencias en la resistencia a la penetración entre los tratamientos de aplicación de ácidos fúlvicos son bajas y tienden a aumentar en profundidad, con isolíneas horizontales. Por otra parte, con el riego deficitario se observa mayor resistencia a la penetración cuando no se aplicaron ácidos fúlvicos (cuadro 11) y una disminución de la horizontalidad de las isolíneas.

Considerando que niveles de resistencia sobre 160 N evaluados en condición húmeda, son considerados como ligeramente rígidos (Schoeneberger et al., 2012), bajo riego deficitario el AF es efectivo en disminuir la resistencia, posiblemente por un efecto de menor concentración salina, previniendo su acción cementante (Xing et al., 2009). Este valor es equivalente a 2,53 MPa, considerado como restrictivo para el crecimiento de raíces (Bengough, 2012; Schoeneberger et al., 2012).

## Densidad aparente

El cuadro 12 presenta los valores de densidad aparente (Da) obtenidos mediante el método del cilindro en función de la profundidad del suelo y la distancia sobre la hilera; dada la variabilidad de las repeticiones, no se generaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en ninguno de los puntos del perfil. Similares resultados encontró López *et al.* (2006), quienes señalan que no hay efecto de las sustancias húmicas sobre la densidad aparente del suelo, tal vez por la naturaleza líquida de los compuestos orgánicos, en comparación con la materia orgánica sólida.

**Cuadro 12.** Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ , promedio  $\pm$  EE) de los distintos tratamientos a dos profundidades y tres posiciones sobre el suelo.

Tratamientos	Profundidad (cm)	Hilera Plantas	15 cm	30 cm
-----Densidad aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ )-----				
Riego deficitario				
Con ácido fúlvico	15		1,32 $\pm$ 0,06	1,35 $\pm$ 0,06
	30		1,42 $\pm$ 0,06	1,39 $\pm$ 0,06
Sin ácido fúlvico	15		1,34 $\pm$ 0,06	1,26 $\pm$ 0,06
	30		1,40 $\pm$ 0,06	1,35 $\pm$ 0,06
Riego normal				
Con ácido fúlvico	15		1,29 $\pm$ 0,06	1,37 $\pm$ 0,06
	30		1,38 $\pm$ 0,06	1,35 $\pm$ 0,06
Sin ácido fúlvico	15		1,32 $\pm$ 0,06	1,35 $\pm$ 0,06
	30		1,42 $\pm$ 0,06	1,36 $\pm$ 0,06

Sin diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ , Test de Fisher) entre tratamientos.

En todos los tratamientos, los valores de densidad aparente son mayores a los 30 cm de profundidad, respondiendo a la lógica de la preparación de suelo y consistente con el aumento de resistencia presentado en el cuadro 11.

Al comparar los valores de Da con lo esperable de acuerdo a la clase textural franca (Sandoval *et al.*, 2012), donde se esperarían valores en el rango de 1,20 a 1,40  $\text{Mg m}^{-3}$ , se observa que en superficie se presentan los valores típicos, pero a los 30 cm de profundidad, si bien los valores variaron entre 1,29 a 1,42  $\text{Mg m}^{-3}$ , tienden a estar en el nivel alto del rango esperado, lo que permite concluir que existe algún grado de compactación. Finalmente, tal como lo señalan Horn y Fleige (2009), la densidad aparente es una propiedad de baja significancia al momento de establecer calidad de suelo o efectos de los manejos.

## Distribución de tamaño de poros

Mediante la curva característica de retención de agua en el suelo, se determinó la distribución de poros por tamaño al momento de la cosecha. Los valores de la porosidad de drenaje rápido (PDR) se presentan en el cuadro 12.

**Cuadro 13.** Contenido de poros drenaje rápido (PDR,  $>50\mu\text{m}$ ) (% base volumen, promedio  $\pm\text{EE}$ ) de los tratamientos evaluados a dos profundidades y tres posiciones sobre el suelo.

Tratamientos	Profundidad (cm)	Hilera Plantas	15 cm	30 cm
			----- Contenido de agua (%) -----	
Riego deficitario				
Con ácido fúlvico	15	14,0 $\pm$ 2,0	15,2 $\pm$ 2,0	13,0 $\pm$ 2,0
	30	10,0 $\pm$ 2,0	13,1 $\pm$ 2,0	13,1 $\pm$ 2,0
Sin ácido fúlvico	15	12,2 $\pm$ 2,0	16,0 $\pm$ 2,0	12,0 $\pm$ 2,0
	30	10,1 $\pm$ 2,0	12,4 $\pm$ 2,0	14,3 $\pm$ 2,0
Riego normal				
Con ácido fúlvico	15	15,2 $\pm$ 2,0	13,2 $\pm$ 2,0	13,2 $\pm$ 2,0
	30	13,3 $\pm$ 2,0	13,1 $\pm$ 2,0	13,1 $\pm$ 2,0
Sin ácido fúlvico	15	13,2 $\pm$ 2,0	12,0 $\pm$ 2,0	13,0 $\pm$ 2,0
	30	13,0 $\pm$ 2,0	14,2 $\pm$ 2,0	15,0 $\pm$ 2,0

Sin diferencias estadísticas significativas ( $p>0,05$ , Test de Fisher) entre tratamientos.

No se observa un efecto diferenciador significativo ( $p>0,05$ ) en el porcentaje de poros de drenaje rápido entre los tratamientos de riego y enmienda evaluados. En todos los puntos, los valores se encuentran mayores o igual a 10%, valor recomendado para una susceptibilidad mínima a daños en los cultivos o que reduzcan el rendimiento déficit de aireación en la zona de la raíz (Reynolds *et al.*, 2009). Por su parte, el cuadro 14 presenta la porosidad de drenaje lento generada por los tratamientos de riego y enmienda.

**Cuadro 14.** Contenido de poros de drenaje lento (PDL, 10-50  $\mu\text{m}$ ) (% base volumen, promedio  $\pm\text{EE}$ ) de los tratamientos evaluados a dos profundidades y tres posiciones sobre la hilera.

Tratamientos	Profundidad (cm)	Hilera Plantas	15 cm	30 cm
			----- Contenido de agua (%) -----	
Riego deficitario				
Con ácido fúlvico	15	12,2 $\pm$ 1,0	10,2 $\pm$ 1,0	12,2 $\pm$ 1,0
	30	13,1 $\pm$ 1,0	9,3 $\pm$ 1,0	10,1 $\pm$ 1,0
Sin ácido fúlvico	15	10,0 $\pm$ 1,0	10,0 $\pm$ 1,0	11,0 $\pm$ 1,0
	30	11,2 $\pm$ 1,0	11,0 $\pm$ 1,0	8,2 $\pm$ 1,0
Riego normal				
Con ácido fúlvico	15	10,1 $\pm$ 1,0	10,3 $\pm$ 1,0	11,1 $\pm$ 1,0
	30	8,3 $\pm$ 1,0	8,1 $\pm$ 1,0	10,0 $\pm$ 1,0
Sin ácido fúlvico	15	11,2 $\pm$ 1,0	10,0 $\pm$ 1,0	12,2 $\pm$ 1,0
	30	8,1 $\pm$ 1,0	8,2 $\pm$ 1,0	9,4 $\pm$ 1,0

Sin diferencias estadísticas significativas ( $p>0,05$ , Test de Fisher) entre tratamientos por profundidad de suelo y tipo de riego.

No se generaron diferencias significativas en la porosidad de drenaje lento en ningún nivel evaluado, para lo cual Seguel *et al.* (2011) indican que en este rango de poros difícilmente

se generan diferencias como consecuencia de los manejos. Los valores registran un máximo de 13% y un mínimo de 8%.

En el cuadro 15 se presenta la porosidad que retiene agua útil para el cultivo según el criterio clásico de la diferencia entre capacidad de campo (retención de agua a -33 kPa) y el punto de marchitez permanente (retención a -1500 kPa).

**Cuadro 15.** Contenido de poros de agua útil (PAU, 0,2-10  $\mu\text{m}$ ) (promedio  $\pm$ EE) de los tratamientos evaluados en tres puntos sobre el suelo y dos profundidades.

Tratamientos	Profundidad (cm)	Hilera Plantas	15 cm	30 cm
			----- Contenido de agua (%) -----	
Riego deficitario				
Con ácido fúlvico	15	13,0 $\pm$ 1,0	14,1 $\pm$ 1,0	16,1 $\pm$ 1,0
	30	13,2 $\pm$ 1,0	13,0 $\pm$ 1,0	15,0 $\pm$ 1,0
Sin ácido fúlvico	15	14,3 $\pm$ 1,0	13,2 $\pm$ 1,0	18,0 $\pm$ 1,0
	30	15,2 $\pm$ 1,0	16,1 $\pm$ 1,0	13,2 $\pm$ 1,0
Riego normal				
Con ácido fúlvico	15	13,0 $\pm$ 1,0	13,1 $\pm$ 1,0	13,0 $\pm$ 1,0
	30	13,0 $\pm$ 1,0	13,0 $\pm$ 1,0	12,0 $\pm$ 1,0
Sin ácido fúlvico	15	15,1 $\pm$ 1,0	14,3 $\pm$ 1,0	15,2 $\pm$ 1,0
	30	13,3 $\pm$ 1,0	13,3 $\pm$ 1,0	12,1 $\pm$ 1,0

Sin diferencias estadísticas significativas ( $p>0,05$ , Test de Fisher) entre tratamientos.

No se generaron diferencias significativas en los poros de agua útil entre los tratamientos evaluados. Al promediar los valores de poros de agua útil de todos los puntos de la superficie del suelo por profundidad, se obtiene el cuadro 16, donde se presenta la categoría de calidad física de este valor según los tratamientos aplicados.

**Cuadro 16.** Efectos de los tratamientos de riego y aplicación de ácidos fúlvicos sobre la calidad física del suelo según Reynolds *et al.* (2009).

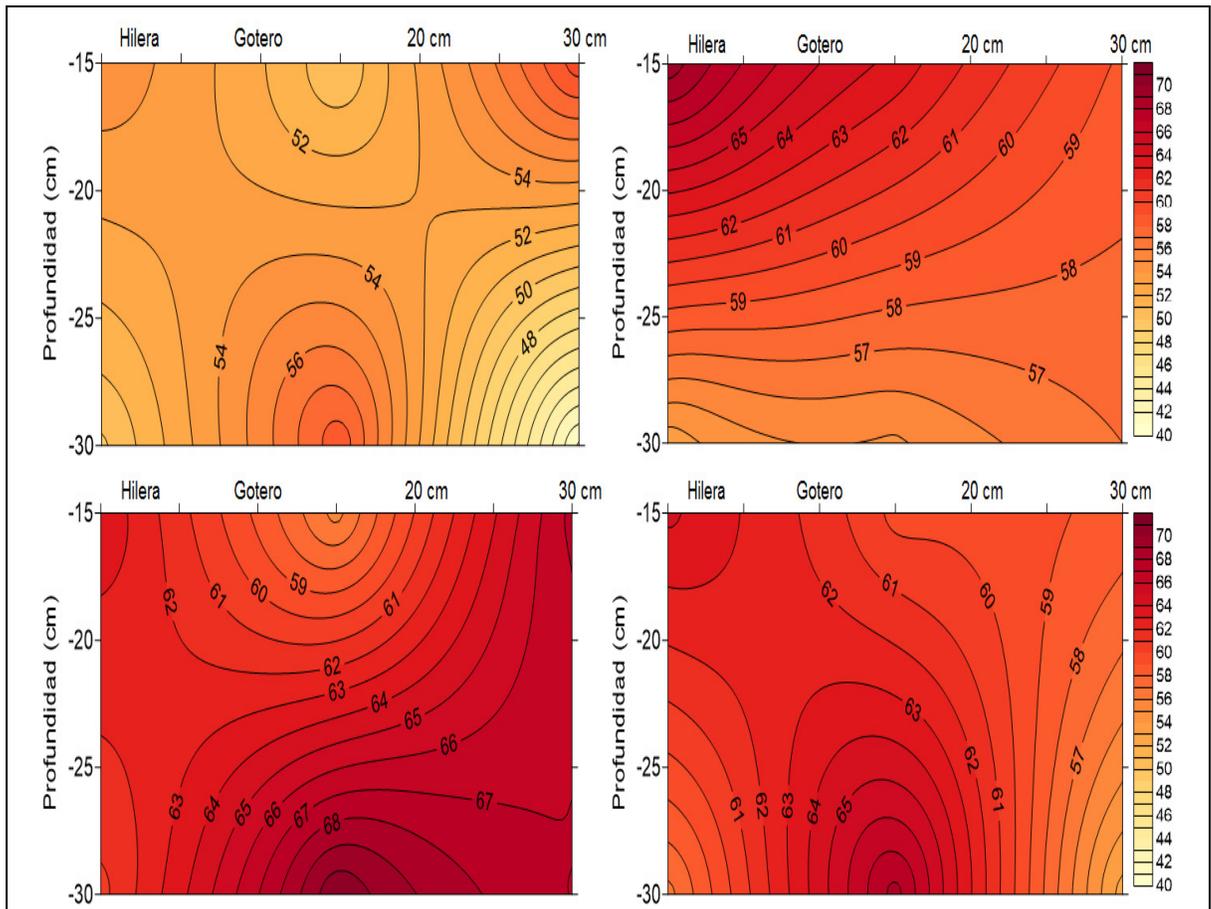
Tratamientos	Profundidad (cm)	Riego	Promedio	Categoría según Reynolds <i>et al.</i> (2009)
Con ácido fúlvico	15	Deficitario	14,4 $\pm$ 1,0	Sub-óptima
	30		13,6 $\pm$ 1,0	Sub-óptima
Sin ácido fúlvico	15	Deficitario	15,0 $\pm$ 1,0	Ideal
	30		14,6 $\pm$ 1,0	Sub-óptima
Con ácido fúlvico	15	Normal	13,0 $\pm$ 1,0	Sub-óptima
	30		12,6 $\pm$ 1,0	Sub-óptima
Sin ácido fúlvico	15	Normal	14,6 $\pm$ 1,0	Sub-óptima
	30		12,6 $\pm$ 1,0	Sub-óptima

De acuerdo con Reynolds *et al.* (2009), valores de PAU mayores o iguales a 15% están categorizados como de buen nivel o ideales, ya que tienen una buena reserva de agua aprovechable para las plantas, mientras que con un valor menor a 15%, la calidad física del suelo es sub-óptima, debido a la menor capacidad de almacenamiento de agua disponible

para la planta. En este sentido, sólo el tratamiento sin la aplicación de ácidos fúlvicos bajo riego deficitario se logró una condición óptima, aunque apenas en el límite inferior del rango.

### Estabilidad de microagregados

En la figura 13 se presentan los mapas de isolíneas de la estabilidad de microagregados determinada mediante el método de la relación de dispersión (RD), donde los valores menores denotan una mayor estabilidad. La evaluación corresponde a la tercera campaña de evaluación.



**Figura 13.** Isolíneas de RD del suelo bajo tratamientos de enmienda orgánica sin la aplicación de ácidos fúlvicos (izquierda) y con la aplicación de ácidos fúlvicos (derecha), bajo riego deficitario (arriba) y riego normal (abajo).

Los tratamientos bajo riego deficitario terminal presentan menores valores de RD (mayor estabilidad) que los tratamientos bajo riego normal. Bajo riego normal, se observan mayores de RD en profundidad en ambos tratamientos de enmienda. En el cuadro 17 se presenta la relación de dispersión de los microagregados promedio del perfil del suelo bajo los tratamientos aplicados.

**Cuadro 17.** Relación de dispersión (RD, % promedio  $\pm$ EE) para microagregados en los distintos tratamientos.

<b>Riego</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>RD</b>
Normal	Con ácido fúlvico	64,2 $\pm$ 2,05 a
	Sin ácido fúlvico	60,0 $\pm$ 2,05 a
Deficitario	Con ácido fúlvico	59,6 $\pm$ 2,51 a
	Sin ácido fúlvico	51,3 $\pm$ 3,29 b

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos y tipo de riego.

La RD es una medida inversa de la estabilidad estructural de agregados al agua, es decir, a mayor RD menor es la estabilidad estructural. Como se presenta en el cuadro 17, todos los valores estuvieron por sobre el 30%, correspondiendo a suelos poco estables de acuerdo con el criterio señalado por Seguel et al. (2003). En general, el suelo bajo riego normal resultó con menor estabilidad estructural que el suelo bajo riego deficitario, independiente a la aplicación de ácidos fúlvicos; sin embargo, el tratamiento de riego deficitario sin la aplicación de ácidos fúlvicos, generó la mayor estabilidad estructural, significativamente distinta a los otros tratamientos. Estos resultados responden, según Brunel-Saldias et al. (2016), a múltiples factores asociados no sólo al contenido y tipo de materia orgánica del suelo, sino en particular a agentes cementantes, contenido y tipo de arcilla y procesos de desecamiento.

La aplicación de ácidos fúlvicos generaría menor estabilidad estructural al presentar mayores valores de RD. Esto podría deberse al movimiento fuera del perfil de cationes divalentes como el  $\text{Ca}^{+2}$  por acción de los ácidos fúlvicos. Por su parte, Piccolo y Mbagwu (1990), señalan que los ácidos húmicos generan mayor estabilidad de microagregados que los ácidos fúlvicos, debido al mayor peso molecular y movilidad.

### **Velocidad de infiltración del suelo**

En el cuadro 18 se presenta la velocidad de infiltración promedio registrada en distintas posiciones respecto a la hilera de plantación, medido superficialmente a través del minidisco infiltrómetro en la tercera fecha de evaluación. Esta evaluación se realizó sólo en las unidades experimentales bajo riego normal.

**Cuadro 18.** Velocidad de infiltración del suelo en distintas posiciones desde la hilera de plantación (promedio  $\pm$ EE) con y sin la aplicación de ácidos fúlvicos bajo riego normal.

<b>Tratamiento/Posición</b>	<b>Gotero (10 cm)</b>	<b>15 cm</b>	<b>30 cm</b>
Con ácido fúlvico	1,34 $\pm$ 0,17 a	5,64 $\pm$ 1,04 a	4,47 $\pm$ 1,20 a
Sin ácido fúlvico	2,98 $\pm$ 0,17 b	4,53 $\pm$ 1,04 a	2,96 $\pm$ 1,20 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos de enmienda de suelo en una misma posición respecto a la línea de plantas.

Según Schoeneberger *et al.* (2012), los valores de  $K_{\text{sat}}$  obtenidos en este estudio están dentro del rango moderado a alto y sólo se generaron diferencias significativas entre los

tratamientos en la posición bajo el gotero, resultando mayor cuando no se aplicó ácidos fúlvicos, lo que podría deberse a la acción de las gotas al impactar el suelo, generando pérdida de estructura, sumada a la potencial acción de arrastre de iones estructurantes como el  $\text{Ca}^{+2}$  por parte de los ácidos fúlvicos. Al respecto, Kremer et al. (2021) destacan el efecto desplazador de sales de ácidos fúlvicos en un suelo franco arenoso, pero en su trabajo no analizaron la relación con la estabilidad de agregados, aspecto que se debe continuar evaluando en estudios futuros.

Al promediar todos los puntos de cada tratamiento, matemáticamente el tratamiento con la aplicación de ácidos fúlvicos generó mayores valores velocidad de infiltración, promediando  $3,81 \text{ cm h}^{-1}$ , mientras que el tratamiento sin la aplicación de ácidos fúlvicos logró una tasa de infiltración de  $3,49 \text{ cm h}^{-1}$ . Tendencias similares encontró López et al. (2006), quienes reportan que los ácidos fúlvicos de distintos orígenes aumentan la infiltración básica del suelo, aunque Seguel et al. (2020) indican que, en sistemas de labranza, la infiltración es altamente variable durante la temporada.

Shishir et al. (2019) señalan que suelos con mayor fracción de ácidos fúlvicos solubles (0,10-0,12%) presentan mejor infiltración, mientras que, con una mayor fracción de ácido húmico insoluble, la infiltración se ve negativamente afectada. Finalmente, según Dyke et al. (2009) la mayor infiltración acumulada promedio en el tratamiento con ácido fúlvico podría deberse a la disminución en la repelencia al agua del suelo debido a la presencia del ácido orgánico soluble en agua, lo que no es coincidente con el resultado bajo el gotero, donde la mayor infiltración se obtuvo sin aplicación de ácido fúlvico, siendo necesario continuar estudiando estas relaciones entre propiedades.

## Resultados del cultivo de tomate

### Rendimiento y licopeno en la fruta

En el cuadro 19 se presenta la concentración de licopeno en la fruta, el rendimiento comercial y la producción de licopeno por hectárea de los distintos tratamientos.

**Cuadro 19.** Concentración de licopeno en la fruta, rendimiento comercial y producción de licopeno por superficie según tratamiento.

Riego	Enmienda	Licopeno ( $\text{mg kg}^{-1}$ de MF)*	Rendimiento ( $\text{T ha}^{-1}$ )	Licopeno ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
Deficitario	Con ácido fúlvico	56,1 $\pm$ 5,03ab	51,6 $\pm$ 3,49 a	2,7 $\pm$ 0,33 a
	Sin ácido fúlvico	69,0 $\pm$ 5,03 a	50,7 $\pm$ 3,49 a	3,4 $\pm$ 0,33 a
Normal	Con ácido fúlvico	52,0 $\pm$ 5,03 b	48,6 $\pm$ 3,49 a	2,7 $\pm$ 0,33 a
	Sin ácido fúlvico	61,5 $\pm$ 5,03 ab	49,7 $\pm$ 3,49 a	3,2 $\pm$ 0,33 a

\*MF= Masa fresca de la fruta; letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) para la interacción enmienda x tratamiento de riego.

Los tratamientos sin la aplicación de ácido fúlvico bajo ambos manejos de riego (deficitario y normal), resultaron con mayor concentración de licopeno en la fruta, con 69,0 y 61,5 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, sin diferencias significativas entre ellos. Por su parte, el tratamiento con la aplicación de ácido fúlvico bajo riego normal resultó con la menor concentración de licopeno, con un valor de 52 mg kg<sup>-1</sup> de fruta fresca, siendo significativamente menor respecto al tratamiento bajo riego deficitario donde no se aplicaron los ácidos fúlvicos.

La menor concentración de licopeno en la fruta producida en las parcelas donde se aplicaron ácidos fúlvicos, se podría deber a un efecto bio-protector que las enmiendas orgánicas habrían otorgado a las plantas. Chukov et al. (1996) ha descrito efectos “bio protectores” por la aplicación de sustancias húmicas sobre cultivos que se desarrollan en condiciones de estrés salino, y que en el caso del tomate corresponde a un cofactor para la producción de licopeno. También Sánchez-Conde et al. (1968) reportan que la aplicación de sustancias húmicas al riego reduce los niveles foliares de Na<sup>+</sup> en algunos cultivos como pimiento y tomate.

La aplicación de ácidos fúlvicos tiende a generar una menor conductividad eléctrica en el suelo circundante a la zona de mayor concentración de raíces, lo que habría ocasionado una disminución del stress salino en el cultivo, provocando menor concentración de licopeno. Según Maggio et al. (2001), al regar las plantas de tomate con aguas salinas, mejoran algunos atributos inherentes a la calidad del fruto, por cuanto éstos presentan un mayor contenido de sólidos solubles, carotenoides y licopeno. Este mismo autor detectó que las concentraciones de carotenoides totales y licopeno se incrementaban gradualmente desde los niveles más bajos de CE (0,5 dS m<sup>-1</sup>) hasta los 4,4 dS m<sup>-1</sup>, rango dentro del cual se mantuvo el presente ensayo.

Según Martínez et al. (2010), la aplicación de un estrés salino moderado a plantas de tomate aumenta el contenido de licopeno, con respuestas en un rango del 30 al 85% de incremento en comparación con las plantas no estresadas. Los resultados del presente estudio muestran esta tendencia, aunque con menores valores. Bajo riego deficitario y sin la aplicación de ácidos fúlvicos, la concentración de licopeno en la fruta aumentó en un 19% respecto al tratamiento con aplicación de enmienda; lo mismo ocurrió con el riego normal, donde se generó un aumento de un 15% cuando no se aplican los ácidos fúlvicos. También hay experiencias donde no hay efectos de los estreses externos, como señalan Serio et al. (2004), quienes experimentaron con una solución nutritiva ajustada a una CE de entre 3 a 6 dS m<sup>-1</sup> con NaCl, no encontrando efectos en la concentración de licopeno de la fruta.

Respecto al rendimiento comercial, no se produjeron diferencias significativas entre los tratamientos. Estos resultados son similares a los obtenidos por Takács et al. (2020), quienes no encontraron diferencias en el rendimiento de un cultivo de tomates cuando se aplicó un 15% menos agua, pero difieren a lo reportado por Macua et al. (2010), Sándor et al. (2020) y Boamah et al. (2011), quienes señalan que una reducción del 50% o más de la cantidad de agua aportada al cultivo de tomate, se traduce en una disminución del rendimiento comercial, pero en un aumento de los sólidos solubles y licopeno. En el presente estudio, la restricción hídrica fue ligera, equivalente a un 88% del agua aplicada en el tratamiento con riego normal en toda la temporada, por lo que no se generó un efecto negativo sobre el rendimiento. Por otra parte, es necesario tener presente la lluvia de 49 mm

ocurrida a finales de enero, lo que pudo ayudar a movilizar sales en profundidad con mayor eficacia en los tratamientos con ácidos fúlvicos.

También es importante la etapa de crecimiento del cultivo cuando ocurre el estrés. En este sentido, Minhas (1996) indica que la aplicación de agua no salina en una etapa sensible y agua salina en una etapa relativamente tolerante podría minimizar la reducción en rendimiento por salinidad. En este sentido, Mizrahi et al. (1988) señalan que el rendimiento general de plantas de tomate regadas con agua con CE de  $3 \text{ dS m}^{-1}$ , aplicadas en una etapa tardía del desarrollo, no fue significativamente diferente al control regado con agua no salina, mientras que la calidad del fruto mejoró significativamente, aumentando el contenido de carotenoides.

Es necesario tener en cuenta que un estrés salino ligero (asociado a un estrés hídrico) favorece la síntesis de licopenos, sin embargo, un estrés excesivo afectará negativamente el rendimiento de fruta, impidiendo lograr el objetivo de producir un alimento saludable en altas cantidades (Singh y Chatrath, 2001). Para las condiciones del presente ensayo, la producción de licopeno por hectárea no se vio afectada por los tratamientos, lo que resulta interesante al considerar que el riego deficitario utilizó un 12% menos de agua en la temporada respecto al riego normal.

### Concentración de clorofila en hojas de tomate

La concentración de clorofila en hojas de tomate se presenta en el cuadro 20.

**Cuadro 20.** Concentración de clorofila ( $\text{mg kg}^{-1}$ , promedio  $\pm$ EE) en las hojas de tomate bajo distintos tratamientos al momento de la cosecha.

Riego	Enmienda	Clorofila a ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Clorofila b ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Clorofila total ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
Deficitario	Con ácido fúlvico	2,49 $\pm$ 0,39 a	1,36 $\pm$ 0,20 b	3,84 $\pm$ 0,57 a
	Sin ácido fúlvico	2,87 $\pm$ 0,39 a	1,63 $\pm$ 0,20 ab	4,50 $\pm$ 0,57 a
Normal	Con ácido fúlvico	3,21 $\pm$ 0,39 a	1,54 $\pm$ 0,20 ab	4,72 $\pm$ 0,57 a
	Sin ácido fúlvico	3,85 $\pm$ 0,39 a	1,97 $\pm$ 0,20 a	5,82 $\pm$ 0,57 a

Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) para la interacción enmienda x tipo de riego.

El contenido de clorofila es uno de los principales índices que refleja la capacidad de fotosíntesis de las hojas y el estado de salud de las plantas (Peng *et al.*, 1993). No se generaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados en la concentración de clorofila *a* en las hojas de tomate, aunque bajo riego deficitario, la concentración alcanzada es menor que bajo riego normal, independientemente a la aplicación de ácidos fúlvicos. Respecto a la clorofila *b*, sin la aplicación de ácidos fúlvicos se registró la mayor concentración en las hojas bajo ambos tratamientos de riego, aunque la interacción de factores determinó que las diferencias significativas se presentan sólo entre el riego normal sin ácido fúlvico y el riego deficitario con ácido fúlvico.

Las diferencias en contenido de clorofila podrían deberse a que plantas bajo stress salino generan clorosis, necrosis y disminución de la densidad estomática en la cara adaxial, y simultáneamente un aumento de clorofila en la cara abaxial e incremento de actividad de la peroxidasa (Romero Aranda et al., 2001). Esto es coincidente con los resultados del presente estudio, ya que la aplicación de ácidos fúlvicos promueve una disminución general de la salinidad en el suelo, previniendo este estrés, aunque resulta evidente la interacción con el factor riego, el que además tuvo una diferenciación en parte de la temporada, destacando el dinamismo de factores involucrados en el comportamiento del cultivo.

Finalmente, en la concentración de la clorofila total, no se generaron diferencias significativas entre los tratamientos. Estos resultados son similares a los publicados por Xu y Leskova (2014), quienes encontraron que el riego deficitario al 75% de ETc tuvo poca influencia sobre el tamaño de la planta y el contenido de clorofila de las hojas.

Considerando los resultados del estudio, se cumple parcialmente la hipótesis, por cuanto el ácido fúlvico bajo riego deficitario ayuda a desplazar sales y prevenir el estrés generado por éstas, aunque genera una disminución de la concentración de licopeno en la fruta si es que se aplica un riego no deficitario. Bajo el objetivo de incrementar la concentración de licopeno en el tomate industrial, no es recomendable el uso de desplazadores de sales si se tiene un agua de riego ligeramente salina, aunque el rendimiento de licopeno por hectárea no se vio afectado por los distintos tratamientos. Esto abre una línea de investigación para entender la relación entre el rendimiento de fruta, la concentración de licopeno y la producción de licopeno total, como una alternativa de producción de alimentos funcionales.

## CONCLUSIONES

El manejo del cultivo de tomate bajo un estrés hídrico terminal, con el objeto de incrementar la concentración y rendimiento de licopeno, en interacción con la aplicación de ácidos fúlvicos al suelo para prevenir un estrés salino excesivo, presenta interacciones sobre las propiedades del suelo y la planta que se resumen en:

La aplicación de ácidos fúlvicos generó una disminución de la conductividad eléctrica aparente (CEa) en partes del perfil de suelo, demostrando su efectividad como desplazador de sales, en particular cuando se genera una restricción hídrica al cultivo en su etapa terminal de desarrollo.

El efecto de los ácidos fúlvicos sobre la CEa del suelo se afecta por el régimen de riego, ya que la movilidad de las sales está condicionada por el movimiento del agua a través del perfil. En este sentido, es el régimen de riego el factor clave para entender los efectos sobre el cultivo, ya que la aplicación del ácido fúlvico no generó mayores cambios en el resto de las propiedades físicas del suelo.

El patrón de humedecimiento del perfil no se afectó por la aplicación de la enmienda, aunque la velocidad de infiltración bajo la línea de goteo disminuyó respecto al tratamiento sin enmienda, denotando la acción estructurante de las sales del suelo.

La aplicación de un déficit de agua a partir de pinta no reduce el rendimiento del cultivo y genera un aumento en la concentración de licopeno cuando se prescinde de la aplicación de ácidos fúlvicos al suelo. Por otra parte, la aplicación de ácidos fúlvicos generó menor concentración de licopeno; sin embargo, ni el régimen de riego ni el uso de la enmienda afecta el rendimiento de licopeno.

## LITERATURA CITADA

- Acevedo E.H. 1979. Interacciones suelo agua raíz en el proceso de absorción de agua por las plantas. *Boletín Técnico* 44:17-25.
- Adalid, M., S. Roselló, and F. Nuez. 2010. Evaluation and selection of tomato accessions (*Solanum* section *Lycopersicon*) for content of lycopene,  $\beta$ -carotene and ascorbic acid. *Journal of Food Composition and Analysis* 23(6):613-618.
- Adiku, K., M. Renger, G. Wessolek, M. Facklam, and C. Hecht-Bucholtz. 2000. Simulation of the dry matter production and seed yield of common beans under varying soil water and salinity conditions. *Agricultural Water Management* 47: 55-68.
- Angulo-Jaramillo, R., F. Moreno, E. Clothier, J. Thony, G. Vachaud, E. Fernandez-Boy, and A. Cayuela. 1997. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61(1):27-32.
- Allen, R., D. Pereira, A. Raes, and M. Smith. 2006. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. 301 p. *In*: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Ayers, R.S., and D.W. Westcot. 1994. Water quality for agriculture. p.129. *In*: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Viale Del le Terme di Caracalla, Italy.
- Binoy, G., D. Charanjit, A. Khurdiya, and H. Kapoor. 2004. Antioxidants in tomato (*Lycopersicon esculentum*) as a function of genotype. *Food Chemistry* (84):45-51.
- Boamah, P.O., L.K. Sam Amoah, and J. Onumah. 2011. Effect of salinity level of irrigation water on the yield of tomato. *Journal of Agricultural and Biological Science* 6:49-53.
- Biehler, E., F. Mayer, L. Hoffman, E. Krause, and E. Bohn. 2010. Comparison of 3 Spectrophotometric methods for carotenoid determination in frequently consumed fruits and vegetables. *Journal of Food Science* 1(75):56-65.
- Bengough, A.G. 2012. Root elongation is restricted by axial but not by radial pressures: so what happens in field soil? *Plant and Soil* 2(360):15-18. doi:10.1007/s11104-012-1428-8.
- Bui, E. 2013. Soil salinity: A neglected factor in plant ecology and biogeography. *Journal of Arid Environments* (92):14-25.
- Bronick, C.J., and R. Lal. 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma* (124):3-22.
- Brunel-Saldías. N., I. Martínez, O. Seguel, C. Ovalle, and E. Acevedo. 2016. Structural characterization of a compacted alfisol under different tillage systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 3(16):689-701.
- Campos, C.B., P.D. Fernandes, H.R. Ghey, F. Blanco, C.B. Goncalves, and A.F. Campos. 2006. Yield and fruit quality of industrial tomato under saline irrigation. *Scientia Agricola* (63):146-152.
- Cantore, V., and S. Musacchi. 2000. Aplicaciones de agua salina en la agricultura en Italia. *Frutticoltura* 7(8):26-36.
- Castellanos, J.Z. 2009. Manual de producción de tomate en invernadero. Celaya, Guanajuato, México.
- Cuartero, J., and R. Fernández-Muñoz. 1999. Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae*(78):83-125.

- Chinnusamy, V., A. Jagendorf, and J. Zhu. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science* (45):437-448.
- Chukov, S., V. Talishkina, and M. Nadporozhskaya. 1996. Physiological activity of growth stimulators and of soil humic acids. *Eurasian Soil Science* 4(28):30-39.
- Clay, D., J. Chang, D. Malo, C. Carlson, C. Reese, S. Clay, M. Ellsbury, and B. Berg. 2001. Factors influencing spatial variability of soil apparent electrical conductivity. *Soil Science and Plant Analysis* 20(32):2993-3008.
- Del Amor, F.M., V. Martinez, and A. Cerdá. 2001. Salt tolerance of tomato plants as affected by stage of plant development. *Hort Science* (36):1260-1263.
- De Pascale, S., A. Maggio, V. Fogliano, P. Ambrosino, and A. Ritieni. 2001. Irrigation with saline water improves carotenoid content and antioxidant activity of tomato. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* (76):447-453.
- Dorais, M., and P. Papadopoulos. 2000. Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews* (29):239-319.
- Diacono, M., and F. Montemurro. 2010. Long term effects of organic amendments on soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development* (30):401-422.
- Dudley, N. 2008. Guidelines for applying protected area management categories. Gland, Switzerland.
- Dumas, Y., M. Dadomo, G. Di Lucca, and P. Grolier. 2003. Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* (83):369-382.
- Dyke, V., G. Johnson, and R. Grossl. 2009. Humic substances effect on moisture retention, nutrition, and colour of Intermountain West Putting Greens. *Turfgrass and Environmental Research* 8:1-9.
- Ettler, V., J. Jehlicka, V. Masek, and J. Hruska. 2005. The leaching behavior of lead metallurgical slag in high molecular weight organic solutions. *Mineralogical Magazine* (69):737-747. <https://doi.org/10.1180/0026461056950284>.
- Eyheraguibel, B., Silvestre, J. and Morard, P. 2008. Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize. *Bioresource Technology* (99):4206-4212.
- Flagella, Z., V. Cantore, F. Boari, D. Volpe, and A. De Caro, A., 1999. Tolleranza allo stress salino delle specie coltivate in relación eagliaspettifisiologici, produttivi e qualitativi. Roma, Italia Disponible en <http://www.inea.it/otris/salinita/flagella.htm> (Consultado en enero de 2021).
- García-Closas, R., A. Berenguer, M. Tormo, J. Sánchez, and J. Quirós. 2004. Dietary source of vitamin C, vitamin E, and specific carotenoid in Spain. *Journal of Nutrition* (91):1005-1011.
- George, B., C. Kaur, D.S. Khurdiya, and H.C. Kapoor. 2004. Antioxidants in tomato (*Lycopersium esculentum L*) as a function of genotype. *Food Chemistry* 1(84):45-51.
- Giorgi, F., and P. Lionello. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* (63):90-104.
- González-Meza, A., y B. Hernández-Leos. 2000. Estimación de las necesidades hídricas del Tomate. *Terra latinoamericana* (18)1: 45-50.
- Gough, C., and G.R. Hobson. 1990. A comparison of the productivity, quality, shelf life characteristics and consumer reaction to the crop from cherry tomato plants grown at different levels of salinity. *Journal of Horticultural Science* 4(65):431-439.

- Gulser, F., F. Sonmez, and S. Boysan. 2010. Effects of calcium nitrate and humic acid on pepper seedling growth under saline condition. *Journal of Environmental Biology* 31:873-876.
- Grainferberg, A., L. Giustiniani, L. Barsanti, and L. Botrini. 2000. Effect of salt stress on tomato fruit quality. *ColtureProtette*6(29):71-80.
- Griffiths, E., and R. Burns. 1972. Interaction between Phenolic sub stances and Microbial polysaccharides in soil aggregation. *Plant Soil* (36):599-612.
- Hanson, B., A. Member, and K. Kaita. 1997. Response of electromagnetic conductivity meter to soil salinity and soil water content. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* (123):141-143.
- Helyes L., A. Lugasi, Z. Pék. 2012. Effect of irrigation on processing tomato yield and antioxidant components. *Turk Journal Agriculture* 36: 702-709.
- Horn, R., and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research* 2(102):201-208. doi:10.1016/j.still.2008.07.015.
- Inzunza, J. 2019. Meteorología descriptiva. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- Julkowska, M., and C. Testerink. 2015. Tuning plant signaling and growth to survive salt. *Trends in Plant Science* (20):586-594.
- Jury, W., and R. Horton. 2004. *Soil Physics*. 6ed. Hoboken, Wiley, Estados Unidos.
- Katerji, N., J. Hoorn, A. Hamdy, and M. Mastrorilli. 2003. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. *Agricultural Water Management* 62(1):37-66.
- Kremer, C., J. Díaz, O. Seguel, and Y. Tapia. 2021. Preliminary use of a fulvic acid, as a strategy to improve water use in saline soils. *Revista Universidad de Cuyo* 1(53):164-175.
- Lauchli, A., and E. Epstein. 1990. Plant responses to saline and sodic conditions. p. 113-137. *In: Tanji, K.K. Agricultural Salinity Assessment and Management. Manuals and Reports on Engineering Practice, ASCE, New York. Estados Unidos.*
- Larry, T., and P. Larry. 2012. Cap V. Pedology. p. 25-33. *In: Huang, P.M., Li, and P. Sumner, Handbook of Soil Sciences, second edition. Estados Unidos.*
- Lakhdar, A., M. Rabhi, T. Ghnaya, F. Montemurro, N. Jedidi, and C. Abdelly. 2009. Effectiveness of compost use in salt-affected soil. *Journal of Hazardous Materials* (171):29-37.
- Lahoz, I., A. Pérez-de-Castro, M. Valcárcel, J. Macua, J. Beltrán, S. Roselló, and J. Cebolla-Cornejo. (2016). Effect of water deficit on the agronomical performance and quality of processing tomato. *Scientia Horticulturae* 200:55-65.
- López, R., A. Arteaga, L. Vázquez, L. López, y I. Sánchez. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento del riego en cultivos agrícolas, *Revista Agricultura Técnica en México* 1(35): 92-106.
- López, R., A. Gallegos del Tejo, E. Peña, A. Reyes, R. Castro, J. Chávez. 2006. Substancias húmicas de origen diverso en algunas propiedades físicas de un suelo franco-arcillo limoso. *Terra Latinoamericana* 3(24):303-309.
- Maas, E., and J. Hoffman, J. 1977. Salt tolerance current assessment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* (103): 115-134.
- Machiwal, D., K. Jha, and B. Mal. 2006. Modelling Infiltration and quantifying spatial soil variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering* 4(95):569-582.

- Macua, J., I. Daza, J. Cebolla, and I. Lahozl. 2010. Licopeno y tomate de industria. Influencia de la dosis de riego en el cultivo en el Valle del Ebro. *Actas de Horticultura* (60):268-272.
- Martínez Valverde, I., M.J. Periago, G. Provan, and A. Chesson. 2002. Phenolic compounds, lycopene and antioxidant activity in commercial varieties of tomato (*Lycopersicon esculentum* L). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 3(82):323-30.
- Martínez, J.P., Antúnez, A., Pertuzé, R., y Araya, H. 2010. Tomate: El manejo de la salinidad cambia la productividad y calidad. *Revista Tierra Adentro* (30):12-14.
- Maggio, A., V. Fogliano, P. Ambrosino, A. Ritieni, and S. De Pascale. 2001. Irrigation with saline water improves carotenoids content and antioxidant activity of tomato. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 4(76):447-453.
- Melero, S., E. Madejón, J. Ruiz, and J. Herencia. 2007. Chemical and biochemical properties of a clay soil under dryland agricultural system as affected by organic fertilization. *European Journal of Agronomy* (26):327-334.
- Minhas, P.S. 1996. Saline water management for irrigation in India. *Agricultural Water Management* 1(30):1-24.
- Mizrahi, Y., E. Taleisnik, V. Kagan-Zur, Y. Zohar, R. Offenbach, E. Matan, and R. Golan. 1988. A saline irrigation regime for improving tomato fruit quality without reducing yield. *Journal of the American Society for Horticultural Science* (113):202-205.
- MMA. 2017. Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022. Ministerio de Medio Ambiente. Disponible en: <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/plan-de-accion-nacional-de-cambio-climatico-2017-2022-pancc-ii/> (Consultado en enero de 2021).
- Munns, R. 2005. Genes and salt tolerance: ringing them together. *New Phytologist* 3:645-660.
- Navarro, G.I., y J.M. Periago. 2016. El tomate, ¿alimento saludable y/o funcional? *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética* 4:323-335.
- Nichols, M.A., E.F. Fadallan, K.J. Fisher, D. Gerasopoulos, S.H. Olympios, and H. Passam. 1995. The effect of osmotic stress on the yield and quality of tomatoes. *Acta Horticulturae* (379):105-111.
- Ouni, Y., Ghnaya, T., Montemurro, F., Abdelly, Ch., Lakhdar, A., 2014. The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant nutrition. *International Journal of Plant Production* 8:353-374.
- OCDE y CEPAL. 2005. Evaluaciones del desempeño ambiental. Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos y Comisión Económica para América Latina y El Caribe, Santiago, Chile.
- ODEPA. 2018. Caracterización económica de la cadena agroalimentaria del tomate de uso industrial. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 75 p.
- Ortiz., R. 2012. El cambio climático y la producción agrícola. Banco Interamericano de Desarrollo. Unidad de Salvaguardias Ambientales (VPS/ ESG), Unidad de salvaguardias ambientales. *Notas Técnicas* 383:36
- Osman, A., and M. Ewees. 2008. The possible use of humic acid incorporated with drip irrigation system to alleviate the harmful effects of saline water on tomato plants. *Journal of Agricultural Research and Development* (22):52-70.
- Pankova, I., P. Aidarov, L. Golovanov, and A. Yamnova. 2015. Salinization as the main soil forming process in soils of natural oases in the Gobi desert. *Eurasian Soil Science* (48):1017-1028.

- Peng, S., Garcia, F., Laza, C. and Cassman, K. 1993. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meters estimate of rice leaf nitrogen concentration. *Agronomy Journal* (85): 987-990.
- Piccolo, A., and J. Mbagwu. 1990. Effects of humic substances and surfactants on the stability of soil aggregates. *Soil Science* (147):47-54.
- Porta, C.J., R.M. Poch, and M.Y. López. 2014. *Introducción a la Edafología: Uso y Protección del Suelo*. Mundi Prensa. México. 122 p.
- Porta, J., M. López Acevedo y C. Roquero. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3 edición, Multi Prensa, Madrid, España, 960 p.
- Pulido Madrigal, L. 2016. Cambio climático, ensaltramiento de suelos y producción agrícola en áreas de riego. *Terra Latinoamericana* (34):2-6.
- Qadir, M., and J. Oster. 2004. Crop and irrigation management strategies for saline-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Science of the Total Environment* (323):1-19.
- Razeto, B. 1995. La salinidad en frutales. *Revista Aconex* 9:5-10.
- Raychev, T., S. Popandova, G. Józefaciuk, M. Hajnos, and Z. Sokoowska. 2001. Physicochemical reclamation of saline soils using coal powder. *International Agrophysics* (15):51-54.
- Rengasamy, P. 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology* (37):613-620.
- Rick, C.M. 1982. The potential of exotic germplasm for tomato improvement. *Plant Improvement and Somatic Cell Genetics* 1:1-28.
- Ried, K., and P. Fakler. 2011. Protective effect of lycopene on serum cholesterol and blood pressure: Meta analyses of intervention trials. *Maturitas* 68(4):299-310.
- Reynolds, W., F. Drury, C. Tan, C. Fox, and X. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* (152):252-263.
- Rysan, L., and O. Sarec. 2008. Research of correlation between electric soil conductivity and yield based on the use of GPS technology. *Research Agricultural Engineering* (54): 134:147.
- Romero Aranda, R., T. Soria, and J. Cuartero. 2001. Tomato plant water uptake and plant water relationships under saline growth conditions. *Plant Science* (160):265-272.
- Romero, P., J. Fernandez, R. Gil-Muñoz, and P. Botía. 2016. Vigour-yield-quality relationships in long-term deficit irrigated winegrapes grown under semiarid conditions. *Theoretical and Experimental Plant Physiology* (28):23-51.
- Rosa, A.H., M.L. Simoes, L.C. Oliveira, J.C. Rocha, L.M. Neto, and D.M. Milori. 2005. Multimethod study of the degree of humification of humic substances extracted from different tropical soil profiles in Brazil's Amazonian region. *Geoderma* (127):1-10.
- Rhoades, J., A. Kandiah, and A. Mashali. 1992. The use of saline waters for crop production. *Irrigation and Drainage* (48):133.
- Rhoades, J. 1990. Overview: Diagnosis of salinity problems and selection of control practices. p.18-41. *In: Tanji, K., Agricultural Salinity Assessment and Management*. New York, Estados Unidos.
- Sánchez-Conde, M., y C. Ortega. 1968. Effect of humic acid on the development and the mineral nutrition of the pepper plant. p. 745-755. *In: Control de la fertilización de las plantas cultivadas*, Cuarto, Sevilla, España.

- Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez, M. Mora, H. Flores, and A. Neaman. 1992. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 1992. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA N° 34. Santiago, Chile.
- Sadzawka, A. 2006. Química, diagnóstico y recuperación de suelos afectados por sales. p. 169-206. *In*: Luzio, W. y Casanova, M. Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. (Re-edición, 2020). Santiago, Chile.
- Sandoval, M., J. Dorner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de Análisis físicos de Suelos. Departamento de Suelos y Recursos Naturales Universidad de Concepción. Publicación N° 5. 80 p.
- Santibáñez, F., C. Santibáñez, P. Caroca, P. Morales, N. Gonzales, P. Gajardo, and C. Perry. 2014. Atlas del cambio climático en las zonas de régimen árido y semiárido: Regiones de Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana. Santiago de Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de Chile. Santiago, Chile. 30 p.
- Sándor, T., P. Zoltán, D. Sányi, G. Hussein, P. Szuvandzsiev. 2020. Influence of Water stress levels on the yield and lycopene content of Tomato. *Water* 12(2165):1-17.
- Seguel, O., V. García de Cortázar, y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica* 3(63):287-297.
- Seguel, O., D. Diaz, E. Acevedo, P. Silva, I. Homer and S. Seitz. 2020. Hydraulic conductivity in a soil cultivated with Wheat-Rapeseed rotation under two Tillage Systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 2:12-22. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00296-w>.
- Seguel O., C. Baginsky, A. Contreras, J. Covarrubias, C. González, and M. Sandoval. 2011. Changes in physical properties of a typichaplocambid by annual crop culture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 1:1-15.
- Seguel, O., Ch. Hardy, F. Alfaro, C. Pastenes. 2020. Estrategias de gestión del riego para aumentar la productividad y la sustentabilidad de los sistemas frutícolas. Experiencias frente al proceso de aridización. Universidad de Chile- FIA. Santiago, Chile. 87 p.
- Sepaskhah, A. and S. Ahmadi. 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. *International Journal of Plant Production*. 4(4): 241-258.
- Serio, F., L. Gara, S. Caretto, L. Leo, P. Santa María. 2004. Influence of an increased NaCl concentration on yield and quality of cherry tomato grown in posidona. *Posidonia Oceanica* (14):1885-1890.
- Singh, N., and R. Chatrath. 2001. Breeding for adaptation to environmental factors. *Salinity Tolerance* 1:23.
- Singh, A., and B. Pandeya. 1998. Sorption and release of cadmium fulvic acid complexes in sludge treated soils. *Bioresource Technology* (66):119-127.
- Srinivas, R. 2001. Salinity tolerance of tomato germplasm during germination. *Seed Science and Technology* 3(29):673-677.
- Schnitzer, M. 1990. Selected methods for the characterization of soil humic substances. p. 65-89. *In*: P. Mac Carthy, C.E., R.L. Clapp. P.R. Malcolm. 1985. Humic substances in soil and crop sciences: Selected readings. Proceedings of a symposium by the IHSS. Illinois, Chicago, Estados Unidos.
- Shishir, S., K. Sarangi, and T. Lama. 2019. Soil salinity, infiltration and organic matter status under different landforms in coastal west Bengal. *Journal Indian Society* 1(37):86-91.

- Schoeneberger, J., D. Wysocki, E. Benham, and Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Stevenson, F. 1994. Humus chemistry. Genesis, composition, reactions. Second Edition. John Wiley & Sons. New York.EstadosUnidos.
- Stock, O., and N.K. Downes. 2008. Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. *Soil & Tillage Research* (99):191–201.
- Tanaka, T., M. Shnimizu, and H. Moriwaki. 2012. Cancer chemoprevention by carotenoids. *Molecules* (17):3202-3242.
- Tanwar, S. 2003. Saline water management for irrigation. International Commission on irrigation and drainage. New Delhi, India.
- Takács, S., Z. Pék, D. Csányi, H. Daood, P. Szuvandzsiev, G. Palotás, and L. Helyes. 2020. Influence of water stress levels on the yield and lycopene content of tomato. *Water* (12):2165. doi:10.3390/w12082165.
- Valcárcel, M., I. Lahoz, C. Campillo, R. Martí, M. Leiva-Brondo, S. Roselló, J. Cebolla-Cornejo. 2020. Controlled deficit irrigation as a water-saving strategy for processing tomato. *Scientia Horticulturae* 261: 2-8.
- Wang, J., Q. Quan Sun, J. Shang, J. Zhang, F. Wu, G. Zhou, and Q. Dai. 2020. A New Approach for Estimating Soil Salinity Using A Low-Cost Soil Sensor In Situ: A Case Study in Saline Regions of China's East Coast Remote Sensors (12):239.doi:10.3390/rs12020239.
- Xing, H., Y. Xiaoming, X. Chao, and Y. Guanbao. 2009. Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil–cement. *Engineering Geology* 103: 33-38.
- Xu, C., and D. Leskovar. 2014. Growth, physiology and yield responses of cabbage to deficit irrigation. *Hort Science* (41):138–146.
- Yokoi, S., B. Ray, and M. Hasegawa. 2002. Salt stress tolerance of plants. Jircas Working Report 1: 25-33.
- Zhao, Q., J. Bai, and Q. Lu. 2016. Effects of salinity on dynamics of soil carbon in degraded coastal wetlands: implications on wetland restoration. *Physics and Chemistry of the Earth* (103):51-71.
- Zhang, R. 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* (61):1024-1030.
- Zhang, Z., H. Hu, F. Tian, H. Hu, X. Yao, and Z. Zhong. 2014. Soil salt distribution under mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China. *Journal of Arid Environments* (104):23-33.
- Zhang, T., T. Wang, K. Liu, K. Wang, and Y. Zhou. 2015. Effects of different amendments for the reclamation of coastal saline soil on soil nutrient dynamics and electrical conductivity responses. *AgricultureWater Management* (159):115-122.
- Zhang, H., H. Xing, and H. Li. 2022. Mechanical characteristic and microstructure of salt-rich cement soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 81:92. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02592-4>

### Apéndices

**Apéndice 1.** Contenido volumétrico de agua ( $\theta\%$ ) en el suelo en distintos puntos del perfil, con y sin la aplicación de ácidos fúlvicos, 85 días después del transplante y previo al inicio de los riegos diferenciados.

Tratamientos	Prof. (cm)	Hilera	Línea de riego	25 cm	40 cm
		Plantas	----- Contenido de agua (%) -----		
Con ácido fúlvico	10	20,3 ±1,5	23,3 ±1,2	23,5 ±1,9	24,1 ±1,8
	20	23,7 ±0,7	24,0 ±1,1	21,6 ±1,7	22,4 ±0,8
	30	22,9 ±1,1	22,0 ±1,1	20,9 ±1,6	15,6 ±1,1
	40	22,7 ±1,3	23,3 ±0,9	21,6 ±1,8	20,0 ±1,6
Sin ácido fúlvico	10	23,0 ±1,5	22,4 ±1,2	23,6 ±1,9	28,4 ±1,8
	20	24,0 ±0,7	23,2 ±1,1	23,3 ±1,7	23,3 ±0,8
	30	22,6 ±1,1	23,7 ±1,1	23,5 ±1,6	19,5 ±1,1
	40	24,9 ±1,3	25,0 ±0,9	21,8 ±1,8	21,0 ±1,6

**Apéndice 2.** Contenido volumétrico de agua ( $\theta\%$ ) en distintos puntos del perfil de suelo, con y sin la aplicación de ácidos fúlvicos, al comienzo de los tratamientos de riego deficitario terminal.

Tratamientos	Prof. (cm)	Hilera	Línea de riego	25 cm	40 cm
		Plantas	----- Contenido de agua (%) -----		
Riego deficitario					
Con ácido fúlvico	10	18,8 ±1,3	17,6 ±3,1	17,7 ±3,1	15,3 ±1,7
	20	17,7 ±2,2	16,1 ±1,5	15,3 ±2,9	14,5 ±1,8
	30	13,0 ±2,1	13,2 ±2,7	12,7 ±2,1	12,4 ±2,0
	40	18,9 ±2,0	18,4 ±2,5	16,7 ±3,4	16,0 ±3,0
Sin ácido fúlvico	10	15,5 ±1,3	14,9 ±3,1	14,7 ±3,1	16,0 ±1,7
	20	17,3 ±2,2	13,1 ±1,5	14,5 ±2,9	14,6 ±1,8
	30	15,7 ±2,1	15,2 ±2,7	15,2 ±2,1	13,0 ±2,0
	40	19,1 ±2,0	17,7 ±2,5	16,2 ±3,4	16,5 ±3,0
Riego normal					
Con ácido fúlvico	10	27,9 ±1,3	27,8 ±3,1	25,0 ±3,1	13,0 ±1,7
	20	27,3 ±2,3	23,0 ±1,5	22,1 ±2,9	13,2 ±1,8
	30	18,3 ±2,2	16,2 ±2,7	16,3 ±2,1	12,1 ±2,0
	40	24,1 ±2,0	18,7 ±2,5	21,1 ±3,4	17,1 ±3,0
Sin ácido fúlvico	10	25,7 ±1,3	24,5 ±3,1	21,9 ±3,1	15,6 ±1,7
	20	23,9 ±2,3	25,2 ±1,5	20,2 ±2,9	12,7 ±1,8
	30	17,2 ±2,2	17,1 ±2,7	16,2 ±2,1	14,0 ±2,0
	40	20,6 ±2,0	20,3 ±2,5	15,4 ±3,4	16,4 ±3,0

**Apéndice 3.** Contenido volumétrico de agua ( $\theta\%$ ) en el suelo al momento de la cosecha.

<b>Tratamientos</b>	<b>Prof. (cm)</b>	<b>Hilera Plantas</b>	<b>Línea de riego</b>	<b>25 cm</b>	<b>40 cm</b>
----- Contenido de agua (%) -----					
Riego deficitario					
Con ácido fúlvico	10	15,1 ±1,7	18,3 ±2,2	12,5 ±2,9	10,7 ±2,63
	20	15,0 ±2,8	14,5 ±1,9	10,0 ±3,0	10,8 ±2,51
	30	14,7 ±2,6	10,7 ±3,1	9,3 ±2,4	9,4 ±2,41
	40	12,2 ±3,1	12,9 ±3,3	13,9 ±2,8	14,2 ±3,02
Sin ácido fúlvico	10	15,1 ±1,7	16,1 ±2,2	14,9 ± 2,9	12,1 ±2,63
	20	15,4 ±2,8	16,6 ±1,9	10,7 ±3,0	7,28 ±2,51
	30	11,7 ±2,6	9,07 ±3,1	8,6 ±2,4	8,86 ±2,41
	40	10,8 ±3,1	10,4 ±3,3	13,5 ±2,8	5,45 ±3,02
Riego normal					
Con ácido fúlvico	10	19,4 ±1,7	21,7 ±2,2	18,5 ±2,9	16,5 ±2,6
	20	20,4 ±2,8	22,7 ±1,9	21,2 ±3,0	18,1 ±2,5
	30	12,1 ±2,6	14,6 ±3,1	9,6 ±2,4	12,5 ±2,4
	40	15,5 ±3,1	16,0 ±3,3	14,5 ±2,8	15,0 ±3,0
Sin ácido fúlvico	10	20,3 ±1,7	21,4 ±2,2	20,5 ±2,9	14,9 ±2,6
	20	21,7 ±2,8	22,4 ±1,9	16,9 ±3,0	11,4 ±2,5
	30	21,4 ±2,6	17,5 ±3,1	14,8 ±2,4	10,7 ±2,4
	40	15,5 ±3,1	18,7 ±3,3	12,4 ±2,8	13,5 ±3,0