

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**EVALUACIÓN DE RIEGO POR GOTEO CON INYECCIÓN DE OZONO EN DOS
TIPOS DE SUELO PARA EL CULTIVO DE ACHICORIA INDUSTRIAL
(*CICHORIUM INTYBUS* VAR. *SATIVUM* 'SAPONITE')**

POR

ENZO SELIM CANCINO URRUTIA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2024**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EVALUACIÓN DE RIEGO POR GOTEO CON INYECCIÓN DE OZONO EN DOS
TIPOS DE SUELO PARA EL CULTIVO DE ACHICORIA INDUSTRIAL
(*CICHORIUM INTYBUS* VAR. *SATIVUM* 'SAPONITE')**

POR

ENZO SELIM CANCINO URRUTIA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2024**

Aprobada por:

Profesor Asistente, Mathias Kuschel O.
Ing. Civil Agrícola, Dr.

Guía

Fabián Carrasco G.
Ing. Agrónomo
Beneo-Orafti

Asesor Externo

Profesor Asociado, Juan Antonio Cañumir
Ing. Agrónomo, Ph. D

Asesor

Profesor Asociado, Susana Fisher G.
Ing. Agrónomo, M. Sc, Dr.

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, M. Sc.

Decano

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación ha sido apoyada y financiada por la empresa BENEIO – Orafti y el Departamento de Suelos y Recursos Naturales de la Facultad de Agronomía.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary.....	1
Introducción	2
Materiales y Métodos	4
Resultados y Discusión	8
Conclusiones	20
Referencias	20

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Figura 1 Distribución del diseño experimental	6
Figura 2 Peso fresco de las raíces de achicoria industrial regadas con diferentes concentraciones de ozono.....	11
Figura 3 Diámetro de raíz al nivel de la corona para distintos tratamientos que se regaron con concentraciones distintas de ozono.....	13
Figura 4 Diámetro de raíz a nivel de corona, respecto a los días después siembra, en tres fechas distintas y para los dos tipos de suelos.....	13
Figura 5 Longitud de la raíz, con respecto a los días después de siembra para tres fechas distintas.....	15
Figura 6 Área foliar bajo diferentes tratamientos con concentraciones de ozono distintas.....	16
Figura 7 Área foliar para plantas desarrolladas en dos tipos de suelos.....	17
Figura 8 Área foliar respecto a los días después siembra, en tres fechas distintas.....	17
Figura 9 Numero de Raíces infectadas en los tipos de suelos.....	19
Figura 10 Porcentaje de incidencia en los dos tipos de suelos.....	19
Tabla 1 Comparación de las unidades de medidas con los distintos equipos medidores de ozono y mV – ORP	8
Tabla 2 Resultados análisis textural de ambos suelos	9
Tabla 3 Densidad aparente (ρ_a) y contenido de humedad a Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP) para distintas profundidades.....	9

Tabla 4	Resultados análisis químico de los suelos	9
Tabla 5	Porcentaje de macetas emergidas para nueve días de medición.....	10
Tabla 6	Escala de severidad	19
Tabla 7	Severidad para los tratamientos en los dos tipos de suelos	19

EVALUACIÓN DE RIEGO POR GOTEO CON INYECCIÓN DE OZONO EN DOS TIPOS DE SUELO PARA EL CULTIVO DE ACHICORIA INDUSTRIAL (*CICHORIUM INTYBUS* VAR. *SATIVUM* ‘SAPONITE’)

EVALUATION OF DRIP IRRIGATION WITH OZONE INJECTION IN TWO TYPES OF SOIL FOR THE CULTIVATION OF INDUSTRIAL CHICORY (*CICHORIUM INTYBUS* VAR. *SATIVUM* ‘SAPONITE’)

Palabras índice adicionales: oxígeno, ORP, agua ozonizada, fenología.

RESUMEN

El cultivo de achicoria es importante en la industria alimentaria por la producción de inulina y oligofructosa. En Chile, la Región del Biobío y Ñuble concentran la mayor superficie sembrada, aunque los rendimientos actuales están por debajo del potencial debido a las condiciones climáticas. Este estudio evalúa el efecto del riego con agua enriquecida con ozono en el crecimiento de la achicoria en suelos arcilloso y franco. El ensayo se realizó en la estación experimental “El Nogal” de la Universidad de Concepción, utilizando como macetas tubos de PVC con dos tipos de suelos y tres tratamientos de riego: agua de pozo y agua enriquecida con ozono durante 5 y 10 minutos. Se midieron variables como germinación, peso fresco, diámetro y longitud de raíz, área foliar e incidencia de *Phoma exigua*. Los resultados mostraron que los tratamientos con ozono aceleraron la emergencia de las plántulas y aumentaron el peso fresco, diámetro de raíz y área foliar en comparación con el control. El tratamiento de 10 minutos con ozono fue el más efectivo, ya que también favoreció la disminución de la severidad del patógeno de raíz. Además, el suelo arcilloso favoreció un mayor crecimiento radicular y foliar comparado con el suelo franco. Se concluye que el uso de ozono en el riego puede mejorar el rendimiento y disminuir la severidad de *Phoma* en el cultivo de la achicoria.

SUMMARY

Chicory cultivation is important in the food industry to produce inulin and oligofructose. In Chile, the Biobío and Ñuble regions concentrate the largest cultivated area, although current yields are below potential due to climatic conditions. This study evaluates the effect of irrigation with ozone-enriched water on the growth of chicory in clay and loam soils. The trial was carried out at the “El Nogal” experimental station of the University of Concepción, using PVC pipes as pots with two types of soil and three irrigation treatments: well water and ozone-enriched water for 5 and 10 minutes. Variables such as germination, fresh weight, root diameter and length, leaf area and incidence of *Phoma exigua* were measured. The results showed that ozone treatments accelerated seedling emergence and increased fresh weight, root diameter and leaf area compared to the control. The 10-minute ozone treatment was the most effective, as it also favored the decrease in the severity of the root pathogen. In addition, the clay soil favored greater root and leaf growth compared to the loam soil. It is concluded that the use of ozone in irrigation can improve yield and decrease the severity of *Phoma* in chicory crops.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la achicoria (*Cichorium intybus* var. *sativum*) pertenece a la familia Asteraceae, originaria de las zonas del norte del mediterráneo en Europa (Vavilov, 1992). Se considera bianual, y durante su primer año desarrolla una raíz profunda y gruesa. Sus hojas con peciolo corto están distribuidas en forma de roseta y durante su segundo año crece la parte reproductiva.

Cuando se logra el desarrollo completo de la raíz, se extrae inulina y oligofructosa, productos muy importantes en la industria alimentaria para la formulación de ciertos alimentos, los cuales buscan incrementar la baja ingesta calórica, ofreciendo importantes beneficios a la salud (Van den Ende *et al.*, 1996; Franck, 2006; Madrigal y Sangronis, 2007).

Bélgica es el mayor productor mundial de achicoria industrial, con exportaciones de \$131 M de dólares para el año 2022, seguido de Países Bajos con un valor exportado de \$62 M y en tercer lugar se encuentra Chile con \$49,6 M exportados. Los principales países importadores son: Estados Unidos (26,1 %), Indonesia (5,8 %), Italia (5,13 %) y China (4,5 %). Chile en los últimos tres años ha mantenido

sus niveles de exportaciones. No obstante, la temporada 2022 – 2023 tuvo una baja de 13,8 % (OEC, 2024). Por otro lado, las regiones de Maule, Ñuble, Biobío y La Araucanía concentran la totalidad de la superficie sembrada con 4.886 hectáreas, un aumento del 35,1 % con respecto a la temporada anterior con solo 3.171 hectáreas (ODEPA, 2024).

Debido a mejores condiciones edafoclimáticas y prácticas de manejo se alcanza en Bélgica un potencial productivo elevado. Sin embargo, el agricultor con alto nivel tecnológico en Chile alcanza rendimientos en promedio de 55 t ha⁻¹. De esta forma se observa una gran brecha entre el potencial productivo de la especie con los rendimientos de los agricultores debido a las condiciones edafoclimáticas que se encuentran los agricultores y los manejos que conllevan la producción, teniendo como el más importante el riego. En el año 2017 la Sociedad Agrícola Pite Ltda., obtuvo 91 t ha⁻¹, y todo lo atribuyeron a una buena preparación de suelo y al buen manejo del riego.

El uso de nuevas tecnologías para mejorar el crecimiento y calidad de los cultivos es una idea prometedora (Alavi *et al.*, 2020, 2021). Para el cultivo de la achicoria industrial, uno de los factores determinantes para obtener altos niveles de rendimiento es no tener raíces infectadas severamente por patógenos de raíces, tales como, *Phoma exigua*, los cuales no tienen un control químico específico, pero se logra manejar su impacto mediante una buena preparación de suelo y con el manejo del riego. El ozono (O₃), descrito en 1839 por el químico germano-suizo Christian Friedrich Schönbein, es una molécula inorgánica con elevadas actividades químicas que tiende a volver a su estado natural de oxígeno siendo inestable en soluciones acuosas, por el contacto que hay entre ozono y el agua que toma lugar como agente oxidante (vida media menor a 20 minutos) (Graham *et al.*, 2011).

Diferentes estudios han indicado los efectos del ozono sobre el crecimiento de las plantas y la producción de cultivos (Jaudé *et al.*, 2008; Masutomi *et al.*, 2019). Si se usa en la concentración adecuada, el ozono afecta de manera positiva el crecimiento y el rendimiento de las plantas (Zhuang *et al.*, 2017; Flores *et al.*, 2019; Terao *et al.*, 2019). En plantas de pepinos, se ha evidenciado que el uso de ozono en el agua de riego es una técnica segura para mejorar el crecimiento en diferentes

condiciones, incluido el estrés (Najarian *et al.*, 2018). Sin embargo, el mal uso puede afectar el crecimiento de las plantas y las propiedades del suelo, principalmente debido a su alto potencial de oxidación (potencial Redox) que conduce a la oxidación de la materia orgánica. Además, la conversión de ozono en oxígeno gaseoso (O_2) proporciona a los microbios de la planta y del suelo una mayor tasa de difusión de oxígeno, viéndose reflejado en la mayor proporción de poros en suelo que dan espacio para mayor cantidad de oxígeno (Ohlenbusch *et al.*, 1998; Raub *et al.*, 2001).

La importancia del oxígeno en la zona radicular es indispensable en el proceso de respiración de ésta y posteriormente en la absorción de nutrientes (Shahzad *et al.*, 2016). Abdella *et al.* (2018) observaron que en raíces en hipoxia (deficiencia de oxígeno en la rizosfera), se reduce la respiración, disminuyendo el flujo de iones y el crecimiento de la raíz en conjunto con la planta en su totalidad. Esta situación de hipoxia se pueden dar por altas tasas de respiración del cultivo, como resultado de elevadas temperaturas, mala capacidad de aireación en el medio del cultivo o por un mal manejo del riego (Carazo, 2015). La inyección de oxígeno al riego muestra que hay un aumento en la tasa de crecimiento en la raíz, tallo y hoja, desde que germina la semilla en plantas de pepino (Ahmed *et al.*, 2018). Es por esto, que el objetivo de esta investigación es evaluar la aplicación de agua de riego enriqueciéndola con ozono y regar con diferentes tiempos para suelo arcilloso y franco, con el fin de aumentar la biomasa de la raíz y la disminución de los patógenos de raíz en achicoria industrial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del ensayo

Este estudio se llevó a cabo en la estación experimental “El Nogal” de la Universidad de Concepción, Campus Chillán, Región de Ñuble, Chile ($36^{\circ}35'S$, $72^{\circ}04'54''O$, 140 m.s.n.m), bajo condiciones de invernadero.

Manejo agronómico

Las condiciones de crecimiento del cultivo fueron en macetas hechas de tubos de PVC de 100 cm de largo y 110 mm de diámetro. Se instalaron en modo de primer

ensayo 54 tubos, los cuales 27 fueron rellenos con un suelo de la serie 'Pocillas' de textura arcillosa (Suelo 1) y 27 con un suelo de la serie 'Arrayán' de clase textural franco (Suelo 2). Se replicó esta misma disposición para un segundo ensayo con 36 macetas de las mismas dimensiones, las cuales 18 fueron rellenas con cada tipo de suelo. Estos fueron inoculados con el patógeno *Phoma exigua* (PhoUdec001) de acuerdo a la metodología descrita por Loyola (2013), incorporando discos de micelio al suelo y generando un medio saturado de agua cuando las raíces alcanzaron los 120 días después de siembra (DDS).

El ensayo se sembró el día 8 de noviembre del 2022. El material vegetal usado fue achicoria industrial (*Cichorium intybus* var. *Sativum*) variedad Saponite. Se depositaron cuatro semillas por tubo y luego de 10 días, después de la emergencia, se realizó un raleo para dejar una planta por maceta hasta el final del ensayo.

Los tratamientos se formaron según el tiempo que se regó con agua de pozo enriquecida con ozono. Para los tratamientos 1, 2 y control se contemplaron riegos de 10, 5 y 0 minutos con ozono, respectivamente.

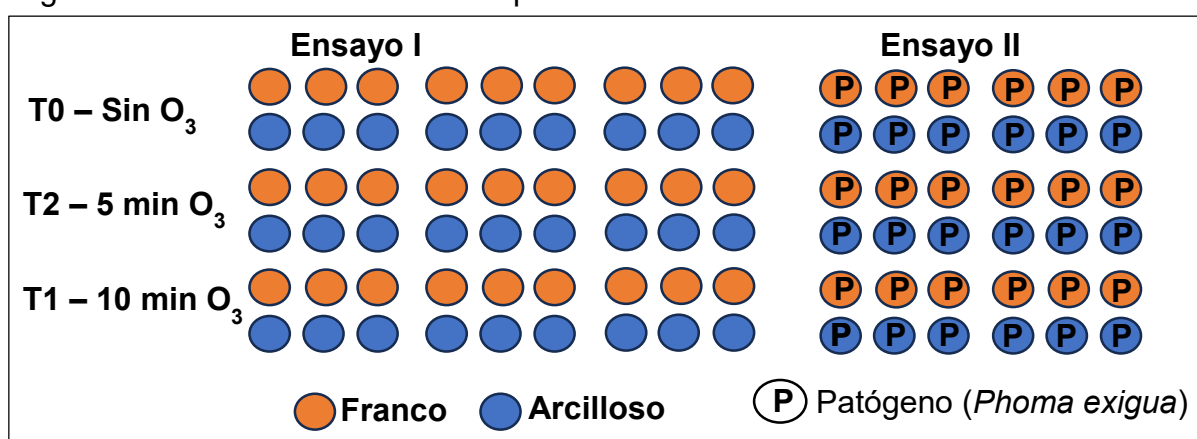
La humedad del suelo se mantuvo en condiciones óptimas. Para lograrlo, se instaló un sistema de riego con inyección de ozono antes de la siembra. Este sistema utilizó tuberías de polietileno en cada hilera de tratamiento, con un gotero por planta que suministra un caudal de 2 L h^{-1} . Las plantas fueron regadas en base a un balance hídrico, el cual tuvo la adaptación de la metodología FAO Penman-Monteith (P-M) con un factor de corrección para invernadero de 0,7, obtenido tras no considerar velocidad del viento y luego de calcular con los demás parámetros que considera P-M. Además, para el ensayo se monitoreó la humedad de los suelos mediante la instalación de sensores de humedad, modelo Teros 10, seleccionando dos tubos, uno con cada tipo de suelo, dejándolos a una distancia de 20 y 40 cm desde el borde superior del tubo.

Diseño experimental

El diseño de este experimento se estableció en bloques completamente al azar con un arreglo en parcelas divididas de tres tratamientos, dos suelos y tres repeticiones, donde el factor principal fue el riego con agua enriquecida en ozono (0, 5 y 10 min). El segundo factor el tipo de suelo (arcilloso y franco) y como último factor el tiempo

de muestreo (159, 188 y 211 DDS). Cada unidad experimental correspondió a una parcela con forma cilíndrica de 110 mm de diámetro por un alto de 100 cm siendo 0,01 m² de superficie de crecimiento, donde se distribuyeron seis hileras. Nueve macetas por hilera para el primer ensayo y seis macetas para el segundo ensayo con una separación 50 cm entre macetas. De esta forma quedaron 54 plantas para el primer ensayo y 36 plantas para el segundo ensayo, con un total de 90 plantas para el experimento (Figura 1).

Figura 1. Distribución del diseño experimental.



Mediciones

Agua. Se realizaron mediciones previas al inicio del experimento de la concentración de ozono en agua con un medidor multiparámetros (HI98194, Hanna Instruments, Woonsocket, RI, USA), con el fin de calibrar la máquina generadora de ozono. Luego, durante el desarrollo del experimento se realizaron mediciones periódicas mediante un medidor de ozono (HI38054 Test Kit Ozono, Hanna Instruments, Woonsocket, RI, USA) para evaluar la calidad de agua con ozono para cada tratamiento. También se registraron presiones y se realizó el aforo del sistema de riego, con el fin de determinar el caudal real para el sistema de riego.

Suelo. Se tomaron muestras de suelo a una profundidad de 15 – 30 cm, para su análisis físico. En el laboratorio se midió la tensión de las muestras utilizando una olla a presión que permite regular las presiones para obtener resultados como la Capacidad de Campo (CC), el Punto de Marchitez Permanente (PMP) y la densidad aparente de cada profundidad correspondiente al perfil del suelo. Además, se

realizó análisis químico del suelo para obtener los valores de macro y micronutrientes, y así, proponer un manejo de reposición de nutrientes.

Emergencia. Una vez establecido el cultivo en los tubos se realizaron mediciones diarias de emergencia durante diez días (plantas día⁻¹). De forma visual se fueron contando las plantas germinadas por cada tubo.

Peso fresco. Se pesaron las raíces de cada tratamiento con una balanza (BEL-Engineering M4202, Monza, Italia), luego de un lavado con agua corriente y estandarizado a un largo de 40 cm, ya que es el largo máximo que las cosechadoras en terreno extraen las raíces.

Diámetro de raíz. Se midieron las raíces transversalmente en la zona de la corona con un pie de metro análogo, para cada uno de los tratamientos.

Longitud de raíz. Se midió el largo de las raíces con una huincha métrica.

Área foliar. Se obtuvo a través de la medición del largo y ancho de las hojas de cada planta y multiplicado por un coeficiente de corrección, de acuerdo con la forma de hoja (Schrader *et al.*, 2021).

Prueba de patogenicidad. Se realizó un corte longitudinal de la raíz, dejando dos mitades a la vista, para luego visualizar el daño causado por *Phoma exigua*. Luego de esto, se determinó la virulencia de cada raíz mediante la severidad e incidencia, de acuerdo con la fórmula de Hickey (1986):

$$\text{Severidad} = \frac{(\text{DLL} + \text{DLT})}{2}$$

Donde DLL es el diámetro de lesión longitudinal (cm) y DLT es el diámetro de lesión transversal (cm).

Para posteriormente formar una escala de severidad y clasificarlas según el tamaño de la lesión.

$$\% \text{ Incidencia} = \frac{\text{Numero de raíces afectadas}}{\text{Número total de raíces}} \times 100$$

Muestreo destructivo

Ensayo 1 (54 tubos). Se realizaron tres muestreos destructivos; a los 159, 188 y 211 DDS, con el fin de poder comparar los tratamientos a lo largo del ensayo y los tratamientos del mismo día de muestreo.

Ensayo 2 (36 tubos). Este ensayo tuvo la misma duración que el ensayo 1 (211 DDS). A los 120 DDS se realizó la inoculación del patógeno *Phoma exigua*, por lo que se muestreó en dos oportunidades: a los 188 y 211 DDS.

Análisis estadístico

Cada variable fue sometida a un análisis de varianza (ANOVA) que permitirá comparar las medias de los tratamientos, para determinar si existen diferencias mínimas significativas (DMS) ($P \leq 0,05$), previa comprobación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, con las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene respectivamente. Todos los análisis se llevaron a cabo con el programa Infostat versión InfoStat/L (Balzarini *et al.*, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Agua. Se utilizó un medidor multiparámetro que daba como resultado milivoltios (mV-ORP) y el kit de ozono que daba como resultado en miligramos por litro (mg L^{-1}) de ozono disuelto en agua. Para dar una claridad sobre las cantidades de ozono que se aplicaron para cada tratamiento, se dispusieron los datos en la siguiente tabla:

Tabla 1. Comparación de las unidades de medidas con los distintos equipos medidores de ozono y mV-ORP.

Tiempo (min)	Potencial Redox (mV-ORP)	Concentración (ppm – mg L^{-1})	Tiempo (min)	Potencial Redox (mV-ORP)	Concentración (ppm – mg L^{-1})
0	300	0,00	6	800	1,00
1	400	0,20	7	860	1,30
2	500	0,20	8	875	1,50
3	600	0,25	9	900	1,70
4	700	0,40	10	915	1,80
5	770	0,70	11	925	2,10

En la Tabla 1 se observan las mediciones que se realizaron en un tiempo de 1 minutos de diferencia, para ver la evolución del generador de ozono, teniendo, así como resultados para el T0, 300 mV-ORP y 0,00 mg/l; T1, 915 mV-ORP y 1,80 mg L⁻¹ y T2, 770 mV-ORP y 0,70 mg L⁻¹.

Suelo. En la Tabla 2 se muestran los resultados fisicoquímicos para el suelo 1 (arcilloso) y para el suelo 2 (franco).

Tabla 2. Resultados análisis textural de ambos suelos.

Sistema U.S.D.A.					
Muestras		% Arena	% Limo	% Arcilla	Clase Textural
Arcilloso	15 - 30 cm	31,8	26,4	41,8	Arcilloso
Franco	15 - 30 cm	40,2	42,3	17,5	Franco

Tabla 3. Densidad aparente (ρ_a) y contenido de humedad a Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP) para distintas profundidades.

Muestras		ρ_a (g cc ⁻¹)	Retención de Humedad	
			CC (m ³ m ⁻³)	PMP (m ³ m ⁻³)
Arcilloso	15 - 30 cm	1,33	38,12	23,33
Franco	15 - 30 cm	1,16	48,56	26,56

Para realizar los cálculos de cuanto y cuando regar, según las características del suelo, se utilizan los valor obtenidos del laboratorio (Tabla 3), así considerando factores importantes para una buen manejo del riego.

Los niveles de los nutrientes en ambos suelos muestran que no se inició el ensayo con problemas de toxicidad de aluminio, un factor importante para el crecimiento de la achicoria industrial. Además, los otros nutrientes están en niveles aceptables para el cultivo (Tabla 4), por lo que solo realizó una fertilización para que no disminuyeran los nutrientes y así no tener deficiencia a lo largo del ensayo.

Los datos se obtuvieron a través del laboratorio de análisis de suelos y plantas de la Universidad de Concepción, Departamento de Suelos y Recursos Naturales.

Tabla 4. Resultados análisis químico de suelos.

Ítems	Unidad	Suelo Arcilloso	Nivel	Suelo Franco	Nivel
pH en agua		5,99	Bajo	6,16	Medio
Materia Orgánica	%	5,76	Bajo	5,22	Medio
Nitratos (N-NO ₃)	mg kg ⁻¹	9,90	Bajo	27,00	Alto
Amonio (N-NH ₄)	mg kg ⁻¹	12,40	Medio	4,80	Bajo
Nitrógeno Disponible	mg kg ⁻¹	22,30	Medio	31,80	Medio
Fósforo Olsen	Cmol kg ⁻¹	9,00	Medio	40,00	Alto
K disponible	mg kg ⁻¹	346,40	Alto	401,40	Alto
K intercambiable	Cmol kg ⁻¹	0,91	Alto	1,03	Alto
Ca intercambiable	Cmol kg ⁻¹	10,04	Alto	9,46	Alto
Mg intercambiable	Cmol kg ⁻¹	3,51	Alto	1,59	Alto
Na intercambiable	Cmol kg ⁻¹	0,09	Bajo	0,20	Bajo
Suma de Bases	Cmol kg ⁻¹	14,55	Alto	12,27	Alto
Al de intercambio	Cmol kg ⁻¹	0,02	Bajo	0,02	Bajo
CICE	Cmol kg ⁻¹	14,57	Medio	12,29	Medio
Saturación de Al	%	0,11	Medio	0,13	Medio
Saturación de K	%	6,27	Medio	8,38	Medio
Saturación de Ca	%	68,92	Medio	76,99	Alto
Saturación de Mg	%	24,10	Alto	12,91	Medio
S disponible	mg kg ⁻¹	1,50	Bajo	19,90	Medio
Fe	mg kg ⁻¹	67,60	Alto	24,40	Alto
Mn	mg kg ⁻¹	40,20	Alto	1,90	Medio
Zn	mg kg ⁻¹	1,00	Medio	0,60	Medio
Cu	mg kg ⁻¹	1,40	Alto	1,40	Alto
B	mg kg ⁻¹	0,50	Bajo	0,80	Medio

Emergencia

La emergencia de las plántulas de achicoria comenzó a los seis días para todos los tratamientos. T1 muestra la mayor emergencia (67 %), seguido de T2 con un 60 % y T0 con un 53 % de emergencia (Tabla 5). Para el día siete, el T1 sigue siendo el de mayor porcentaje de emergencia con un 87 %, seguido T0 (80 %) y el T2 (77 %). El día ocho, tanto T1, como T0 presentan un 87 % de emergencia, mientras que T2 muestra un 83 %. Para el día nueve, todos los tratamientos alcanzaron el 100 % de emergencia.

Los tratamientos T1 y T2 tienden a tener una emergencia más rápida y ligeramente mayor en los primeros días comparado con el T0.

En particular, T1 muestra una mejor respuesta en términos de emergencia de plántulas en comparación con T2. Sin embargo, al final del período de nueve días, todos los tratamientos alcanzan el 100 % de emergencia, indicando que todos son efectivos a largo plazo, aunque el ozono puede acelerar la emergencia inicial.

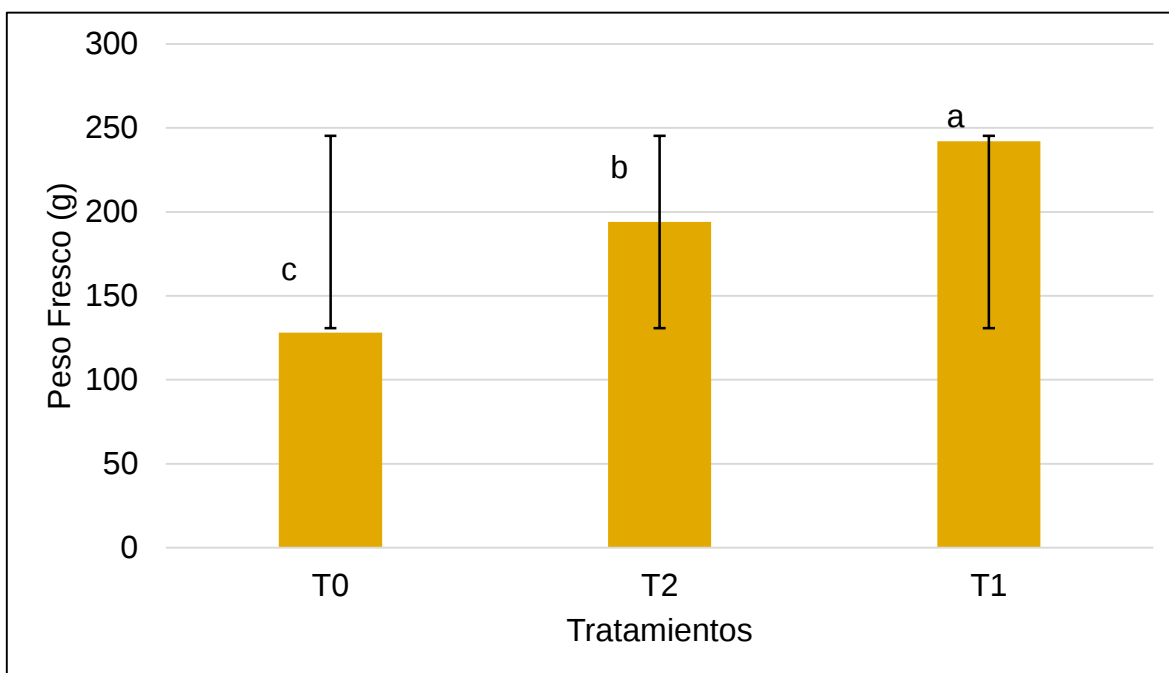
Tabla 5. Porcentaje de macetas emergidas para nueve días de medición.

Día	T0		T1		T2	
	Maceta	% Emergencia	Maceta	% Emergencia	Maceta	% Emergencia
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	16	53	20	67	18	60
7	24	80	26	87	23	77
8	26	87	26	87	25	83
9	30	100	30	100	30	100

T0 (Sin Ozono), T1 (10 minutos de riego con ozono), T2 (5 minutos de riego con ozono).

Peso fresco

Figura 2. Peso fresco de las raíces de achicoria industrial regadas con diferentes concentraciones de ozono.



T0 (Sin Ozono), T1 (10 minutos de riego con ozono), T2 (5 minutos de riego con ozono).

El peso fresco promedio en T0 es el más bajo entre los tres tratamientos, mientras que T2 muestra el mayor peso fresco promedio (Figura 2).

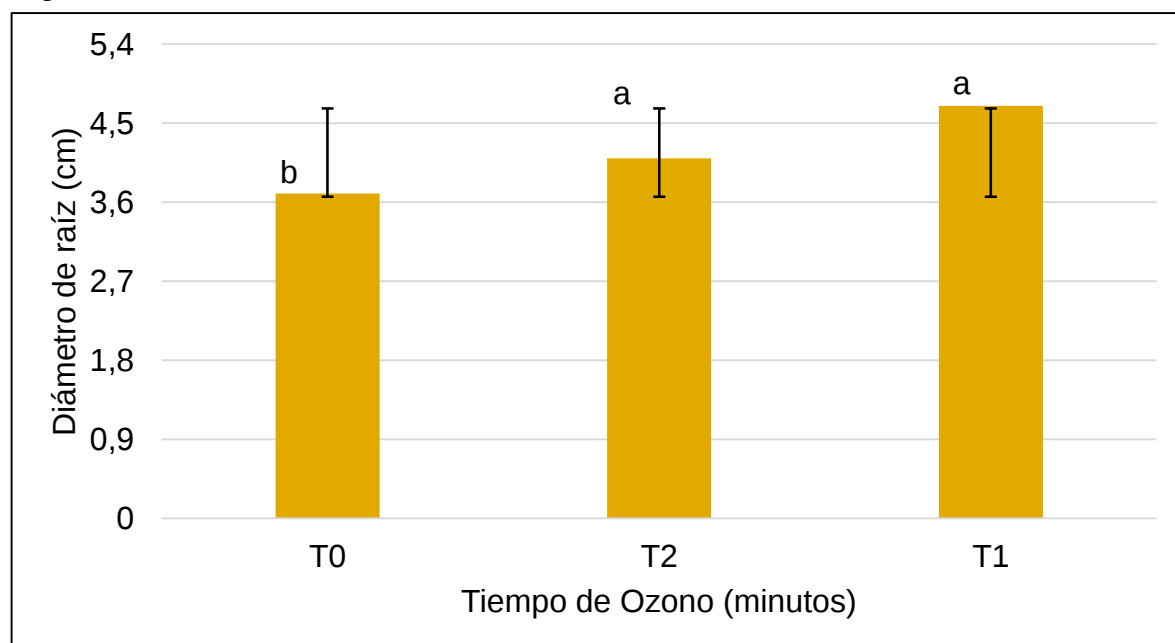
Los tratamientos con ozono (T1 y T2) resultan en un mayor peso fresco promedio comparado con el control, mostrando que el ozono tiene un efecto positivo en el crecimiento de las raíces de achicoria. Entre los tratamientos con ozono, T1 tiene un mayor impacto positivo que T2, indicando que un mayor tiempo de exposición al ozono mejora el crecimiento de las raíces.

Diámetro de raíz

El tratamiento T1 muestra el mayor diámetro de raíz, sugiriendo que un mayor tiempo de exposición al ozono promueve un crecimiento radicular más robusto. El tratamiento T2 muestra un diámetro de raíz ligeramente mayor que el T0 (Figura 3).

En cada momento de medición (159, 188 y 211 DDS), el diámetro de raíz es mayor en el suelo arcilloso comparado con el suelo franco (Figura 4).

Figura 3. Diámetro de raíz al nivel de la corona para distintos tratamientos que se regaron con concentraciones distintas de ozono.

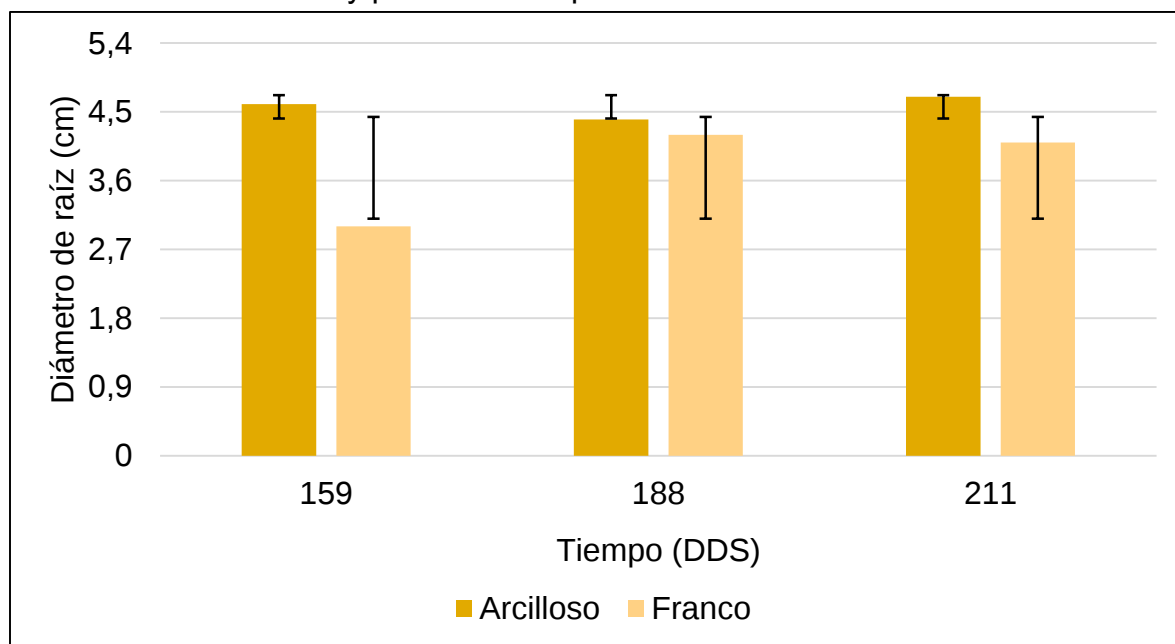


T0 (Sin Ozono), T1 (10 minutos de riego con ozono), T2 (5 minutos de riego con ozono).

La Figura 3 sugiere que el T1, incrementa el diámetro de raíz en comparación con el riego sin ozono. El T1 muestra el mayor diámetro de raíz, indicando que un

mayor tiempo de exposición al ozono promueve un crecimiento radicular más robusto. El T2 también incrementa el diámetro de raíz, aunque de manera más ligera comparado con el control.

Figura 4. Diámetro de raíz a nivel de corona, respecto a los días después siembra, en tres fechas distintas y para los dos tipos de suelos.



DDS (Días Después de Siembra).

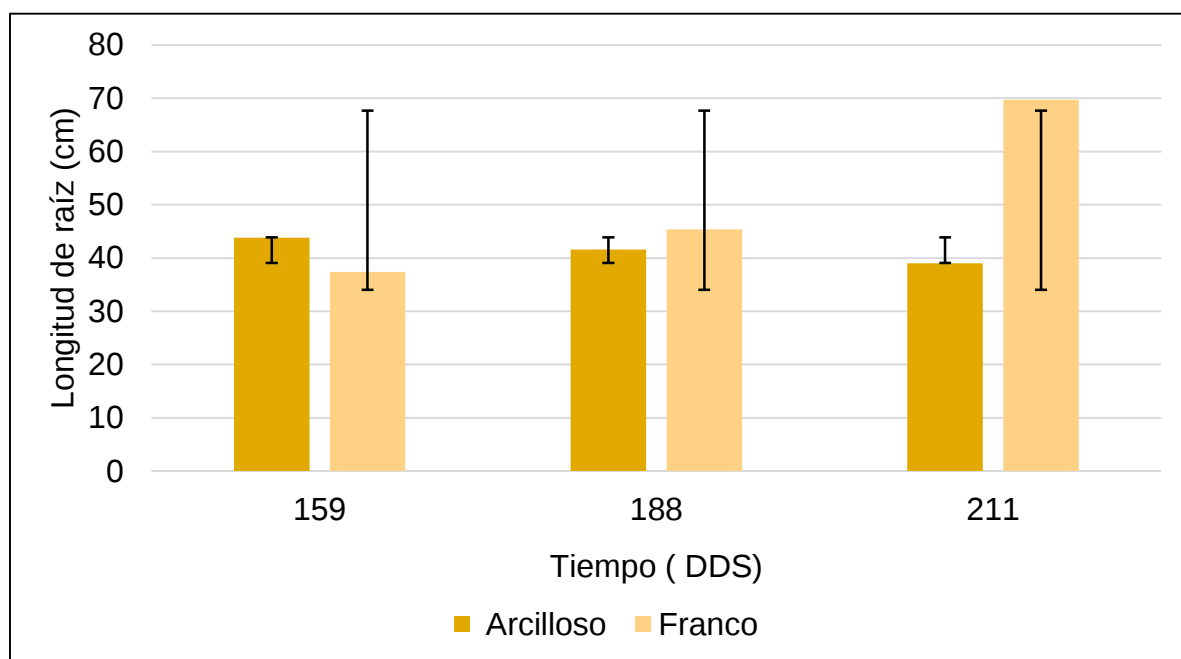
La Figura 4 muestra que el suelo arcilloso favorece un mayor diámetro de raíz en comparación con el suelo franco en diferentes momentos de crecimiento. Ambas figuras indican que factores externos como el tratamiento con ozono y el tipo de suelo pueden influir significativamente en el diámetro de raíz de las plántulas. El tratamiento con ozono parece tener un efecto positivo en el crecimiento radicular, así como el cultivo en suelo arcilloso comparado con el suelo franco.

Longitud de raíz

En ambos tipos de suelo, la longitud de la raíz tiende a aumentar con el tiempo, aunque hay una ligera disminución en el caso del suelo arcilloso a los 188 días después de la siembra (DDS). A los 159 DDS, la longitud de la raíz en suelo arcilloso es de aproximadamente 45 cm, disminuyendo a cerca de 40 cm a los 188 DDS y aumentando nuevamente a unos 50 cm a los 211 DDS. En contraste, el suelo franco

muestra un aumento más pronunciado en la longitud de la raíz hacia el final del período de medición, con una longitud de aproximadamente 40 cm a los 159 DDS, aumentando a unos 45 cm a los 188 DDS y alcanzando cerca de 60 cm a los 211 DDS. Esto sugiere que las plantas parecen tener un mejor crecimiento de raíces en suelo franco hacia el final del período de observación (Figura 5).

Figura 5. Longitud de la raíz, con respecto a los días después de siembra para tres fechas distintas.



DDS (Días Después de Siembra).

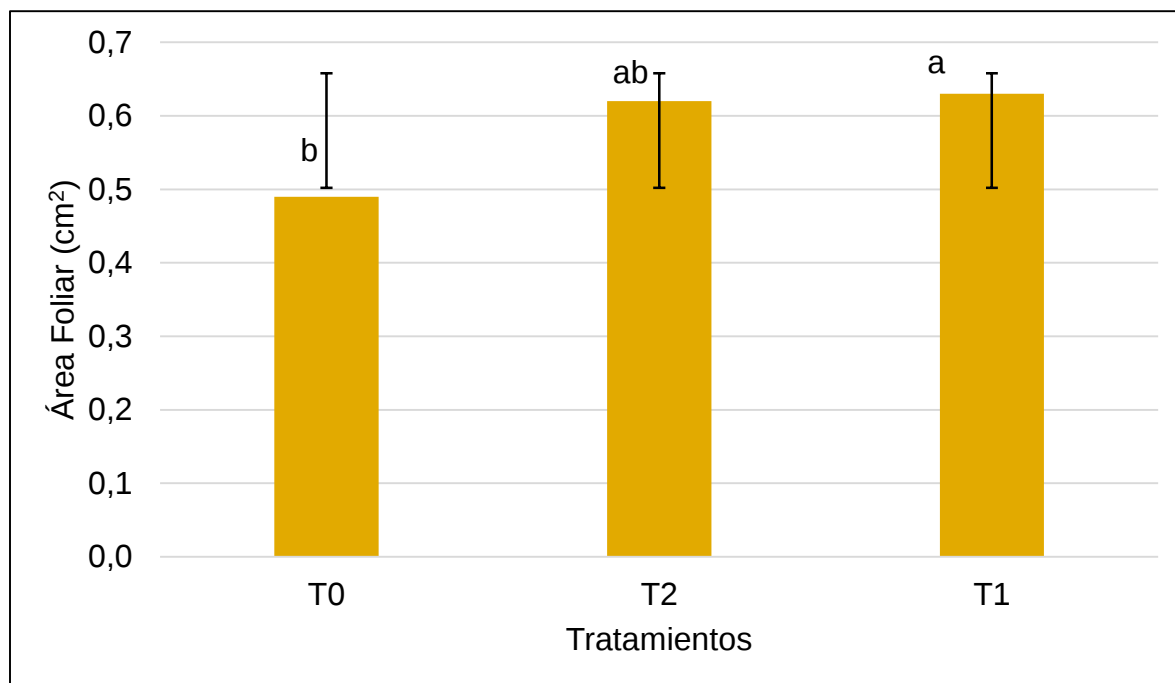
La variabilidad en las mediciones, representada por las barras de error, indica que podría haber otros factores en juego que afectan el crecimiento de las raíces, especialmente en el suelo franco a los 211 DDS. El error es mayor en este último punto de tiempo, lo que sugiere una mayor incertidumbre en las medidas. Esta variabilidad podría deberse a variaciones genéticas entre las plantas. En general, el suelo franco favorece un crecimiento de raíces más extensivo, aunque con mayor variabilidad en las mediciones hacia el final del período de estudio.

Área foliar

Las plantas expuestas al tratamiento T1 muestran la mayor área foliar, con un valor promedio de aproximadamente 0,6 cm². Las plantas bajo el tratamiento 2 también

tienen un área foliar de aproximadamente $0,6 \text{ cm}^2$ y el control muestra la menor área foliar, con aproximadamente $0,45 \text{ cm}^2$ (Figura 6).

Figura 6. Área foliar bajo diferentes tratamientos con concentraciones de ozono distintas.



T0 (Sin Ozono), T1 (10 minutos de riego con ozono), T2 (5 minutos de riego con ozono).

La exposición al ozono en el tratamiento T1 promueve un mayor crecimiento del área foliar en comparación con el control, mostrando un aumento más claro en el área foliar. T2 también muestra un aumento en el área foliar, aunque la diferencia no es estadísticamente diferente como en el caso de T1 con el control. En general, los tratamientos de ozono, especialmente T1, tienen un efecto positivo en el área foliar de las plantas.

Las plantas cultivadas en suelo arcilloso tienen un área foliar promedio mayor (aproximadamente $0,7 \text{ cm}^2$) en comparación con las cultivadas en suelo franco, que tienen un área foliar promedio de aproximadamente $0,55 \text{ cm}^2$ (Figura 7). Las plantas muestran un mayor desarrollo de área foliar en suelos arcillosos en comparación con los francos. Aunque hay una cierta variabilidad en las mediciones, el suelo arcilloso muestra una tendencia a favorecer un mayor crecimiento del área foliar.

Figura 7. Área foliar para plantas desarrolladas en dos tipos de suelos.

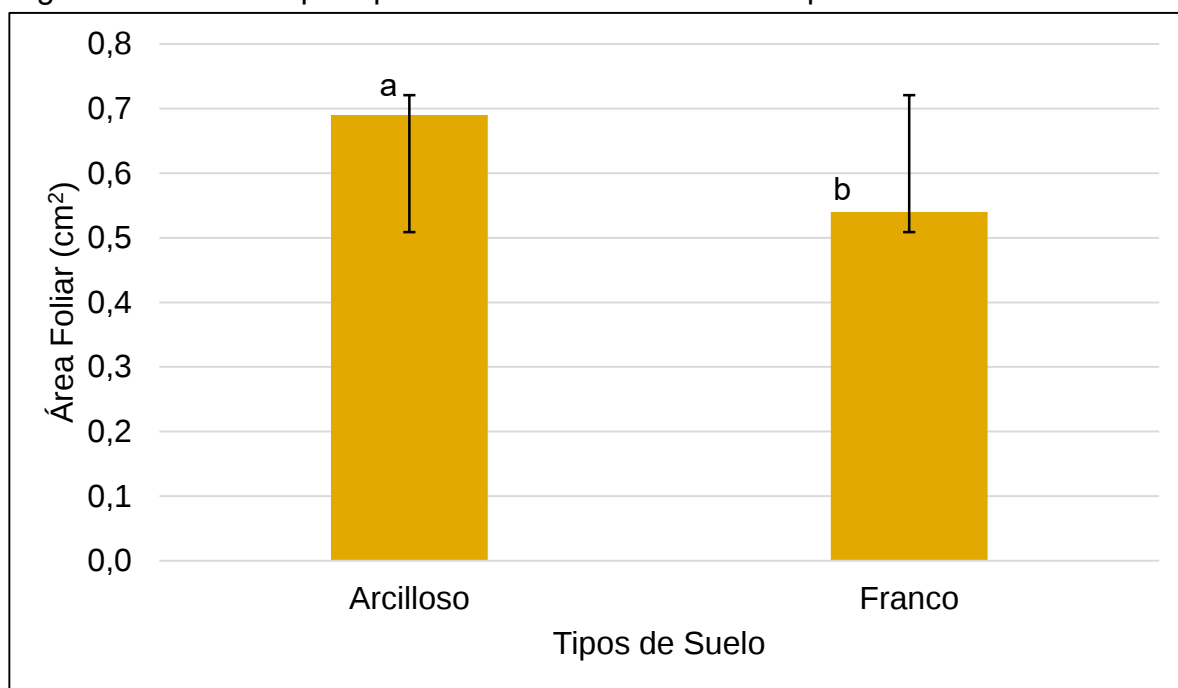
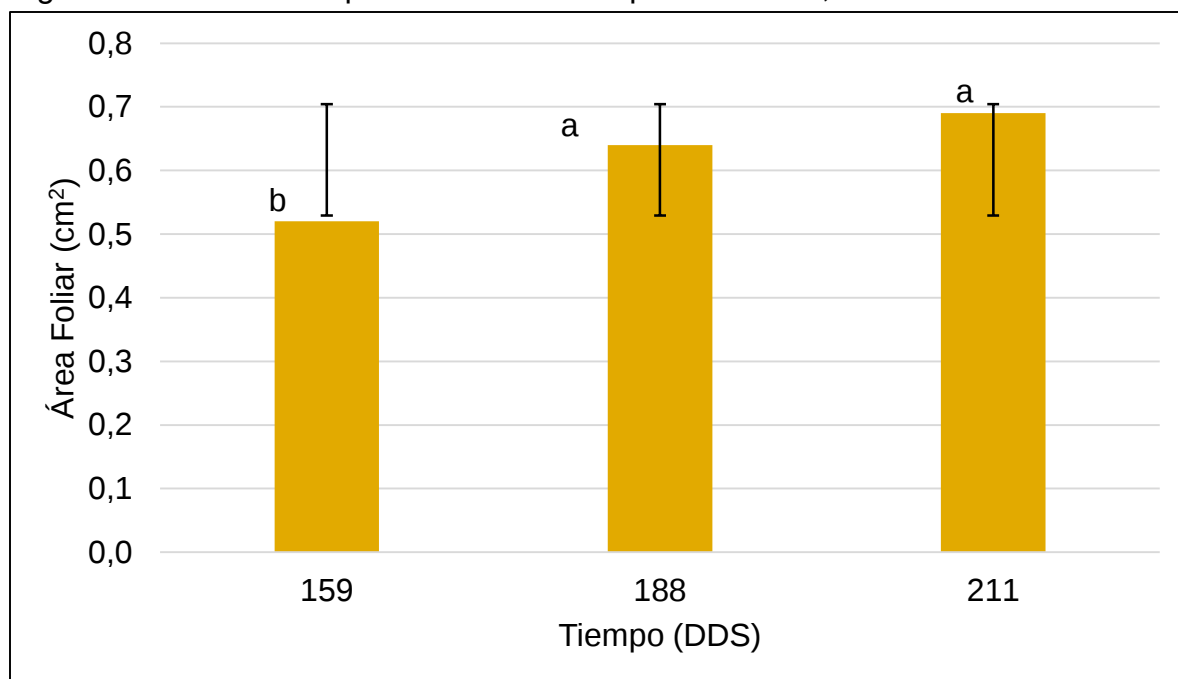


Figura 8. Área foliar respecto a los días después siembra, en tres fechas distintas.



DDS (Días Después de Siembra).

A los 159 días, el área foliar es en promedio 0,5 cm². Este valor es el más bajo entre los tres momentos de muestreo, lo cual es esperable dado que las plantas son más

jóvenes y están en las etapas iniciales de su desarrollo. Durante este periodo, las plantas están comenzando a establecer sus estructuras básicas para el crecimiento posterior.

Para 188 días, el área foliar aumenta en promedio a 0,6 cm². Este incremento significativo sugiere que las plantas están experimentando un crecimiento acelerado. El periodo entre 159 y 188 días parece ser crucial para el desarrollo foliar, probablemente debido a un aumento en la fotosíntesis y la producción de biomasa, lo que permite una expansión rápida de la superficie foliar.

Finalmente, a los 211 días, el área foliar alcanza aproximadamente 0,7 cm² en promedio. Aunque el incremento entre 188 y 211 días no es tan pronunciado como entre 159 y 188 días aún muestra una continuación en el crecimiento (Figura 8). Este patrón puede indicar que las plantas están entrando en una fase de madurez en la que el crecimiento foliar se estabiliza, sugiriendo que han alcanzado una etapa de desarrollo donde la expansión foliar es más moderada.

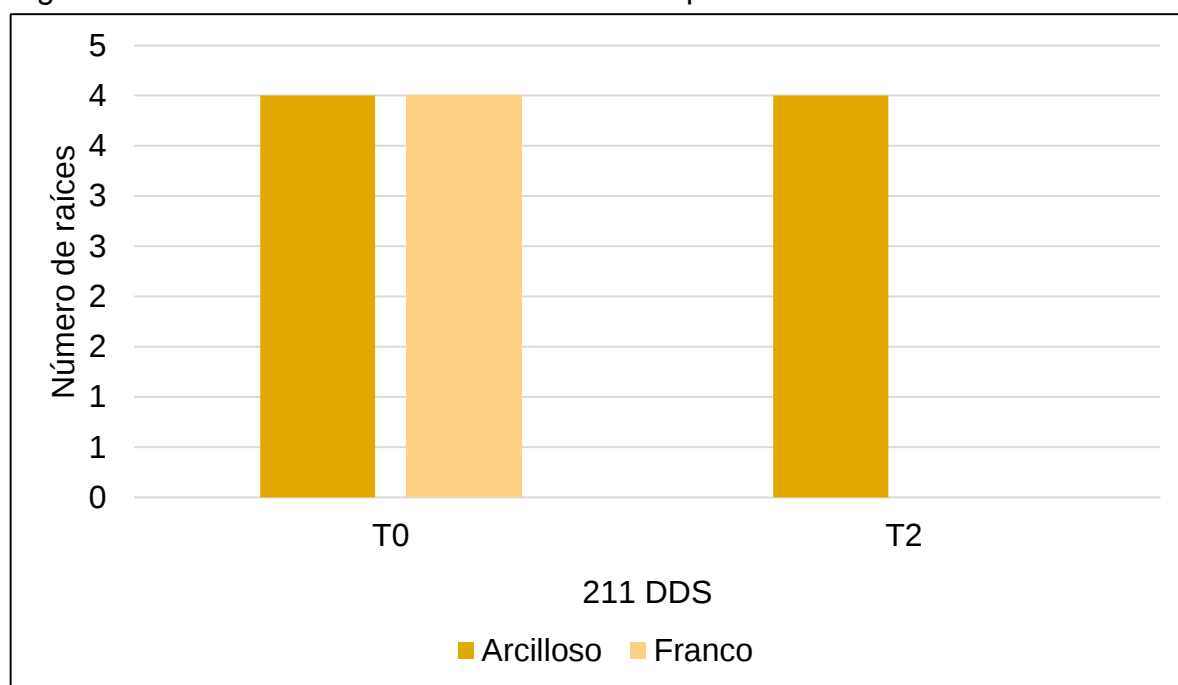
Patogenicidad

El ultimo muestreo, realizado a los 211 DDS, muestra raíces infectadas y en los suelos arcilloso y franco. Para T1 no se evidenciaron raíces infectadas para ambos suelos. En el suelo arcilloso los tratamientos T0 y T2 se infectaron 4 raíces en cada uno de los tratamientos. Por otro lado, en el suelo franco, el tratamiento T0 se infectaron 4 raíces (Figura 9).

Al realizar las mediciones de incidencia del patógeno *Phoma exigua* se mostró que el tratamiento T0 y T2 tuvieron un 67 % de incidencia de patógenos en las raíces (Figura 10). El muestro realizado a los 188 DDS, no mostro raíces infectadas en ninguno de los tratamientos.

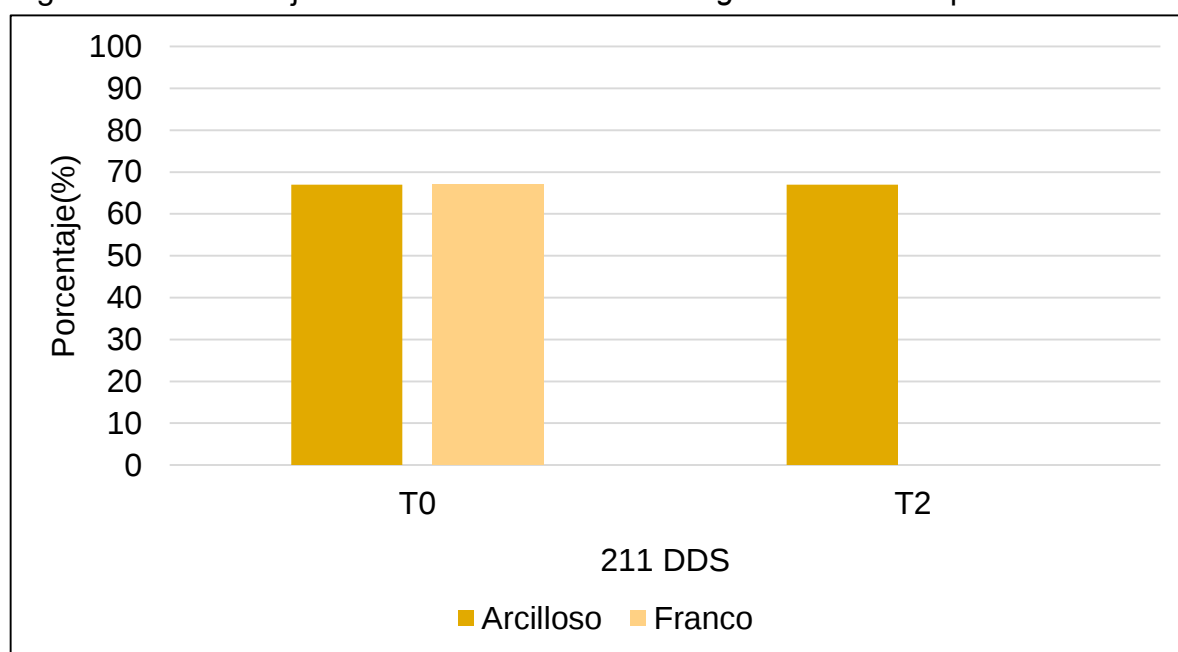
Respecto a la severidad del daño en las raíces se utilizó una escala que se relaciona directamente con el área de daño, que varía desde 1 a 5, donde 1 es nula severidad y 5 es muy alta severidad (Tabla 6).

Figura 9. Número de Raíces infectadas en los tipos de suelos.



T0 (Sin Ozono), T2 (5 minutos de riego con ozono), T1 (10 minutos de riego con ozono)
 DDS (Días Después de Siembra).

Figura 10. Porcentaje de incidencia de *Phoma exigua* en los dos tipos de suelos.



T0 (Sin Ozono), T2 (5 minutos de riego con ozono); DDS (Días Después de Siembra).

Para el tratamiento T0 en el suelo arcilloso las raíces obtuvieron una severidad alta mientras que en el suelo franco mostraron una severidad de nulo a bajo. En el tratamiento T2 las raíces mostraron una severidad de nulo a bajo (Tabla 7).

Tabla 6. Escala de severidad.

Área (cm ²)	Categoría
1	Nulo
2	Bajo
3	Medio
4	Alto
5	Muy Alto

Tabla 7. Severidad para los tratamientos en los dos tipos de suelos.

Muestreo	Tratamiento	Severidad	
		Suelo Arcilloso	Suelo Franco
211 DDS	T0	4	2
		4	2
		4	1
		4	1
	T2	1	0
		1	0
		1	0
		2	0
	T1	0	0
		0	0
		0	0
		0	0

CONCLUSIONES

1. El riego con ozono mostró el mayor porcentaje de germinación de semillas de achicoria.
2. El riego con ozono resaltó en peso fresco y diámetro de raíz, por lo que el ozono favorece a la producción de biomasa.
3. Entre los tipos de suelo, en el suelo franco se obtuvo un mejor crecimiento longitudinal de las raíces en comparación con el suelo arcilloso.
4. El riego con ozono tuvo un efecto en la disminución de la severidad del daño, por el patógeno, en la raíz.

REFERENCIAS

1. Abdella, A.K., X. Shi, L. Hua, L. Manzueta, W. Qing, T. Marhaba, W. Zhang. 2018. Influences of air, oxygen, nitrogen, and carbon dioxide nanobubbles on seed germination and plant growth. *J. Agric. Food Chem.* 66(20): 5117-5124.
2. Ahmed, A.K.A., C. Sun, L. Hua, Z. Zhang, Y. Zhang, W. Zhang, T. Marhaba. 2018. Generation of nanobubbles by ceramic membrane filters: The dependence of bubble size and zeta potential on surface coating, pore size and injected gas pressure. *Chemosphere* 2018, 203, 327-335.
3. Alavi, S.A., A.M. Ghehsareh, A. Soleymani, E. Panahpour, M. Mozafari. 2020. Pepermint (*Mentha piperita* L.) growth and biochemical properties affected by magnetized saline water. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 201:110775.
4. Alavi, S.A., A.M. Ghehsareh, A. Soleymani, E. Panahpour. 2021. Enhanced nutrient uptake in salt stressed *Mentha piperita* L. using magnetically treated water. *Protoplasm* in press.
5. Balzarini M.G., L. González, M. Tablada, F. Casanoves, J.A. Di Rienzo, C.W. Robledo. 2008. Infostat. Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
6. Carazo, G. N. 2015. Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de rosa para flor cortada (*Rosa sp.*) y pimiento (*Capsicum annuum* L.): efectos en desarrollo y producción. Tesis Doctoral. Lleida. Lleida, España. 83 p.
7. Flores, P., V. Hernández, J. Fenoll, P. Hellin. 2019. Pre-harvest application of ozonated water on broccoli crops: effect on head quality. *J. Food. Compos. Anal.* 83:103260.
8. Franck, A. 2006. Inulin. p. 335-349. In A. Stephen, G. Phillips, and P. Williams (eds.). *Food polysaccharides and their applications*. 2nd. ed. CRS Press, New York, USA.
9. Graham, T., P. Zhang, E. Woyzbun, M. Dixon. 2011. Response of hydroponic tomato to daily applications of aqueous ozone via drip irrigation. *Sci Hortic* 129:464–471.
10. Jaudé, M.B., N. Katerji, M. Mastrorilli, G. Rana. 2008. Analysis of the effect of ozone on soybean in the Mediterranean region: I. The consequences on crop-water status. *Eur. J. Agron.* 28:508–518.

11. Hickey, K.D. 1986. Methods for evaluating pesticides for control of plants pathogens. The American Phytopathological Society, St. Paul, USA.
12. Loyola, C. 2013. Phytophthora Cryptogea y Phoma Exigua Var. Exigua: Patógenos causantes de la pudrición radicular en Achicoria Industrial (Cichorium Intybus Var. Sativum Bisch) en Chile. Universidad de Concepción. <http://tesisencap.udec.cl/eu1.proxy.openathens.net/chillan/agronomia/loyola_c/2/> [consulta: 13 julio 2024].
13. Madrigal, L., E. Sangronis. 2007. La inulina y derivados como ingredientes claves en alimentos funcionales. Archivos Latinoamericanos de Nutrición 57(4):387-395.
14. Masutomi, Y., Y. Kinose, T. Takimoto, T. Yonekura, H. Oue, K. Kobayashi. 2019. Ozone changes the linear relationship between photosynthesis and stomatal conductance and decreases water use efficiency in rice. Sci. Total. Environ. 655:1009–1016.
15. Najarian, M., A. Mohammadi-Ghehsareh, J. Fallahzade, E. Peykanpour. 2018. Responses of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to ozonated water under varying drought stress intensities. J. Plant. Nutr. 41:1–9.
16. ODEPA. 2024 Estimación superficie sembrada a nivel nacional. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Chile. <<https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas>> [consulta: 29 julio 2024].
17. OEC. 2024 Exportadores e Importadores de inulina a nivel mundial. Observatorio de Complejidad Económica. <<https://oec.world/es/profile/hs/inulin#trade>> [consulta: 29 julio 2024].
18. Ohlenbusch, G., S. Hesse, F.H. Frimmel. 1998. Effects of ozone treatment on the soil organic matter on contaminated sites. Chemosphere 37:1557–1569.
19. Raub, L., C. Amrhein, M. Matsumoto. 2001. The effects of ozonated irrigation water on soil physical and chemical properties. Ozone Sci. Eng. 23:65–76.
20. Schrader, J., Shi, P., Royer, D. L., Peppe, D. J., Gallagher, R. V., Li, Y., Wang, R., & Wright, I. J. 2021. Leaf size estimation based on leaf length, width and shape. *Annals of Botany*, 128(4), 395–406. <https://doi.org/10.1093/aob/mcab078>

21. Shahzad, Z., M. Canut, C. Tournaire-Roux, A. Martinière, Y. Boursiac, O. Loudet, C. Maurel. 2016. Potassium-dependent oxygen sensing pathway regulates plant root hydraulics. *CellPress* 167: 87-98.
22. Terao, D., K. de Lima Nechet, R.T.S. Frighetto, F.F.C. Sasaki. 2019. Ozonated water combined with heat treatment to control the stem-end rot of papaya. *Sci. Hortic.* 257:108722.
23. Van den Ende, W., A. Mintiens, H. Speleers, A. Onuoha, A. Laere. 1996. The metabolism of fructans in roots of *Cichorium intybus* during growth, storage and forcing. *New Phytologist* 132(4):555-563.
24. Vavilov, N.I. 1992. Origin and geography of cultivated plants. In V.F. Dorofeyev (ed.). Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain.
25. Zhuang, M., S.K. Lam, Y. Li, S. Chen. 2017. Elevated tropospheric ozone affects the concentration and allocation of mineral nutrients of two bamboo species. *Sc.*