



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD DE LOS AEROGELÉS A BASE DE ÓXIDO DE
GRAFENO PARA USO AGRONÓMICO**

POR

Paula Valentina Oyarzún Cánovas

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico

Profesores Guía

Dra. Katherina Fernández

Dr. Ernesto Moya

Profesor Comisión

Dr. Oscar Valerio

Agosto 2023

Concepción (Chile)

© 2023 Paula Valentina Oyarzún Cánovas

© 2023 Paula Valentina Oyarzún Cánovas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia y hermanas por acompañarme en todo este camino, a Chris por toda su ayuda en este proceso y a mis amigos que sin duda hicieron que todo fuera más divertido.

Agradecer también a todas las personas que estuvieron presentes en esta etapa.

Por último, agradecer a la Meche que siempre se preocupó por mis estudios, estoy segura de que siempre me estás acompañando.

Resumen

Los aerogeles a base de óxido de grafeno -gelatina (GO-G) son un tema de gran interés debido a sus diversas aplicaciones en distintas actividades productivas como la agricultura, dado su capacidad para absorber y retener agua, lo que podría contribuir a mitigar el estrés hídrico en las plantas. En este estudio, se evaluó la potencial toxicidad de los aerogeles a base de GO-G en el crecimiento de las plantas de tomate, al emplearse como materiales que retienen agua.

La metodología consistió en comparar la capacidad de absorción del aerogel desarrollado con la turba. También, se analizó la tasa de absorción de agua de 25 semillas, al adicionar aerogel al 0,1% y 0,2% p/p en agua, comparándolas con semillas en contacto con agua y otras con turba en agua. Además, se analizó la curva de humedad de los suelos, específicamente tierra de hoja y arena, mezclados con aerogel al 0,1% y 0,2% p/p, junto con suelos sin aditivos y otros con turba. Las pruebas de germinación de semillas y el crecimiento de plántulas fueron fundamentales para la detección de la toxicidad del aerogel.

Los resultados demostraron que los aerogeles absorben aproximadamente tres veces más agua que la turba, y mantuvieron un mayor porcentaje de humedad a lo largo de las curvas de humedad en los diferentes tipos de suelos. Se observaron efectos positivos en el hinchamiento y en la tasa de germinación con la presencia de aerogel en comparación con el grupo de control, sin mostrar efectos fitotóxicos visibles.

En cuanto a la morfología de las plantas, se observaron efectos significativos en el crecimiento y desarrollo de las raíces, tallos y hojas de las plantas de tomate. En maceteros con un 0,2% p/p de aerogel, cuatro plantas presentaron apoptosis, con un porcentaje de 1,1% y 2,8% en las plantas cultivadas en tierra de hoja, y de 0,5% y 1,7% en las cultivadas en arena. Como parte de los experimentos finales, se determinó el peso seco de las muestras de plantas, observando que las muestras con mayor peso se desarrollaron con un 0,1% p/p de aerogel. Además, las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de las raíces en distintas concentraciones no mostraron restos de óxido de grafeno en su superficie.

Por lo anterior, este estudio resalta el potencial de los aerogeles GO-G en la agricultura, ya que actúan como eficientes retenedores de agua, contribuyendo positivamente al crecimiento de las plantas de tomate. Los hallazgos obtenidos ofrecen perspectivas valiosas para la aplicación práctica de los aerogeles en la agricultura y su potencial uso en el mejoramiento del crecimiento de los cultivos.

Abstract

Graphene oxide-based aerogels (GO-G) are a topic of great interest due to their diverse applications in various productive activities, such as agriculture, given their ability to absorb and retain water, which could help mitigate water stress in plants. In this study, the potential toxicity of GO-G aerogels on tomato plant growth was evaluated when used as water-retaining materials.

The methodology involved comparing the water absorption capacity of the developed aerogel with peat. Additionally, the water absorption rate of 25 seeds was analyzed by adding aerogel at 0.1% and 0.2% w/w in water, comparing them with seeds in contact with water and others with peat in water. Furthermore, the soil moisture curve was analyzed for different soil types, specifically leaf soil and sand mixed with aerogel at 0.1% and 0.2% w/w, along with soils without additives and others with peat. Seed germination tests and seedling growth were crucial for detecting aerogel toxicity.

The results demonstrated that aerogels absorb approximately three times more water than peat and maintained a higher moisture percentage along the moisture curves in different soil types. Positive effects were observed in swelling and germination rate with the presence of aerogel compared to the control group, without showing visible phytotoxic effects.

Regarding plant morphology, significant effects were observed in the growth and development of roots, stems, and leaves of tomato plants. In pots with 0.2% w/w aerogel, four plants exhibited apoptosis, with a percentage of 1.1% and 2.8% in plants cultivated in leaf soil, and 0.5% and 1.7% in those cultivated in sand. As part of the final experiments, the dry weight of plant samples was determined, and it was observed that samples with greater weight developed with 0.1% w/w aerogel. Furthermore, scanning electron microscopy (SEM) images of roots at different concentrations showed no traces of graphene oxide on their surface.

Therefore, this study highlights the potential of GO-G aerogels in agriculture, as they act as efficient water retainers, positively contributing to the growth of tomato plants. The findings obtained offer valuable insights for the practical application of aerogels in agriculture and their potential use in enhancing crop growth.

Contenido

Índice de figuras	9
Índice de tablas	11
Nomenclatura	13
1. Introducción	14
2. Objetivos	16
2.1. Objetivo general	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. Antecedentes generales	17
3.1. Escasez hídrica	17
3.2. Agua en los cultivos	18
3.3. Germinación en las plantas	19
3.4. Crecimiento en las plantas	19
3.5. Cultivos de tomate	20
3.5.1. Requerimientos edafoclimáticos del tomate	20
3.6. Suelos	21
3.6.1. Capacidad del suelo para almacenar agua	22
3.6.2. Humedad	23
3.7. Turba	24
3.8. Aerogeles	24
3.8.1. Aerogeles a base de óxido de grafeno	24
3.8.2. Óxido de grafeno (GO)	25
3.8.3. Obtención de GO	26
4. Metodología	27
4.1. Síntesis de óxido de grafeno	28

4.2.	Síntesis de aerogeles a base de GO	29
4.3.	Preparación pruebas preliminares	30
4.3.1.	Capacidad de absorción de los aerogeles.....	30
4.3.2.	Capacidad de absorción de agua de las semillas.....	30
4.4.	Suelos	31
4.4.1.	Tratamiento de suelos	31
4.4.2.	Capacidad de campo.....	31
4.4.3.	Determinación del pH del suelo.....	32
4.4.4.	Determinación de humedad inicial.....	32
4.4.5.	Riego	32
4.4.6.	Análisis de variación de humedad del suelo.....	33
4.5.	Siembra.....	34
4.6.	Germinación en suelo	35
4.7.	Desarrollo de las plántulas.....	35
4.7.1.	Longitud y diámetro del tallo.....	35
4.7.2.	Longitud y volumen de la raíz.....	36
4.7.3.	Área foliar aproximada y estado físico de hojas	36
4.7.4.	Peso seco.....	36
4.8.	Microscopio electrónico de barrido (SEM)	36
4.9.	Análisis estadístico.....	37
5.	Resultados y discusión	38
5.1.	Estudio de la morfología	38
5.2.	Capacidad de absorción de agua de los aerogeles	40
5.3.	Capacidad de hinchamiento de las semillas en agua	41
5.4.	Propiedades de suelos.....	44

5.5.	Variación de humedad en los suelos	46
5.5.1.	Curva de humedad en arena	47
5.5.2.	Curvas de humedad en tierra de hoja	48
5.6.	Germinación.....	50
5.6.1.	Germinación de semillas de tomate en arena	50
5.6.2.	Germinación de semillas de tomate en tierra de hoja.....	52
5.7.	Desarrollo plantas	53
5.7.1.	Longitud y grosor de tallo	54
5.7.2.	Longitud y volumen radical.....	56
5.7.3.	Área foliar	61
5.7.4.	Estudio visual	65
5.7.5.	Peso seco.....	66
5.8.	Análisis microscópico de raíces.	68
6.	Conclusión	70
7.	Referencias.....	71
8.	Anexos.....	80
8.1.	Composición vasos precipitados para absorción de semillas.	80
8.2.	Composición maceteros.....	80
8.3.	Desviación estándar de las curvas de humedad.....	81
8.4.	Tratamiento estadístico de datos	82
8.4.1.	Análisis de varianza absorción de agua en aerogel	82
8.4.2.	Análisis de varianza absorción de agua en semillas	83
8.4.3.	Análisis de varianza desarrollo plantas	83
8.5.	Imágenes SEM de las raíces.	92

Índice de figuras

Figura 3.1. Triangulo textural basado en la clasificación del USDA.	21
Figura 3.2. Relación general entre el agua en saturación, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y el agua aprovechable (AA) (Zotarelli et al., 2022). ..	22
Figura 3.3. Estructura del óxido de grafeno por Lerf-Klinowski (Dreyer et al., 2014).	25
Figura 4.1. Obtención de GO a partir de grafito. (Berrio et al., 2021)	28
Figura 4.2. Aerogeles GEL-GO en cajas Petri.	29
Figura 5.1. Imágenes SEM con 100 μm y 500 μm respectivamente de un aerogel entero.	38
Figura 5.2. Imágenes SEM con 500 μm y 100 μm respectivamente de un mismo aerogel triturado.	39
Figura 5.3. Muestra de aerogel triturado (a) y de turba (b) previo a la prueba de capacidad de absorción y muestra de aerogel triturado (c) y de turba (d) posterior a la prueba de capacidad de absorción.	40
Figura 5.4. (a) Semillas de tomate en agua destilada. (b) Semillas de tomate en agua destilada con 0,1% p/p de aerogel. (c) Semillas de tomate en agua destilada con 0,2% p/p de aerogel. (d) Semillas de tomate en agua destilada con 5% p/p de turba.	42
Figura 5.5. Influencia del aerogel a base de GO en la tasa de absorción de agua en las semillas de tomate.	43
Figura 5.6. Absorción de agua acumulada en las semillas de tomate.	44
Figura 5.7. Curva de humedad obtenida de la arena.	47
Figura 5.8. Curva de humedad obtenida en tierra de hoja.	48
Figura 5.9. Semillas luego de proceso de germinación precoz.	50
Figura 5.10. Número de semillas germinadas en arena.	51
Figura 5.11. Número de semillas germinadas en tierra de hoja.	52
Figura 5.12. Plantas de tomate sembradas en macetero control (a), con 5% p/p de turba (b), con 0,1% p/p de aerogel (c) y con 0,2% p/p de aerogel (d) en arena después de 26 días desde la plantación.	57

Figura 5.13. <i>Plantas de tomate sembradas en macetero control (a), con 5% p/p de turba (b), con 0,1% p/p de aerogel (c) y con 0,2% p/p de aerogel (d) en tierra de hoja después de 26 días desde la plantación.</i>	58
Figura 5.14. Hojas de planta de tomate en muestra control (a), en muestra de 5% p/p de turba (b), en muestra de 0,1% p/p de aerogel (c), en muestra de 0,2% p/p de aerogel (d) en arena después de 26 días desde la plantación.	62
Figura 5.15. Hojas de planta de tomate en muestra control (a), en muestra de 5% p/p de turba (b), en muestra de 0,1% p/p de aerogel (c), en muestra de 0,2% p/p de aerogel (d) en tierra de hoja después de 26 días desde la plantación.	64
Figura 5.16. (a) Planta de tomate con apoptosis en macetero con 0,2% p/p de aerogel en arena. (b) Planta de tomate con apoptosis en macetero con 0,2% p/p de aerogel en tierra de hoja.	65
Figura 5.17. Imagen SEM de las raíces de plantas tomate en muestra con 0,1% p/p de aerogel-arena con 50µm (a) y en muestra con 0,2% p/p de aerogel-arena con 50µm (b).	68
Figura 8.1. Imágenes SEM de las raíces de plantas de tomate en muestras control-arena con 500µm y 100µm.	92
Figura 8.2. Imágenes SEM de las raíces de plantas de tomate en muestras control-tierra de hoja con 100µm y 500µm.....	93
Figura 8.3. Imágenes SEM de las raíces de plantas tomate en muestra con 0,1% p/p de aerogel-tierra de hoja con 50µm y 100µm.	93
Figura 8.4. Imágenes SEM de las raíces de plantas tomate en muestra con 0,2% p/p de aerogel-tierra de hoja con 100µm y 200µm.....	94

Índice de tablas

Tabla 4.1. Condiciones y notación de los maceteros	33
Tabla 5.1. Capacidad absorbente de los aerogeles GEL-GO y Turba.....	41
Tabla 5.2. Magnitudes promedio de las características de cada suelo.....	45
Tabla 5.3. Cantidad de agua para riego inicial de cada suelo.....	46
Tabla 5.4. Longitud y grosor de tallo promedio en arena para distintos tratamientos. ..	54
Tabla 5.5. Longitud y grosor de tallo promedio en tierra de hoja para distintos tratamientos.....	55
Tabla 5.6. Longitud de raíz promedio en arena.....	56
Tabla 5.7. <i>Longitud y volumen de raíz promedio en tierra de hoja.</i>	58
Tabla 5.8. Volumen de raíz promedio en arena.....	59
Tabla 5.9. Volumen de raíz promedio en tierra de hoja.....	60
Tabla 5.10. Área foliar aproximada de muestras en arena.....	61
Tabla 5.11. Área foliar aproximada de muestras en tierra de hoja.....	63
Tabla 5.12. Peso seco total de muestras en arena.....	66
Tabla 5.13. Peso seco total de muestras en tierra de hoja.....	67
Tabla 8.1. Composición vasos precipitados para absorción de semillas	80
Tabla 8.2. Composición macetero en tierra de hoja.....	80
Tabla 8.3. Composición macetero en arena.....	81
Tabla 8.4. Desviación estándar de la curva de humedad en los tres ciclos en tierra de hoja.....	81
Tabla 8.5. Desviación estándar de la curva de humedad en los tres ciclos en arena. ..	82
Tabla 8.6. Resumen ANOVA multifactorial para absorción de agua en semillas.....	82
Tabla 8.7. Resumen ANOVA multifactorial para absorción de agua en semillas.....	83
Tabla 8.8. Resumen ANOVA para longitud de tallo en arena.....	83
Tabla 8.9. Prueba múltiples rangos para longitud de tallo en arena.....	83
Tabla 8.10. Prueba múltiples rangos para longitud de tallo en arena.....	84
Tabla 8.11. Resumen ANOVA para longitud de tallo en tierra de hoja.....	84
Tabla 8.12. Prueba múltiples rangos para longitud de tallo en tierra de hoja.....	84
Tabla 8.13. Prueba múltiples rangos para longitud de tallo en tierra de hoja.....	84

Tabla 8.14. Resumen ANOVA para grosor de tallo en arena.	85
Tabla 8.15. Prueba múltiples rangos para grosor de tallo en arena.	85
Tabla 8.16. Prueba múltiples rangos para grosor de tallo en arena.	85
Tabla 8.17. Resumen ANOVA para grosor de tallo en tierra de hoja.	85
Tabla 8.18. Prueba múltiples rangos para grosor de tallo en tierra de hoja.	86
Tabla 8.19. Prueba múltiples rangos para grosor de tallo en tierra de hoja.	86
Tabla 8.20. Resumen ANOVA para longitud de raíz en arena.	86
Tabla 8.21. Prueba múltiples rangos para longitud de raíz en arena.	86
Tabla 8.22. Prueba múltiples rangos para longitud de raíz en arena.	87
Tabla 8.23. Resumen ANOVA para longitud de raíz en tierra de hoja.	87
Tabla 8.24. Prueba múltiples rangos para longitud de tallo en tierra de hoja.	87
Tabla 8.25. Prueba múltiples rangos para longitud de raíz en tierra de hoja.	87
Tabla 8.26. Resumen ANOVA para volumen de raíz en arena.	88
Tabla 8.27. Prueba múltiples rangos para volumen de raíz en arena.	88
Tabla 8.28. Prueba múltiples rangos para volumen de raíz en arena.	88
Tabla 8.29. Resumen ANOVA para volumen de raíz en tierra de hoja.	88
Tabla 8.30. Prueba múltiples rangos para volumen de raíz en tierra de hoja.	89
Tabla 8.31. Prueba múltiples rangos para volumen de raíz en tierra de hoja.	89
Tabla 8.32. Resumen ANOVA para área foliar en arena.	89
Tabla 8.33. Prueba múltiples rangos para área foliar en arena.	89
Tabla 8.34. Prueba múltiples rangos para área foliar en arena.	90
Tabla 8.35. Resumen ANOVA para área foliar en tierra de hoja.	90
Tabla 8.36. Prueba múltiples rangos para área foliar en tierra de hoja.	90
Tabla 8.37. Prueba múltiples rangos para área foliar en tierra de hoja.	90
Tabla 8.38. Resumen ANOVA para peso seco en arena.	91
Tabla 8.39. Prueba múltiples rangos para peso seco en arena.	91
Tabla 8.40. Prueba múltiples rangos para peso seco en arena.	91
Tabla 8.41. Resumen ANOVA para peso seco en tierra de hoja.	91
Tabla 8.42. Prueba múltiples rangos para peso seco en tierra de hoja.	92
Tabla 8.43. Prueba múltiples rangos para peso seco en tierra de hoja.	92

Nomenclatura

ANOVA	Análisis de varianza
AFA	Área Foliar Aproximada
cm	Centímetros
g	Gramos
kV	Kilovoltio
L	Litros
m	Metros
min	minutos
mg	Miligramos
mL	Mililitros
nm	Nanómetros
s	Segundos
SEM	Microscopio electrónico de barrido
WHC	Capacidad de campo
μm	Micrómetros
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
% p/p	Porcentaje peso/peso – Porcentaje en peso

1. Introducción

La sequía se define como una condición climática con precipitaciones por debajo del promedio o ninguna durante una temporada suficientemente larga (Marcos, 2001). En las últimas décadas, las condiciones climáticas extremas han obstaculizado la productividad de los cultivos de las regiones en nuestro país y en todo el mundo.

El escenario de sequía se puede describir como una situación en la que las plantas no pueden extraer agua del suelo y experimentan condición de estrés hídrico. Este desastre natural lleva a graves problemas ambientales y socioeconómicos, como malas cosechas, escasez de agua e inseguridad alimentaria en el área afectada (Bocco et al., 2021).

Una posible forma de reducir el estrés hídrico es diseñar y mejorar la capacidad de retención de agua del suelo, retardando la infiltración de agua hasta la capa más profunda y, por lo tanto, minimizar el requerimiento de agua para riego (López, 2016). La adición de enmiendas al suelo es considerada como una de las mejores prácticas por parte de los investigadores que mejoran la infiltración de agua, el drenaje, la aireación, la estructura del suelo y la retención de agua y nutrientes del suelo, resultando un mejor crecimiento de las plantas (Saha et al., 2020).

Actualmente, se utiliza la turba, que es un material compuesto principalmente por los residuos de plantas como mejorador de suelo y retenedor de agua en la agricultura. Sin embargo, la utilización de nanomateriales absorbentes en el campo de la agricultura está siendo de interés, ya que con sus propiedades hidrofílicas aumentan la capacidad de retención y disponibilidad de agua en el suelo, lo que prolonga la supervivencia de las plantas bajo estrés hídrico, disminuyendo también la tasa de evaporación (Orzolek, 2018). Estos factores son los principales para lograr mejorar la actividad biológica y productiva del suelo. Estudios previos han demostrado que al mezclar aerogel con suelo ha permitido obtener plantas con una mayor biomasa (Guo et al., 2021b).

Se ha reportado que los elementos que presentan efectos tóxicos en los vegetales, por lo general, se acumulan en los tejidos y causan algún efecto letal para las especies no tolerantes (Lidén, 2011; N. Zhang et al., 2006), lo que ocasiona un efecto negativo sobre los cultivos y las cadenas alimenticias (Aslani et al., 2014). Bajo determinadas

condiciones de crecimiento, las plantas pueden absorber tanto elementos esenciales como no esenciales y, de acuerdo a la concentración en la que se encuentren, esto puede resultar en toxicidad (Lai et al., 2006; R. Nair et al., 2010; N. Zhang et al., 2006).

Plántulas de tomate han sido utilizadas como plantas indicadoras de sequía y fitotoxicidad, ya que estas poseen un rápido crecimiento y desarrollo, además de ser bastantes sensibles a los cambios de humedad (Adams & Lockaby, 1987). En este estudio, se evaluó el efecto fitotóxico que tiene utilizar aerogeles a base de óxido de grafeno a diferentes concentraciones en la germinación y crecimiento de las plántulas de tomate a través del tiempo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar la potencial toxicidad que los aerogeles pudieran tener al emplearse como materiales que retienen agua en el crecimiento vegetal.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar diferentes concentraciones de aerogeles en distintos suelos y su efecto en la retención de agua.
- Evaluar efecto fitotóxico de una mezcla aerogel-suelo en la germinación de semillas.
- Evaluar la capacidad que tienen los aerogeles para crecer plantas de tomate y su potencial fitotoxicidad en el tiempo.

3. Antecedentes generales

En esta sección, se abordaron problemáticas como la escasez hídrica a nivel mundial y la importancia de este elemento para la agricultura. Debido a la utilización de las plántulas de tomate en este estudio, se mencionan las condiciones óptimas requeridas para su desarrollo adecuado, así como conceptos fundamentales relacionados con los suelos utilizados.

Se describe la turba como uno de los sustratos más usados en la actualidad, y se presentan a los aerogeles a base de óxido de grafeno como un nanomaterial que podría reemplazarla gracias a las características que posee. Finalmente, se mencionan los aspectos importantes sobre la química del óxido de grafeno, incluyendo su obtención y el método de síntesis empleado en la creación de los aerogeles a base de óxido de grafeno.

3.1. Escasez hídrica

El estado actual de los recursos hídricos destaca la necesidad imperante de mejorar la gestión del agua. Reconocer, cuantificar y valorar el agua, incorporando su importancia en la toma de decisiones, resulta fundamental para lograr una gestión sostenible y equitativa de los recursos hídricos, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (Schmidt et al., 2012).

La escasez hídrica, también conocida como estrés hídrico, se refiere a la situación en la que la demanda de agua excede la disponibilidad de recursos hídricos en una determinada región o área geográfica durante un período de tiempo específico (Schmidt et al., 2012). Es decir, cuando la cantidad de agua disponible es insuficiente para satisfacer las necesidades de consumo humano, agrícolas, industriales y ambientales.

En el caso de la agricultura en zonas semiáridas, que dependen en gran medida de las condiciones climáticas y sus variabilidades, el recurso hídrico juega un papel crucial en el rendimiento de los cultivos (Costanzo et al., 2009). Por lo tanto, la evaluación del uso del agua en la producción agrícola contribuye a promover una gestión más eficiente de este recurso en el territorio (FAO, 2013).

Es relevante destacar que la agricultura es el mayor consumidor de agua dulce en el mundo, alcanzando el 69% del total (UNESCO, 2021). Sin embargo, a medida que la competencia intersectorial por el agua aumenta y la escasez se intensifica, surgen cuestionamientos sobre el uso del agua para la producción alimentaria. Además, en muchas regiones del mundo, el agua destinada a la producción alimentaria se utiliza de manera ineficiente, lo que ha llevado a la degradación medioambiental (UNESCO, 2021).

El estrés por déficit hídrico o por sequía, se produce en las plantas en respuesta a un ambiente escaso en agua, en el cual la tasa de transpiración excede a la toma de agua. El déficit hídrico no sólo ocurre cuando hay poca agua en el ambiente, sino también por bajas temperaturas y por una elevada salinidad del suelo. Estas condiciones, que pueden provocar una reducción en la cantidad de agua disponible en el citoplasma de las células vegetales, conocido como estrés osmótico (Levitt, 1980).

La escasez hídrica representa un desafío global cada vez más preocupante, con impactos significativos en la seguridad alimentaria, la salud pública, la economía y el medio ambiente, lo que destaca la urgencia de abordar y mejorar la gestión del agua a nivel mundial.

3.2. Agua en los cultivos

El agua es uno de los elementos que más limita la producción vegetal tanto en la agricultura como en los ecosistemas naturales, lo que provoca marcadas diferencias en el tipo de vegetación.

Para prevenir la deshidratación, las plantas deben absorber agua desde el suelo por las raíces y transportarla a la parte aérea. El agua es transportada por toda la planta de manera casi continua para mantener sus procesos vitales funcionando. Pequeños desequilibrios entre la absorción y la pérdida de agua a la atmósfera pueden causar déficit hídrico. Por ello, el equilibrio entre la absorción, transporte y pérdida de agua implica un importante desafío para la agricultura de riego.

La cantidad de agua que necesitan las plantas es variable, ya que depende de muchos factores como el clima, el tipo de planta, el estado fenológico y otros. Por otra parte, el suelo también tiene la capacidad de retener agua y perderla por evaporación, que

sumado a la transpiración de la planta dan origen a la cantidad de agua que se debe reponer mediante el riego, lo que es llamado evapotranspiración.

Aunque la nutrición de la planta puede afectar la calidad de la fruta, el manejo de riego durante la formación del fruto y maduración pueden tener un rol mucho más importante en la determinación de la calidad de fruto. Un número de estudios ha mostrado que el estrés hídrico moderado durante la floración y primeras cuajas de fruto puede disminuir el rendimiento de frutos (Colla et al., 1999). De esta forma, si el agua está limitada durante los períodos de crecimiento de una planta, el tamaño final de las células disminuirá, lo que conduce a una menor cantidad de hojas y de menor tamaño, frutas más pequeñas, tallos más cortos y un sistema radicular más pequeño. La falta de agua produce plantas pequeñas y débiles.

3.3. Germinación en las plantas

La germinación de las semillas es definida como una serie de procesos metabólicos y morfológicos, la cual comienza con la absorción de agua por la semilla y termina con la aparición de la radícula a través de las estructuras que la rodean. Estos procesos dan como resultado la transformación de la semilla en una plántula, la cual posteriormente es capaz de convertirse en una planta (Bewley et al., 2013).

3.4. Crecimiento en las plantas

El desarrollo del tallo es un indicador del adecuado crecimiento y establecimiento de la plántula; éste también puede ser afectado por diversos factores de estrés, por lo cual una alteración en el desarrollo del tallo influirá en el establecimiento de la plántula.

Después de la germinación, el desarrollo de la radícula (parte subterránea de la plántula), es indispensable para el establecimiento de la plántula, siendo la biomasa de la radícula un indicador de la capacidad de la plántula para crecer, desarrollarse y establecerse como plántula.

3.5. Cultivos de tomate

El tomate *Solanum lycopersicum* (o su denominación anterior *Lycopersicum esculentum* Mill.), pertenece a la familia *Solanaceae*. Es una planta herbácea anual de origen centro y sudamericano. De acuerdo con estimaciones de la FAO, el tomate es la hortaliza más cultivada e importante a nivel mundial, siendo utilizada tanto para consumo fresco como para la industria alimentaria (Flaño, 2013). Chile ocupa el lugar 40° en superficie para cultivar tomate, con 13.864 hectáreas, y el lugar 24° en su producción, con 872.485 toneladas (Flaño, 2013).

3.5.1. Requerimientos edafoclimáticos del tomate

3.5.1.1. Suelo

El pH óptimo del suelo debe oscilar entre 6 y 6,5 para que la planta de tomate se desarrolle y disponga de nutrientes adecuadamente. Los suelos pueden ser desde ligeramente ácidos hasta medianamente alcalinos. Al respecto, es posible encontrar cultivos de tomate establecidos en suelos que presentan pH 8, siendo un factor posible de manejar, ya que el tomate es la especie cultivada en invernadero que mejor tolera las condiciones de pH (Torres et al., 2017).

3.5.1.2. Clima

El tomate es una especie de estación cálida y su temperatura óptima de desarrollo varía entre 18°C y 30°C. Por ello, el cultivo al aire libre se realiza en climas templados. Temperaturas bajo 10°C afectan la formación de flores y, por otro lado, las temperaturas mayores a 35°C pueden afectar la fructificación. La temperatura nocturna puede ser determinante en la producción, provocando deformidades (Torres et al., 2017).

Respecto de la humedad relativa, el desarrollo del tomate requiere que ésta oscile entre 60% y 80%, considerando que humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades fungosas y bacterianas. Por otra parte, humedades relativas inferiores al 60% podrían provocar estrés hídrico si es por un periodo prolongado (Torres et al., 2017).

La luminosidad en el cultivo de tomate cumple un rol importante, más allá del crecimiento vegetativo de la planta, ya que el tomate requiere de al menos 6 horas diarias de luz

directa para florecer. Estos valores reducidos pueden incidir de forma negativa sobre este proceso y la fecundación (Torres et al., 2017).

3.6. Suelos

El suelo es la cubierta superficial de la mayoría de la superficie continental de la Tierra. Es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica (Shakoor, 2018).

Para identificar los tipos de suelo, existen dos clasificaciones principales, taxonómica y textural. La primera, requiere de un análisis completo del suelo extraído, el cual incluye determinar su origen, el material orgánico y mineral, más un estudio de las capas de material de la zona desde la cual se extrajo (USDA-Natural Resources Conservation Service - Soil Survey Staff, 2014b). Por otra parte, la clasificación por textura se refiere a su aspecto o apariencia superficial. La textura del suelo está influenciada por el tamaño individual y por la distribución de las partículas presentes en éste (Yolcubal et al., 2004). La referencia más utilizada para catalogar las texturas es la desarrollada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) que se presenta en la figura 3.1.

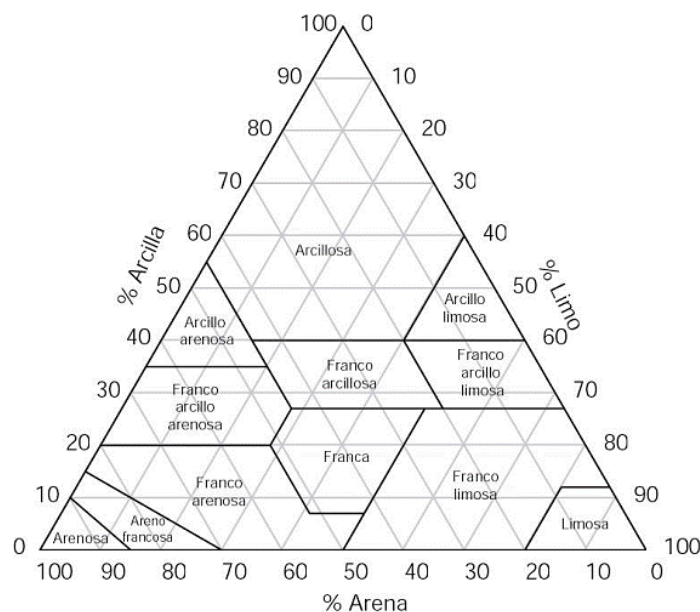


Figura 3.1. Triángulo textural basado en la clasificación del USDA.

Los suelos utilizados en esta investigación, de acuerdo con la clasificación textural propuesta por la USDA, corresponden a franco limoso (tierra de hoja) y arena.

3.6.1. Capacidad del suelo para almacenar agua

Los suelos contienen diferente cantidad de agua dependiendo de su textura y estructura. El límite superior de almacenamiento de agua se denomina “capacidad de campo” (CC), mientras que el límite inferior se denomina “punto de marchitamiento permanente” (PMP). En la figura 3.2 se representa la relación general entre ambas definiciones.

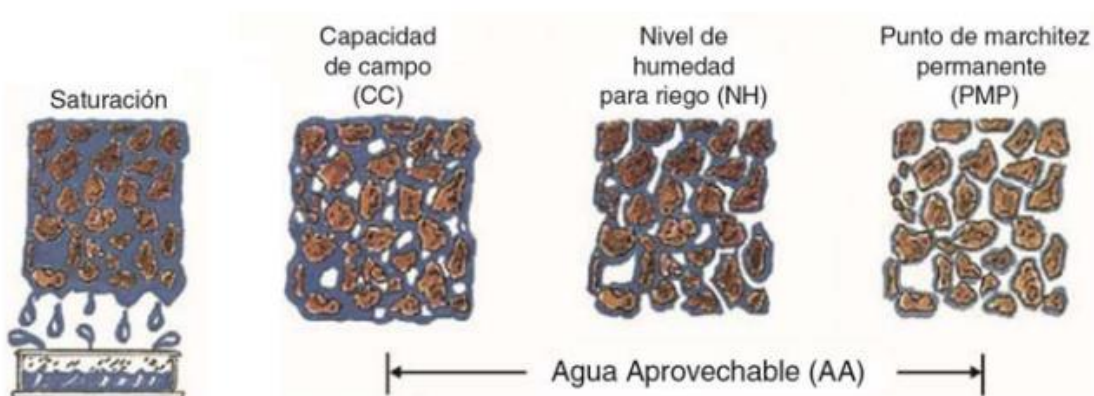


Figura 3.2. Relación general entre el agua en saturación, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y el agua aprovechable (AA) (Zotarelli et al., 2022).

El PMP se define como el contenido de humedad del suelo en el que la planta ya no tiene la capacidad de absorber agua haciendo que se marchite y muera si no se añade agua adicional. Sin embargo, la mayoría de las plantas estarán sometidas a un estrés hídrico significativo antes de este punto, y será muy factible que éstas sufran una reducción importante en su rendimiento y desarrollo mucho antes de alcanzar el punto de marchitamiento (Zotarelli et al., 2022).

La capacidad de campo es de especial importancia, ya que es útil para conocer la cantidad máxima de agua que puede soportar una determinada fracción de suelo. Mediante la ecuación (3.1) es posible determinar su valor.

$$CC = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de suelo seco}} \quad (3.1)$$

3.6.2. Humedad

La determinación de la humedad natural del suelo es primordial para resolver problemas vinculados a las necesidades de agua de riego, consideraciones ambientales y determinación de los excedentes hídricos (Reyna et al., 2014). Para determinar el contenido de humedad en el suelo se utilizó la ecuación (3.2)

$$\% H_{Base\ húmeda} = \frac{\text{masa de suelo húmedo} - \text{masa de suelo seco}}{\text{masa de suelo seco}} \times 100 \quad (3.2)$$

3.6.2.1. Curvas de retención de humedad (CRH)

Las CRH en el suelo expresan la relación existente entre el contenido de humedad y su potencial matricial, además reflejan la capacidad del suelo para retener agua en función de la succión; dicha relación depende de los factores relacionados con la porosidad del suelo. (Teepe et al., 2003)

En la agricultura, estas curvas son cruciales si se quiere caracterizar hidráulicamente los movimientos del agua en el suelo. Se utilizan para el uso eficiente del agua de riego, agua disponible, capacidad de campo, planificación y manejo del riego.

3.7. Turba

La turba es un material compuesto por los residuos de plantas que se acumulan en una zona pantanosa. Es de consistencia algo esponjosa, cuenta con una importante presencia de carbono y exhibe un tono oscuro. La turba se forma cuando las capas inferiores de vegetación mueren, quedan anegadas y se van transformando primero en turba rubia y luego turba negra a medida que pasa el tiempo, mientras que las capas superiores siguen vivas (Domínguez et al., 2017).

La turba se usa fundamentalmente en la agricultura para fabricar sustratos, acondicionar y mejorar los suelos. Además, ayuda en la retención del agua permitiendo tener un buen nivel de humedad. La utilización más adecuada depende de las características de cada turba (Domínguez et al., 2017). Pese a que son muy pobres en nutrientes, sus propiedades resultan ideales para el desarrollo y crecimiento de la gran mayoría de especies vegetales.

Se considera la turba como una de las enmiendas de suelo más utilizadas en la actualidad, sin embargo, los aerogeles a base de óxido de grafeno se perfilan como un prometedor nanomaterial capaz de reemplazarla, gracias a sus destacadas características.

3.8. Aerogeles

El aerogel es un material altamente poroso con baja densidad y alta área de superficie específica, el cual es obtenido reemplazando el líquido por un gas sin cambiar significativamente la estructura y volumen de la red del gel (Wei et al., 2022).

3.8.1. Aerogeles a base de óxido de grafeno

Los aerogeles compuestos a base de óxido de grafeno son sustancias porosas sólidas formadas por grafeno o sus derivados, óxido de grafeno (GO) y óxido de grafeno reducido (rGO), con materiales y polímeros (Wei et al., 2022).

Sus funciones provienen principalmente del grafeno y sus derivados, mientras que su estructura y estabilidad de volumen son principalmente determinados por otros materiales de matriz (Elkhatat et al., 2011). Algunas investigaciones indican que estos aerogeles tienen menor densidad que los hace muy absorbentes, tener mayor porosidad,

menor diámetro de poro, mayor área de superficie específica y morfología más estable en comparación con los aerogeles generales. Pero más importante, son algunas características únicas que presenta, como mayor resistencia al calor, mejor conductividad eléctrica y mayor capacidad de absorción de iones metálicos (Guo et al., 2018).

3.8.2. Óxido de grafeno (GO)

Entre los materiales derivados del carbono destaca el óxido de grafeno (GO por sus siglas en inglés), que es un nanomaterial bidimensional, es decir, presenta un espesor de unos cuantos nanómetros y áreas superficiales relativamente grandes (Zolezzi, 2017). El GO es una lámina de grafeno funcionalizada con diferentes grupos oxigenados, que no está disponible naturalmente (Vargas, 2017)

La estructura del GO no se encuentra totalmente definida, sin embargo, Lerf-Klinowski presentó un modelo, el cual fue ampliamente aceptado y que consiste en dividir la estructura molecular del óxido de grafeno en dos regiones fácilmente diferenciables.

- La primera es una zona levemente funcionalizada con una estructura similar al grafeno con predominancia de carbonos con hibridación sp^2
- La segunda se encuentra altamente oxidada con gran presencia de carbonos con hibridación sp^3 (Zolezzi, 2017).

En la figura 3.4 se muestra la estructura del óxido de grafeno de Lerf-Klinowski.

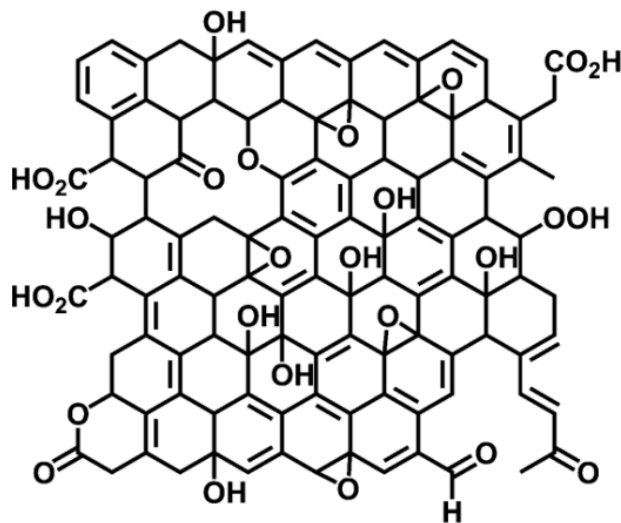


Figura 3.3. Estructura del óxido de grafeno por Lerf-Klinowski (Dreyer et al., 2014).

Una de las principales ventajas del GO es que es un material bidimensional que posee zonas hidrofílicas, como los grupos carboxilos de los bordes y en menor medida las demás especies oxidadas que permiten captar especies hidrofílicas debido a interacciones electrostáticas, puentes de hidrógeno e interacciones ácido base de Lewis. Además, permite dispersarse fácilmente en agua y solventes polares. Las zonas hidrofóbicas, como los segmentos de la matriz aromática (carbono con hibridación sp^2), permiten la interacción con especies hidrofóbicas a través de apilamientos del tipo $\pi - \pi$. A pH alto el GO tiene un comportamiento hidrofílico, pero a medida que disminuye el pH aumenta su hidrofobicidad (Kim et al., 2012).

3.8.3. Obtención de GO

Se ha demostrado que los productos de las reacciones de síntesis de óxido de grafito muestran una fuerte variación, dependiendo no solo de los oxidantes particulares utilizados, sino también de la fuente de grafito y las condiciones de reacción (Georgakilas, 2009; Zhao et al., 2015).

Los tres principales métodos para la síntesis de GO son el método de Brodie, el de Staunmaier y el de Hummers (Vargas, 2017). Estos métodos implican la intercalación de grafito con un oxidante, que introduce grupos funcionales de oxígeno, grupos hidroxilo o epóxido en el plano basal y en los bordes carbonilo y carboxílico (Phiri et al., 2018).

Los métodos antes mencionados no están exentos de inconvenientes, ya que tanto el método de Brodie como el de Staudenmaier, generan gas ClO_2 , que debe manejarse con precaución debido a su alta toxicidad y tendencia a descomponerse en el aire produciendo explosiones. A diferencia del método de Hummers que no contiene ClO_2 y utiliza en su reacción permanganato de potasio ($KMnO_4$) y ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_3) para generar oxidaciones más homogéneas.

Este último método es el más utilizado hoy en día (Dreyer et al., 2010) y fue el empleado durante la metodología de este estudio descrita en la sección 4.

4. Metodología

Cabe destacar que la presente metodología describe la planificación de los experimentos para el posterior tratamiento de datos.

Con el objetivo de evaluar diferentes concentraciones de aerogeles en distintos suelos y su efecto en la retención de agua, se trabajó con aerogeles en formato triturado, dado que, en estudios anteriores realizados en el laboratorio de biomateriales, fue el formato que más absorbía agua en comparación con el aerogel entero o trozado (Campos Francisco, 2022).

Es importante mencionar que los experimentos como capacidad de absorción de la semilla, curva de humedad y germinación/crecimiento de la semilla se realizaron en una carpa indoor de dimensiones de 60x60x180 cm, la cual estuvo equipada con:

- Balastro eléctrico, necesario para transformar y limitar la intensidad de la corriente que permite alimentar la ampolleta de este armario de cultivo.
- Extractor que se encendía a temperaturas mayores de los 25°C.
- Humidificador de 8 L que siempre se mantuvo encendido en su mínima capacidad para mantener una humedad entre el 60% y 70%.
- Ventilador interior para mantener el aire interno en movimiento.
- Termohigrómetro, instrumento eléctrico para medir la temperatura y humedad relativa del ambiente.

La ampolleta que se utilizó durante toda la investigación fue una ampolleta de haluro metálico que produce una luz en el espectro azul, que ayudan en la etapa de crecimiento que es el objetivo de este trabajo.

4.1. Síntesis de óxido de grafeno

El GO se preparó a partir de polvo de grafito natural mediante el método de Hummers modificado (Marcano et al., 2010), con posterior purificación y exfoliación a diferentes tiempos de reacción (Wang et al., 2014). En la síntesis, se agregaron 30 mL de H_3PO_4 concentrado y 270 mL de H_2SO_4 en un vaso precipitado en un baño de hielo, seguido de una adición lenta de 2,25 g de polvo de grafito y 13,5 g de KMnO_4 . Estos productos químicos se incorporaron cuidadosamente para evitar que la temperatura supere los 45°C . Luego, la mezcla se mantuvo a 35°C - 40°C después de agitarse durante 1 hora. Después de la reacción, se agregaron lentamente 60 mL de H_2O_2 hasta que se observó un color marrón verdoso en la mezcla. Posteriormente, el producto de oxidación se lavó en continuo y se centrifugó a 800 rpm durante 15 min. En el primer lavado, la mezcla se trató con agua Milli-Q® (200 mL) y solución acuosa de HCl (20 mL) para eliminar los iones metálicos hasta que el pH de la suspensión estuvo cercano a 7, utilizando como indicador AgNO_3 . La mezcla se lavó con etanol (100 mL) y cuatro veces con agua Milli-Q® (200 mL en cada caso), eliminando cada vez el sobrenadante hasta obtener un pH entre 3,5-4. Finalmente, la mezcla se dializó en membranas de diálisis durante 3 días para eliminar cualquier resto de impurezas y liofilización durante 72 horas (sistema de secado por congelación de Labconco, Alemania) para obtener una dispersión sólida de GO (Borges-Vilches et al., 2020).

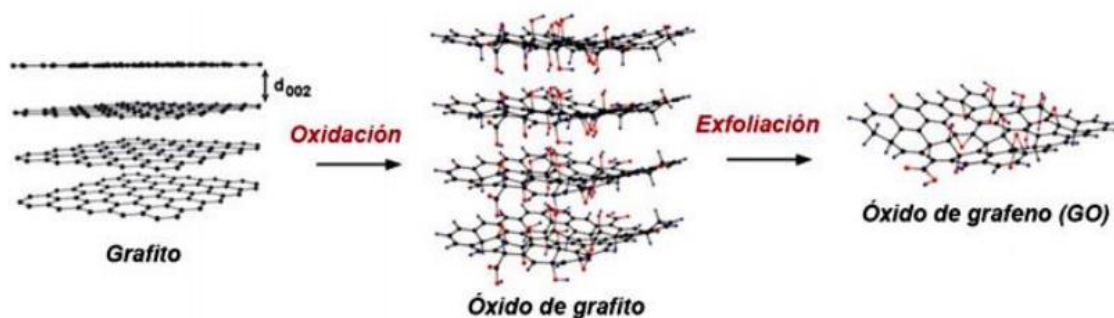


Figura 4.1. Obtención de GO a partir de grafito. (Berrio et al., 2021)

4.2. Síntesis de aerogeles a base de GO

La síntesis de aerogeles a base de GO se realizó mediante reacciones asistidas por microondas. En este proceso, se disolvió 0.1 g de GO en 50 mL (concentración de 2 mg/mL) de agua Milli-Q® y se sonicó la solución por 30 min (Digital Ultrasonic cleaner model CD 4820, 42 kHz, 160 W, Shenzhen Codyson Electrical Co. Ltd., China). Esto, para evitar la formación de conglomerados. Luego, se ajustó el pH de la solución GO al valor de 11, que inicialmente tuvo un valor entre 2-3.

La solución de GEL se preparó calentando 1 g de GEL disuelto en 150 mL de agua Milli-Q® a 60°C durante 15 min. Las soluciones de GO y GEL se mezclaron, manteniendo la proporción de GEL: GO a 10:1. La mezcla resultante se trabajó en un matraz y se sometió a reacción asistida por MW (Microondas Somela 17L C1700N), operando a una potencia de 800 W en intervalos de calentamiento y no-calentamiento de 5 min cada uno, cumpliendo un tiempo total de reacción de 30 min. De esta forma, se aseguró que la temperatura de la solución no supere los 90°C, para evitar desnaturalizar y dañar la estructura química del GO y el GEL (Figuerola et al., 2021).

Finalmente, la solución de GEL-GO (color negro) se colocó en cajas Petri con formas cilíndricas y se entrecruzó durante 12h a 4°C hasta obtener hidrogeles GEL-GO. Estos hidrogeles se congelaron a -86°C y se liofilizaron (Sistema de secado por congelación de Labconco, Alemania) durante 72h para obtener una estructura porosa (aerogeles GEL-GO) después de la sublimación del agua.

En la figura 4.2 se presentan los aerogeles a base de GO.

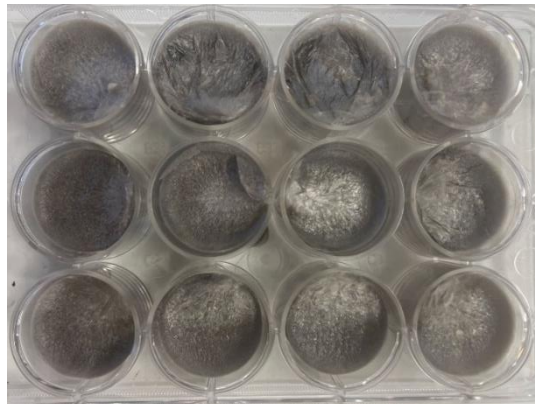


Figura 4.2. Aerogeles GEL-GO en cajas Petri.

4.3. Preparación pruebas preliminares

Para las pruebas preliminares, los aerogeles GEL-GO fueron extraídos de las cajas Petri y se trituraron en una minipimer (Minipimer Philips HR2531/50).

4.3.1. Capacidad de absorción de los aerogeles

El experimento inició pesando una muestra de aerogel, para luego con una propipeta graduada en 100 μL , añadir gota a gota agua destilada hasta que el agua comenzó a escurrir, es decir, no hubo absorción por los aerogeles. Para finalizar, se registró el valor de la balanza (M214Ai, BEL ENGINEERING SRL) para determinar la cantidad de agua absorbida por los aerogeles en porcentaje utilizando la ecuación (4.1).

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{W_{wet} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100 \quad (4.1)$$

Donde,

W_{wet} = Peso húmedo (g)

W_{dry} = Peso seco (g)

El mismo procedimiento se hizo para la Turba, con el fin de realizar una comparación entre los resultados de ambos.

4.3.2. Capacidad de absorción de agua de las semillas

Se remojaron 25 semillas de tomate Cal Ace (Ergo®, Chile) por muestra en un vaso precipitado con 50 mL de agua destilada.

Se realizaron cuatro tratamientos distintos, uno con agua destilada, otros dos con 0,1% p/p de aerogel en agua y 0,2% p/p de aerogel en agua y por último uno con 5% p/p de turba en agua, cada uno con sus respectivos triplicados. Éstos se mantuvieron bajo fotoperiodos de 16h luz y 8h oscuridad dentro de un indoor. Las semillas se pesaron previo al remojo usando una balanza (M214Ai, BEL ENGINEERING SRL) y luego de absorber agua en un periodo de 6h, 12h, 24h y 48h, se depositaron las semillas en papel filtro antes de ser pesadas para absorber todas las gotas de agua que existieran al

momento de extraer la semilla y lavándolas con agua destilada para remover cualquier muestra externa de la semilla (Chen et al., 2019).

Este estudio es importante, dado que la absorción de agua de las semillas está estrechamente relacionada con la germinación (Nair et al., 2010).

4.4. Suelos

Los suelos utilizados en estos experimentos fueron dos: Tierra de hoja (Anasac®, Chile) que contiene compost de hojas y residuos vegetales, y Arena de Lampa (Anasac®, Chile).

4.4.1. Tratamiento de suelos

Con el fin de homogeneizar el tamaño de los granos en los distintos suelos, estos fueron tratados con un tamiz de 2mm. Los suelos se almacenaron en frascos Schott con capacidad entre 2L a 5L, para ser esterilizadas en Autoclave por 15 min a 121,5°C y 1 bar.

Finalizada la esterilización, los recipientes se dejaron reposando a temperatura ambiente y una vez enfriados, se extrajeron las muestras necesarias de cada suelo para los estudios posteriores.

4.4.2. Capacidad de campo

Para obtener la capacidad de campo se utilizó el “método de conteo de gotas” para determinar la capacidad de retención de agua (WHC) del suelo (Brischke & Wegener, 2019). Se pesó una muestra de suelo a condiciones ambientales y se añadió agua destilada hasta saturar la mezcla y alcanzar una textura más densa. Luego, se agregaron 25 mL más de agua destilada, se mezcló homogéneamente y se dejó reposar durante 2 horas. Se utilizó papel filtro sobre un embudo Buchner (100 mm de diámetro), y se humedeció para sellar el papel al embudo. La muestra preparada se transfirió al embudo y se esparció uniformemente hasta una altura de 10 mm aproximadamente. Con una bomba de vacío, se aplicó succión hasta que no se extrajeron más de cinco gotas de agua por minuto. La muestra final, se dispuso en una placa Petri de vidrio, de masa conocida, para luego ser pesada. La placa se secó en un horno (WSU 3, mLw) a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 14 horas, para luego ser pesada nuevamente. Al obtener el valor de ambas

muestras, se determinó la capacidad de campo de cada suelo por diferencia de peso por medio de la ecuación (3.1). Este procedimiento se realizó tres veces por cada muestra de suelo.

4.4.3. Determinación del pH del suelo

Para medir el pH del suelo, se mezclaron 40g de suelo seco con agua destilada hasta que el suelo y el líquido estén en equilibrio para poder medir el pH con precisión. Para este protocolo se utilizó una solución de suelo/agua en relación 1:1. Se revolvió la mezcla con una cuchara durante 30 segundos y se dejó reposar tres minutos, este proceso se repitió cinco veces. Cuando la muestra decantó y se formó un sobrenadante (líquido claro sobre el suelo depositado), se midió el pH utilizando un pH-metro (Thermo Scientific™ Orion StarA214). Se realizó triplicado de cada suelo para este experimento.

4.4.4. Determinación de humedad inicial

El análisis de humedad inicial se determinó con el protocolo de la norma D2216-10 (ASME). Se extrajeron 3 muestras de 50 g por suelo esterilizado, las cuales fueron depositadas en placas Petri de vidrio, previamente pesadas, para secarlas en un horno (WSU 3, mLw) a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 15 horas. Una vez terminado el secado, las placas se dejaron reposando en un desecador durante 20 min, dado que las altas temperaturas afectan las mediciones de la balanza, y se pesaron nuevamente para determinar la humedad mediante la ecuación (3.2)

4.4.5. Riego

Para el riego inicial, se determinó la cantidad de agua necesaria a partir de la humedad inicial para alcanzar el 80% de capacidad de campo del suelo. Para los riegos posteriores, fue necesario obtener el porcentaje de humedad final del primer ciclo de la curva en el macetero control de cada suelo, ya que, a partir de este valor se calculó la cantidad de agua necesaria para volver a llegar al 80% de capacidad de campo, así toda el agua regada estuviera disponible para la planta y comenzar el nuevo periodo.

El riego para cada macetero fue a través de un vaso precipitado con los gramos de agua destilada correspondiente para cada suelo, y se vertió cuidadosamente distribuyendo equitativamente sobre la superficie para asegurar una absorción homogénea.

4.4.6. Análisis de variación de humedad del suelo

La variación del porcentaje de humedad a través del tiempo es un parámetro para evaluar a los aerogeles como un biomaterial que aumenta la retención de agua y que sirve como enmienda para la tierra, además de ser un parámetro para determinar la cantidad de agua para el riego.

En este experimento, el análisis de variación de humedad comenzó el día del primer riego (día 0), hasta el día que el porcentaje de humedad fue similar a la inicial, en el cual se da como finalizado el ciclo. Luego se repitió tres veces el ciclo anterior, en donde se riega los maceteros el día 0 de cada periodo.

Este estudio consistió en comparar los distintos suelos con una concentración de aerogel de 0,2% y 0,1% p/p con suelos sin aditivos y con adición de turba, a una concentración de 5% p/p, donde se le adicionó 2 semillas a cada macetero, con el objetivo de evaluar el efecto del aerogel en la retención de suelo y determinar la cantidad de agua para el riego y los días. En la tabla 4.1 se especifica las condiciones de los distintos maceteros en ambos suelos.

Tabla 4.1. Condiciones y notación de los maceteros

Tipo de suelo	Condición	Notación
Tierra de hoja	Tierra con semilla	TS
	Aerogel 0,1% con semilla	TS-0,1%
	Aerogel 0,2% con semilla	TS-0,2%
	Turba con semilla	TS-TR
	Reposición	RP
Arena	Arena con semilla	AS
	Aerogel 0,1% con semilla	AS-0,1%
	Aerogel 0,2% con semilla	AS-0,2%
	Turba con semilla	AS-TR
	Reposición	RP

La configuración y distribución de los suelos, la turba y los aerogeles fueron en maceteros de 8 cm de diámetro y 10 cm de alto, en donde, se dispuso un papel filtro grado 1 de 6 cm de diámetro en el fondo de estos, para evitar la pérdida de granos de suelo a través de los orificios de drenaje que estos presentan. Una vez preparados los maceteros, comenzó el día 0 con el riego inicial en cada macetero y se dejó reposar unos minutos. Luego, se extraen muestras de 4 g de suelo, enterrando una espátula lo más profundo posible, dado que el suelo expuesto no es representativo en el estudio. Las muestras se depositaron en placas Petri, de masa conocida, para dejarlas en el horno (WSU 3, mLw) a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 135 minutos, correspondiente al tiempo mínimo de secado especificado por norma D2216-10 (ASME). Es importante mencionar, que cada muestra extraída de los maceteros tuvo su respectiva reposición, la cual consistía en un macetero con las composiciones correspondientes destinado a reponer la masa de suelo extraído para no afectar de manera significativa los porcentajes de peso que cada uno tiene. Transcurrido el tiempo de secado, las muestras se dejaron reposando en un desecador durante 20 min y se pesaron en una balanza digital (M214Ai, BEL ENGINEERING SRL). Obtenidos todos los datos, se determinó la humedad mediante la ecuación (3.2). La última fase de extracción, reposición y la consecuente medición de humedad son repetidas diariamente hasta completar los tres periodos.

4.5. Siembra

Previo a iniciar la plantación de las semillas de tomate en los maceteros, se realizó un proceso de germinación precoz para acelerar el proceso y al mismo tiempo asegurar las condiciones óptimas de las semillas. Este proceso consistió en humedecer papel absorbente y ubicar las semillas en hileras, dejando un espacio de no más de un centímetro entre ellas. Luego, se envolvieron las semillas en el mismo papel absorbente, se humedecieron y se guardaron en una bolsa de plástico con cierre hermético dentro del indoor, para evitar corrientes de aire y se mantenga la humedad.

A los cuatro días de iniciado el proceso de germinación, la gran mayoría de las semillas germinaron y presentaron raíces, por lo que fueron óptimas para plantar.

Para la siembra de las semillas de tomate se utilizaron los mismos porcentajes de peso/peso en aerogel y en turba que en la sección 4.4.6. Se plantaron 2 semillas

pregerminadas en cada macetero y se hizo triplicado de cada condición en cada suelo. Una vez sembradas las semillas, se regaron los maceteros con la cantidad de agua obtenida de las respectivas curvas de humedad de cada suelo.

4.6. Germinación en suelo

En este estudio, la etapa de germinación en suelo se consideró realizada cuando emerge la radícula entre los cotiledones. La germinación se evaluó desde que se siembran las semillas pregerminadas hasta que se visualiza una plántula, siendo éste el periodo de evaluación de esta investigación. Las evaluaciones de germinación se realizaron diariamente (Chulim et al., 2014).

4.7. Desarrollo de las plántulas

Después de 26 días de exposición con el aerogel, se tomaron muestras de plántulas de tomate cultivadas en maceteros a distinta concentración de aerogel, en maceteros con turba y en maceteros control de cada suelo.

Las raíces y los brotes se separaron y se lavaron con agua para eliminar el medio de cultivo. Luego, se secaron con papel filtro para eliminar el agua superficial. Para evaluar los efectos y la exposición de los aerogeles en el desarrollo de las plántulas, se midieron los siguientes parámetros (Méndez et., 2018):

- Longitud y diámetro del tallo.
- Longitud y volumen de la raíz.
- Área foliar aproximada y estado físico de hojas.
- Peso seco.

4.7.1. Longitud y diámetro del tallo

Para estudiar la longitud se midió con una regla graduada en cm desde la base de la planta hasta el meristemo apical de la planta y el diámetro se determinó con un pie de metro.

4.7.2. Longitud y volumen de la raíz

Se midió el largo de la raíz desde el inicio de ésta hasta la ramificación más larga, esto se logró mediante la utilización de una regla (graduada en centímetros); la medición del volumen radical se obtuvo tomando el dato del volumen desplazado al introducir la raíz en una probeta (con agua) con capacidad para 50 ml

4.7.3. Área foliar aproximada y estado físico de hojas

Para determinar el área foliar aproximada (AFA) se fotocopiaron todas las hojas de las muestras en una hoja de papel blanco tamaño carta, se recortaron y se pesaron. Dado que la superficie y peso inicial de la hoja de papel blanco es conocido. El AFA se obtuvo mediante la ecuación 4.2.

$$AFA = \frac{\text{Peso hoja impreso} \times 605,43 \text{ cm}^2}{4,5789 \text{ g}} \quad (4.2)$$

Por otra parte, se estudió visualmente la planta para determinar efectos fitotóxicos como color, tamaño y forma de hoja.

4.7.4. Peso seco

Las muestras que fueron sometidas a todas las mediciones anteriores fueron introducidas en un horno (WSU 3, mLw) a 60°C por 72 horas para el proceso de secado y determinación del peso seco.

4.8. Microscopio electrónico de barrido (SEM)

Con la intención de lograr un nivel de caracterización más profunda de los aerogeles, éstos fueron fotografiados con ayuda de un microscopio electrónico de barrido (SEM). Con este método se obtuvieron imágenes que permitieron visualizar, en detalle, la morfología del material en un rango de acercamiento entre 100 µm y 500 µm, con el haz electrónico del microscopio.

Se fotografiaron las raíces de plantas de tomate que, al no presentar propiedades conductivas, fueron bañadas en oro. Se destinaron réplicas con concentración del 0,2% p/p aerogel, 0,1% p/ aerogel y otra sin concentración (control) para un análisis espectroscópico, con el propósito de certificar y contrastar la composición morfológica que exhibe cada ejemplar para visualizar posibles efectos fitotóxicos de los aerogeles en las raíces.

4.9. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos en los distintos ensayos se adquirieron por triplicado y se procesaron por OriginPro8.5® software. Los resultados de los experimentos se expresaron como el valor medio \pm desviación estándar. Los estudios de comparación de medias se realizaron mediante análisis de varianza (ANOVA), cuya significancia aceptada fue p-valor $\leq 0,05$, y un análisis de múltiples rangos mediante el test de LSD o test de Tukey con un 95% de confianza) en Statgraphics software Centurion XVII ®

5. Resultados y discusión

La recopilación e interpretación de todos los análisis desarrollados en esta investigación se encuentran detallados a lo largo de este capítulo.

5.1. Estudio de la morfología

La morfología de los aerogeles de gelatina-GO enteros y triturados fue investigada por análisis SEM. Los aumentos utilizados fueron 100 μm y 500 μm , a 20 kV de Voltaje.

La morfología de los aerogeles está relacionada con sus capacidades de absorción, porosidad y propiedades mecánicas (Zhang et al., 2019). Como se ilustra en la figura 5.1, los aerogeles de GO-G presentaron una estructura porosa tridimensional que tienen una apariencia esponjosa y ligera. Los poros, que son espacios vacíos dentro del material, le otorgan la gran capacidad de absorción de líquidos y gases a los aerogeles (Zhang et al., 2019).

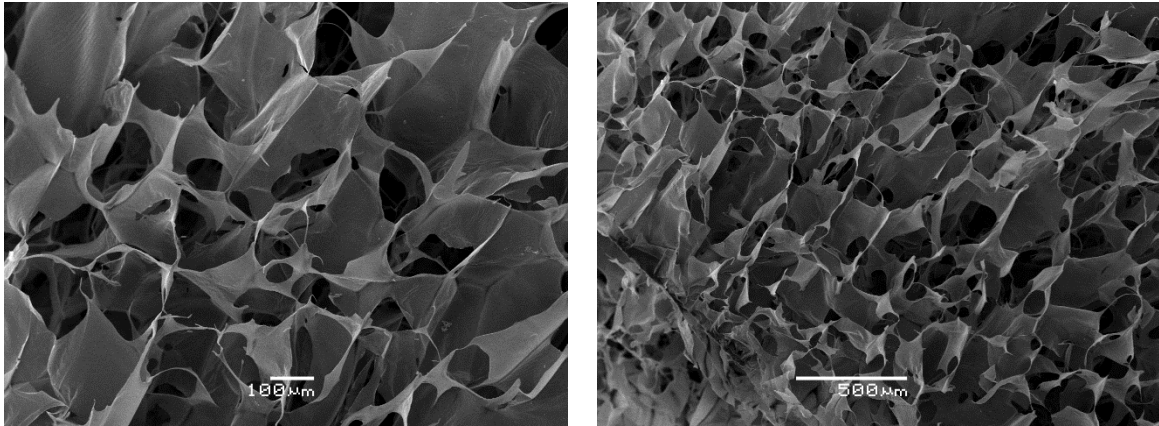


Figura 5.1. Imágenes SEM con 100 μm y 500 μm respectivamente de un aerogel entero.

En la figura 5.2 se visualizó un cambio en la morfología debido al proceso de triturado de los aerogeles. Es posible que los poros hayan colapsado durante el proceso de triturado, lo que explicaría por que no fueron observados a simple vista, pero esto no significó que hayan desaparecido por completo.

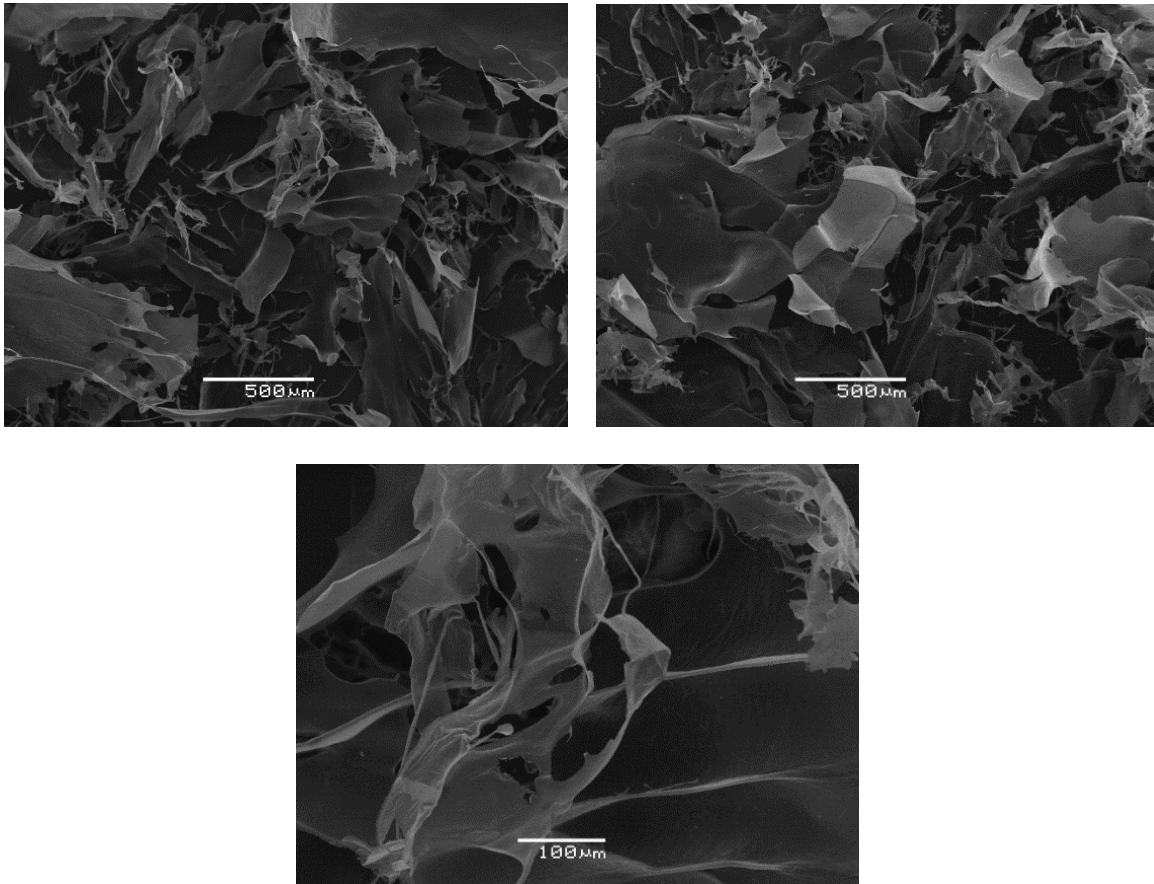


Figura 5.2. Imágenes SEM con 500 µm y 100 µm respectivamente de un mismo aerogel triturado

5.2. Capacidad de absorción de agua de los aerogeles

Una de las propiedades más relevantes de los aerogeles es su alta capacidad de absorción, que depende de varios factores como el tipo de aerogel, su estructura y composición. Para esta prueba se midió la capacidad de absorción de agua (ecuación 4.1) de aerogeles previamente triturados y de turba como se visualiza en la figura 5.3.

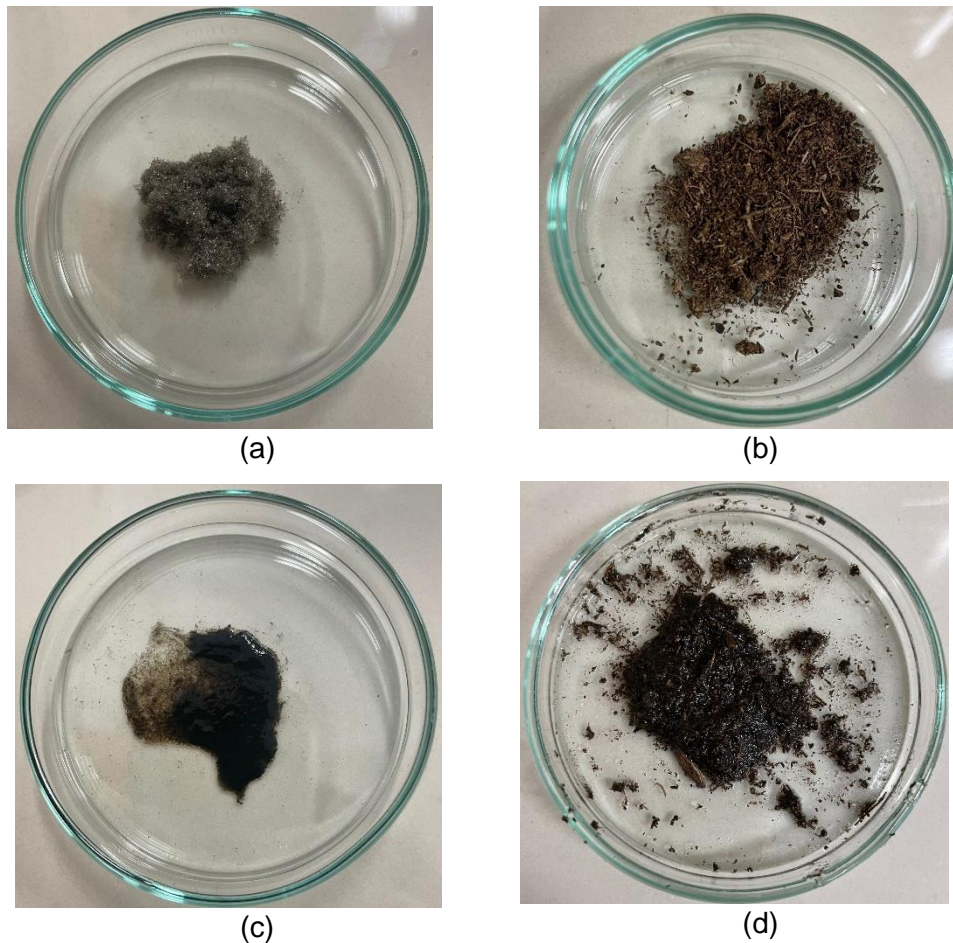


Figura 5.3. Muestra de aerogel triturado (a) y de turba (b) previo a la prueba de capacidad de absorción y muestra de aerogel triturado (c) y de turba (d) posterior a la prueba de capacidad de absorción.

En la figura 5.3 se visualiza el antes y después de la prueba de absorción de agua por goteo de las muestras de aerogel triturado y turba. El aerogel luego de la prueba presentó una textura muy ligera y esponjosa, mientras que la turba mostró un aspecto fibroso, se deshacía fácilmente.

Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Capacidad absorbente de los aerogeles GEL-GO y Turba.

	Aerogel	Turba
Absorción (g agua/ g aerogel)	20,6 ± 0,2	6,0 ± 0,8

Comparando las muestras de aerogel con las de turba, el porcentaje de absorción del material desarrollado fue aproximadamente el triple ($p < 0,05$).

Según lo reportado en un estudio (Campos, 2022), la capacidad absorbente de agua de los aerogeles a base de GO en formato triturado es de 12,5 g/g de aerogel. Por otra parte, un estudio en el que se desarrollaron aerogeles compuestos de óxido de grafeno y polietilenglicol (PEG) obtuvo una capacidad de absorción de agua de 20,2 g/g de aerogel (Borges-Vilches et al., 2021). Estos valores evidenciados en las distintas investigaciones demuestran la gran capacidad de absorción que tienen los aerogeles a base de GO.

Los resultados de este análisis son de interés para uno de los objetivos del estudio, dado que se comprueba la alta capacidad de absorción de los aerogeles en comparación a la turba.

5.3. Capacidad de hinchamiento de las semillas en agua

En este estudio, se midió la absorción de agua de 25 semillas durante 48 horas bajo cuatro tratamientos distintos: agua destilada, agua destilada con 0,1% p/p de aerogel, agua destilada con 0,1% p/p de aerogel y agua destilada con 5% p/p de turba. En la Figura 5.4. se muestran los tratamientos mencionados.

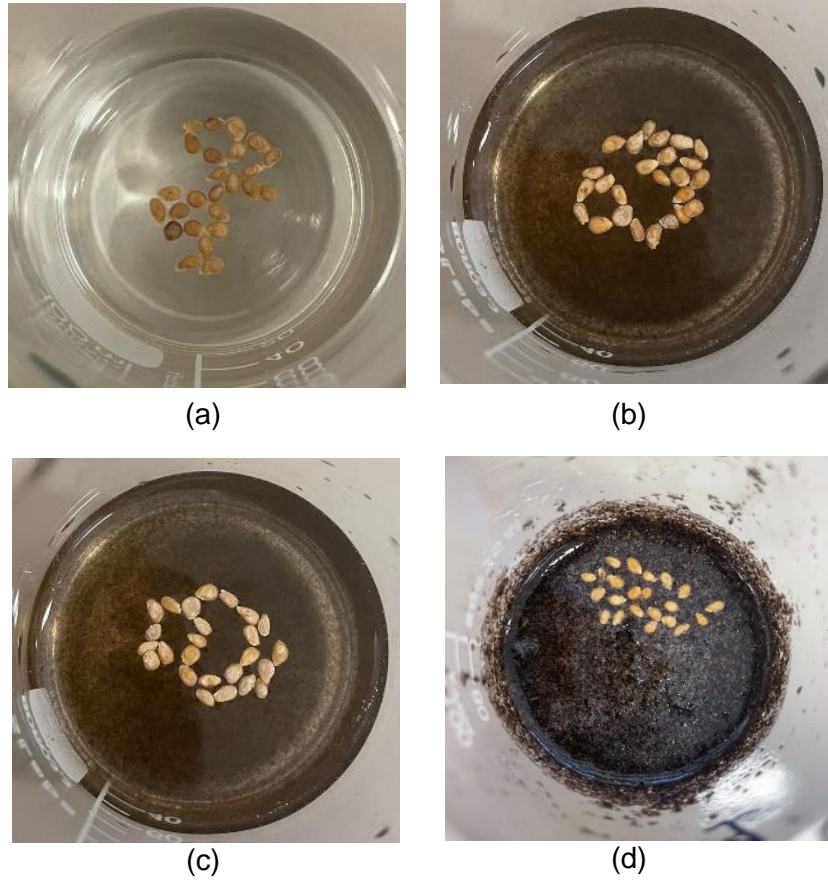


Figura 5.4. (a) Semillas de tomate en agua destilada. (b) Semillas de tomate en agua destilada con 0,1% p/p de aerogel. (c) Semillas de tomate en agua destilada con 0,2% p/p de aerogel. (d) Semillas de tomate en agua destilada con 5% p/p de turba.

Las cuatro composiciones exhibidas en la figura 5.4 mostraron diferentes comportamientos en su composición durante el ensayo, lo cual se le atribuye al porcentaje de aerogel o turba que contenía cada una. Las muestras con turba presentaron una consistencia más densa que las con aerogel y las de control, debido a la concentración que se utilizó.

En la figura 5.5 se presenta la tasa de absorción de agua de las semillas de tomate

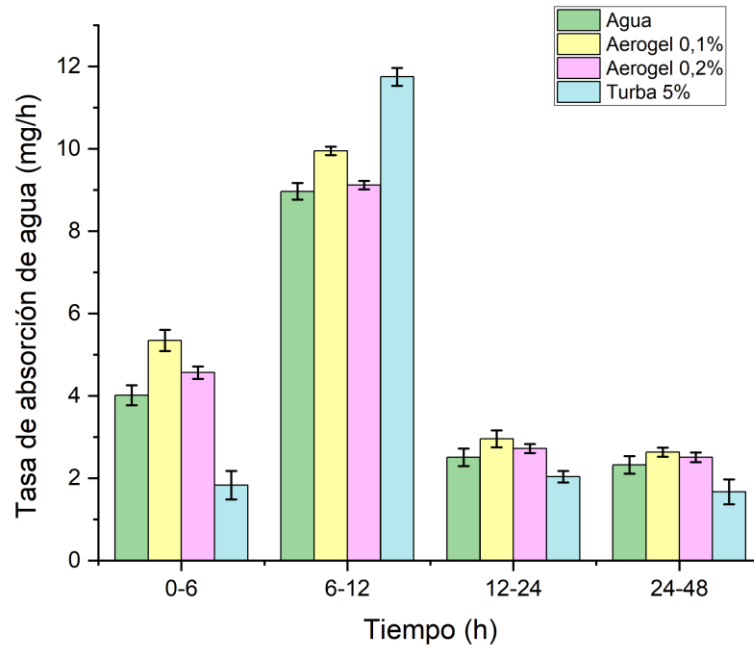


Figura 5.5. Influencia del aerogel a base de GO en la tasa de absorción de agua en las semillas de tomate.

Como se puede ver en la figura 5.5, el intervalo de 6-12 horas fue el que presentó mayor absorción de agua en todas las muestras y luego de ese tiempo la absorción disminuyó, pero la tasa de absorción fue mayor en las muestras que contenían aerogel.

Un estudio sobre la fitotoxicidad en plantas de arroz reportó que la absorción de agua de las semillas de arroz disminuyó significativamente por la concentración de GO a partir de las tres horas y presentaron menor hinchamiento que las semillas control, por lo que se consideró fitotóxico (Chen et al., 2019). Sin embargo, en esta prueba se observó que la tasa de absorción de agua comenzó a disminuir a partir de las 12 horas.

En la figura 5.6 se presenta la absorción de agua acumulada de las semillas de tomate

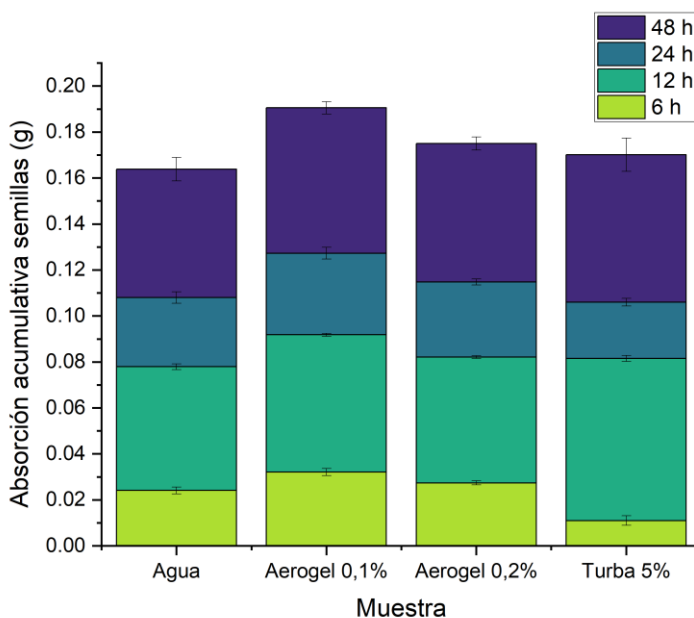


Figura 5.6. Absorción de agua acumulada en las semillas de tomate.

Por otra parte, a partir de la figura 5.6 se obtuvo que las muestras que contenían aerogel a base de GO presentaron la mayor absorción a lo largo del estudio, en comparación a las otras muestras. Por lo que la concentración de GO no afectó en su capacidad de hinchamiento y no se consideró tóxico como en el estudio antes mencionado.

5.4. Propiedades de suelos

Se realizaron pruebas de capacidad de campo, determinación de la humedad inicial y del pH a diferentes concentraciones de aerogel para poder describir las características de los suelos. Los valores promedio de cada parámetro se resumen en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Magnitudes promedio de las características de cada suelo.

Suelo	Capacidad de campo (g H₂O/ g suelo)	Humedad inicial (%)	pH	pH 0,1% aerogel	pH 0,2% aerogel
Arena	0,13 ± 0,60	1,10 ± 0,18	7,83 ± 0,06	7,91 ± 0,03	7,76 ± 0,02
Tierra de hoja	0,68 ± 1,07	29,8 ± 0,07	7,03 ± 0,01	7,03 ± 0,04	7,01 ± 0,02

A partir de la tabla 5.2 se obtuvieron las características necesarias de la arena y tierra de hoja para realizar los estudios de curva de humedad, germinación de semillas y desarrollo de las plántulas de tomate. A pesar de que los valores de capacidades de campo y de humedad no son parámetros comparativos entre cada suelo, es importante su análisis para el cálculo de riego, en donde inicialmente se llegó al 80% de la capacidad de campo de cada suelo teniendo en cuenta la humedad inicial que presentaron.

Los valores de los pH en los diferentes suelos a distintas concentraciones de aerogel cumplen con los rangos en donde se puede desarrollar una plántula de tomate, por lo que ambos suelos son aptos para el estudio. De igual forma, se encuentran dentro de los rangos 5,0 - 8,5 que presenta sus respectivas fichas. Al agregarle aerogel este valor no varía, por lo que se concluyó que el porcentaje añadido de aerogel a los suelos no influye en el parámetro del pH.

Al comparar los valores de capacidad de campo con valores experimentales obtenidos con el modelo propuesto por (Saxton & Rawls, 2006), se obtuvieron diferencias de un 41% para la tierra de hoja y 8% para la arena aproximadamente, siendo sus magnitudes inferiores a las expuestas en la tabla 5.2. No obstante, el modelo depende mucho de los porcentajes de mezcla entre suelos, textura, origen o de pureza que presenten.

5.5. Variación de humedad en los suelos

Se estudió la variación de humedad en tres ciclos, los cuales son iniciados con un riego y finalizados al alcanzar un valor aproximado al porcentaje humedad inicial de cada suelo. Los resultados son presentados en la tabla 5.2.

Dado que la capacidad de campo es distinta en cada suelo, los porcentajes alcanzados a lo largo de la curva también lo son, es por esto que, este análisis comparativo fue exclusivo e independiente en cada suelo y no se comparó entre ellos. Los maceteros sin aditivos representan el control del experimento y tanto estos como los maceteros con turba, fueron parámetros de comparación con respecto a los que contenían aerogel.

Para el riego inicial, se calculó la cantidad de agua necesaria para llegar al 80% de la capacidad de campo teniendo en cuenta la humedad inicial de cada suelo. Así, se obtuvieron los valores presentados en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Cantidad de agua para riego inicial de cada suelo.

Suelo	Riego inicial (ml)
Arena	11
Tierra de hoja	22

Una vez obtenidos los valores del primer ciclo de la curva de humedad de cada suelo con semilla, se calculó, nuevamente, la cantidad de agua necesaria para llegar al 80% de capacidad de campo desde el último valor obtenido del macetero control, para regar cada macetero. Así, toda el agua regada estaría disponible para la planta, dado que esta no escurriría.

5.5.1. Curva de humedad en arena

En la figura 5.7 se presenta la curva de humedad en arena

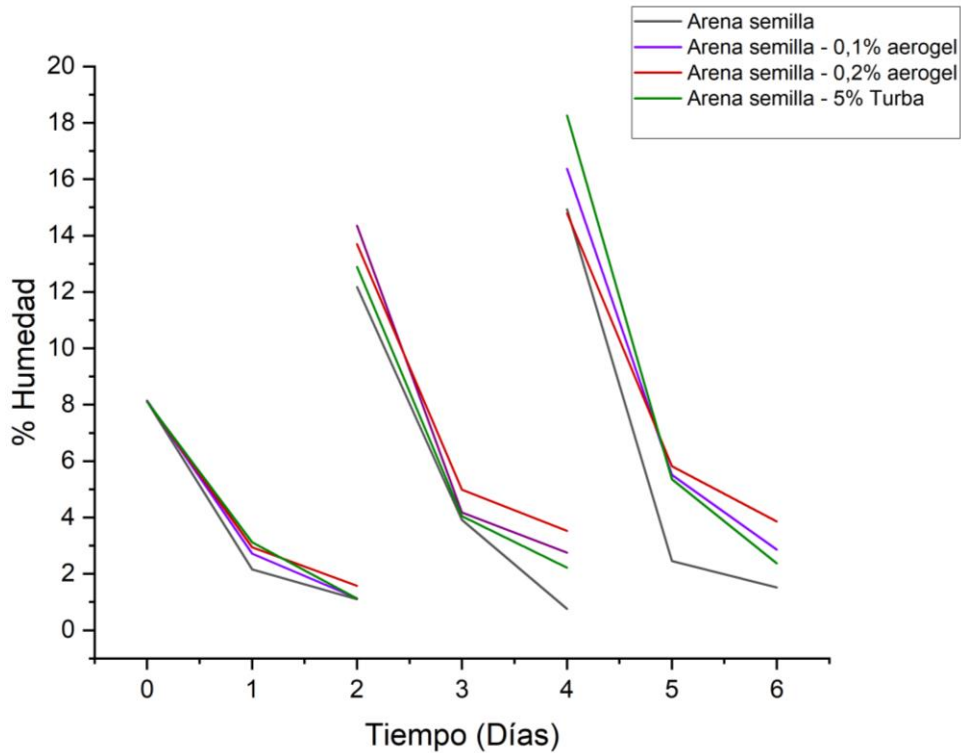


Figura 5.7. Curva de humedad obtenida de la arena.

En cuanto a los valores que presentó la curva de humedad de la arena, se obtuvo un ciclo de 2 días y la cantidad de agua fue de 12 ml para el riego. Al comenzar los siguientes ciclos todos los maceteros presentaron un aumento en el porcentaje de humedad, a pesar de que el cálculo de riego era para llegar al 80% de su capacidad de campo. Lo anterior puede atribuirse a las características de este suelo, el cual presentó una variación de humedad en comparación a la del ambiente y, al buscar el equilibrio, aumentó la humedad en todas las muestras como se refleja en las curvas de la figura 5.7.

Las curvas no presentaron mayores diferencias en la humedad al inicio del estudio, sin embargo, la curva con 0,2% p/p de aerogel presentó un mayor porcentaje de humedad en comparación a las otras muestras a lo largo del estudio. El aumento en el porcentaje de humedad correspondiente a las muestras con 0,2% p/p de aerogel fue de un 155% comparado a la curva control, destacando el efecto relevante del aerogel en la retención de humedad en comparación con las otras condiciones.

Autores como Black (Black et al., 1969) o Yamanaka y Yonetani (Yamanaka & Yonetani, 1999), realizaron mediciones de contenido de humedad en arena en condiciones naturales al aire libre. Los resultados obtenidos fueron similares al primer ciclo de esta investigación. Los valores siguientes no son comparables, dado al riego que se realizó en este estudio.

5.5.2. Curvas de humedad en tierra de hoja

En la figura 5.8. se presenta la curva de humedad en tierra de hoja

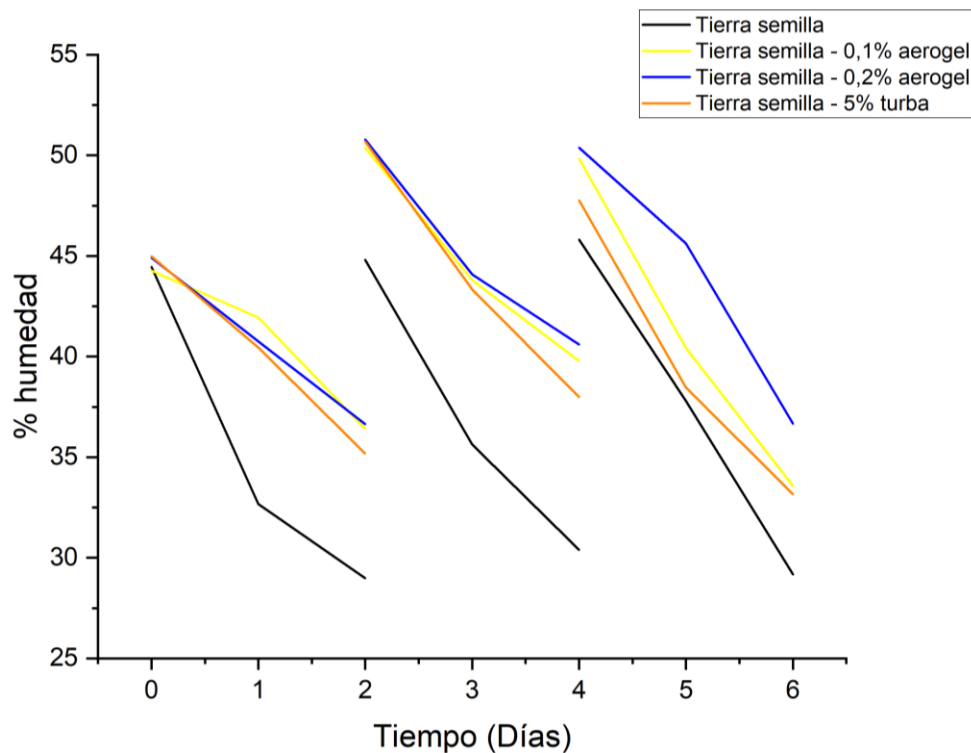


Figura 5.8. Curva de humedad obtenida en tierra de hoja.

A partir de los valores que presentó el macetero control de la curva de humedad de la tierra de hoja, se obtuvo un ciclo de dos días hasta alcanzar una humedad similar a la que presentaba el suelo inicialmente. Así, se determinó que los riegos serían cada dos días y la cantidad de agua de 22 ml.

El macetero control presentó humedades similares al inicio de los tres ciclos, a diferencia de los maceteros que presentan aerogel y los que contenían turba. Al ser regados en cada inicio de ciclo, estos maceteros aumentaron hasta aproximadamente un 5% en su humedad en los siguientes dos ciclos. El macetero que contenía un 0,2% p/p de aerogel mostró la mayor retención promedio de humedad, alcanzando los niveles más altos tanto al inicio como al final de los ciclos de riego. Desde el inicio del experimento, se pudo observar una marcada diferencia entre la curva de este macetero y las demás, incluida la curva control. Esta diferencia se acentuó aún más durante el segundo ciclo aumentando hasta en un 26% su porcentaje de humedad.

Estudios realizados por Blevins (Blevins et al., 1971) muestra las curvas de humedad para suelos franco limonosos en condiciones ambientes, los cuales presentan valores inferiores a los observados al inicio de este estudio. Esta variación puede atribuirse a las distintas composiciones que presenta el suelo y a las condiciones ambientales a las que estuvo expuesto.

En ambos suelos se refleja el efecto que tiene el aerogel en cuanto a su rendimiento, sin embargo, presentó un mayor impacto en arena.

En general, las curvas que contenían tanto turba como aerogel no mostraron mayores diferencias en ambos suelos. Pero, es importante considerar el porcentaje peso/peso utilizado para cada agente absorbente, ya que el aerogel tuvo una concentración 25 veces menor en comparación con la turba en el macetero más concentrado.

5.6. Germinación

Para este estudio se utilizaron semillas previamente germinadas para verificar su viabilidad como se muestra en la figura 5.9. En cada macetero se sembraron dos semillas, en triplicado para cada condición, dando un total de veinticuatro semillas por suelo.



Figura 5.9. Semillas luego de proceso de germinación precoz.

Los resultados obtenidos de la germinación se muestran a continuación.

5.6.1. Germinación de semillas de tomate en arena

En la figura 5.10 se comparó el tiempo de germinación de las semillas de tomate en las cuatro composiciones de macetero en arena.

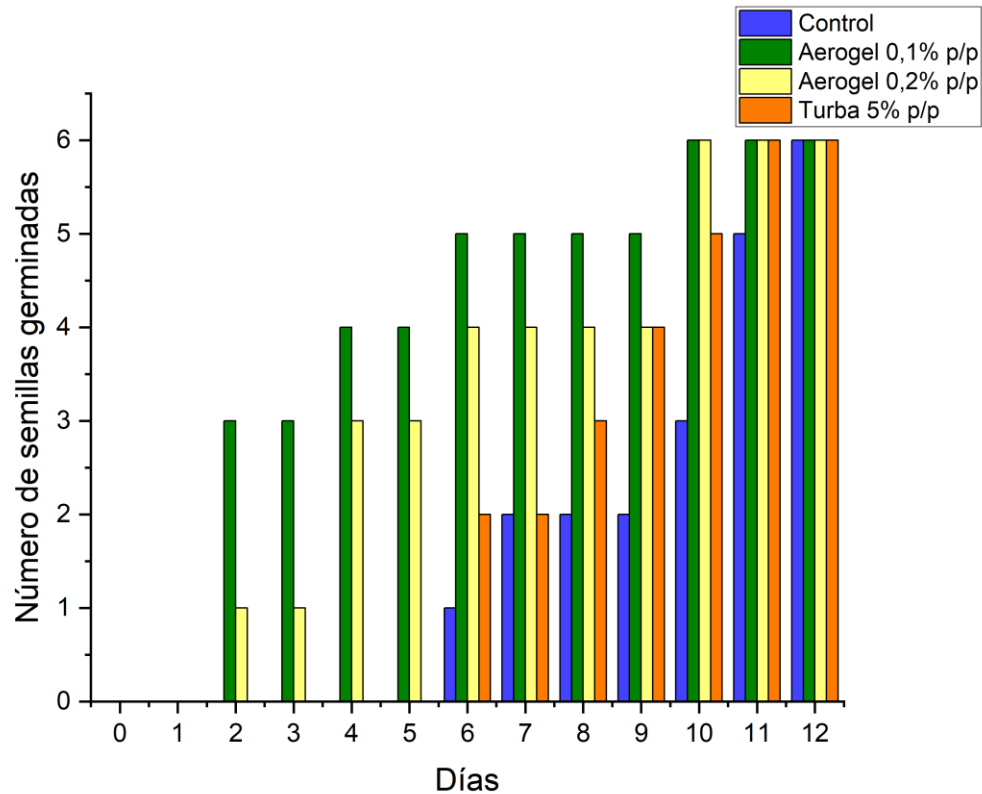


Figura 5.10. Número de semillas germinadas en arena.

El proceso de germinación comenzó el día 2 en los maceteros que contenían aerogel. Al sexto día todas las composiciones presentan al menos una semilla germinada de un total de seis (6) y al día doce (12) ya todas las semillas germinaron, por lo que se dio por finalizado el estudio.

La germinación se consideró adelantada, dado que el tiempo promedio del tomate comprende 8 días aproximadamente según la información entregada por la empresa Ergo® sobre las semillas utilizadas, y a pesar de haber pasado por un proceso previo, el tiempo de germinación sigue siendo menor al indicado por la marca.

Los maceteros que presentaban aerogel a distintas concentraciones fueron los primeros en terminar su proceso de germinación, es decir, que el aerogel a base de óxido de grafeno en la arena tuvo un efecto promotor en este proceso.

5.6.2. Germinación de semillas de tomate en tierra de hoja

En la figura 5.11 se presenta el número de semillas germinadas durante 14 días en tierra de hoja

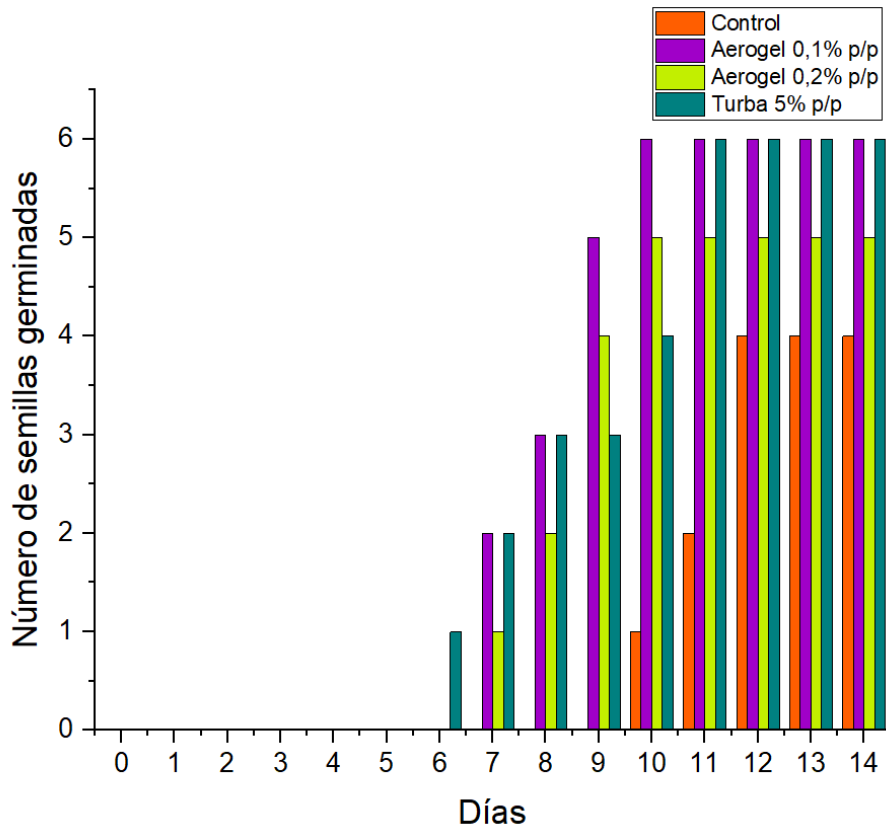


Figura 5.11. Número de semillas germinadas en tierra de hoja.

La germinación comenzó el día 6 en los maceteros que contenían turba. Al décimo día (10) todas las composiciones presentan plántulas en sus maceteros. El estudio en este suelo se dio por finalizado el día catorce (14), al no presentar cambios en el tiempo.

En tierra de hoja no todas las semillas germinaron. En los maceteros control, la germinación total fue de un 0,67% aproximadamente y puede relacionarse con la cantidad de agua disponible que tenía la semilla para absorber, ya que, al no contener un agente retenedor de agua en el macetero, la disponibilidad de este recurso era menor. Es importante mencionar que las semillas pertenecían a maceteros distintos. Podría existir una competencia entre ambas semillas contenidas en el mismo macetero para

obtener el agua suficiente para su desarrollo y en este caso, una de ellas no obtuvo la cantidad de agua suficiente y no logró germinar.

En los maceteros con una concentración de aerogel 0,2% p/p el porcentaje de germinación fue de 0,83%, siendo solo una semilla la que no germinó. Las razones pueden ser variadas, como la concentración de aerogel presente en el macetero, que en esta proporción generaba durezas al ir perdiendo humedad y exigía más energía a la semilla para poder germinar. Otra razón puede ser una cantidad excesiva de agua o que el aerogel haya tenido un efecto negativo para la semilla. Al ocurrir esto sólo a una semilla no se consideró un factor importante.

Se puede apreciar que en ambos suelos si hubo germinación en todas las condiciones de suelo. La velocidad de germinación fue mayor en los maceteros que presentaban aerogel, seguido por los que presentaba turba.

Un estudio indicó que la germinación se retrasó con el aumento de la concentración de grafeno en plantas de tomate, repollo y espinaca roja (Begum et al., 2011a), lo mismo observado en este estudio. En otros experimentos se observó que la tasa de germinación de semillas de arroz disminuyó significativamente en un 10% con el tratamiento de óxido de grafeno (Chen et al., 2019). Sin embargo, hay otros estudios que indican que la presencia de GO a diferentes concentraciones promovió la división celular en la germinación de las semillas de tomate y se obtuvieron brotes más fuertes (Guo et al., 2021a).

5.7. Desarrollo plantas

El efecto de la humedad del suelo sobre las plantas y su rendimiento es vital, la variación de la humedad del suelo en el crecimiento de las plantas refleja su salud, plantas con déficit de agua reducen el crecimiento de tallos y hojas, lo que significa menos azúcar disponible para el crecimiento del fruto y hace más lento el crecimiento del sistema radicular (May-Lara et al., 2011).

A continuación, se muestran los principales resultados respecto al desarrollo de las plantas

5.7.1. Longitud y grosor de tallo

La calidad de una planta se identifica por un tallo vigoroso y alto, que comúnmente está relacionado con la firmeza que le dará a la planta durante su desarrollo y fase de crecimiento (Alvarado et al., 2010). La longitud y grosor de las plantas fueron medidas según lo descrito en la sección 4.7.

5.7.1.1. Longitud y grosor de tallo en arena

En la tabla 5.4 se muestran los valores obtenidos para la longitud y grosor de tallo en arena.

Tabla 5.4. Longitud y grosor de tallo promedio en arena para distintos tratamientos.

Muestra	Longitud tallo (cm)	Grosor tallo (mm)
Control	4,2 ± 0,35 ^a	1,5 ± 0,13 ^a
Turba	5,3 ± 0,46 ^b	1,9 ± 0,16 ^b
0,1% p/p aerogel	7,0 ± 0,22 ^c	2,2 ± 0,18 ^c
0,2% p/p aerogel	7,9 ± 0,25 ^d	2,3 ± 0,06 ^c

Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de comparación de medias LSD.

En la arena los valores máximos en longitud y grosor se presentaron en las muestras con 0,2% p/p de aerogel. En ambos parámetros estudiados las muestras presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$).

En cuanto a la longitud del tallo, se observaron incrementos significativos al comparar con la muestra control, que mostró el valor más bajo. Los porcentajes de aumento fueron del 88% para la muestra con 0,2% p/p de aerogel, del 67% para la muestra con 0,1% p/p de aerogel y del 26% para la muestra con turba.

Por otro lado, al analizar el grosor del tallo, se encontró una relación proporcional con la concentración de aerogel en las muestras. Se obtuvo un aumento del 53% para la muestra con concentración de 0,2% p/p de aerogel y de un 47% para la muestra con concentración de 0,1% p/p de aerogel. En contraste, las muestras que contenían turba

en sus maceteros mostraron un aumento del grosor del tallo más bajo, con un incremento del 27% en comparación con la muestra control.

5.7.1.2. Longitud y grosor de tallo en tierra de hoja

En la tabla 5.5 se muestran los valores obtenidos para la longitud y grosor de tallo en arena.

Tabla 5.5. Longitud y grosor de tallo promedio en tierra de hoja para distintos tratamientos.

Muestra	Longitud tallo (cm)	Grosor tallo (mm)
Control	4,8 ± 0,3 ^a	1,6 ± 0,18 ^a
Turba	5,5 ± 0,3 ^{ab}	1,7 ± 0,16 ^{ab}
0,1% p/p aerogel	6,3 ± 0,2 ^b	1,9 ± 0,02 ^b
0,2% p/p aerogel	6,1 ± 0,3 ^b	2,4 ± 0,01 ^c

Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de comparación de medias Tukey.

A partir del análisis de varianza, existe diferencia estadísticamente significativa en ambos parámetros estudiados ($p < 0,05$). El mayor valor promedio en la longitud de tallo se encontró en las muestras con una concentración de 0,1% p/p de aerogel, mientras que las muestras control presentaron el valor más bajo. Las muestras con un 0,1% p/p de aerogel experimentaron un aumento del 31% en longitud en comparación con las de control, y un incremento del 15% en comparación con las muestras que contenían turba. Además, las plántulas con una mayor concentración de aerogel también mostraron aumentos significativos en longitud en comparación con las de control y las que contenían turba, con incrementos del 27% y 11%, respectivamente.

En cuanto al grosor del tallo, el valor máximo promedio se observó en las plantas con una concentración de 0,2% p/p de aerogel. El aumento en el grosor del tallo, al comparar el valor máximo con las plantas control, las que contenían turba y aquellas con un 0,1% p/p de aerogel, fue de 50%, 41% y 26%, respectivamente.

En un estudio previo, se observó que la longitud de las plántulas de quinoa aumentó significativamente con concentraciones de 4 mg L⁻¹ y 8 mg L⁻¹ de GO (Guo et al., 2019),

mientras que, en plántulas de tomate, un efecto similar se logró con dosis más altas de 20 mg L⁻¹ y 50 mg L⁻¹ de GO (Guo et al., 2021a). En conclusión, el impacto del GO en el crecimiento y longitud de las plantas está estrechamente relacionado con la concentración y duración de la exposición, además de depender de la especie de planta y su etapa de crecimiento (Villagarcía et al., 2012; Zhang et al., 2015).

Finalmente, al analizar la variabilidad de longitud y de grosor en las distintas muestras en los distintos suelos se logró establecer un efecto positivo significativo con la adición de aerogel en ambas concentraciones en los maceteros, aumento el área y la capacidad de transporte.

5.7.2. Longitud y volumen radical

El sistema radical es el encargado de satisfacer diferentes requerimientos de las plantas, como su anclaje, adquisición y transporte de los recursos desde suelo como el agua y nutrientes esenciales. Es por esto, que su tamaño, morfología y arquitectura puede ejercer un control sobre el tamaño y crecimiento de las plantas (Leskovar, 2001). A continuación, se muestran los resultados de longitud y volumen radical obtenidos

5.7.2.1. Longitud radical en arena

Los resultados de longitud en arena son presentados en la tabla 5.6

Tabla 5.6. Longitud de raíz promedio en arena.

Muestra	Longitud raíz (cm)
Control	9,2 ± 1,1 ^{ab}
Turba	7,3 ± 1,3 ^a
0,1% p/p aerogel	10,5 ± 1,2 ^b
0,2% p/p aerogel	10,1 ± 1,5 ^b

Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de comparación de medias LSD.

La mayor longitud radical promedio en arena la presentaron las muestras con 0,1% p/p de aerogel, pero no presentó diferencias significativas con las muestras control ($p < 0,05$).

En la figura 5.12 se puede hacer un estudio visual de las distintas muestras de plantas de tomates desarrolladas en maceteros con distinta concentración de aerogel a base de GO.

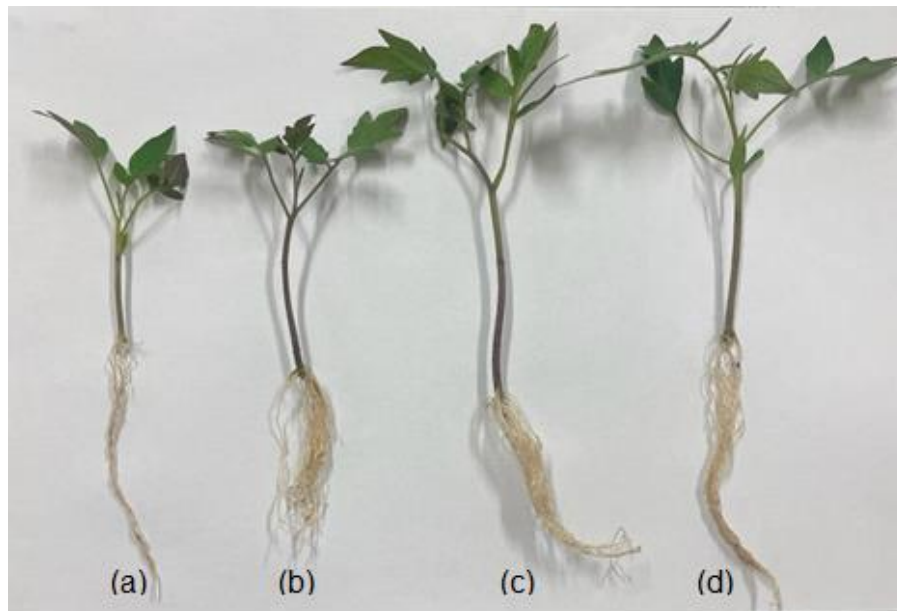


Figura 5.12. Plantas de tomate sembradas en macetero control (a), con 5% p/p de turba (b), con 0,1% p/p de aerogel (c) y con 0,2% p/p de aerogel (d) en arena después de 26 días desde la plantación.

Como se observó en la tabla 5.6 y figura 5.12 el parámetro de longitud radical no tuvo una relación directamente proporcional con el volumen de la raíz. Una raíz que presenta mayor volumen tiene mayores ramificaciones y a su vez una mayor área de absorción para los nutrientes, pero puede no presentar una mayor longitud en sus raíces.

5.7.2.2. Longitud radical en tierra de hoja

Los resultados de longitud en tierra de hoja son presentados en la tabla 5.7

Tabla 5.7. Longitud y volumen de raíz promedio en tierra de hoja.

Muestra	Longitud raíz (cm)
Control	6,5 ± 1,9
Turba	9,7 ± 1,3
0,1% p/p aerogel	9,2 ± 2,0
0,2% p/p aerogel	7,7 ± 2,1

En los resultados de longitud de raíz en tierra de hoja, se obtuvo que en tierra de hoja el mayor promedio obtenido fue en las muestras con tratamiento en turba, pero no hubo diferencias significativas en ninguna de las muestras ($p < 0,05$).

En la figura 5.13 se pueden visualizar distintas muestras de plantas de tomates desarrolladas en tierra de hoja con distintas concentraciones de aerogel

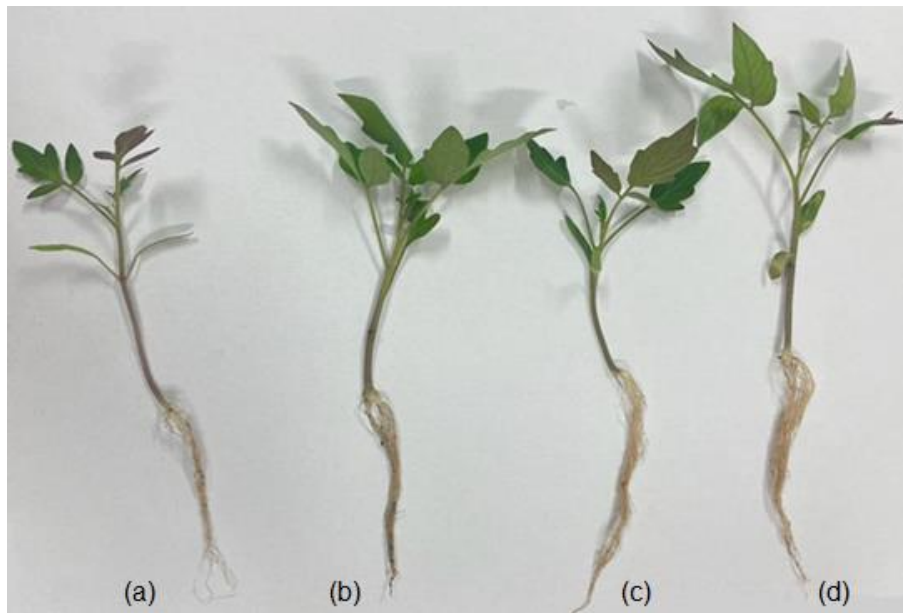


Figura 5.13. Plantas de tomate sembradas en macetero control (a), con 5% p/p de turba (b), con 0,1% p/p de aerogel (c) y con 0,2% p/p de aerogel (d) en tierra de hoja después de 26 días desde la plantación.

El análisis de longitud a partir de los valores de la tabla 5.7 y figura 5.13, es similar al descrito en las muestras de arena. Debido a esto, es que en este estudio los resultados de volumen tuvieron una mayor relevancia que los de longitud. Los volúmenes radiculares se obtuvieron a través de desplazamiento de volumen de agua dentro de una probeta de 50 ml que presentaba graduaciones cada 0,5 ml, por lo que los valores obtenidos fueron aproximados.

5.7.2.3. Volumen radical en arena

En la tabla 5.8 se muestran los resultados para la longitud y volumen radical

Tabla 5.8. *Volumen de raíz promedio en arena.*

Muestra	Volumen raíz (ml)
Control	0,35 ± 0,14 ^a
Turba	0,50 ± 0,40 ^a
0,1% p/p aerogel	1,4 ± 0,25 ^b
0,2% p/p aerogel	1,2 ± 0,11 ^b

Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de comparación de medias LSD.

En arena, las muestras con una concentración de 0,1% p/p de aerogel mostraron el mayor volumen. Al comparar estos resultados con las muestras control y las que contenían turba, se encontró un aumento de 4,7 veces y 2,8 veces, respectivamente, siendo significativamente distintas ($p < 0,05$).

5.7.2.4. Volumen radical en tierra de hoja

En la tabla 5.9 se muestran los resultados para la longitud y volumen radical

Tabla 5.9. Volumen de raíz promedio en tierra de hoja.

Muestra	Volumen raíz (ml)
Control	0,21 ± 0,37 ^a
Turba	0,53 ± 0,41 ^a
0,1% p/p aerogel	1,3 ± 0,28 ^b
0,2% p/p aerogel	1,5 ± 0,34 ^b

Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de comparación de medias LSD.

En tierra de hoja se observó que las muestras con un contenido del 0,2% p/p de aerogel presentaban el mayor volumen radicular, seguidas por las muestras con un 0,1% p/p de aerogel. Al comparar estos valores máximos con las muestras control, se determinó que el volumen radicular era 7,5 veces mayor en el caso del macetero sin aditivo y 3 veces mayor en las muestras con turba, presentando diferencias significativas ($p < 0,05$).

Una investigación demostró que el GO aumento el área superficial total en un 31% en los sistemas de raíces de las plantas de tomate comparación con el control (Guo et al., 2021a). Por otra parte, otro estudio reciente encontró que el oxígeno que contiene los grupos funcionales de GO atraen moléculas de agua, para luego ser transportadas al suelo (He et al., 2018), entregando un indicio que es probable que GO mejora la capacidad de almacenar y transportar agua en el suelo, acelerando así el crecimiento del sistema radicular del tomate (Guo et al., 2021b).

Finalmente, se determinó que existe un efecto positivo al agregar aerogel en ambas concentraciones a los maceteros en los diferentes tipos de suelo, aumentando su volumen radical y a la vez aumentando el área de absorción de la planta.

5.7.3. Área foliar

Para calcular el área foliar aproximada, se separaron las hojas de las plantas y se fotografiaron para poder tener una comparación tanto visual como numérica. Esta comparación no es necesariamente proporcional, dado que una planta podría tener pocas hojas, pero de gran tamaño presentando una mayor área foliar. A continuación, se muestran los resultados del área foliar de las plantas en diferentes tipos de suelos.

5.7.3.1. Área foliar en arena

En la tabla 5.10 se muestran los resultados obtenidos del área foliar en arena,

Tabla 5.10. Área foliar aproximada de muestras en arena.

Muestra	Área foliar (cm ²)
Control	10,5 ± 3,29 ^a
Turba	13,8 ± 2,91 ^a
0,1% p/p aerogel	28,3 ± 3,58 ^b
0,2% p/p aerogel	28,1 ± 2,31 ^b

Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de comparación de medias LSD.

Las muestras que crecieron en maceteros con aerogel exhibieron la mayor área foliar., presentado diferencias significativas con las otras muestras ($p < 0,05$). En comparación con las muestras control, se observó un incremento de aproximadamente 2,7 veces en las muestras con concentración de aerogel en la composición del macetero y de aproximadamente 1,3 veces en las muestras que contenían turba.

En la figura 5.14 se visualizan las hojas pertenecientes a distintas muestras de planta de tomate en arena.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.14. Hojas de planta de tomate en muestra control (a), en muestra de 5% p/p de turba (b), en muestra de 0,1% p/p de aerogel (c), en muestra de 0,2% p/p de aerogel (d) en arena después de 26 días desde la plantación.

Como se observó en la figura 5.14, las muestras que contienen aerogel presentan un mayor número de ramificaciones y hojas en comparación con la muestra control. Además, en estas se aprecian pequeñas hojas que están en proceso de crecimiento, a diferencia de la muestra control que no presentaban brotes de hojas a simple vista.

5.7.3.2. Área foliar en tierra de hoja

En la tabla 5.11 se muestran los resultados obtenidos del área foliar en tierra de hoja.

Tabla 5.11. Área foliar aproximada de muestras en tierra de hoja.

Muestra	Área foliar (cm ²)
Control	6,79 ± 1,42 ^a
Turba	13,4 ± 3,32 ^b
0,1% p/p aerogel	24,9 ± 1,94 ^c
0,2% p/p aerogel	23,2 ± 3,02 ^c

Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de comparación de medias LSD.

Las muestras que presentan aerogel en tierra de hoja muestran una mayor cantidad de hojas y un área foliar más extensa en comparación con las muestras control y las que contenían turba. El incremento en el área foliar de las muestras control es aproximadamente 3,7 veces menor en comparación con los maceteros que contenían aerogel. Por otro lado, la adición de turba también mostró un aumento de este parámetro en aproximadamente 2 veces más.

En la figura 5.15 se visualizan las hojas pertenecientes a distintas muestras de planta de tomate en tierra de hoja.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.15. Hojas de planta de tomate en muestra control (a), en muestra de 5% p/p de turba (b), en muestra de 0,1% p/p de aerogel (c), en muestra de 0,2% p/p de aerogel (d) en tierra de hoja después de 26 días desde la plantación.

En general, las muestras crecidas en arena presentaron una mayor cantidad de hojas y una mayor área foliar en comparación a las crecidas en tierra de hoja. A pesar de que en algunas muestras en las que se tenía mayor concentración de aerogel presentaron posibles efectos fitotóxicos en las plantas de tomate, se consideró que la adición de este retenedor de agua incrementó el área foliar de muestras que la contenían.

Un estudio observó reducciones significativas en el área foliar de plantas de tomate y de otras plantas a diferentes concentraciones de grafeno, indicando que esta reducción dependía de la dosis administrada (Begum et al., 2011a). A partir del estudio mencionado y los resultados obtenidos, se comprueba el potencial que tiene el GO en comparación al grafeno en el crecimiento de las hojas en plantas de tomate.

Finalmente, el aerogel a base de GO presentó mejores resultados que el grafeno al ser suministrado en plantas de tomate, promoviendo la división celular en las hojas de las plantas.

5.7.4. Estudio visual

Al analizar el estado físico de las hojas de las diferentes muestras se pudo visualizar ciertas manchas en muestras que presentaban aerogel a una concentración de 0,2% p/p en tierra de hoja y arena como se muestran en la figura 5.16.



(a)



(b)

Figura 5.16. (a) Planta de tomate con apoptosis en macetero con 0,2% p/p de aerogel en arena. (b) Planta de tomate con apoptosis en macetero con 0,2% p/p de aerogel en tierra de hoja.

Las manchas que se observan en las hojas son evidencia de apoptosis, un proceso de muerte celular que podría tener varias causas, como daños causados por plagas, enfermedades provocadas por patógenos externos o condiciones ambientales adversas (Pérez, 2007). Este fenómeno se presentó en ambas muestras de suelo, específicamente en dos plantas de cada tipo, donde solo una o dos hojas por planta se vieron afectadas. El área afectada representó el 1,1% y 2,8% en cada planta de tierra de hoja, y el 0,5% y 1,7% en cada planta de arena.

El factor común en estas plantas afectadas fue la concentración de aerogel presente en sus maceteros, específicamente en una concentración de 0,2% p/p, a diferencia de las otras condiciones en las que este fenómeno no se evidenció. Dado que todas las plantas

crecieron en el mismo entorno con condiciones ambientales similares, como humedad, temperatura y riego, se descartaron otras posibles causas.

5.7.5. Peso seco

Se puede definir al crecimiento de las plantas como un aumento irreversible y permanente de volumen de una célula, tejido y órganos, generalmente acompañado de un aumento de masa que no es uniforme en toda la planta (Melgarejo, 2010). Debido a esto, es de gran importancia estudiar el peso total seco de cada muestra. En este caso fue el experimento final dado que es una prueba destructiva.

5.7.5.1. Peso seco en arena

Los resultados de esta prueba final en arena se muestran en la tabla 5.12

Tabla 5.12. *Peso seco total de muestras en arena.*

Muestra	Peso seco (mg)
Control	29,7 ± 4,22 ^a
Turba	83,3 ± 8,25 ^b
0,1% p/p aerogel	159 ± 6,21 ^c
0,2% p/p aerogel	110 ± 4,86 ^d

Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de comparación de medias LSD.

Las muestras que contenían un 0,1% p/p de aerogel mostraron la mayor biomasa en arena. Se encontraron diferencias significativas en todas las muestras ($p < 0,05$). Específicamente, las muestras con un 0,1% p/p de aerogel experimentaron un incremento de peso que fue cinco veces mayor que las muestras control, mientras que en las muestras con un 0,2% p/p de aerogel, el incremento fue de aproximadamente tres veces más.

Además, al comparar las muestras que contenían 0,1% p/p de aerogel con las que contenían turba, se observó que las primeras presentaron un incremento de aproximadamente tres veces el peso seco de las muestras con turba.

5.7.5.2. Peso seco en tierra de hoja

Los resultados de esta prueba final en tierra de hoja se muestran en la tabla 5.13

Tabla 5.13. *Peso seco total de muestras en tierra de hoja.*

Muestra	Peso seco (mg)
Control	37,0 ± 7,53 ^a
Turba	43,3 ± 6,28 ^a
0,1% p/p aerogel	71,2 ± 7,15 ^b
0,2% p/p aerogel	66,3 ± 8,36 ^b

Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según la prueba de comparación de medias LSD.

Las muestras con un 0,1% p/p de aerogel mostraron un peso seco mayor, presentando una diferencia significativa con respecto a las muestras control ($p < 0,05$). Se observó que el peso seco de las muestras con aerogel casi se duplicó en comparación con las muestras control.

Se pudo evidenciar que la concentración de aerogel agregada a los maceteros no es proporcional al desarrollo ni crecimiento de la planta de tomate, existiendo posiblemente una concentración dentro o fuera del rango utilizado que sería la “concentración ideal” para maximizar el desarrollo de la planta de tomate. Estos resultados reflejan que luego de cierta concentración ideal la adición de aerogel podría provocar un retardo en el crecimiento de la planta.

En estudios anteriores se demostró que el GO promovió la división celular y la biomasa en las raíces y brotes/tallos de plántulas de tomate (Guo et al., 2021b). Otro estudio concluyó que las plantas de tomate son sensibles a la presencia de grafeno, ya que su peso seco disminuyó hasta en un 92% en comparación al control (Begum et al., 2011a).

Así, se comprueba el potencial que tiene el óxido de grafeno en comparación al grafeno en el aumento de la biomasa en plantas de tomate.

5.8. Análisis microscópico de raíces.

Para analizar microscópicamente la posible toxicidad de los aerogeles a base de GO en la etapa de desarrollo de las plantas de tomate, se analizó su morfología de las raíces utilizando SEM para visualizar probables alteraciones producidas por este aerogel y compararlas con las correspondientes a control.

En la figura 5.17 se muestran imágenes SEM pertenecientes a raíces de muestras en arena.

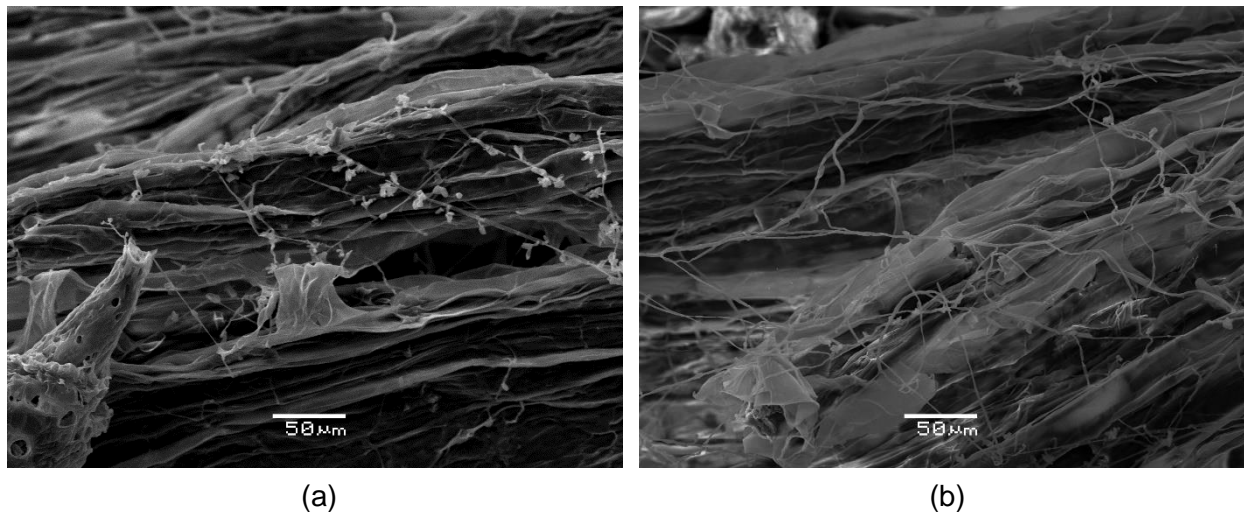


Figura 5.17. Imagen SEM de las raíces de plantas tomate en muestra con 0,1% p/p de aerogel-arena con 50μm (a) y en muestra con 0,2% p/p de aerogel-arena con 50μm (b).

El examen SEM de las plantas no reveló presencia de GO en las raíces de las muestras desarrolladas en arena y en tierra de hoja (Anexo 8.5). La forma de la raíz no presentó cambios morfológicos ni tampoco desprendimientos de sus tejidos, que es un efecto característico del daño de la membrana provocados por estrés en las células vegetales (Méndez et al., 2019).

A diferencia de los resultados obtenidos, un estudio realizado por Begum (Begum et al., 2011b) si se observó una agregación de grafeno en la superficie de la raíz de plantas de tomate, disminuyendo el área de absorción de sustancias y/o nutrientes.

Se concluyó que la adición de GO no presentó efectos fitotóxicos a la raíz en contraste del grafeno.

6. Conclusión

Los aerogeles a base de GO-G destacan por su marcada capacidad de absorción, mostrando una capacidad aproximadamente tres veces superior en comparación a la turba en formato triturado.

El estudio de la capacidad de absorción de agua por parte de las semillas no reveló efectos fitotóxicos en éstas. Las muestras con un 0,1% p/p de aerogel presentaron un mayor hinchamiento, y el intervalo de mayor absorción de agua en todas las muestras fue entre las 6 horas y las 12 horas.

La germinación se observó en todas las condiciones en ambos suelos, pero no en su totalidad en el caso de la tierra de hoja. En el macetero de control, la falta de un agente retenedor pudo haber sido la razón detrás de la falta de germinación, ya que el agua disponible fue insuficiente para estimular el proceso. En cuanto a la semilla que no germinó en la condición con un 0,2% p/p de aerogel, es posible que el exceso de agua disponible o un efecto negativo del aerogel hayan sido las causas de este resultado. En la arena, el aerogel aceleró el proceso de germinación, finalizándose con éxito antes que las muestras de control.

Al analizar la morfología de las plantas de tomate, se observó que las muestras con un 0,1% p/p de aerogel en ambos suelos presentaron un mayor crecimiento en general, seguidas por las muestras con un 0,2% p/p de aerogel. Esto indica que la adición de aerogel en los suelos utilizados en este estudio tuvo un efecto positivo en el desarrollo y crecimiento de las plantas de tomate. Aunque se detectaron algunos efectos fitotóxicos en algunas muestras desarrolladas en maceteros con un 0,2% p/p de aerogel, no se consideraron intensos debido a que el área afectada no fue significativa.

Todos los resultados obtenidos respaldan el potencial beneficioso de los aerogeles a base de GO-G en la agricultura y el crecimiento de las plantas de tomate.

7. Referencias

- Adams, J. C., & Lockaby, B. G. (1987). Commercial produced superabsorbent material increases water-holding capacity of soil medium. *Tree Planters Notes*, 38(1), 24-25.
- Alvarado Ojeda, Andrea, Guajardo Becchi, Felipe, Devia Cartes, Simón. Corporación Nacional Forestal Chile. (2014). Manual de plantación de árboles en áreas urbanas. CONAF. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/29451>
- Aslani, F., Bagheri, S., Muhd Julkapli, N., Juraimi, A. S., Hashemi, F. S. G., & Baghdadi, A. (2014). Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview. *The Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/641759>
- Begum, P., Ikhtiari, R., & Fugetsu, B. (2011b). Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce. *Carbon*, 49(12), 3907-3919. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.05.029>
- Berrio, M. E., Oñate, A., Salas, A., Fernández, K., & Meléndrez, M. F. (2021a). Synthesis and applications of graphene oxide aerogels in bone tissue regeneration: a review. *Materials Today Chemistry*, 20, 100422. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100422>
- Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W., Nonogaki, H., Bewley, J. D., Bradford, K. J., Nonogaki, H. (2013). Synthesis of storage reserves. *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy, 3rd Edition*, 85-131.
- Black, T. A., Gardner, W. R., & Thurtell, G. W. (1969). The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. *Soil Science Society of America Journal*, 33(5), 655-660. <https://doi.org/10.2136/sssaj1969.03615995003300050013x>
- Blevins, R. L., Cook, D., Phillips, S. H., & Phillips, R. E. (1971). Influence of No-tillage on Soil Moisture 1. *Agronomy Journal*, 63(4), 593-596. <https://doi.org/10.2134/agronj1971.00021962006300040024x>

- Borges-Vilches, J., Figueroa, T., Guajardo, S., Meléndrez, M., & Fernández, K. (2020). Development of gelatin aerogels reinforced with graphene oxide by microwave-assisted synthesis: Influence of the synthesis conditions on their physicochemical properties. *Polymer*, *208*. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122951>
- Borges-Vilches, J., Poblete, J., Gajardo, F., Aguayo, C., & Fernández, K. (2021). Graphene oxide/polyethylene glycol aerogel reinforced with grape seed extracts as wound dressing. *Journal of Materials Science*, *56*(28), 16082–16096. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06297-z>
- Brischke, C., & Wegener, F. L. (2019). Impact of water holding capacity and moisture content of soil substrates on the moisture content of wood in terrestrial microcosms. *Forests*, *10*(6). <https://doi.org/10.3390/f10060485>
- Campos Francisco. (2022). *Evaluación del potencial de recuperación hídrico de diferentes suelos mediante el uso de aerogeles de grafeno*. Memoria de título. Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Concepción, Chile.
- Chen, J., Mu, Q., & Tian, X. (2019). Phytotoxicity of graphene oxide on rice plants is concentration-dependent. *Materials Express*, *9*(6), 635-640. <https://doi.org/10.1166/mex.2019.1538>
- Chulim, Á. C., Leobarda, S., Guerrero, G. R., Manuel Ortega Escobar, H., Crespo, E. C., Flores Román, D., Iván, E., Bernal, S., & Molina, A. M. (2014). Germinación y crecimiento de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. en condiciones de salinidad. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Vol. 5).
- Colla, G., Casa, R., Lo Cascio, B., Saccardo, F., Temperini, O., & Leoni, C. (1998). Responses of processing tomato to water regime and fertilization in Central Italy. In *VI International Symposium on Processing Tomato & Workshop on Irrigation & Fertigation of Processing Tomato 487* (pp. 531-536).
- Costanzo, M., Bonel, B., & Montico, S., (2009). Efecto de la variabilidad climática sobre la producción de bioenergía a partir de maíz (*Zea mays*, L.). *Revista de investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias*, XV.

- Domínguez, E., Leod, C., Águila, K., Ojeda, A., & Ivelic-Sáez, J. (2017). *Cómo utilizar la turba rubia de Sphagnum en horticultura*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Kampenaike. <https://www.researchgate.net/publication/323836297>
- Dreyer, D. R., Park, S., Bielawski, C. W., & Ruoff, R. S. (2010). The chemistry of graphene oxide. *Chem. Soc. Rev*, 39, 228-240. <https://doi.org/10.1039/b917103g>
- Dreyer, D. R., Todd, A. D., & Bielawski, C. W. (2014). Harnessing the chemistry of graphene oxide. *Chemical Society Reviews*, 43(15), 5288-5301. <https://doi.org/10.1039/c4cs00060a>
- ElKhatat, A. M., & Al-Muhtaseb, S. A. (2011). Advances in tailoring resorcinol-formaldehyde organic and carbon gels. *Advanced materials*, 23(26), 2887-2903. <https://doi.org/10.1002/adma.201100283>
- FAO. (2013). Reutilización del agua en la agricultura: ¿beneficios para todos?. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/017/i1629s/i1629s.pdf> (Consultado: 22 abril 2023)
- Figuroa, T., Carmona, S., Guajardo, S., Borges, J., Aguayo, C., & Fernández, K. (2021). Synthesis and characterization of graphene oxide chitosan aerogels reinforced with flavan-3-ols as hemostatic agents. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 197, 111398. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.111398>
- Flaño, A. (2013). Situación del tomate para consumo fresco. Recuperado de: https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2013/08/11729_ArtTomateFresco2013.pdf
- Gerardo Bocco, Quetzalcóatl Orozco Ramírez, Alina Álvarez Larrain, Berenice Solis Castillo, Carlos Dobler-Morales, El estudio del impacto de la sequía en pequeñas comunidades rurales de México, *Biblio 3w: revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales*: Vol. 26, Núm. 1 (2021)
- Georgakilas, V. (2014). Functionalization of graphene by other carbon nanostructures. *Functionalization of Graphene*, 255-282.

- Guo, F., Jiang, Y., Xu, Z., Xiao, Y., Fang, B., Liu, Y., Gao, W., Zhao, P., Wang, H., & Gao, C. (2018). Highly stretchable carbon aerogels. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03268-y>
- Guo, X. H., Zhao, J. G., Wen, R. Y., Liu, J. X., Qiao, L. X., Pang, X., Tang, Y. H. (2019). Effects of graphene on root morphology and biomass of Quinoa seedlings. *J. Shanxi Agric. Sci*, 47, 1395-1398. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2481.2019.08.22>
- Guo, X., Zhao, J., Wang, R., Zhang, H., Xing, B., Naeem, Wu, J. (2021). Effects of graphene oxide on tomato growth in different stages. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162, 447-455. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.013>
- He, Y., Hu, R., Zhong, Y., Zhao, X., Chen, Q., & Zhu, H. (2018). Graphene oxide as a water transporter promoting germination of plants in soil. *Nano Research*, 11, 1928-1937. <https://doi.org/10.1007/s12274-017-1810-1>
- Leskovar, D.I. (2001). PRODUCCIÓN Y ECOFISIOLOGÍA DEL TRASPLANTE HORTÍCOLA.
- Kim, J., Cote, L. J., & Huang, J. (2012). Two dimensional soft material: new faces of graphene oxide. *Accounts of chemical research*, 45(8), 1356-1364. <https://doi.org/10.1021/ar300047s>
- Lai, F., Wissing, S. A., Müller, R. H., & Fadda, A. M. (2006). Artemisia arborescens L essential oil-loaded solid lipid nanoparticles for potential agricultural application: preparation and characterization. *Aaps Pharmscitech*, 7, E10-E18. Recuperado de: <http://www.aapspharmscitech.org> (Consultado: 25 mayo 2023).
- Levitt, J. (1980). Responses of Plants to Environmental Stress, Volume 1: Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses. Academic Press..
- Lidén, G. (2011). The European commission tries to define nanomaterials. *Annals of Occupational Hygiene*, 55(1), 1-5. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meq092>
- López-Olivari, Rafael (ed.) (2016) *Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el sur de Chile* [en línea]. Temuco, Chile: Boletín INIA - Instituto de

Investigaciones Agropecuarias. no. 340. Recuperado de:
<https://hdl.handle.net/20.500.14001/6558> (Consultado: 12 abril 2023).

Marcano, D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L. B., Lu, W., & Tour, J. M. (2010). Improved synthesis of graphene oxide. *ACS Nano*, 4(8), 4806–4814. <https://doi.org/10.1021/nn1006368>

Marcos Valiente, Óscar. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, (26), 59–80. <https://doi.org/10.14198/INGEO2001.26.06>

May-Lara, C., Pérez-Gutiérrez, A., Ruiz-Sánchez, E., Ic-Caamal, A. E., & García-Ramírez, A. (2011). Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum chinense* Jacq. y su relación con el desarrollo de *Bemisia tabaci* Genn. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(3), 1039-1045.

Melgarejo, L. M., Romero, M., Hernández, S., Barrera, J., Solarte, M. E., Suárez, D., Pérez, W. (2010). Laboratorio de Fisiología y Bioquímica Vegetal. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia.

Méndez-Espinoza, C., & Vallejo Reyna, M. Á. (2019). Response mechanisms to abiotic stress: Towards a forest species perspective. In *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* (Vol. 10, Issue 56). National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.567>

Méndez Ontiveros, R. (2018). *Salinidad y óxido de grafeno: su influencia en la germinación de semillas y desarrollo de plántulas de dos variedades de frijol (Phaseolus vulgaris L.)* (Master's thesis).

Nair, R., Varghese, S. H., Nair, B. G., Maekawa, T., Yoshida, Y., & Kumar, D. S. (2010). Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant science*, 179(3), 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.04.012>

Orzolek, M. D. (2018). Use of Hydrophilic Polymers in Horticulture. *HortTechnology*, 3(1), 41–44. <https://doi.org/10.21273/horttech.3.1.41>

- Pérez Delgado, Y., Galindo Castro, I., & Arvelo, F. (2007). La muerte celular programada en las plantas: ¿es semejante a la "apoptosis" en animales? *Interciencia*, 32(12),812-819. ISSN: 0378-1844. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33913503> (Consultado: 26 abril 2023)
- Phiri, J., Johansson, L. S., Gane, P., & Maloney, T. (2018). A comparative study of mechanical, thermal and electrical properties of graphene-, graphene oxide-and reduced graphene oxide-doped microfibrillated cellulose nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 147, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.018>
- Reyna, T., Reyna, S., Lábaque, M., Fulginiti, F., Riha, C., & Linares, J. (2011). Importancia de la determinación de la humedad en estudios de infiltración y escorrentía superficial para períodos largos. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 6(2), 91-110. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Saha, A., Sekharan, S., & Manna, U. (2020). Superabsorbent hydrogel (SAH) as a soil amendment for drought management: A review. In *Soil and Tillage Research* (Vol. 204). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104736>
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
- Schmidt, G.; Benítez-Sanz, C. (2012): Topic report on: Assessment of Water Scarcity and Drought aspects in a selection of European Union River Basin Management Plans. En colaboración con WFD CIS Expert Groupon on Water Scarcity & Drought. edit. por Study by Intecsa-Inarsa for the European Commission. Recuperado de: <http://bcn.cl/248mm>. (Consultado: 26 marzo 2023).
- Shakoor, A. (2018). Characterization of Soils. En P. T. Bobrowsky & B. Marker (Eds.), *Encyclopedia of Engineering Geology* (pp. 108–114). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_48

- Teepe, R., Dilling, H., & Beese, F. (2003). Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(1), 111–119. <https://doi.org/10.1002/jpln.200390001>
- Torres P., Andrea (ed.) (2017) *Manual de cultivo del Tomate bajo invernadero* [en línea]. La Cruz, Chile: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 377. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6708> (Consultado: 27 julio 2023).
- UNESCO World Water Assessment Programme. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos: El valor del agua. UNESCO Publishing. UNESCO.
- USDA-Natural Resources Conservation Service - Soil Survey Staff. (2014b). 4 - Identification of the Taxonomic Class of a Soil. En D. W. Smith (Ed.), *Keys to Soil Taxonomy* (12th ed., pp. 37–41). Independently Published. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Vargas Astudillo, D. (2017). Síntesis de óxido de grafeno reducido y aminado químicamente y su influencia en las propiedades eléctricas y mecánicas de nanocompuestos a base de caucho natural. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144751>
- Villagarcia, H., Dervishi, E., De Silva, K., Biris, A. S., & Khodakovskaya, M. V. (2012). Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. *Small*, 8(15), 2328–2334. <https://doi.org/10.1002/sml.201102661>
- Wang, S., Tristan, F., Minami, D., Fujimori, T., Cruz-Silva, R., Terrones, M., Takeuchi, K., Teshima, K., Rodríguez-Reinoso, F., Endo, M., & Kaneko, K. (2014). Activation routes for high surface area graphene monoliths from graphene oxide colloids. *Carbon*, 76, 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.04.071>

- Wei, D., Liu, X., Lv, S., Liu, L., Wu, L., Li, Z., & Hou, Y. (2022). Fabrication, structure, Performance, and Application of Graphene-Based Composite Aerogel. *Materials*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/ma15010299>
- Yamanaka, T., & Yonetani, T. (1999). *Dynamics of the evaporation zone in dry sandy soils*. *Journal of Hydrology*, 217(1-2), 135-148. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00021-9)
- Yolcubal, I., Brusseau, M. L., Artiola, J. F., Wierenga, P., & Wilson, L. G. (2004). 12 - ENVIRONMENTAL PHYSICAL PROPERTIES AND PROCESSES. En J. F. Artiola, I. L. Pepper, & M. L. Brusseau (Eds.), *Environmental Monitoring and Characterization* (pp. 207–239). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012064477-3/50014-X>
- Zhang, M., Gao, B., Chen, J., & Li, Y. (2015). Effects of graphene on seed germination and seedling growth. *Journal of Nanoparticle Research*, 17(2). <https://doi.org/10.1007/s11051-015-2885-9>
- Zhang, N., Ring, Q., Huang, G., Han, X., Cheng, Y., & Xu, W. (2006). Transport characteristics of wheat germ agglutinin-modified insulin-liposomes and solid lipid nanoparticles in a perfused rat intestinal model. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 6(9–10), 2959–2966. <https://doi.org/10.1166/jnn.2006.425>
- Zhang, Y., Guan, J., Wu, J., Ding, S., Yang, J., Zhang, J., Dong, A., & Deng, L. (2019). N-alkylated chitosan/graphene oxide porous sponge for rapid and effective hemostasis in emergency situations. *Carbohydrate Polymers*, 219, 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.05.028>
- Zhao, J., Liu, L., & Li, F. (2015). *Graphene oxide: physics and applications* (Vol. 1, p. 161). London, UK:Springer.
- Zolezzi Iturra, C. (2017). Efecto del grado de oxidación del óxido de grafeno sobre la remoción de contaminantes solubles y particulados. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148988>

Zotarelli, L., Dukes, M. D., & Morgan, K. T. (2022). *Interpretación del Contenido de la Humedad del Suelo para Determinar Capacidad de Campo y Evitar Riego Excesivo en Suelos Arenosos Utilizando Sensores de Humedad 1 Capacidad del suelo para almacenar agua*. <http://edis.ifas.ufl.edu/ae266>

8. Anexos

8.1. Composición vasos precipitados para absorción de semillas.

Tabla 8.1. Composición vasos precipitados para absorción de semillas

Muestra	Cantidad agua (g)	Peso aerogel (g)	Peso turba (g)	% p/p
Agua	50	-	-	-
Aerogel	50	0,05	-	0,10
	50	0,10	-	0,20
Turba	50	-	2,63	5,00

8.2. Composición maceteros

Tabla 8.2. Composición macetero en tierra de hoja.

Tipo de suelo	Descripción	Peso suelo (g)	Peso aerogel (g)	Peso turba (g)	% p/p
Tierra de hoja	Control	90	-	-	-
	Aerogel	90	0,09	-	0,10
		90	0,18	-	0,20
	Turba	90	-	4,74	5,00
	Reposición 1	90	-	-	-
	Reposición 2	90	0,09	-	0,10
	Reposición 3	90	0,18	-	0,20
	Reposición 4	90	-	4,74	5,00

Tabla 8.3. Composición macetero en arena.

Tipo de suelo	Descripción	Peso suelo (g)	Peso aerogel (g)	Peso turba (g)	% p/p
Arena	Control	130	-	-	-
	Aerogel	130	0,13	-	0,10
		130	0,26	-	0,20
	Turba	130	-	6,84	5,00
	Reposición 1	130	-	-	-
	Reposición 2	130	0,13	-	0,10
	Reposición 3	130	0,26	-	0,20
	Reposición 4	130	-	6,84	5,00

8.3. Desviación estándar de las curvas de humedad

Tabla 8.4. Desviación estándar de la curva de humedad en los tres ciclos en tierra de hoja.

Día	TS	TS - 0,1%	TS - 0,2%	TS-TR
Primer ciclo				
0	2,50	1,08	2,12	1,95
1	2,27	3,76	1,69	1,86
2	1,14	2,18	1,67	1,61
Segundo ciclo				
2	3,58	1,71	2,47	4,15
3	4,98	2,99	1,06	2,70
4	5,38	3,68	1,63	0,47
Tercer ciclo				
4	5,98	3,86	1,48	2,53
5	5,50	2,48	1,11	1,70
6	1,30	3,50	5,66	1,09

Simbología: TS= Tierra/semilla y TR= turba

Tabla 8.5. Desviación estándar de la curva de humedad en los tres ciclos en arena.

Día	AS	AS - 0,1%	AS - 0,2%	AS-TR
Primer ciclo				
0	1,03	1,35	1,39	3,49
1	2,05	3,18	3,59	2,82
2	2,02	3,19	2,28	2,98
Segundo ciclo				
2	1,35	1,59	4,08	2,26
3	1,19	1,81	2,29	2,95
4	1,24	1,37	2,52	1,01
Tercer ciclo				
4	1,79	1,63	1,72	3,96
5	2,68	1,83	1,57	2,23
6	2,00	2,27	2,08	3,65

Simbología: AS= Arena/semilla y TR= turba

8.4. Tratamiento estadístico de datos

8.4.1. Análisis de varianza absorción de agua en aerogel

Tabla 8.6. Resumen ANOVA multifactorial para absorción de agua en semillas.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	319,74	1	319,74	940,41	0,0000
Intra grupos	1,36	4	0,34		
Total (Corr.)	321,1	5			

8.4.2. Análisis de varianza absorción de agua en semillas

Tabla 8.7. Resumen ANOVA multifactorial para absorción de agua en semillas.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: tiempo	154.066	3	51.3552	42.66	0.0000
B: composición	1.90086	3	0.633619	0.53	0.6751
RESIDUOS	10.8341	9	1.20379		
TOTAL (CORREGIDO)	166.801	15			

8.4.3. Análisis de varianza desarrollo plantas

Los resultados de los ANOVAS realizados para los datos obtenidos son expuesto a continuación.

Longitud de tallo en arena

Tabla 8.8. Resumen ANOVA para longitud de tallo en arena.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	24,9	3	8,3	61,48	0,0000
Intra grupos	1,08	8	0,135		
Total (Corr.)	25,98	11			

Tabla 8.9. Prueba múltiples rangos para longitud de tallo en arena.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	4,2	X
turba	3	5,3	X
0,1% p/p aerogel	3	7,0	X
0,2% p/p aerogel	3	7,9	X

Tabla 8.10. Prueba múltiples rangos para longitud de tallo en arena.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba	*	-1,1	0,691803
control - 0,1% p/p aerogel	*	-2,8	0,691803
control - 0,2% p/p aerogel	*	-3,7	0,691803
turba - 0,1% p/p aerogel	*	-1,7	0,691803
turba - 0,2% p/p aerogel	*	-2,6	0,691803
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel	*	-0,9	0,691803

*indica una diferencia significativa.

Longitud de tallo en tierra de hoja

Tabla 8.11. Resumen ANOVA para longitud de tallo en tierra de hoja.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	4,06909	3	1,35636	17,91	0,0012
Intra grupos	0,53	7	0,0757143		
Total (Corr.)	4,59909	10			

Tabla 8.12. Prueba múltiples rangos para longitud de tallo en tierra de hoja.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	4,8	X
turba	2	5,5	XX
0,2% p/p aerogel	3	6,1	X
0,1% p/p aerogel	3	6,3	X

Tabla 8.13. Prueba múltiples rangos para longitud de tallo en tierra de hoja.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba		-0,7	0,83009
control - 0,1% p/p aerogel	*	-1,5	0,742455
control - 0,2% p/p aerogel	*	-1,3	0,742455
turba - 0,1% p/p aerogel		-0,8	0,83009
turba - 0,2% p/p aerogel		-0,6	0,83009
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel		0,2	0,742455

*indica una diferencia significativa.

Grosor de tallo en arena

Tabla 8.14. Resumen ANOVA para grosor de tallo en arena.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	1,2063	3	0,4021	20,49	0,0004
Intra grupos	0,157	8	0,019625		
Total (Corr.)	1,3633	11			

Tabla 8.15. Prueba múltiples rangos para grosor de tallo en arena.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	1,53	X
turba	3	1,91	X
0,1% p/p aerogel	3	2,24	X
0,2% p/p aerogel	3	2,34	X

Tabla 8.16. Prueba múltiples rangos para grosor de tallo en arena.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba	*	-0,38	0,263767
control - 0,1% p/p aerogel	*	-0,71	0,263767
control - 0,2% p/p aerogel	*	-0,81	0,263767
turba - 0,1% p/p aerogel	*	-0,33	0,263767
turba - 0,2% p/p aerogel	*	-0,43	0,263767
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel		-0,1	0,263767

*indica una diferencia significativa.

Grosor de tallo en tierra de hoja

Tabla 8.17. Resumen ANOVA para grosor de tallo en tierra de hoja.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,9831	3	0,3277	22,41	0,0003
Intra grupos	0,117	8	0,014625		
Total (Corr.)	1,1001	11			

Tabla 8.18. Prueba múltiples rangos para grosor de tallo en tierra de hoja.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	1,62	X
turba	3	1,71	XX
0,1% p/p aerogel	3	1,85	X
0,2% p/p aerogel	3	2,36	X

Tabla 8.19. Prueba múltiples rangos para grosor de tallo en tierra de hoja.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba		-0,09	0,2277
control - 0,1% p/p aerogel	*	-0,23	0,2277
control - 0,2% p/p aerogel	*	-0,74	0,2277
turba - 0,1% p/p aerogel		-0,14	0,2277
turba - 0,2% p/p aerogel	*	-0,65	0,2277
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel	*	-0,51	0,2277

*indica una diferencia significativa.

Longitud de raíz en arena

Tabla 8.20. Resumen ANOVA para longitud de raíz en arena.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	18,2625	3	6,0875	3,69	0,0419
Intra grupos	13,18	8	1,6475		
Total (Corr.)	31,4425	11			

Tabla 8.21. Prueba múltiples rangos para longitud de raíz en arena.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
turba	3	7,3	X
control	3	9,2	XX
0,2% p/p aerogel	3	10,1	X
0,1% p/p aerogel	3	10,5	X

Tabla 8.22. Prueba múltiples rangos para longitud de raíz en arena.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba		1,9	2,41673
control - 0,1% p/p aerogel		-1,3	2,41673
control - 0,2% p/p aerogel		-0,9	2,41673
turba - 0,1% p/p aerogel	*	-3,2	2,41673
turba - 0,2% p/p aerogel	*	-2,8	2,41673
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel		0,4	2,41673

*indica una diferencia significativa.

Longitud de raíz en tierra de hoja

Tabla 8.23. Resumen ANOVA para longitud de raíz en tierra de hoja.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	19,1025	3	6,3675	1,86	0,2151
Intra grupos	27,42	8	3,4275		
Total (Corr.)	46,5225	11			

Tabla 8.24. Prueba múltiples rangos para longitud de tallo en tierra de hoja.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	6,5	X
0,2% p/p aerogel	3	7,7	X
0,1% p/p aerogel	3	9,2	X
turba	3	9,7	X

Tabla 8.25. Prueba múltiples rangos para longitud de raíz en tierra de hoja.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba		-3,2	3,48581
control - 0,1% p/p aerogel		-2,7	3,48581
control - 0,2% p/p aerogel		-1,2	3,48581
turba - 0,1% p/p aerogel		0,5	3,48581
turba - 0,2% p/p aerogel		2,0	3,48581
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel		1,5	3,48581

*indica una diferencia significativa.

Volumen de raíz en arena

Tabla 8.26. Resumen ANOVA para volumen de raíz en arena.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2,55	3	0,85	12,59	0,0021
Intra grupos	0,54	8	0,0675		
Total (Corr.)	3,09	11			

Tabla 8.27. Prueba múltiples rangos para volumen de raíz en arena.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	0,3	X
turba	3	0,5	X
0,2% p/p aerogel	3	1,2	X
0,1% p/p aerogel	3	1,4	X

Tabla 8.28. Prueba múltiples rangos para volumen de raíz en arena.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba		-0,2	0,489179
control - 0,1% p/p aerogel	*	-1,1	0,489179
control - 0,2% p/p aerogel	*	-0,9	0,489179
turba - 0,1% p/p aerogel	*	-0,9	0,489179
turba - 0,2% p/p aerogel	*	-0,7	0,489179
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel		0,2	0,489179

*indica una diferencia significativa.

Volumen de raíz en tierra de hoja

Tabla 8.29. Resumen ANOVA para volumen de raíz en tierra de hoja.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3,5025	3	1,1675	9,36	0,0054
Intra grupos	0,998	8	0,12475		
Total (Corr.)	4,5005	11			

Tabla 8.30. Prueba múltiples rangos para volumen de raíz en tierra de hoja.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	0,2	X
turba	3	0,5	X
0,1% p/p aerogel	3	1,3	X
0,2% p/p aerogel	3	1,5	X

Tabla 8.31. Prueba múltiples rangos para volumen de raíz en tierra de hoja.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba		-0,3	0,665022
control - 0,1% p/p aerogel	*	-1,1	0,665022
control - 0,2% p/p aerogel	*	-1,3	0,665022
turba - 0,1% p/p aerogel	*	-0,8	0,665022
turba - 0,2% p/p aerogel	*	-1,0	0,665022
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel		-0,2	0,665022

*indica una diferencia significativa.

Área foliar en arena

Tabla 8.32. Resumen ANOVA para área foliar en arena.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	785,923	3	261,974	27,99	0,0001
Intra grupos	74,8894	8	9,36118		
Total (Corr.)	860,813	11			

Tabla 8.33. Prueba múltiples rangos para área foliar en arena.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	10,51	X
turba	3	13,82	X
0,2% p/p aerogel	3	28,09	X
0,1% p/p aerogel	3	28,27	X

Tabla 8.34. Prueba múltiples rangos para área foliar en arena.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba		-3,31	5,76077
control - 0,1% p/p aerogel	*	-17,76	5,76077
control - 0,2% p/p aerogel	*	-17,58	5,76077
turba - 0,1% p/p aerogel	*	-14,45	5,76077
turba - 0,2% p/p aerogel	*	-14,27	5,76077
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel		0,18	5,76077

*indica una diferencia significativa.

Área foliar en tierra de hoja

Tabla 8.35. Resumen ANOVA para área foliar en tierra de hoja.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	653,599	3	217,866	33,62	0,0001
Intra grupos	51,8456	8	6,4807		
Total (Corr.)	705,445	11			

Tabla 8.36. Prueba múltiples rangos para área foliar en tierra de hoja.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	6,79	X
turba	3	13,35	X
0,2% p/p aerogel	3	23,22	X
0,1% p/p aerogel	3	24,85	X

Tabla 8.37. Prueba múltiples rangos para área foliar en tierra de hoja.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba	*	-6,56	4,79321
control - 0,1% p/p aerogel	*	-18,06	4,79321
control - 0,2% p/p aerogel	*	-16,43	4,79321
turba - 0,1% p/p aerogel	*	-11,5	4,79321
turba - 0,2% p/p aerogel	*	-9,87	4,79321
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel		1,63	4,79321

*indica una diferencia significativa.

Peso seco en arena

Tabla 8.38. Resumen ANOVA para peso seco en arena.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	26151,2	3	8717,07	236,67	0,0000
Intra grupos	294,66	8	36,8325		
Total (Corr.)	26445,9	11			

Tabla 8.39. Prueba múltiples rangos para peso seco en arena.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	29,7	X
turba	3	83,3	X
0,2% p/p aerogel	3	110,3	X
0,1% p/p aerogel	3	158,9	X

Tabla 8.40. Prueba múltiples rangos para peso seco en arena.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba	*	-53,6	11,427
control - 0,1% p/p aerogel	*	-129,2	11,427
control - 0,2% p/p aerogel	*	-80,6	11,427
turba - 0,1% p/p aerogel	*	-75,6	11,427
turba - 0,2% p/p aerogel	*	-27,0	11,427
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel	*	48,6	11,427

*indica una diferencia significativa.

Peso seco en tierra de hoja

Tabla 8.41. Resumen ANOVA para peso seco en tierra de hoja.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2549,43	3	849,81	15,66	0,0010
Intra grupos	434,18	8	54,2725		
Total (Corr.)	2983,61	11			

Tabla 8.42. Prueba múltiples rangos para peso seco en tierra de hoja.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
control	3	37,0	X
turba	3	43,3	X
0,2% p/p aerogel	3	66,3	X
0,1% p/p aerogel	3	71,2	X

Tabla 8.43. Prueba múltiples rangos para peso seco en tierra de hoja.

Contraste	Sig	Diferencia	+/- Límites
	.		
control - turba		-6,3	13,8709
control - 0,1% p/p aerogel	*	-34,2	13,8709
control - 0,2% p/p aerogel	*	-29,3	13,8709
turba - 0,1% p/p aerogel	*	-27,9	13,8709
turba - 0,2% p/p aerogel	*	-23,0	13,8709
0,1% p/p aerogel - 0,2% p/p aerogel		4,9	13,8709

*indica una diferencia significativa.

8.5. Imágenes SEM de las raíces.

A continuación, se presentan las imágenes SEM de las muestras control en arena

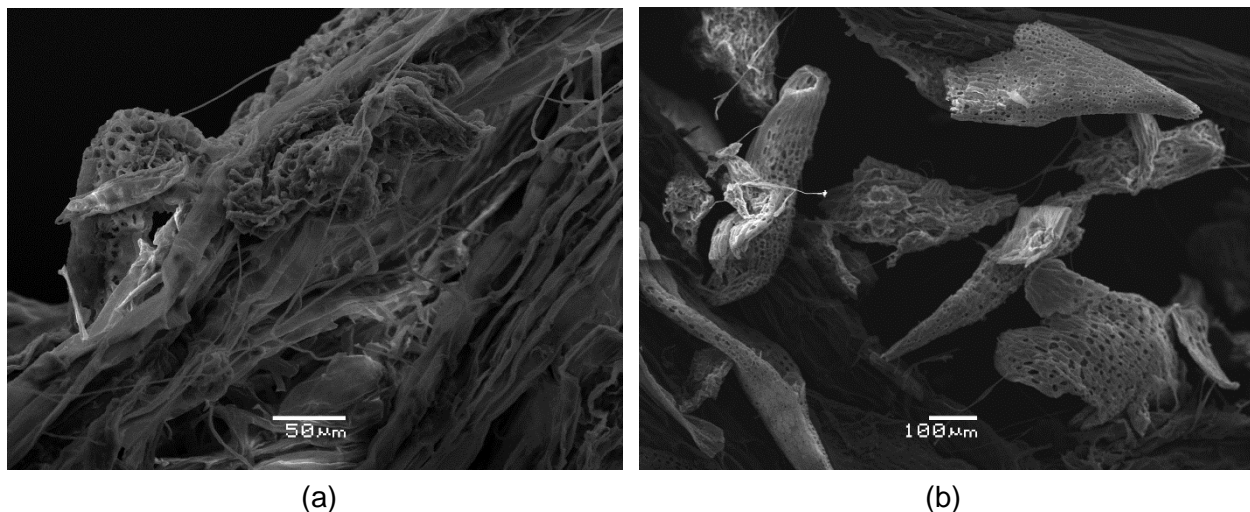


Figura 8.1. Imágenes SEM de las raíces de plantas de tomate en muestras control-arena con 500 μm y 100 μm.

Las siguientes imágenes SEM corresponden a las muestras control y con distintas concentraciones de aerogel.

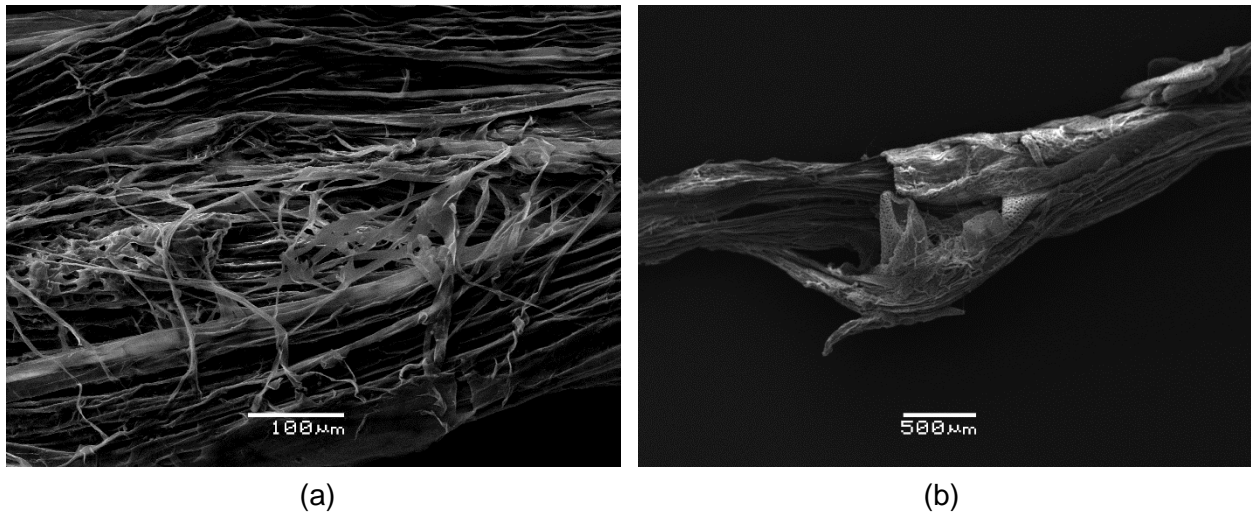


Figura 8.2. Imágenes SEM de las raíces de plantas de tomate en muestras control-tierra de hoja con 100μm y 500μm.

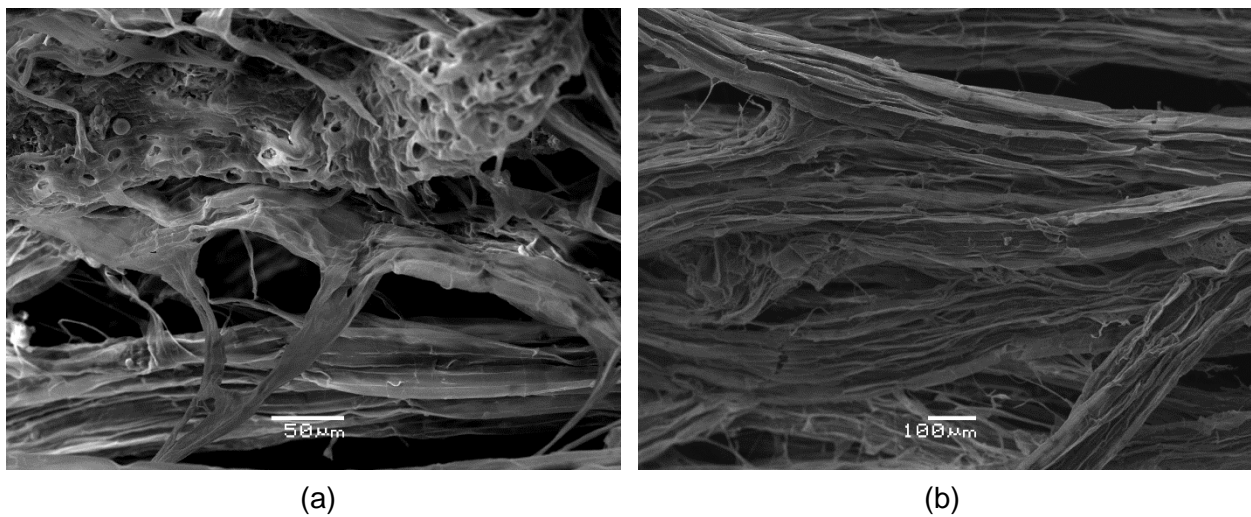


Figura 8.3. Imágenes SEM de las raíces de plantas tomate en muestra con 0,1% p/p de aerogel-tierra de hoja con 50μm y 100μm.

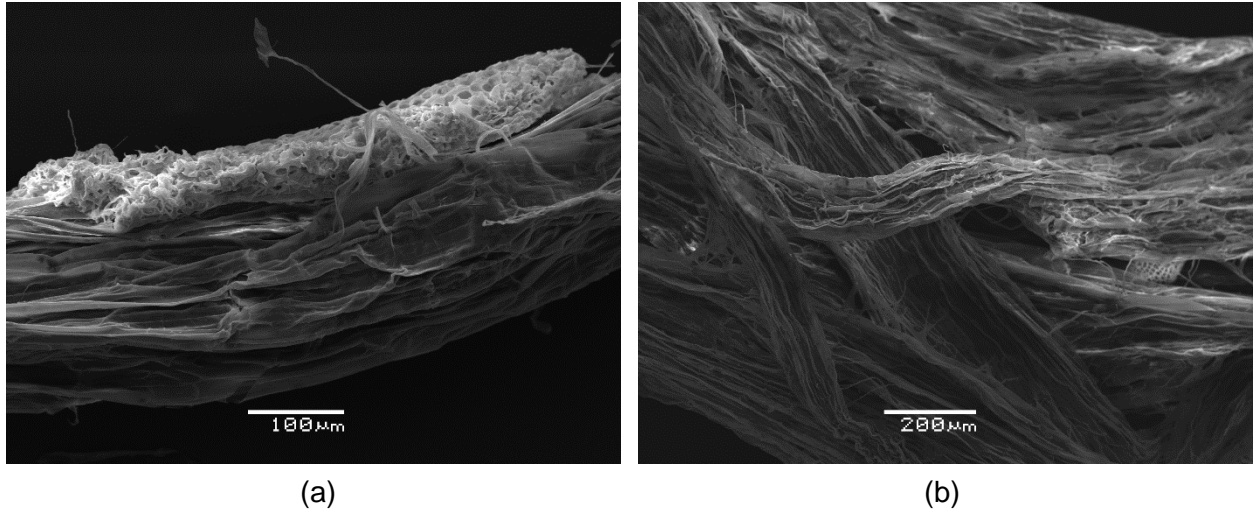


Figura 8.4. Imágenes SEM de las raíces de plantas tomate en muestra con 0,2% p/p de aerogel-tierra de hoja con 100µm y 200µm.