



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
PUEBLA**

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”



**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE HIDROGELES SUPERABSORBENTES EN LA
PRODUCCIÓN DE ALMÁCIGO DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum* L.): UNA
ALTERNATIVA AMBIENTAL**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

Mariana Rojas Bravo

Directora de tesis:

Dra. María Teresa Zayas Pérez

Co-Director:

Dr. Rolando Rueda Luna



Octubre 2023



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE HIDROGELES SUPERABSORBENTES EN LA PRODUCCIÓN DE ALMÁCIGO DE CHILE SERRANO (*Capsicum annuum* L.): UNA ALTERNATIVA AMBIENTAL

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

Mariana Rojas Bravo

Comité tutorial:

Directora	Dra. María Teresa Zayas Pérez
Co-Director	Dr. Rolando Rueda Luna
Tutora	Dra. María Guadalupe Tenorio Arvide
Integrante Comité Tutorial	Dr. Ricardo Munguía Pérez

Octubre 2023

El presente trabajo de tesis de Maestría en Ciencias Ambientales se realizó en el Laboratorio de Química Ambiental del Centro de Química del Instituto de Ciencias (ICUAP) y en el Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, bajo la dirección de la Dra. María Teresa Zayas Pérez y el Dr. Rolando Rueda Luna, con el apoyo de beca de Maestría con No. 797285 otorgada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT).



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

Parte de los resultados de este trabajo fueron presentados en:

- ◆ I Congreso Internacional de polímeros y alimentos. “Síntesis y caracterización de hidrogeles superabsorbentes a partir de goma arábica para uso agrícola”. Popayán, Colombia, del 22 al 24 de marzo de 2023.
- ◆ XXX Coloquio de Investigación del Programa de Maestría en Ciencias Ambientales. “Síntesis y caracterización de hidrogeles superabsorbentes a partir de goma arábica para su uso agrícola”. Puebla, México, del 26 al 28 de abril de 2023.
- ◆ Congreso Internacional de la Sociedad Química de México 2023. “Emergencia y desarrollo de la plántula de chile serrano (*Capsicum annuum* L.) aprovechando hidrogeles superabsorbentes de goma arábica de acacia”. San Luis Potosí, México, del 2 al 6 de octubre de 2023

AGRADECIMIENTOS

- ◆ A mis padres, por estar presentes en esta etapa, por su confianza y apoyo.
- ◆ A mi directora de tesis, la Dra. Teresa Zayas por su orientación, consejos, cuestionamientos que permitieron el entendimiento y aprovechamiento de este trabajo, por su confianza y por el apoyo durante mi estancia en el laboratorio.
- ◆ A mi Codirector, el Dr. Rolando Rueda Luna a quien admiro y respeto demasiado, por su confianza, comprensión, orientación e introducción al área agrícola, por su infinito apoyo y paciencia en todo momento, por su calidez, predisposición para escuchar, por sus valiosas aportaciones en la práctica y el escrito de este trabajo, por el acompañamiento en actividades extras y sobre todo por el ser humano excepcional que es.
- ◆ A la Mtra. Miriam por el auxilio en el invernadero y sus pláticas.
- ◆ Al jurado por el tiempo dedicado, en especial a la Dra. Tenorio y al Dr. Munguía quienes dieron seguimiento desde el inicio de este proyecto, por sus provechosas aportaciones y consejos. Al Dr. Carlos Ochoa por el préstamo de su equipo de laboratorio en varias ocasiones y por estar presente en esta ocasión como parte del jurado.
- ◆ A mis compañeritos de generación: Dian y Miguel, por su disposición y amabilidad cuando necesité de su asistencia.
- ◆ A mis compañeritos de laboratorio: Clara Chia, por hacer agradable los días de trabajo y por su disposición en todo momento. Al Dr. Juan, por sus consejos, apoyo, entusiasmo, amabilidad, ánimos, confianza en mi capacidad para ser una futura científica y por la apreciación de virtudes de los demás. Gracias por los momentos divertidos.
- ◆ A la Dra. Esmeralda, por su comprensión, paciencia y apoyo en el aprendizaje de los equipos y la obtención de resultados durante la estancia de investigación, además de las recomendaciones culturales dadas para visitar en Saltillo, por sus pláticas y acortarme el camino a casa varias veces, por el detalle de despedida junto con los demás compañeros.

La estancia, aunque fue corta amplió mi panorama, perspectivas, me permitió conocer una forma muy diferente de trabajar, gracias a todo su laboratorio por enseñarme el uso de otros equipos que no conocía, sin duda una grata y enriquecedora experiencia.

- ◆ A mi amiga Sofía por su enorme paciencia al escucharme sobre el desarrollo de este trabajo, a pesar de no entenderme porque no es su área, por ser mi fiel confidente en muchos temas personales, mi cómplice de aventuras y vergüenzas, y por considerarme su psicóloga, aunque siempre hace lo que quiere, maremoto.
- ◆ A Queso por las veces que llegué a estar con él y con mucho trabajo, y se desvelaba conmigo.
- ◆ A mi abuelo Rey, por ser sincero, directo y darme buen trato en mis visitas, por sus palabras de aliento, por creer en mi e impulsarme a trabajar fuerte y a que por más complicado que resulte una situación no debo rendirme. A no estancarme sino cada vez ser mejor. Por dejarme buenos recuerdos, tu presencia me acompañará en todo momento ♥
- ◆ A quien me estuvo sosteniendo e impulsado, una motivación para seguir avanzando y creciendo en todos los aspectos <3.

AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS

- ◆ Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo financiero otorgado durante el estudio de posgrado.
- ◆ Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado por el apoyo otorgado para la conclusión de esta tesis dentro del Eje IV. Modelo de Investigación abierta y compartida. Objetivo 13. Formar recursos humanos que impacten positivamente el contexto social y científico como consecuencia de su accionar en una comunidad para lograr una educación desarrolladora de la transformación. Indicador establecido en el Plan de Desarrollo Institucional 2021-2025.
- ◆ Al Doctor Abel Cruz Montalvo por facilitar el uso del espectrómetro de absorción atómica.
- ◆ Al Maestro César Calderón Fabián por posibilitar el uso del flamómetro, el fotocolorímetro y el micro destilador Kjeldahl.
- ◆ Al Centro de Química del ICUAP y a la Q. Patricia Ruiz Gutiérrez responsable de realizar las mediciones para la obtención de los espectros infrarrojos.
- ◆ A la Dra. Esmeralda Saucedo Salazar por permitir la realización de la estancia de investigación en el área de Microscopía Electrónica en el Laboratorio Central de Instrumentación Analítica del Centro de Investigación en Química Aplicada en Saltillo, Coahuila.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE TABLAS.....	II
NOMENCLATURA.....	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
1.INTRODUCCIÓN.....	1
2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1. El agua y su consumo en el mundo.....	3
2.2. La agricultura una fuente de contaminación y escasez de agua.....	6
2.3. Consecuencias del uso de aguas contaminadas para el riego de cultivos agrícolas.....	8
2.4. Hidrogeles superabsorbentes: una tecnología para riego en cultivos agrícolas.....	9
2.5. Goma arábica.....	14
2.6. Cultivo de chile verde (<i>Capsicum annuum</i> L.): una hortaliza con importancia a nivel mundial.....	16
2.6.1. Origen, distribución e importancia del chile verde (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	16
2.6.2. Clasificación taxonómica (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	18
2.6.3. Chile serrano (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	19
2.6.4. Factor climático (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	19
2.6.5. Fenología de <i>Capsicum annuum</i>	20
2.6.5.1. Germinación y emergencia.....	20
2.6.5.2. Crecimiento vegetativo.....	21
2.6.5.3. Desarrollo de flor y fruto.....	21
2.7. Chile serrano nativo, bastión mundial en peligro de extinción.....	23
3. MARCO CONCEPTUAL.....	25
3.1. Tipo de investigación.....	25

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	26
5. JUSTIFICACIÓN.....	27
6. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	28
7. HIPÓTESIS.....	29
8.OBJETIVOS.....	30
8.1. Objetivo general.....	30
8.2. Objetivos particulares.....	30
9. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	31
9.1. Diagrama general de trabajo.....	31
9.2. Trabajo de laboratorio.....	32
9.2.1. Reactivos y equipos.....	32
9.2.2. Síntesis de hidrogeles entrecruzados o reticulados de goma arábica.....	32
9.3. Caracterización de los hidrogeles entrecruzados.....	33
9.3.1. Cinética de hinchamiento.....	33
9.3.2. Espectroscopía Infrarroja (ATR-FTIR).....	34
9.3.3. Microscopía electrónica de Barrido (MEB).....	34
9.4. Diseño experimental.....	35
9.5. Trabajo de campo.....	36
9.5.1. Variables de respuesta.....	37
9.5.2. Porcentaje de emergencia.....	38
9.5.3. Número de hojas.....	38
9.5.4. Altura de la plántula.....	38
9.5.5. Diámetro del tallo.....	38
9.5.6. Longitud de raíz.....	38
9.5.7. Micronutrientes y Macronutrientes.....	38
9.6. Análisis estadístico.....	39
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
10.1. Trabajo de laboratorio.....	40
10.1.1. Síntesis de hidrogeles superabsorbentes GA/AN/PAM.....	40

10.2. Caracterización de hidrogeles superabsorbentes GA/AN/PAM.....	42
10.2.1. Cinética de hinchamiento.....	42
10.2.2. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (ATR-FTIR).....	45
10.2.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	49
10.3. Trabajo de campo.....	52
10.3.1. Evaluación de variables fenológicas.....	52
10.3.2. Porcentaje de emergencia.....	52
10.3.3. Número de hojas.....	53
10.3.4. Altura de plántulas.....	55
10.3.5. Longitud de raíz.....	56
10.3.6. Diámetro de tallo.....	58
10.3.7. Micronutrientes en tallo y hojas	59
10.3.8. Macronutrientes en tallo y hojas	60
11. CONCLUSIÓN.....	66
12. SUGERENCIAS.....	67
13. ANEXOS.....	68
14. BIBLIOGRAFÍA.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	<i>Países con mayor población en el mundo 2021 (millones de habitantes).</i>	4
Figura 2.	<i>Volumen concesionado por fuente y por entidad federativa durante 2020</i>	5
Figura 3.	<i>Distribución porcentual de agua concesionada por uso en 2020.....</i>	6
Figura 4.	<i>Representación de hidratación de un hidrogel.....</i>	11
Figura 5.	<i>Estructura de goma arábiga de acacia Senegal.....</i>	16
Figura 6.	<i>Diagrama general de trabajo de la metodología de investigación.....</i>	31
Figura 7.	<i>Hidrogel de goma arábiga/agar nutritivo/poliacrilamida sintetizados y purificados (a). Xerogel de goma arábiga/agar nutritivo/poliacrilamida (b)</i>	32
Figura 8.	<i>Invernadero tipo túnel ubicado en el Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA) del Instituto de Ciencias de la BUAP.....</i>	36
Figura 9.	<i>Charolas de germinación con peat moss e hidrogel, y semillas de chile serrano.....</i>	37
Figura 10.	<i>Isoterma de absorción de hidrogeles sintetizados GA/AN/PAM con variación en la cadena principal a 455 min.....</i>	44
Figura 11.	<i>Hidratación del hidrogel sintetizado en agua desionizada.....</i>	44
Figura 12.	<i>Capacidad de absorción de agua desionizada y de la red municipal del Hidrogel comercial PAM e Hidrogel sintetizado HGS-1.25.....</i>	45
Figura 13.	<i>Espectro ATR-FTIR de goma arábiga pura y sus bandas más características.....</i>	47
Figura 14.	<i>Espectro ATR-FTIR de agar nutritivo y sus bandas más características...</i>	47
Figura 15.	<i>Espectro ATR-FTIR del xerogel HGS-1.25 y sus bandas más características.....</i>	48
Figura 16.	<i>Imagen de MEB del xerogel con aumentos de 62X, 175X y 215X.....</i>	50

Figura 17. <i>Imagen de MEB del xerogel HGS-1.25 con aumentos de 100X, en diferentes regiones de la muestra e histograma de la estimación del tamaño de poro.....</i>	50
Figura 18. <i>Emergencia de plántula de chile serrano.....</i>	53
Figura 19. <i>Número de hojas verdaderas durante el desarrollo de plántulas de chile serrano.....</i>	53
Figura 20. <i>Altura de plántulas de chile serrano.....</i>	56
Figura 21. <i>Plántula de chile serrano con sus raíces lavadas.....</i>	57
Figura 22. <i>Medición de diámetro de tallo de plántulas de chile serrano.....</i>	58
Figura 23. <i>Tallo y hojas de plántula de chile serrano seca (a) y molida (b) para la cuantificación de micronutrientes y macronutrientes.....</i>	62
Figura 24. <i>Gráfica de temperatura y humedad relativa en el invernadero junio-agosto 2022.....</i>	68
Figura 25. <i>Microscopio Electrónico de Barrido utilizado para la obtención de micrografía y tamaño de poros del xerogel de HGS-1.25.....</i>	68
Figura 26. <i>Micro destilador Kjeldahl para cuantificación de nitrógeno para su cuantificación en plántulas de chile serrano.....</i>	69
Figura 27. <i>Flamómetro para la cuantificación de potasio en plántulas de chile serrano.....</i>	69
Figura 28. <i>Horno de microondas para la digestión.....</i>	70
Figura 29. <i>Espectrómetro de absorción atómica para la cuantificación de calcio, magnesio y micronutrientes en plántulas de chile serrano.....</i>	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Valores estimados de las temperaturas óptimas, humedad relativa y luminosidad en las diferentes etapas fenológicas del cultivo de chile (<i>Capsicum sp.</i>).....</i>	20
Tabla 2.	<i>Criterio de clasificación de una investigación.....</i>	25
Tabla 3.	<i>Tratamientos en cultivo de chile serrano con biopolímero entrecruzado e hidrogel comercial.....</i>	36
Tabla 4.	<i>Proporciones de alimentación utilizadas para la síntesis de los hidrogeles GA/AN/PAM variando la concentración de goma arábica y agar nutritivo.....</i>	41
Tabla 5.	<i>Comparación de medias para la variable porcentaje de emergencia de plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos.....</i>	52
Tabla 6.	<i>Comparación de medias para la variable número de hojas de plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos.....</i>	54
Tabla 7.	<i>Comparación de medias para la variable altura de plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos.....</i>	55
Tabla 8.	<i>Comparación de medias para la variable longitud de raíz de plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos.....</i>	57
Tabla 9.	<i>Comparación de medias para la variable diámetro de tallo de plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos.....</i>	59
Tabla 10.	<i>Comparación de medias para la variable micronutrientes en plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos.....</i>	60
Tabla 11.	<i>Comparación de medias para la variable macronutrientes en plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos.....</i>	61
Tabla 12.	<i>Concentrado de valores más altos con diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$) de las variables evaluadas al final de su evaluación (día 12 y 71).....</i>	65

NOMENCLATURA

AA	Acrilamida
AN	Agar nutritivo
AR	Distrito de riego
CE	Conductividad eléctrica
e.s.	Estadísticamente significativa
GA	Goma arábica
HS	Hidrogel superabsorbente
FAO	Food and Agriculture Organization
FTIR	Fourier Transformed Infra Red
IMCO	Instituto Mexicano para la Competitividad
MBA	N´N, metilenbisacrilamida
MEB	Microscopía Electrónica de Barrido
OCDE	Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo
PAM	Poliacrilamida
REDPA	Registro Público de Derechos de Agua
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

RESUMEN

Se elaboraron hidrogeles superabsorbentes (HS) a partir de goma arábica, agar nutritivo, persulfato de potasio, N, N'-metilenbisacrilamida y poliacrilamida asistida por radiación de microondas. Se analizó la variación en la proporción de goma arábica y agar nutritivo en el intervalo de 0.25 g a 1.50 g manteniendo constante la masa de persulfato de potasio, N, N'-metilenbisacrilamida y poliacrilamida. Seis hidrogeles fueron obtenidos mediante reacción de entrecruzamiento. Se determinó la capacidad de hinchamiento de cada hidrogel sintetizado mediante gravimetría. El hidrogel (HGS-1.25) con una composición de 1.25 g de goma arábica como de agar nutritivo alcanzó la mayor capacidad de hinchamiento con un porcentaje de 1257% respecto a su masa inicial. El hidrogel HGS-1.25 fue caracterizado por espectroscopía Infrarroja y Microscopía Electrónica de Barrido. Una comparación de la capacidad de hinchamiento entre el hidrogel HGS-1.25 y el hidrogel comercial de poliacrilamida (PAM) demostró que la capacidad de hinchamiento del hidrogel sintetizado (HGS-1.25) fue de 757% mayor que la del hidrogel comercial. En una etapa subsecuente se llevó a cabo el estudio de aplicación del hidrogel HGS-1.25 en la producción de plántulas de chile serrano en invernadero, usando peat moss como sustrato. El diseño experimental para la producción de chile serrano consistió en un arreglo factorial de 2x2x3 con dos variedades de chile (nativo e híbrido), dos hidrogeles (HGS-1.25 e hidrogel comercial PAM) y en ambos casos, tres dosis de hidrogel (0.25, 0.35 y 0.45%) respecto de la masa total de sustrato con el hidrogel. Se realizaron tres repeticiones para cada dosis considerando el testigo de cada chile con un diseño completamente al azar y con una duración de 71 días luego de la siembra. Se probó un total de 14 tratamientos. La eficacia de los hidrogeles en la producción de chile fue analizado a través de las variables fenológicas: Porcentaje de emergencia, número de hojas, altura de plántulas, longitud de raíz, diámetro de tallo, micronutrientes y macronutrientes. Los resultados mostraron que la efectividad del hidrogel HGS-1.25 al 0.35% superó el desempeño del hidrogel comercial durante los 71 días del almácigo. El análisis estadístico demostró diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) para el hidrogel sintetizado (HGS-1.25) al 0.35% en comparación con la aplicación del hidrogel comercial y del testigo. Estos resultados experimentales muestran que la utilización del hidrogel superabsorbente sintetizado mejora significativamente el desarrollo de plántulas de chile serrano, lo que puede tener un impacto positivo en la producción agrícola.

ABSTRACT

Superabsorbent hydrogels (HS) were prepared from gum arabic, nutrient agar, potassium persulfate, N, N'-methylenebisacrylamide, and polyacrylamide assisted by microwave radiation. The variation in the proportion of gum arabic and nutrient agar was analyzed in the range of 0.25 g to 1.50 g, keeping the mass of potassium persulfate, N, N'-methylenebisacrylamide, and polyacrylamide constant. Six hydrogels were obtained by cross-linking reaction. The swelling capacity of each synthesized hydrogel was determined by gravimetry. The hydrogel (HGS-1.25) with a composition of 1.25 g of gum arabic and 1.25 g of nutrient agar reached the highest swelling capacity with a percentage of 1257% concerning its initial mass. The HGS-1.25 hydrogel was characterized by Infrared spectroscopy and Scanning Electron Microscopy. A comparison of the swelling capacity between the HGS-1.25 hydrogel and the commercial polyacrylamide (PAM) hydrogel showed that the swelling capacity of the synthesized hydrogel (HGS-1.25) was 757% higher than that of the commercial hydrogel. In a subsequent stage, the application study of the hydrogels was carried out in the production of serrano pepper seedlings in a greenhouse, using peat moss as a substrate. The experimental design for the production of serrano chili consisted of a 2x2x3 factorial arrangement with two varieties of chili (native and hybrid), two hydrogels (HGS-1.25 and commercial PAM hydrogel), and in both cases, three doses of hydrogel (0.25, 0.35 and 0.45%) concerning the total mass (substrate+hydrogel). For each dose of hydrogel, 3 repetitions were carried out considering the control for hybrid and native chili with a completely randomized design and a duration of 71 days after sowing. A total of 14 treatments were tested. The effectiveness of the hydrogels in chili production was analyzed through the phenological variables: Percentage of emergence, number of leaves, seedling height, root length, stem diameter, micronutrients, and macronutrients. The results showed that the effectiveness of the 0.35% HGS-1.25 hydrogel exceeded the performance of the other treatments during the 71 days of seedling. The statistical analysis showed statistically significant differences ($p \leq 0.05$) for the synthesized hydrogel (HGS-1.25) at 0.35% compared to the application of the other treatments and the control. These experimental results show that the use of the synthesized superabsorbent hydrogel significantly improves the development of serrano pepper seedlings, which can have a positive impact on agricultural production.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es primordial para la subsistencia de los seres humanos, además del desarrollo socioeconómico, energía, producción de alimentos, ecosistemas, sin olvidar que es decisivo en la adaptación al cambio climático y es un enlace entre la sociedad y el medioambiente. En materia de sectores con el mayor uso de agua, es la agricultura, que se sabe ocupa aproximadamente el 76% de agua dulce a nivel mundial, ocupándola mayormente para riego.

Ahora bien, la mayoría de las acciones humanas que requieren utilizar agua, generan como desecho “aguas residuales” que al emplearse en el riego agrícola tienden a causar daños a la salud y mala calidad de los cultivos. Es necesario señalar que actualmente la agricultura tiene un impacto en la contaminación y escasez de agua, causa del uso irracional de enormes cantidades de agroquímicos, materia orgánica, sedimentos, entre otros, que, al estar presentes en el agua, ésta se vuelve una amenaza ambiental, pudiendo desencadenar problemas de salud, mala calidad de alimentos y salinización del suelo, por indicar algunos daños.

Entre tanto, el cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.) se encuentra dentro de las especies hortícolas de gran significancia dado que, la siembra oscila en 1,990,926 millones de hectáreas a nivel mundial (FAO, 2020), ubicándose entre las siete hortalizas más cultivadas a nivel mundial, también su importancia radica desde la historia hasta la cultura mexicana. El chile serrano es una variedad de mayor comercio, se usa casi exclusivamente en fresco para la elaboración de salsas y recibe su nombre de la región donde se producía originalmente, que es la serranía del norte de Puebla e Hidalgo en el declive del Golfo.

El agua proveniente por las lluvias que se presentan durante el ciclo del cultivo son las responsables de la humedad de la zona radicular de la planta. En vista de la mala distribución del agua, el chile serrano presenta constantemente estrés hídrico, por lo que la activación de un sistema de riego reduce y/o evita el estrés hídrico debido a la retención de humedad para evitar el gasto de energía extra de la planta para absorber el agua y nutrientes más allá del bulbo húmedo (zona radicular).

Actualmente existe una tecnología aplicada, que cada vez está adquiriendo mayor interés e importancia en el área agrícola y se refiere al uso de polímeros o hidrogeles

superabsorbentes, pues éstos requieren una menor cantidad del líquido vital, ofrecen una alta distribución, dan un aumento de retención de agua en el suelo, menor cantidad de pérdida por filtración, además de una disminución de evaporación de la misma en la agricultura, de ahí que se logra beneficiar el desarrollo de las plantas, aprovechamiento y recuperación de suelo.

Tal que, el buen uso de esta tecnología logra reducir costos de producción de las cosechas, por las menores demandas de cantidades de agua y de nutrientes aplicados porque la liberación es controlada, permitiendo un mejor riego y conservación en óptimas condiciones de las plantas sobrado de un regado continuo, lo cual mejora y acelera la germinación.

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de hidrogeles poliméricos de goma arábica y compararlos con un polímero comercial de poliacrilamida en el desarrollo fenológico para establecer el rendimiento y eficacia en el almácigo de chile serrano (*Capsicum annuum* L.).

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. El agua y su consumo en el mundo

El problema del agua hoy en día es una de las principales preocupaciones a nivel internacional, tomando como una referencia los foros internacionales efectuados cada vez con mayor frecuencia con el fin de tratar desde diferentes perspectivas la problemática de la escasez de agua y su contaminación. México, desde hace una década ha situado este tema como preferente y de seguridad nacional para el país (Domínguez, 2018).

La demanda mundial del recurso agua presenta en los últimos 100 años un aumento por un factor de seis. De acuerdo con la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCDE), entre los años 2000 y 2050 el requerimiento de agua ascendería 55% a nivel mundial. A pesar de que el asunto se focaliza en los requerimientos humanos, no se debe de perder de vista que el agua también es fundamental para el funcionamiento de los ecosistemas, teniendo en cuenta que, si el recurso es insuficiente, se pierde su biodiversidad, surge la degradación y, por ende, desequilibrio y reduce su capacidad funcional. Otra de las preocupaciones es el cambio climático, puesto que también perturba la funcionalidad de los ecosistemas al provocar inundaciones, sequías y variaciones en la accesibilidad del agua (IMCO, 2023).

Tanto la escasez como el deterioro de la calidad del agua de los cuerpos superficiales y subterráneos son factores agravantes que, incorporado al impacto del cambio climático sobre aspectos cualitativos y cuantitativos, se deben en gran medida a las descargas residuales, provenientes de aguas municipales, industriales, como de las áreas practicantes de actividades agrícolas y ganaderas, de ahí que llevan a la necesidad de un manejo integrado del recurso. Ahora bien, para alcanzar la sustentabilidad es necesario establecer indicadores sociales, económicos, ambientales y culturales, con estrategias de crecimiento y desarrollo vinculadas al manejo integrado (IMCO, 2023).

Entonces el uso del recurso natural agua debe ser ecuánime y sostenible, es decir, debe existir eficiencia en la regulación, gestión e inversión en infraestructura que pueda certificar su acceso y saneamiento, con la finalidad tener consumo doméstico, personal, agrícola e industrial.

En el periodo comprendido entre 1950 y 2022, se registró un aumento de 2.6 mil millones a 8 millones de personas, asimismo la estimación para el 2050 asciende a 10 mil millones (United Nations, 2022). En la Figura 1 se identifica que al 2021 México ocupa el décimo país con mayor población a nivel mundial con un reporte de 130.1 millones de habitantes.

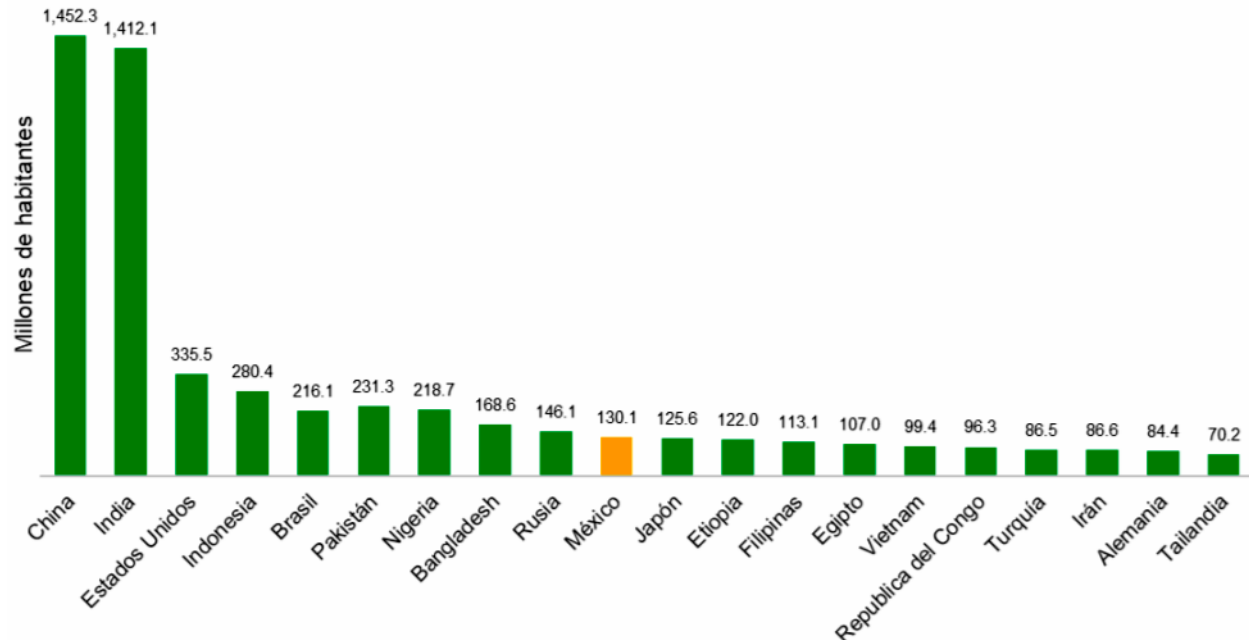


Figura 1. Países con mayor población en el mundo 2021 (millones de habitantes)

Fuente: Elaborado por el IMCO con información de la OCDE 2021, top 20 de los países más grandes del mundo por población.

Es así como el crecimiento poblacional, económico y la variación de consumo humano causan que el uso global de agua aumente de manera constante el 1% anual. Por consiguiente, el padecimiento de la disminución de agua utilizable es para los países más poblados del mundo, donde en México con datos reportados por el Banco Mundial, tiene como promedio de disponibilidad de agua por persona de 4 mil en 2020 y ahora alrededor de 3.2 mil m³, sin embargo, se valora que para el 2030 la disponibilidad sea menor de los 3 mil m³ por habitante al año (UNESCO, 2020; IMCO, 2023).

Existen dos grupos de uso de agua, sin importar si son subterráneas o superficiales, éstas son consuntivo, aludiendo al consumo del líquido de los distintos sectores y el no consuntivo que hace referencia a la producción de energía hidroeléctrica. A continuación, en la

Figura 2, se destaca el volumen concesionado de agua por fuente y por entidad federativa del 2020 donde el mayor volumen concesionado pertenece a los estados de Sinaloa, Sonora, Veracruz, Michoacán y Chihuahua, al contrario, los de menor volumen son Aguascalientes, Ciudad de México, Baja California Sur, Tabasco y Tlaxcala (IMCO, 2023). Mientras que Puebla se encuentra en la posición 12 con más de 2 mil hm³, proveniente principalmente de aguas superficiales y el resto de las aguas subterráneas.

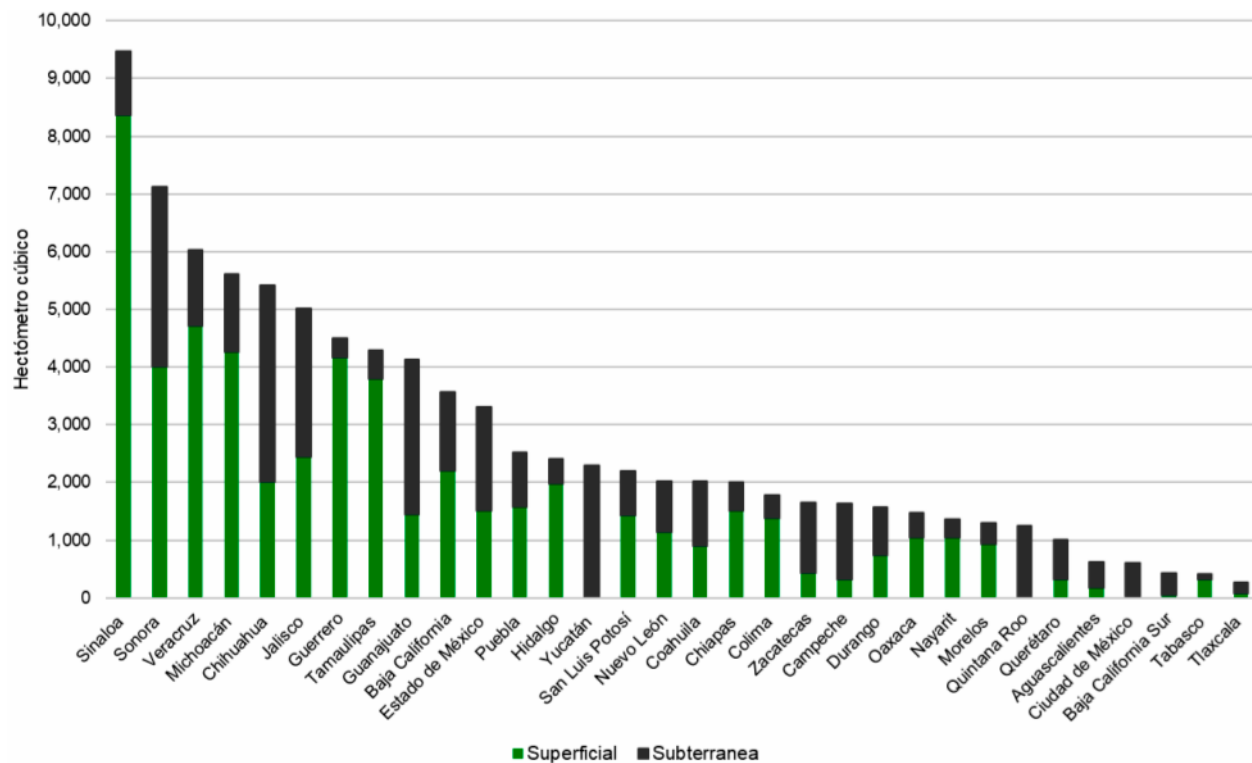


Figura 2. Volumen concesionado por fuente y por entidad federativa durante 2020

Fuente: Elaborado por el IMCO con información de la CONAGUA 2021. Registro Público de Derechos de Agua (REPD) / Volúmenes Inscritos.

Sin embargo, los datos reportados por la CONAGUA (responsable de la administración del agua en México) no corresponden a los valores reales de uso, dado que se han identificado usos sin título de concesión. Dentro de la imposible identificación del consumo real de agua, el sector agrícola ocupa un lugar importante en la falta de control sobre las concesiones, por ello, únicamente se conocen las estimaciones (Fondo para la comunicación y la educación ambiental, 2023).

2.2. La agricultura una fuente de contaminación y escasez de agua

En nuestro país, la agricultura es el sector que más agua consume (Conagua, 2021): en 2020 recibió 76% del volumen concesionado utilizándolo primordialmente para riego de cultivos, ganadería y para actividades pecuarias y acuícolas (Figura 3) (IMCO, 2023).

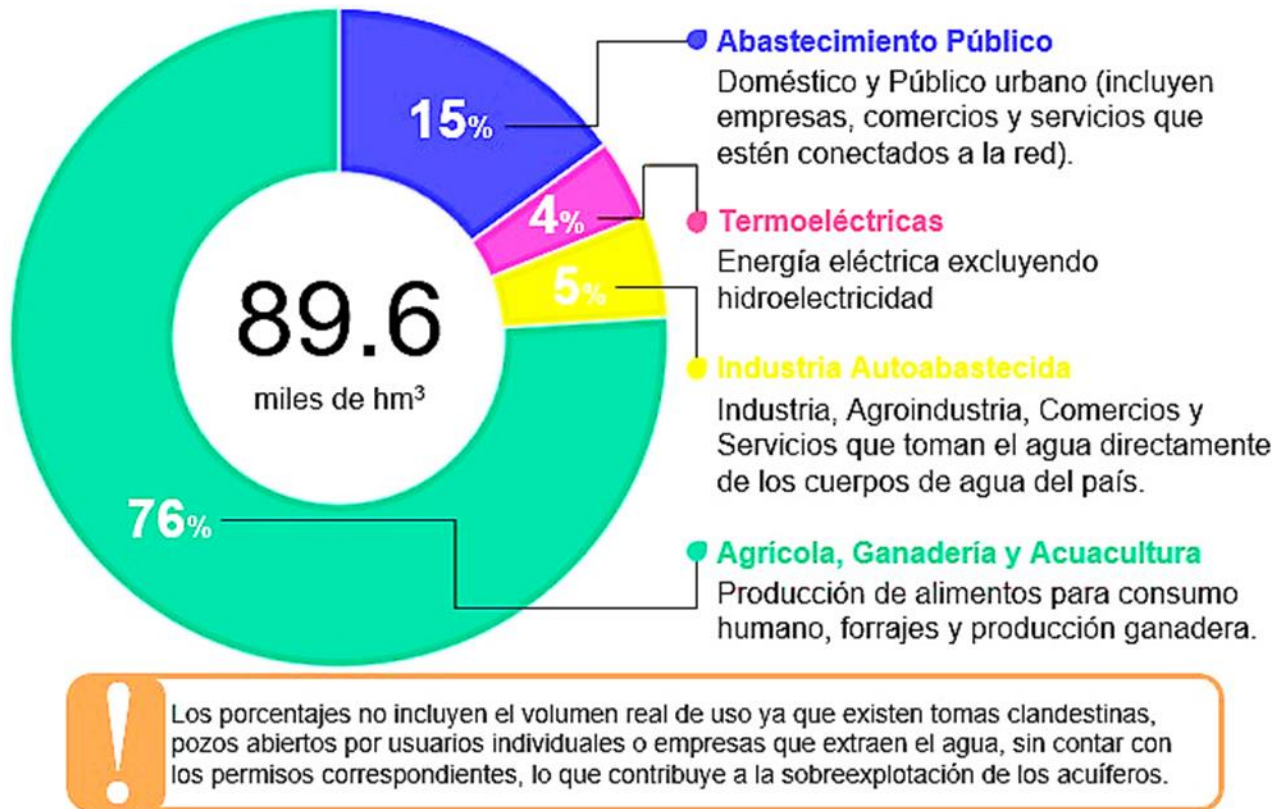


Figura 3. Distribución porcentual de agua concesionada por uso en 2020

Nota: hm³, hectómetros cúbicos, unidad de volumen que equivale a un millón de metros cúbicos.

Fuente: Elaborado por el IMCO con información del Sistema Nacional de información del agua (SINA) 2020. Distribución de volúmenes concesionados.

La agricultura es causante de la contaminación del agua subterránea por el uso de fertilizantes (aportes de nitrógeno) y por los pesticidas que se aplican para aumentar la productividad de los cultivos. Pese a que desde 1988 la Comisión Intersecretarial Mexicana para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Productos Químicos Tóxicos (CICOPLAFEST) restringió el uso de ciertos plaguicidas, la implementación de dicha política ha sido difícil e inconsistente (Hansen, 2012)

Un desafío para progresar hacia un uso sustentable del agua es aumentar la eficiencia del sector agrícola, esto es, reducir la cantidad consumo de agua, aumentando paralelamente la producción agrícola. Asimismo, contribuye a interrumpir el aumento de la eficiencia y puede ayudar a aminorar la competencia entre todos los sectores consumidores y la presión sobre las fuentes de abasto.

Los acuíferos se contaminan, tanto por las fugas de aguas residuales domésticas como industriales debiendo agregar las aguas contaminadas con fertilizantes y plaguicidas que se infiltran directamente al subsuelo con origen en los campos agrícolas. (Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2020).

Contaminación del agua agrícola: datos destacados

- ◆ El uso para riego en la agricultura es el mayor productor mundial de aguas residuales debido al volumen generado (en forma de drenaje agrícola).
- ◆ Mundialmente, las tierras agrícolas reciben cerca de 115 millones de toneladas de fertilizantes nitrogenados minerales al año. Alrededor del 20% de fertilizantes de nitrógeno finalizan con acumulación en los suelos y la biomasa, mientras que el 35% llega los océanos.
- ◆ El medio ambiente es rociado cada año a nivel global con 4,6 millones de toneladas de plaguicidas químicos.
- ◆ El 25% del uso mundial de plaguicidas en la agricultura se presenta en países en desarrollo.
- ◆ Cálculos recientes indican que el impacto económico de los plaguicidas en las especies no objetivo (incluidos los seres humanos) es de aproximadamente 8 000 millones de dólares anuales en los países en desarrollo.
- ◆ El agotamiento del oxígeno consecuencia de la sobrecarga de nutrientes (inducida por el hombre), afecta un área aproximada de 240 mil km² a nivel global, de los cuales 70 mil km² son de aguas continentales y 170 mil km² de zonas costeras.
- ◆ Se estima que el 24% de la superficie irrigada en el mundo es afectada por la salinización. (FAO, 2018).

Por lo anterior, la Organización Mundial de la Salud reconoce que el consumo de alimentos transgénicos y agroquímicos ha elevado los índices de enfermedades degenerativas del sistema inmunológico como diabetes, hipertensión, obesidad, cáncer, e incluso son

causantes de abortos espontáneos, malformaciones genéticas, enfermedades de la piel, respiratorias y neurológicas, autismo y enfermedad celiaca (SEMARNAT, 2019).

2.3. Consecuencias del uso de aguas contaminadas para el riego de cultivos agrícolas

La ampliación poblacional resulta un factor importante que de forma paralela precisa mayor cantidad de agua y genera mayores volúmenes de residuales y contaminación ambiental (Hassing, *et al.*, 2009).

Los aspectos principales de los que depende la demanda de agua y su disponibilidad son: en primer lugar, la disponibilidad natural, es decir, la cantidad de agua apta para aprovechar y que precisa del clima y de la geografía; en segundo lugar, se encuentra el crecimiento poblacional porque involucra el incremento de la población y su demanda de satisfactores, por ende, se requiere de más alimentos, además de insumos de uso directo e indirecto y de servicios. El tercer y último lugar es el aumento significativo del volumen de aguas residuales vertidas sin previo tratamiento sobre las corrientes naturales y suelos agrícolas (Guadarrama-Galván, 2015).

A nivel nacional, se ha incrementado en los últimos años el uso de aguas residuales municipales para el riego de cultivos agrícolas, originado por el agotamiento de los mantos acuíferos y a la escasez de fuentes alternas de abastecimiento. Las aguas residuales poseen una composición variada dependiendo de la actividad y uso que les dio origen y por lo tanto las concentraciones de contaminantes presentes también varían. Generalmente, el contenido las aguas residuales es: materia orgánica, microorganismos patógenos, grasas, aceites, nutrientes, contaminantes tóxicos orgánicos e inorgánicos y minerales disueltos (Cisneros-Saucedo, 2016).

En México, el principal uso del agua residual se destina a la agricultura. La superficie dedicada a las labores agrícolas en México varía entre los 20 y 25 millones de hectáreas, teniendo una superficie cosechada de entre 18 a 22 millones de hectáreas por año y se estima que el total de aguas residuales municipales anuales generadas en México es de 228.7 m³/s, mientras que para el caudal tratado es de 111.3 m³/s (CONAGUA, 2021).

Al presente, se sabe que las rutas de migración de contaminantes y los efectos de estos son más amplios de lo que se había pensado. Por lo tanto, las descargas de aguas residuales

pueden llegar hasta el ser humano por a) riego agrícola, b) consumo directo del ganado, o c) consumo del ser humano, pero los impactos estarán determinados por la capacidad de absorción de cada elemento en la cadena de transmisión (Guadarrama-Galván, 2015).

Por otra parte, se han detectado trazas de metales pesados (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg y Pb), microorganismos patógenos y algunos compuestos orgánicos tóxicos en las legumbres y otros cultivos (Lugo, 2009), también Castro *et al.* (2009) reportan que, en el Estado de Sonora, las aguas residuales son tratadas y mezcladas en los canales de riego para su uso agrícola; sin embargo, su estudio arroja que la remoción de los patógenos de las aguas residuales es poco efectiva, ya que se han detectado quistes de *giarda* y de *Cryptosporidium*, producto de las altas concentraciones de coliformes fecales. También se detectó la presencia del virus de la hepatitis A. mientras que Hernández *et al.* (2014), precisan que existe contaminación alta por coliformes fecales (en agua, suelo y plantas) y huevos de helmintos en las aguas residuales utilizadas para riego de cultivos en el DR (distrito de riego) 028 en Tulancingo, Hidalgo. Los valores obtenidos rebasan los límites permisibles de las normas mexicanas, por lo que el riesgo para la salud por la presencia de estos parásitos es evidente. Campos-Pinilla *et al.* (2015), reporta concentraciones de coliformes fecales en una superficie entre $1,3 \times 10^3$ y $9,3 \times 10^3$ UFC/100 ml, y en profundidad entre $(2,7 \times 10^3$ y $1,1 \times 10^4$ UFC/100 ml) y huevos de helminto (1,2 HHV/L) encontradas en el agua utilizada para riego y superan las concentraciones sugeridas por la OMS en 2007 e implican riesgos sanitarios para los encargados de los cultivos y los consumidores, por lo que se evidencia que éstas prácticas tienen un riesgo microbiológico debido a la presencia de patógenos probablemente causantes de alteraciones en la salud de la población.

Por consiguiente, cabe mencionar que los productos agrícolas que se producen a partir del uso de aguas residuales en las actividades agrícolas son un riesgo para el ser humano, sin contar el daño que se le está ocasionando al medio ambiente por la presencia de metales pesados en sus suelos. En la actualidad, la superficie dedicada a la agricultura ha aumentado teniendo en su mayoría presencia en los Estados de Hidalgo, Michoacán, San Luís Potosí, Morelos, Nayarit, Colima, Puebla, Tlaxcala, Estado de México, Sonora, Chihuahua y Ciudad de México. Los cultivos más representativos son las hortalizas (cebolla, jitomate, brócoli), maíz (*Zea mays* L.) y alfalfa (*Medicago sativa*) (Benavides *et al.*, 2008; Castro *et al.*, 2009; Cifuentes *et al.*, 1994; Jáuregui *et al.*, 2007; Pacheco, 2007; Pérez, 2002; Prieto *et al.*, 2007).

2.4. Hidrogeles superabsorbentes: una tecnología para riego en cultivos agrícolas

El uso racional y eficiente del agua de riego para los cultivos es un determinante que cada día toma mayor importancia, por un lado, pero por otro para aumentar la productividad de los suelos agrícolas, los investigadores se han centrado en aplicar las enmiendas del suelo y para mejorar la fertilidad del suelo al aumentando la disponibilidad de nutrientes para las plantas, el agua del suelo, disminuyendo el secado del suelo, conservando la actividad microbiológica en el suelo e incrementando la absorción de nutrientes por las plantas. En este sentido se emplean polímeros o hidrogeles superabsorbentes que presenta dichas ventajas.

Los hidrogeles superabsorbentes son un tipo de enmienda del suelo que se ha aplicado en la agricultura para aumentar la eficiencia en el uso del agua, reducir la lixiviación de nitratos y las pérdidas por infiltración en los embalses de riego, además de atrapar el agua que de otro modo se habría lixiviado fuera de la raíz, liberación controlada de agroquímicos, remediación de metales pesados del suelo, uso como inoculante microbiano del suelo) y uso para mejorar las propiedades hidráulicas del suelo.

La tecnología moderna ha desarrollado hidrogeles que son materiales muy absorbentes de agua, con uso como reservorios para la disminución o prevención de pérdidas de agua en el suelo y para incrementar la eficiencia de riego (Garcés, 2021).

Se han clasificado a los hidrogeles en función de su origen, síntesis o reticulación . De acuerdo con su fuente, los biohidrogeles se basan en la utilización de polímeros naturales, mientras que los hidrogeles sintéticos son hidrogeles sintetizados a través de la polimerización química de monómeros sintéticos. Los biohidrogeles se preparan utilizando polisacáridos como alginato, quitosano y dextrano, goma arábiga, en tanto, los hidrogeles sintéticos incluyen diacrilato poli(etilenglicol), poli(acrilamida) y poli(alcohol vinílico).

Los hidrogeles son los materiales formados por el entrecruzamiento de cadenas poliméricas con carácter hidrófilo capaces de absorber e interactuar con matrices acuosas, manteniendo en todo caso su estado sólido. (Ramírez *et al*, 2012). El carácter hidrófilo del hidrogel se debe a la presencia de grupos funcionales en su estructura molecular tales como hidroxilo (-OH), ácidos carboxílicos (-COOH) y amidas (-CONH₂).. Los radicales libres liberan hidrógeno de los grupos funcionales (-COOH, -OH, -NH₂) presentes en las cadenas poliméricas de los carbohidratos, llevando a una reacción de entrecruzamiento entre los

monómeros polymerizados y los grupos funcionales para producir una red tridimensional y así la formación del hidrogel (Soto y Oliva, 2012).

Los hidrogeles tienen capacidad de absorber desde 10 a 20% hasta miles de veces su peso seco en agua. Mientras que cuando el contenido de agua sobrepasa de 100% se denominan hidrogeles superabsorbentes (Hoffman, 2012; Peppas *et al*, 2000).

La estructura tridimensional del polímero es establecida por el agente entrecruzante, responsable de unir las cadenas flexibles de polímero mediante enlaces covalentes, enlaces de hidrógeno, fuerzas de Vander Waals o interacciones hidrófobas.

Cuando un hidrogel entra en contacto con el agua, ocurre la disociación de sus grupos hidrofílicos. Estos grupos tienen afinidad por las moléculas de agua, lo que se debe a la presencia de cargas negativas o grupos funcionales que interactúan con el agua mediante fuerzas de atracción electrostática y enlaces de hidrógeno. Como resultado, los grupos hidrofílicos se vuelven más flexibles o se disocian, lo que permite que las cadenas poliméricas se separen y, en consecuencia, aumenta el tamaño de las cavidades dentro del hidrogel. Esta expansión de las cavidades de la red facilita la absorción de agua por parte del polímero. El agua se infiltra en el hidrogel y queda retenida debido a las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua y los grupos hidrofílicos del polímero (Figura 4).

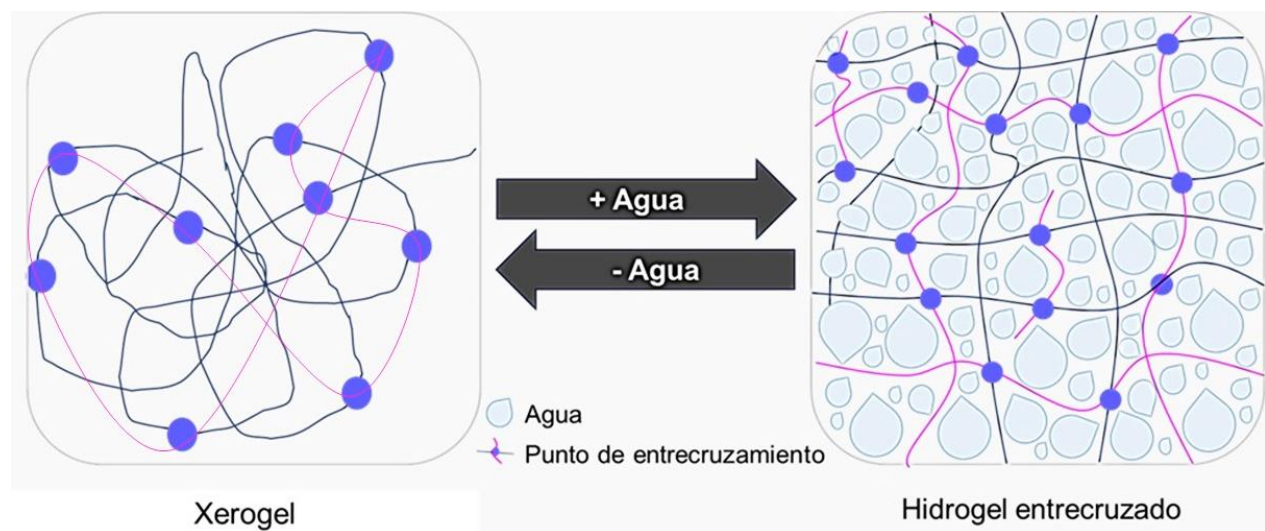


Figura 4. Representación de hidratación de un hidrogel superabsorbente

La liberación controlada de agua ocurre una vez que el agua ha sido absorbida por el hidrogel y puede ser liberada gradualmente en respuesta a cambios en las condiciones. Este proceso se lleva a cabo mediante la presión osmótica, que es un fenómeno físico en el que el agua se libera desde el hidrogel hacia áreas con una mayor concentración de solutos, como las raíces de una planta. La presión osmótica genera un flujo de agua desde el hidrogel hacia las raíces de la planta, lo que contribuye a la irrigación y al suministro de agua de manera controlada. Este proceso resulta particularmente valioso en aplicaciones como la agricultura y la jardinería, donde los hidrogeles se emplean para retener agua y liberarla gradualmente, manteniendo así el suelo húmedo y proporcionando agua de manera eficiente a las plantas. Debido al mecanismo de absorción del agua que tienen los polímeros superabsorbentes, el hidrogel puede absorber cientos de veces su peso en agua, cuando su entorno comienza a secarse, el hidrogel dispersa gradualmente hasta el 95% del agua almacenada. Cuando se expone otra vez al agua, se rehidrata y se repite el proceso de almacenamiento. Específicamente para el caso de hidrogeles biodegradables, este proceso puede durar de 2 a 5 años, momento en el cual el hidrogel puede iniciar su degradación (Kalhapure *et al.*, 2016).

Los sistemas basados en hidrogeles son muy populares debido a la estructura única que poseen, la cual les permite un gran hinchamiento en presencia de agua, logrando conservar su forma original. El contenido de agua en el equilibrio de un hidrogel depende principalmente de la naturaleza del monómero o monómeros hidrófilos que lo forman, tipo y densidad de entrecruzamiento, entre otros factores tales como, temperatura, fuerza iónica y pH del medio de hidratación (Hernández, 2007).

Cabe mencionar que la importancia del agua con relación a la agricultura se encuentra en que todos los procesos fisiológicos de las plantas que involucran este compuesto. El agua constituye el 90% del peso celular de las plantas y es también un reactivo en el proceso de la fotosíntesis. Otro aspecto importante es que el agua es esencial para mantener la presión de turgencia, siendo esto fundamental en el proceso de crecimiento de las plantas. Es indispensable aclarar que la absorción es indispensable para el crecimiento y desarrollo de las plantas. En el proceso de absorción, el agua penetra desde la solución del suelo hacia el interior de las células radicales en las raíces por medio de procesos osmóticos, puesto que las células radicales tienen una menor concentración de agua que el suelo. Las células de la epidermis (sistema radical) de una planta tienen como función absorber agua y nutrientes. De ellas parten largas proyecciones tubulares llamadas pelos radicales que aumentan la superficie de la raíz permitiendo una mayor y más eficiente absorción de agua por parte de la planta. El

agua absorbida por estos pelos atraviesa el córtex y entra al cilindro vascular que la conduce hacia el tallo. La velocidad de absorción de agua está determinada por dos factores: la eficacia del sistema radical y el ambiente (Pineda *et al.*, 2003).

Con respecto al ambiente en el que se desarrolla la planta, existen factores como la temperatura del suelo, la aireación y la cantidad de agua disponible y accesible son elementales. En lo que respecta a la cantidad de agua suministrada al suelo, el déficit de ésta y por consiguiente el estrés de la planta afecta su fisiología vegetal (Pineda *et al.*, 2003).

Debido a lo antes mencionado, los polímeros absorbentes son importantes en los usos agrícolas como materiales estructurales para crear un clima benéfico, acondicionador en suelos, para mejorar el establecimiento y crecimiento vegetal, en especial, en regiones con escasos recursos hídricos, han podido ayudar a minimizar o resolver diversos problemas en los cultivos, como resultado de las características de absorción y liberación prolongada que presenta.

Además, permite mejorar las propiedades física de los suelos compactos, así como el crecimiento de la planta, el agua y los nutrientes que están continuamente disponibles en la zona de las raíces para una óptima absorción por las plantas, protege al medio ambiente contra la sequía y la contaminación de las aguas subterráneas, evita la perdida de la cosecha y reduce la tensión de las plantas por falta de agua, absorbe fertilizantes solubles y los libera lentamente, incrementa el rendimiento de las cosechas, ahorro de abono, mejora la calidad de planta, son amigables con el medio ambiente y sobretodo aceleran la germinación y desarrollo de la plántula (Idrobo *et al.*, 2010).

Los hidrogeles basados de polímeros naturales, en especial los polisacáridos, son muy utilizados en los últimos años en vista de sus ventajas únicas. En general, los polisacáridos son inocuos, abundantes y biocompatibles (Soto, 2012; Olaya y Tovar, 2022)

El uso de hidrogeles es recomendado para cultivos extensivos tales como: soya, maíz, trigo, girasol, sorgo, fríjol y maní, por citar algunos; en el caso de las hortalizas como papa, tomate, brócoli, etc.

La cantidad para utilizarse del producto dependerá del tipo de cultivo, también del tipo de suelo que posea el productor y el sistema de producción que utilice. Con respecto a cultivos extensivos, la dosificación puede oscilar entre 10 a 30 kg/hectárea. Una vez aplicado el hidrogel

en el suelo tiene una vida útil de 3 a 5 años. Hay que destacar que debe evitarse la exposición directa del producto a los rayos ultravioleta (Hernández, 2007).

Los hidrogeles biodegradables contienen enlaces lábiles en el esqueleto del polímero o en los enlaces cruzados. Los enlaces lábiles se pueden romper en condiciones fisiológicas, ya sea enzimática o químicamente durante un período de tiempo. Los productos finales después de la degradación son CO₂, agua y amoníaco (Ekebafe *et al.*, 2011). El residuo de acrilamida tampoco se detecta en productos de cultivo cuando se cultivan con aplicación del hidrogel (Kalhapure *et al.*, 2016).

En el trabajo de hidrogeles entrecruzados a partir de goma arábica realizado por Valencia (2022) donde elaboró hidrogeles con composición polimérica de goma arábica/poliacrilamida/agar nutritivo y goma arábica/poliacrilamida/agar coliforme, y a diferentes concentraciones de la cadena principal y monómero con diferentes tiempos de irradiación de microondas, determinaron que el hidrogel a partir goma arábica/poliacrilamida/agar nutritivo con masa de 1.25 g a 40 s de irradiación, presentó el máximo porcentaje de hinchamiento a los 120 minutos, alcanzando un valor de 559.21%. y de goma arábica/poliacrilamida/agar coliforme con masa de 1.00 g, consiguió un 631.59% de hinchamiento.

Por otra parte, Hasija *et al.* (2018) con la síntesis verde de hidrogeles superabsorbentes a base de agar/goma arábica realizaron la optimización de las variables de reacción: iniciador, solvente, monómero y entrecruzante. Al disminuir la concentración de entrecruzante hasta 0.01 mol/L obtuvieron el porcentaje de hinchamiento mayor con respecto a las demás síntesis, alcanzado un 378%.

2.5. Goma arábica

La goma arábica es un exudado vegetal natural (polisacárido natural) producido como un exudado protector y pegajoso por los árboles de acacia en respuesta a una herida, es conocido desde la antigüedad y utilizado desde hace miles de años en el área de alimentos, la industria farmacéutica y con fines técnicos.

Se estima la existencia de diversas especies de acacias con más de 700 distribuidas por África, Australia, India y Sudamérica.

El árbol *Acacia Senegal*, por lo general, se encuentra en regiones en donde un promedio anual de precipitación es de 500-1200 mm y una estación seca definida. Su límite de elevación máximo es de aproximadamente 2000 metros sobre el nivel del mar. La temperatura más baja dentro de su rango natural oscila entre 5 y 10 °C, ocasionalmente descendiendo por debajo de 5 °C en áreas de mayor altitud. Sin embargo, su distribución geográfica sugiere una sensibilidad a las heladas. Prospera especialmente en suelos profundos y densos con un pH elevado, que se encuentra en el rango de 6 a 8.

La goma de acacia es el tercer ingrediente hidrocoloide más utilizado por la industria en términos de volumen. El mercado de la goma de acacia crece cada año porque es un aditivo multifuncional con propiedades como agente texturizante, formador de película, emulsionante y estabilizador, con numerosos beneficios para la salud y reforzado por el origen vegetal natural no modificado.

La goma de acacia es un polisacárido de arabinogalactano altamente ramificado con un alto peso molecular y una baja viscosidad en agua, en su estructura presenta los azúcares: galactosa, arabinosa, ramnosa y ácidos glucurónicos que están parcialmente neutralizados con sales de calcio, potasio, sodio y magnesio (Figura 5) (Jurasek *et al.*, 1993). Por sus propiedades de retención de agua, se utiliza continuamente en el secado por pulverización para reducir la higroscopicidad y hacer crecer el rendimiento de los polvos obtenidos a partir de productos higroscópicos solubles en agua.

Las gomas exudadas son versátiles y se emplean en una amplia variedad de aplicaciones, con un enfoque principal en la industria alimentaria. No obstante, también encuentran importantes aplicaciones fuera de este ámbito. La goma arábiga, por ejemplo, se utiliza extensamente en el sector industrial como estabilizante, espesante, emulsionante y agente encapsulante en la industria alimentaria, y en menor medida en sectores como el textil, la cerámica, la litografía, la cosmética y la farmacéutica (Mariana *et al.*, 2012).

La goma arábiga presenta una excelente solubilidad tanto en agua fría como en agua caliente, siendo posible disolverla en concentraciones de hasta el 50%. Esto se debe a su estructura compacta y ramificada, que resulta con una baja hidrodinámica. En términos de volumen, las soluciones de goma arábiga exhiben una baja viscosidad, lo que permite utilizar concentraciones elevadas, llegando incluso al 40%. Además, estas soluciones muestran un comportamiento pseudoplástico a concentraciones aún más elevadas (Verbeken *et al.*, 2003).

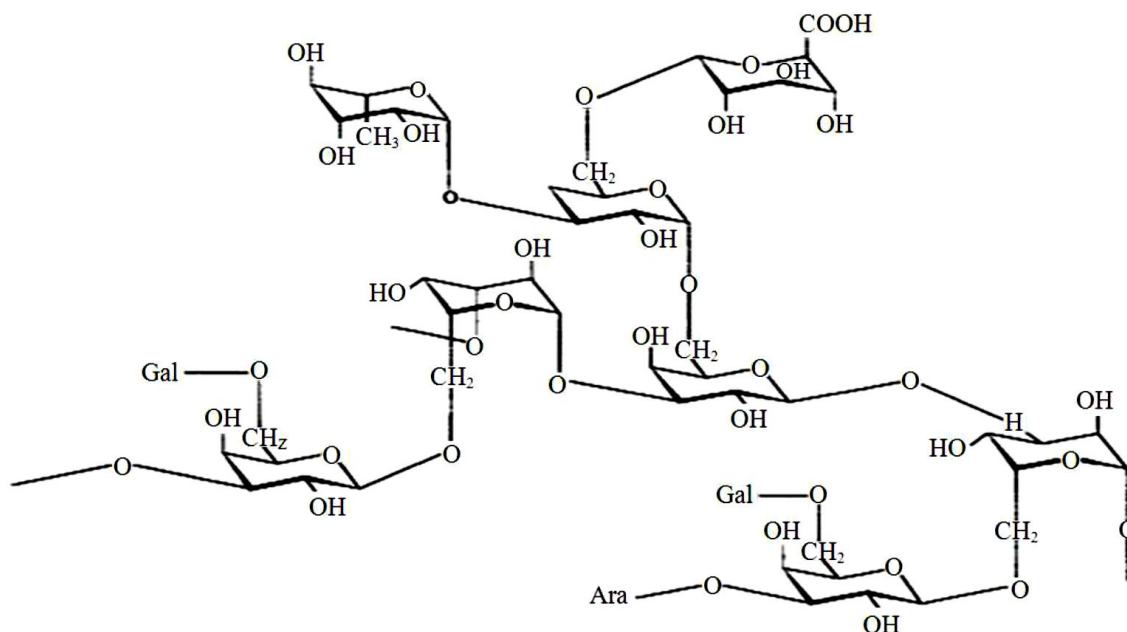


Figura 5. Estructura de goma arábica de acacia Senegal.

Fuente: Dauqan y Abdullah, 2013

2.6. Cultivo de chile (*Capsicum annuum*): hortaliza con importancia a nivel mundial

2.6.1. Origen, distribución e importancia del chile (*Capsicum annuum*)

El chile (*Capsicum annuum* L.) fue acogido en Europa, Asia y la India luego del descubrimiento de América, después en África, actualmente es un cultivo con distribución y uso mundial. Si bien es un alimento perecedero, en diversos sitios arqueológicos se localizaron evidencias de la existencia del chile en la época prehispánica con semillas carbonizadas o fragmentos de semillas.

A nivel mundial el chile es una de las principales hortalizas cultivadas, con una producción de 36,771,482 toneladas (FAO, 2020), creciendo un 2.17% con respecto a 2017. La superficie cosechada del cultivo también tuvo un incremento de 1.4% en el mismo período. Este aumento está acorde a la tendencia que se tiene desde hace 11 años con el cultivo. De igual manera, el rendimiento promedio mundial pasó de 15.5 t/ha⁻¹ en 2008 a 18.5 t/ha⁻¹ en 2018.

Dentro de los 5 principales países productores de chile en 2018 se reportó a China (49.45%), México (9.19%), Turquía (6.95%), Indonesia (6.91%) y España (3.47%), generando

en total el 67.67% de la superficie cosechada, es decir, más del 75% de la producción mundial (FAO, 2020).

El chile (*Capsicum annuum*) es una hortaliza con amplia diversidad genética de gran importancia en México a causa de que el consumo de sus frutos puede ser en fresco como en seco con la finalidad de aportar sabor, aroma y color a los alimentos. Otra importancia económica del chile es que es uno de los alimentos con mayor comercialización, es un alimento nutritivo, una fuente de colorantes naturales y compuestos secundarios, utilizados para la elaboración de productos alimenticios, cosméticos y farmacéuticos. Teniendo las variedades mayormente cultivadas: jalapeño, serrano, poblano, pimiento morrón y habanero. El pimiento morrón se destina primordialmente al mercado de exportación con el 86% del volumen exportado de chiles en 2019. También se exportan, en menor medida los chiles anaheim, serrano y jalapeño. (Aguilar, 2012; INTAGRI, 2020).

En México, este crecimiento de producción se enlaza al desarrollo de la industria de la horticultura protegida, a consecuencia del uso de estructuras de protección como las casa sombra, invernaderos y macrotúneles, sumado a mejores prácticas de manejo agronómico, sanitario, de inocuidad y nutricional, es que se ha podido ampliar el rendimiento por unidad de superficie. Esto lo podemos identificar con los datos reportados del SIAP (2020), donde señala que el 12.3 kg·m² es resultado de un rendimiento promedio en agricultura protegida y 1.8 kg·m² para campo abierto para el año 2019, Además la FAO (2020) menciona que los rendimientos más altos en el 2018 fueron para Reino Unido (31.85 kg·m²), Bélgica (28 kg·m²) y Países bajos (27 kg·m²), atribuyéndolo a la inversión en la producción bajo invernadero en este sector. Como resultado del uso de estructuras de cubierta en el cultivo de chile, que además de mejorar la producción, también se reflejó mejoría en la calidad e inocuidad de los frutos, de ahí que se consiguió elevar los volúmenes de exportación y con ello, alcanzar a triplicar el valor de la producción del chile en los últimos 15 años. Sin duda, la importancia del chile en México no solo es gastronómica, es también económica tomando en cuenta que es generadora de ingresos y de empleos directos e indirectos (INTAGRI, 2020).

El desinterés por cultivarlo y comercializarlo ha aumentado especialmente por el pequeño pago que reciben los agricultores, a la vez por la presencia de intermediarios, que fijan el precio del chile serrano muy bajo, este abuso se debe entre otras causas: a que los productores no cuentan con los medios para comercializar sus cosechas; falta de mercados; carencia de un centro de acopio y la desorganización de los agricultores. También, los

productores cada año buscan suelos más fértiles para asegurar una buena calidad y mayor producción de sus cosechas, por lo que realizan la práctica tradicional muy cuestionada de roza, tumba y quema, aunado a la fertilización excesiva y el mal uso de agroquímicos. Lo que implica la erosión del suelo, así como la extinción de especies de importancia ecológica en cuanto a flora y fauna, y la contaminación del agua y aire.

2.6.2. Clasificación taxonómica (*Capsicum annuum*)

La primera descripción del cultivo *Capsicum* fue por el taxónomo botánico José Pitton (antes del año 1700).

Reino: Vegetal
 Tipo: Fanerógama
 División: Spermatophita
 Clase: Dicotiledonea
 Subclase: Simpetala
 Orden: Solanales
 Familia: Solanaceae
 Género: *Capsicum*
 Especie: *annuum*

El género *Capsicum* llamado así por los herbarios europeos en el siglo XVIII presenta la distribución geográfica más amplia (FAO, 2008). El cultivo y domesticación del chile está referenciado a México y América Central y se asevera que desde hace miles de años se ha utilizado como un ingrediente obligado en la comida mexicana. La planta de chile se encuentra en la familia de las Solanaceas y el género *Capsicum*. Algunas especies destacadas en el género *Capsicum* incluyen: *Capsicum annuum*: Esta es la especie más común y ampliamente cultivada de pimientos. Incluye variedades como el pimiento bell, el jalapeño, el pimiento de cayena y el pimiento serrano. *Capsicum frutescens*: Esta especie incluye variedades como el ají picante, el tabasco y el pimiento de Malagueta. Son conocidos por ser bastante picantes. *Capsicum chinense*: Incluye algunas de las variedades de chiles más picantes del mundo, como el habanero y el bhut jolokia (también conocido como fantasma). *Capsicum baccatum*: Esta especie incluye variedades como el ají amarillo y el ají limón. Son populares en la cocina de América del Sur. *Capsicum pubescens*: Incluye variedades como el rocoto. Se caracterizan por tener hojas peludas y frutos picantes. Estas plantas de la familia *Solanaceae* son apreciadas

por su diversidad en términos de sabor, picante y uso culinario. Además, algunas de ellas también tienen propiedades medicinales y se utilizan en la fabricación de productos como cremas analgésicas. La mayor parte de variedades de chile cultivadas en todo el mundo son de la especie *C. annum*.

2.6.3. Chile serrano (*Capsicum annum* L.)

La segunda variedad popular más producida en México es el chile serrano, dentro de sus mayores cultivadores están 25 estados, sus principales zonas productoras son los estados de San Luis Potosí, Nayarit, Hidalgo, Tamaulipas, Veracruz, Puebla, Nuevo León, Coahuila, Jalisco y Sinaloa (Aguirre y Muñoz, 2015). El cultivo de esta hortaliza es por siembra directa o por trasplante, siendo la mayoría por trasplante (SAGARPA, 2017). El chile serrano, también conocido como chile verde, tiene su origen en el norte de Puebla e Hidalgo. Posiblemente, la designación de serrano proviene de que casi siempre se cultiva en zonas serranas (de las sierras) (PROFECO, 2021). La práctica de su cultivo se efectúa usualmente en todo el país, debido a esto, se pueden encontrar diferentes morfologías de la planta.

La producción de esta hortaliza se localiza principalmente en la Sierra Norte de Puebla en los municipios de Tlaola, Huachinango, Cuautempan y Chiconcuautla.

Actualmente, la variedad híbrida Tampiqueño-74 ocupa el 50% del área cultivada del país por ser la más rendidora y aceptada en el mercado. Tienen mayor potencial de rendimiento, excelente calidad y aceptación en el mercado (Córdova, 2003).

2.6.4. Factor climático (*Capsicum annum*)

La temperatura, humedad relativa y luminosidad dependen de la variedad y etapa fenológica del chile (Tabla 1). El crecimiento, los procesos de fotosíntesis, respiración, acumulación de carbohidratos, acumulación de azúcares y almidón, germinación de la semilla, utilización de nutrientes, pérdida de agua, etc., son influenciadas por la temperatura, la cual al ser óptima induce al desarrollo armónico de acuerdo con la especie.

La humedad relativa provoca enfermedades cuando pasa la óptima, cuando es baja puede provocar transpiración y caída de la flor. Mientras que la luminosidad en este cultivo es muy rigurosa, especialmente durante la germinación y desarrollo de flor. Esta planta es designada como planta de día largo por el periodo de luz que necesita, que cuando se cumple

el requerimiento se prolonga su ciclo vegetativo. (Castaños, 1992; Infrago, 2003; Baños, 1991; Guenkov, 1987).

Tabla 1. Valores estimados de las temperaturas óptimas, humedad relativa y luminosidad en las diferentes etapas fenológicas del cultivo de chile (*Capsicum* sp.)

Fase	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)		
	Mínima	Óptima	Máxima	Mínima	Óptima	Máxima
Germinación y emergencia	13	20-25	40	50	70	---
Crecimiento vegetativo	15	20-25 (día) 16-18 (noche)	32			
Desarrollo de flor y fruto	18	26-28 (día) 18-20 (noche)	35			
Luminosidad	Poco fotoperiodo	Alto fotoperiodo				

Referencia: Cruz *et al.*, 2014; Hernández, 2016; Poain, 2020.

2.6.5. Fenología de *Capsicum annuum*

Una fase fenológica simboliza un rasgo específico o los cambios periódicos que se presentan en la hortaliza. Cada periodo depende de cada especie, por ello se produce en diferentes fechas.

En los procesos fisiológicos para el desarrollo y crecimiento de las plantas se considera que existe una multitud de reacciones bioquímicas que son determinadas en su mayoría por la temperatura, son diferentes dependiendo de la estación del año, latitud y fase de la planta.

2.6.5.1. Germinación y emergencia

El momento en que la raíz ya es visible se conoce como fase de germinación y esta va desde los 12 días hasta los 15 días después de la siembra, los factores importantes que influyen para el desarrollo o no de esta fase son: temperatura, agua, presencia de luz y

oxígeno. Posterior a esto, la fase de emergencia va desde el alargamiento de hipocótilo hasta la caída de los cotiledones, conocido como estado de la plántula (Mundarain *et al*, 2005).

2.6.5.2. Crecimiento vegetativo

El crecimiento vegetativo se da cuando hay presencia de hojas cotiledonares y alto crecimiento de hojas verdaderas, dependiendo del desarrollo cuando llegan de 6 a 8 hojas el crecimiento del sistema radicular puede tener reducción progresiva, por el contrario, el follaje incrementa considerablemente y el tallo aumenta su grosor (Orellana *et al.*, 2015). El momento en que el tallo presenta una bifurcación en las hojas es cuando ha conseguido el tamaño máximo considerable, con el transcurso del tiempo y el crecimiento de la planta los tallos se vuelven a ramificar (García, 2022).

2.6.5.3. Desarrollo de flor y fruto

Ahora bien, durante los 70 días comienza la aparición de las primeras flores y al día 93 su mayor aparición, consecuentemente, se da la etapa de maduración de frutos a partir de los 85 días después de la siembra (algunas variedades precoces) y hasta los 107 días (variedades nativas o tardías) (Fernandes *et al.*, 2004).

Hoy en día, en México los campesinos cuentan con sistemas de invernaderos, con ellos han podido incrementar un promedio de 7 veces más con relación a cielo abierto, de modo que les permite una mayor competencia (FIRCO, 2016).

Un invernadero se puede definir como estructuras cerradas, estáticas y accesibles a pie, utilizadas para el cultivo y/o protección de plantas y cosechas, proporcionado normalmente de cubierta exterior traslúcida de vidrio o plástico, las cuales optimizan la transmisión de radiación solar bajo condiciones controladas como la temperatura, humedad, entre otros factores ambientales para favorecer el desarrollo del cultivo y cuyo tamaño permite que personal trabaje dentro de este.

La decreciente disponibilidad de agua hace que los invernaderos sean una alternativa para un sistema de producción intensiva, logrando producir hortalizas de calidad durante todo el año. El uso de esta alternativa trae beneficios al proporcionar un ambiente más controlado, pues ofrece mejor sanidad de la planta al evitar el contacto con patógenos presentes en el medio ambiente, especialmente del suelo, asimismo, brinda protección de malezas, plagas,

animales, viento, etc., al mismo tiempo posibilita el control de la cantidad de luz, temperatura y el manejo químico y biológico, creando así un microclima (FIRCO, 2016; Valadez, 2001).

Por lo anterior, es que un invernadero es el indicado para llevar a cabo el crecimiento vegetal, permitiendo con ello la reducción del ciclo de cultivo, además de aumentar rendimientos e ingresos con respecto al cultivo a cielo abierto y también de cultivar fuera de época. Que con el paso del tiempo ha habido una expansión en la superficie protegida, obteniendo así, productos de alta calidad aptas para exportación.

El uso de invernaderos beneficia los requerimientos de los productos frescos y económicos en cualquier temporada del año para los consumidores en los países desarrollados (Valadez, 2001).

La combinación de características como la altura, diámetro de tallo, longitud de raíz y concentración nutrimental son determinantes para la calidad de las plántulas (Araméndiz *et al.*, 2013), sumando a esto el número de hojas y área foliar (Vidigal *et al.*, 2011), así pues, tiene repercusión en el vigor de éstas. Si bien, para tener una mayor adaptabilidad al trasplante, con alta capacidad de absorción de agua y nutrientes debe haber un buen desarrollo, libre de plagas y enfermedades (Salusso *et al.*, 2015). Sarduy *et al.* (2016) mencionaron que, para garantizar una excelente producción de chile serrano, la calidad comienza desde almácigo, bajo invernadero con la producción de las plántulas de chile (*Capsicum annuum* L.).

Para lograr un crecimiento óptimo y obtener rendimientos elevados, tanto en condiciones de campo como en invernadero después del trasplante, es fundamental garantizar la generación de plántulas sanas y vigorosas (Souri y Sooraki, 2019). Diversos factores influyen en este proceso, como el tipo de sustrato, la composición de la solución nutritiva y el uso de inoculantes. Entre estos factores, los sustratos desempeñan un papel crucial en la producción de plántulas, ya que tienen un impacto directo en la fisiología y la calidad de las mismas (Richmond, 2010; López *et al.*, 2013).

Además de la importancia de la nutrición en los procesos de germinación, fisiología y calidad de las plántulas (Marschner, 2012; Santos *et al.*, 2014), es factible regular su crecimiento mediante la manipulación de las concentraciones y proporciones de las soluciones nutritivas, como señalan Souri y Sooraki en 2019.

2.7. Chile serrano nativo, bastión mundial en peligro de extinción

El chile es importante en nuestra cultura, en virtud que forma parte de la identidad de los mexicanos, por ello, su estudio y conservación es fundamental.

Variedades de chile como el san plabeño, comapa y jalapeño rayado (Veracruz), el onza, el huacle y el agua (Oaxaca), el yahualica (Jalisco) y, el copi y verde (Puebla) advierten de su extinción (Aguilar, 2012).

La actividad de cultivo se da en distintas regiones del mundo, no obstante, la domesticación y diversidad morfológica viene del continente americano teniendo como centro de origen de todos los chiles a México.

Nuestro país solo cuenta con datos anecdóticos que apuntan la presencia de erosión y la desaparición de morfotipos definitivos de ciertos casos. Por ejemplo, el chile ancho Ramos Arizpe (Coahuila) ya desapareció. Por ello, es necesaria la planificación y desarrollo de programas de bancos de genes y de conservación de variedades criollas (asegurar el mantenimiento de fuentes de genes brindando apoyo a agricultores locales). Empero, como en México no hay dato ni estrategia plasmada sobre la diversidad genética de los chiles mexicanos, se requiere efectuar documentación y un resguardo seguro de esta información con prioridad en los agricultores tradicionales (Aguilar, 2012).

La situación de extinción es parte de la desvalorización de los productos propios y del mal pago por el producto. La relevancia sobre el cuidado y preservación de la diversidad de los chiles también se debe al reconocimiento mundial teniendo en cuenta que la mayoría de los chiles consumidos actualmente en el mundo surgieron en México.

Los chiles criollos (manejada por pequeños agricultores) están por desaparecer por motivo de la dinámica de cultivo que está cambiando muy rápido. Está desapareciendo la forma tradicional de cultivar el chile, las extensiones de tierra ya no sirven, la gente migra a otras ciudades u otro país; en fin, la cosecha de chile padece todos los problemas que afectan al campo mexicano” (Meléndez, 2021)

El desarrollo de variedades mejoradas de chile por medio de la genética y biotecnología tienen ventajas como: fructificación temprana a comparación de las variedades criollas, altos rendimientos por hectárea a causa de que las plantas son más densas y por la mejor resistencia a enfermedades causadas por microorganismos, además de la uniformidad en las

características físicas del fruto que son de suma importancia para el mercado, razón por la cual los agricultores eligen esta variedad mejorada. No obstante, cuando se disminuye o reemplaza el uso de cultivos criollos por la variedad mejorada aumenta el riesgo de existencia del germoplasma de las especies, de ahí la importancia de generar extenso conocimiento de la diversidad genética de las variedades silvestres y criollas para generar un mejoramiento genético, manejo y su aprovechamiento (Aguirre y Muñoz, 2015).

Finalmente, la diversidad de clima y suelo hacen que México tenga una riqueza genética, aunado al uso de semillas seleccionadas de plantas nativas en las prácticas tradicionales por los pequeños agricultores.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Tipo de investigación

El objeto de estudio de la presente investigación se encuentra dentro de la investigación transversal, comparativa y experimental, tomando como referencia la Tabla 2. Criterio de clasificación de una investigación que posteriormente se presentan. De acuerdo con la evolución del fenómeno estudiado se consideró que es transversal debido a que los resultados de los análisis establecidos en las poblaciones se recolectaron en ese momento en el tiempo, dando fin al estudio en un período máximo de un año. Mientras que, en el criterio basado en la comparación de las poblaciones, se reconoció que la investigación es de tipo comparativo porque en el estudio existió la población de chile serrano híbrido y nativo a las que se les aplicó hidrogel comercial e hidrogeles poliméricos de goma arábica y se compraron algunas variables para contrastar la hipótesis. Por último, para el criterio basado en la interferencia del investigador en el estudio, se identificó que fue de tipo experimental, dado que se ocuparon tres proporciones o concentraciones de alimentación de goma arábica establecidas para sintetizar los hidrogeles poliméricos, además del hidrogel comercial seleccionado para su aplicación en el cultivo de chile serrano y su análisis, llevándose a cabo en un invernadero para un control de variables ambientales como humedad y temperatura.

Tabla 2. *Criterio de clasificación de una investigación*

Criterios para clasificar una investigación basados en:	Periodo en que se capta la información	Retrospectivo
		Retrospectivo parcial
		Prospectivo
	Evolución del fenómeno estudiado	Longitudinal
		Transversal
	Comparación de poblaciones	Descriptivo
		Comparativo
	Interferencia del investigador en el estudio	Observacional
		Experimental

Referencia: Méndez Ramírez, I., et al., (2001).

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En México, la mayor parte del agua es destinada a la agricultura, siendo ésta la de mayor actividad generadora de una notable escasez y contaminación de agua debido al mal uso de agroquímicos y requerimiento de volúmenes altos de agua, dando pie a la instauración de otros problemas como la amenaza a la seguridad alimentaria, social, ambiental y económica, por lo cual, se vuelve necesaria la implementación de estrategias para mejorar de manera eficiente al efecto de reducir y retener la máxima cantidad posible del recurso agua con el fin de alcanzar su optimización junto con la de la cosecha del cultivo.

En nuestro país, una de las principales hortalizas cultivadas es el chile, ocupando el segundo lugar en importancia en el grupo de los chiles verdes. La principal sede de producción de chile serrano se encuentra en la Sierra Norte de Puebla en los municipios de Tlaola, Huachinango, Cuautempan y Chiconcuautla donde su principal ingreso económico se cimienta en la agricultura.

La escasa tasa de germinación en las semillas de chiles silvestres se atribuye a la impermeabilidad de su cubierta protectora, un factor que restringe su capacidad de propagación. En varios Estados del país, los chiles son importantes en la cultura culinaria regional, por lo que el conocer los factores que influyen en su germinación y desarrollo permiten su aprovechamiento sustentable (Prado *et al.*, 2015).

Por ello, el resultado de la falta de tecnología en el cultivo se tiene un mal manejo del recurso agua y del mismo cultivo que trae por consecuencia un bajo rendimiento, por lo que los agricultores no visualizan ganancias y por consiguiente optan por desatender este sector, por lo anterior, se hace necesario la aplicación de la tecnología sugerida, que ayudaría a lograr un mejor manejo y disponibilidad de agua, menor filtración y mayor retención de nutrientes, además de un aumento en la productividad del cultivo, sin dejar atrás la disminución de costos que implican un riego y con ello la obtención de mayores ganancias para los agricultores, agregado a una disminución de impactos ambientales generados por la agricultura, con el fin de una mejor salud ambiental.

5. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se considera relevante, para la generación del conocimiento científico, así como pretende sentar bases que aporten fundamentos a la propuesta de empleo de polímeros para el uso racional y eficiente del agua de riego. Uno de los elementos a considerar es que busca contribuir al incremento en la capacidad de retención de agua, así se aprovechará mejor ésta, disminuir pérdidas por filtración, mejorar la eficiencia en su manejo y minimizar costos, lo anterior, llevado a cabo en un invernadero localizado en el Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA) del Instituto de Ciencias de la BUAP, vinculando desde una problemática mundial, pasando por lo nacional hasta llegar al sector productivo primario, a partir de considerar el cultivo de chile serrano, base en el consumo alimentario de la sociedad nacional, por lo que no se descarta la posibilidad a mediano plazo para su práctica en el sector agrícola, con la finalidad de disminuir el consumo de dicho recurso en la agricultura y mejorar la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

6. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

- ◆ ¿Cuál será la diferencia sobre la capacidad de absorción de agua entre un polímero superabsorbente de goma arábica entrecruzado sintetizado en el laboratorio en comparación con un polímero comercial de poliacrilamida para la etapa de almácigo de chile serrano (*Capsicum annuum* L.)?

Pregunta particular de investigación

- ◆ ¿Cuáles efectos de desarrollo fenológico se generarán en la plántula de chile serrano por la aplicación de un polímero superabsorbente respecto al polímero comercial de poliacrilamida?

7. HIPÓTESIS

Los efectos en el desarrollo fenológico en el cultivo de chile serrano son mayores al aplicar hidrogeles poliméricos de goma arábica en comparación a polímeros comerciales de poliacrilamida.

8. OBJETIVOS

8.1. Objetivo general

Evaluar los efectos de hidrogeles poliméricos de goma arábica y compararlos con un polímero comercial de poliacrilamida en el desarrollo fenológico para establecer el rendimiento y la eficacia en almácigo de chile serrano (*Capsicum annuum* L.).

8.2. Objetivos particulares

1. Sintetizar biopolímeros entrecruzados de goma arábica y agar nutritivo en diferentes proporciones de alimentación para obtener hidrogeles superabsorbentes y caracterizar por diferentes métodos analíticos.
2. Evaluar el efecto de la aplicación de los hidrogeles de poliacrilamida comercial y biopolímeros entrecruzados sobre las características agronómicas establecidas en plántulas de chile serrano nativo e híbrido (*Capsicum annuum* L.).
3. Valorar el contenido de micronutrientes y macronutrientes en plántulas de chile serrano nativo e híbrido (*Capsicum annuum* L.).

9. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

9.1. Diagrama general de trabajo

En la Figura 6 se señala el diagrama general de trabajo el cual comprendió las etapas de trabajo de laboratorio y trabajo de campo. La primera y segunda etapa consistió en el trabajo de laboratorio. La tercera, cuarta y quinta etapa se refiere al trabajo de campo. En la primera etapa se llevó a cabo la síntesis de los hidrogeles superabsorbentes, y en la segunda etapa se realizó la caracterización de los hidrogeles superabsorbentes mediante la técnica de grado de hinchamiento, espectroscopía infrarroja (FTIR) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

En el trabajo de campo se llevó a cabo la siembra de semilla de chile híbrido y nativo (etapa 3) para posteriormente determinar el porcentaje de emergencia y desarrollo de plántulas de chile serrano híbrido y nativo (etapa 4), así como la evaluación de las variables fenológicas: porcentaje de emergencia, número de hojas, altura de las plántulas, longitud de raíz, ancho de tallo, contenido de micronutrientes y macronutrientes en plántula (etapa 3 y 4). A partir de los datos recolectados en la etapa 4 se elaboró y ejecuto el análisis estadístico (etapa 5).

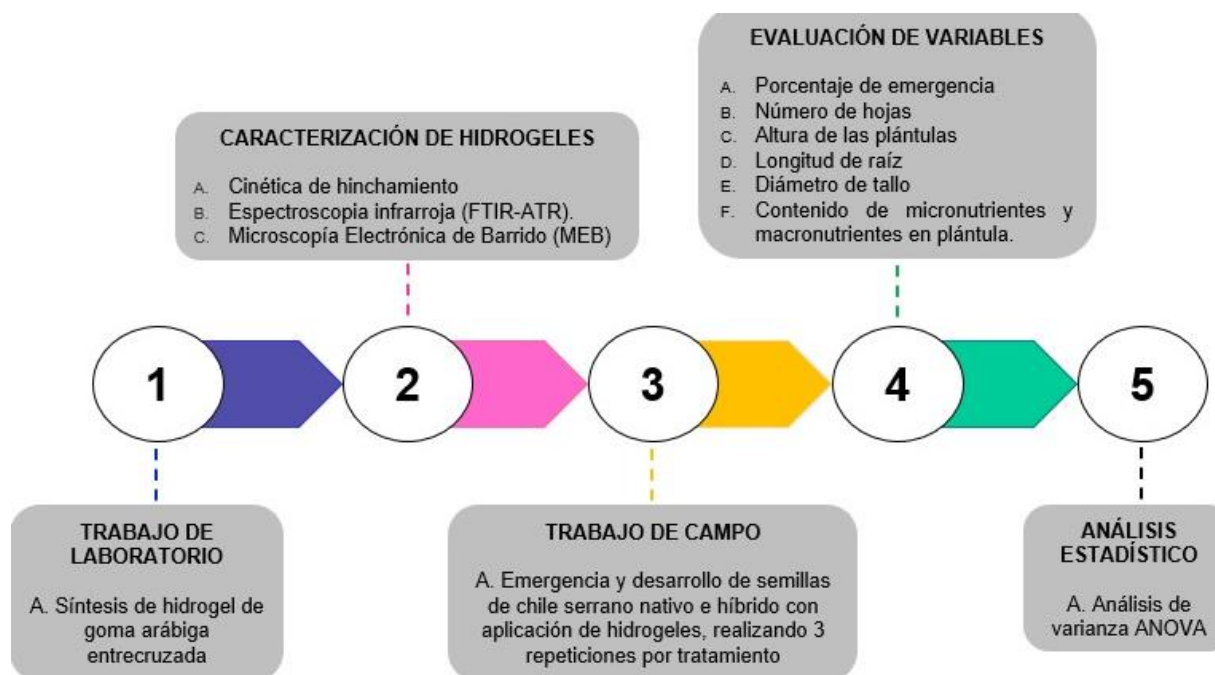


Figura 6. Diagrama general de trabajo de la metodología de investigación

9.2. Trabajo de laboratorio

9.2.1. Reactivos y equipos

El polímero comercial de poli(acrilamida) (PAM) que se utilizó fue adquirido del Grupo H-Gel Acuagel SAPI de C.V. Los siguientes reactivos químicos de calidad analítica: goma arábica (GA), acrilamida ($\text{CH}_2\text{CHCONH}_2$) [monómero], N, N'-metilenbisacrilamida ($(\text{CH}_2\text{CHCONH})_2\text{CH}_2$) [entrecruzante], persulfato de potasio ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) [iniciador polimérico] se utilizaron de la marca comercial Sigma-Aldrich y agar nutritivo [cadena principal] de BD Bioxon. Se utilizó agua desionizada durante todo el proceso de síntesis. El equipo que se empleó para llevar a cabo la reacción fue un equipo de radiación de microondas modelo 17 PM-ME a 2450 MHz y 1200 W.

9.2.2. Síntesis de hidrogel de goma arábica entrecruzado

Los hidrogeles basados en goma arábica se prepararon a partir de la modificación de la síntesis reportada por Hasija *et al.* en 2018, de la siguiente manera: la goma arábica y el agar nutritivo se solubilizaron en agua. Luego, a la mezcla de reacción se adicionó persulfato de potasio como iniciador, para después agregar el N, N'-metilenbisacrilamida como entrecruzante y posteriormente se adicionó gota a gota del monómero acrilamida, en todo momento con agitación continua. La mezcla se mantuvo bajo irradiación de microondas durante un período de 40s continuos para la formación del hidrogel (Figura 7a). El producto se lavó con agua desionizada para eliminar el homopolímero remanente hasta llegar a un pH final de 7. Finalmente, la muestra de hidrogel resultante se llevó a secado en un horno de aire caliente a 60 °C durante 24 horas (Figura 7b). La reacción se optimizó con respecto a la concentración de goma arábica y agar nutritivo.

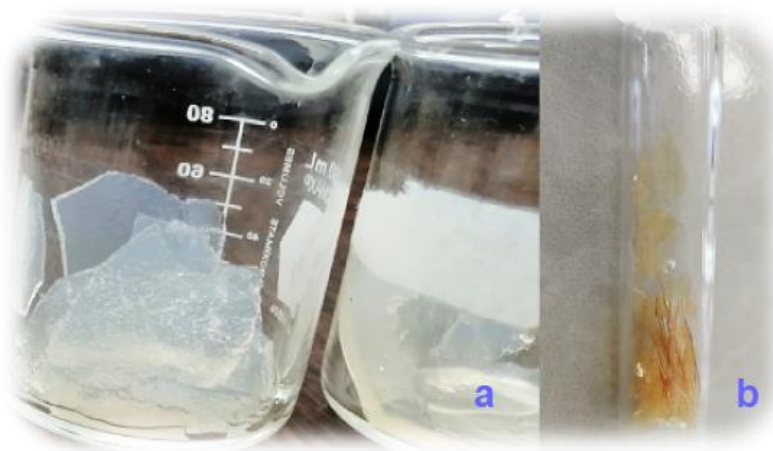


Figura 7. Hidrogel de goma arábica/agar nutritivo/poli(acrilamida) sintetizados y purificados (a). xerogel goma arábica/agar nutritivo (b)

El Agar nutritivo es un medio de cultivo ampliamente empleado con fines generales, diseñado para el aislamiento y recuento de microorganismos que requieren nutrientes mínimos para crecer. Su aplicación se detalla en protocolos destinados al análisis de alimentos, aguas y otros materiales de relevancia sanitaria. Este medio de cultivo es no selectivo y nutritivo, en el que la pluripectona y el extracto de carne actúan como fuentes de carbono y nitrógeno, suministrando los nutrientes esenciales para el crecimiento bacteriano. La inclusión de cloruro de sodio tiene como objetivo mantener el equilibrio osmótico, y el agar se emplea como agente solidificante.

Cuando se utiliza como parte de un hidrogel, el Agar Nutritivo desempeña un papel fundamental. Durante su degradación, los nutrientes contenidos en él pueden ser reciclados y utilizados por las bacterias beneficiosas presentes en el suelo o sustrato empleado. Esto incluye bacterias promotoras del crecimiento en las plantas, como *Rhizobium*, *Azobacter*, *Bacillus subtilis*, entre otras. Además de su función como medio de cultivo, también cumple la función de indicador de la salud del cultivo, proporcionando información importante sobre su estado de sanidad.

9.3. Caracterización de los hidrogeles

9.3.1. Cinética de hinchamiento

Para llevar a cabo la cinética de hinchamiento de los hidrogeles sintetizados, en primera instancia se pesaron 0.100 g de cada hidrogel, luego se colocaron en 70 ml agua desionizada a temperatura ambiente. El pH de las muestras en el medio de hinchamiento se midió con tiras reactivas de pH. En seguida, las muestras se pesaron en los siguientes tiempos: 1, 2, 3, 4, 5, 15, 25, 35, 50, 65, 80, 95, 155, 215, 275, 335, 395 y 455 minutos, para cada pesada se removió el exceso de agua de la superficie con papel filtro.

El porcentaje de hinchamiento para cada muestra a cada tiempo establecido se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$H\% = \left(\frac{W_t - W_o}{W_o} \right) * 100$$

Donde W_t es el peso de la muestra a un tiempo t y W_o es el peso del xerogel.

9.3.2. Espectroscopia Infrarroja (ATR-FTIR)

Los espectros IR se obtuvieron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier utilizando la técnica de Reflectancia Total Atenuada (FTIR-ATR). Esta técnica es valiosa para identificar los grupos funcionales presentes en el xerogel, ya que se basa en el principio de que las moléculas absorben radiación infrarroja cuando sus vibraciones intramoleculares coinciden con las frecuencias de la radiación. Esta coincidencia de vibraciones con la radiación resulta en un aumento notable en la intensidad de las señales en el espectro IR, lo que permite la detección y análisis precisos de los grupos químicos y funcionales presentes en el xerogel, brindando señales con frecuencias correspondientes a la vibración de un enlace particular. Por lo tanto, FTIR-ATR es una herramienta esencial para el estudio y la caracterización de materiales como el xerogel. Se utilizó un equipo marca Bruker modelo ALPHA II Platinum. Los espectros fueron adquiridos después de 32 scans/muestra en el rango de $4000\text{-}400\text{cm}^{-1}$, con una resolución de 4 cm^{-1} .

9.3.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

El microscopio electrónico de barrido es una herramienta moderna que permite la observación de muestras con resolución de unos 4 nm y magnificaciones de hasta 300.000x. es así como se pueden obtener así imágenes de todo tipo de materiales (estructurales o de material biológico) con una de preparacion previa diminuta y observar directamente las superficies con profundidad de foco. Esta característica propia permite la obtención de micrografías en foco de superficies irregulares como una superficie de fractura. Las imágenes de esta herramienta se obtienen mediante la detección, procesamiento y visualización de las señales resultantes de las interacciones entre un haz de electrones de alta energía con la materia. Estas interacciones pueden proporcionar información sobre topografía, composición y estructura. Los requerimientos necesarios para su obtención son asegurar que las muestras sean limpias, secas, resistentes al alto vacío del instrumento y buenas conductoras eléctricas. En el caso que se requiera observar un material no conductor, habitualmente se recubren las muestras con una fina capa metálica, p.ej. el oro, o bien, con el desecado previo de las muestras con contenido alto de vapor de agua.

La morfología de los xerogeles se realizó a través de imágenes de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). La muestra se recubrió con una fina capa de oro/paladio (60:40) para volverlas conductoras, mediante un recubridor por pulverización catódica de la marca Denton Vacuum modelo Desk II. Las imágenes se obtuvieron usando un microscopio

electrónico de barrido de la marca FEI modelo Quanta 200 3D operando con voltaje de 15.00 kV y una magnificación de 100 veces.

Las imágenes adquiridas se obtuvieron en función de electrones secundarios, que son producidos al momento que un electrón incidente posee energía necesaria para arrancar un electrón de las capas internas del átomo de la muestra y un electrón de una capa superior decae emitiendo un electrón secundario, asimismo, un solo electrón es capaz de originar diversos electrones secundarios. Resultado de esta producción de electrones secundarios es la imagen de la topografía de la muestra causado por la baja energía (≤ 5 kV), los cuales son los más próximos a la superficie (≤ 10 nm) aptos para salir de la muestra y recolectarse.

A partir de las distintas micrografías tomadas en varias zonas de la muestra por MEB, se utilizó el software Image-Pro-10 para efectuar la medición de diámetros de los poros.

El equipo Microscopio Electrónico de Barrido utilizado se encuentra ubicado en el Laboratorio Central de Instrumentación Analítica en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), en el Estado de Saltillo, Coahuila, en donde se realizó una estancia académica en los meses de febrero-marzo de 2022.

9.4. Diseño experimental

Para la germinación y desarrollo de la plántula con hidrogeles superabsorbentes se utilizó un arreglo factorial ($2 \times 2 \times 3$), con dos variedades de chile serrano (nativo e híbrido), con dos hidrogeles (hidrogel sintetizado e hidrogel comercial) en ambos casos con 2.5, 3.5 y 4.5 g por Kg de sustrato, más el testigo, además del control o testigo de cada chile con un diseño completamente al azar, con tres repeticiones, dando un total de 42 unidades de repetición (U.R.) con 200 plantas cada una.

El número total de los tratamientos preparados a partir de hidrogel sintetizado y comercial, y su simbología se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. *Tratamientos en cultivo de chile serrano con biopolímero entrecruzado e hidrogel comercial*

Variedad Chile serrano		Tratamiento	Simbología	
Híbrido	Nativo	Testigo	TH	TN
		Hidrogel sintetizado 0.25%	HS1	NS1
		Hidrogel sintetizado 0.35%	HS2	NS2
		Hidrogel sintetizado 0.45%	HS3	NS3
		Hidrogel comercial 0.25%	HC1	NC1
		Hidrogel comercial 0.35%	HC2	NC2
		Hidrogel comercial 0.45%	HC3	NC3

9.5. Trabajo de campo

El experimento se llevó a cabo en el ciclo primavera - verano del 14 de junio al 24 de agosto de 2022, en un invernadero tipo túnel con cubierta plástica blanco como se muestra en Figura 8. localizado en el Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA) del Instituto de Ciencias de la BUAP.



Figura 8. *Invernadero tipo túnel ubicado en el Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas (DICA) del Instituto de Ciencias de la BUAP*

Para el cultivo de chile serrano híbrido se utilizaron semillas de chile verde picante de origen estadounidense de la empresa ITSCO y las semillas de chile serrano nativo utilizadas provinieron de la Sierra Norte del municipio de Tlaola, las cuales fueron seleccionadas tratando de contar con la mayor homogeneidad posible.

El sustrato fue adquirido de la marca PEAT MOSS PREMIER producto proveniente de Canadá y el hidrogel comercial ACUAGEL de la Comercializadora Internacional México.

El almácigo (técnica de cultivo que consiste en sembrar las semillas en un espacio controlado y protegido, como un invernadero, para después trasplantarlas al lugar definitivo una vez que han crecido lo suficiente) se realizó en charolas de poliestireno de 200 cavidades y como material vegetal se utilizaron semillas de chile serrano híbrido y nativo. Se mezcló perfectamente el sustrato peat moss con el hidrogel superabsorbente sintetizado de goma arábica, de la misma manera que con el hidrogel comercial a las concentraciones de 0.25, 0.35 y 0.45%, respectivamente (Tabla 3), y se adicionaron las charolas con 200 cavidades (Figura 9), además del testigo de cada chile, teniendo un total de 42 unidades de repetición (U.R.). El riego con agua fue por aspersión y se realizó a los 10 días después de la siembra únicamente con agua, posteriormente a los 18 días se incorporó una solución nutritiva al almácigo compuesta en (mMol/L): NO_3^- (17.0), H_2PO_4^- (1.5), SO_4^- (3.75), HCO_3^- (0.5), NH_4^+ (1.00), K^+ (8.0), Ca^{+2} (4.25), Mg^{+2} (2.0) con pH de 6.5 y CE=2.2. También, durante la etapa de crecimiento se aplicó un fungicida (captan 50 WP) como tratamiento preventivo para evitar algún daño por hongos.



Figura 9. Charolas de germinación con peat moss e hidrogel, y semillas de chile serrano

9.5.1. Variables de respuesta

A los 5, 8 y 12 días después de la siembra, fue evaluada la variable de emergencia y expresada en términos de porcentaje. Posteriormente se registró: número de hojas (29, 43, 64 y

71 días, diámetro de tallo, longitud de raíz, durante 71 días en cuatro ocasiones: 50, 57, 64 y 71 días. Al día 71 se determinó la variable de altura de plántula, contenido de micronutrientes y macronutrientes en plántula.

9.5.2. Porcentaje de emergencia

Para la variable de respuesta porcentaje de emergencia, se efectuó el conteo del número de plántulas emergida en cada tratamiento el día 5, 8 y 12, tiempo donde se obtuvo un número máximo de plántulas emergidas.

La relación: $PE = (NPE/NTS)$ donde; NPE es el número de plántulas emergidas y NTS el número total de semillas sembradas, nos permite conocer el porcentaje de emergencia.

9.5.3. Número de hojas

Se contabilizó el número de hojas verdaderas a los días 29, 43, 64 y 71 considerando hojas bien desarrolladas, el conteo de hojas se realizó por plántula durante el tiempo que permaneció el almácigo.

9.5.4. Altura de plántulas

La altura de las plantas se midió en el día 71 con una regla graduada en cm a partir de la base del tallo al ápice de la plántula o punto máximo de la curvatura de la hoja superior.

9.5.5. Diámetro de tallo

El diámetro del tallo se evaluó a los días 50, 57, 64 y 71 en mm con un vernier digital.

9.5.6. Longitud de raíz

Para la medición de longitud de raíz se extrajeron plántulas por cada tratamiento a los 50, 57, 64 y 71 días después de la siembra, se lavaron las raíces y posteriormente con un vernier digital se realizó la medición a partir del cuello de la plántula al ápice de la raíz, las unidades fueron en mm.

9.5.7. Contenido de micronutrientes y macronutrientes en plántula

Los análisis químicos se realizaron utilizando el método de digestión ácida en microondas, tomando 0.3 g de la muestra seca y molida (tallo y hojas) y se colocaron en los

tubos del horno, aplicándoles 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) al 70% y 5 mL de peróxido de hidrógeno en una concentración al 30%, se dejó un tiempo de 15 minutos para dar lugar a la reacción, se taparon los tubos para luego colocarlos en el carrito programando el horno a 1600W a una temperatura de 200 °C por 15 minutos, posteriormente se dejaron los tubos y se les agregó el doble de su contenido de agua destilada, las muestras se filtraron en matraces Erlenmeyer de 50 mL y se aforaron, por último se envasaron y rotularon para realizar las lecturas, llevándose a cabo para Ca, Mg, Fe, Mn, Cu y Zn un espectro de absorción atómica consecutivamente, por medio de espectroscopía de absorción atómica Spectra AA 55B, para K se utilizó un flamómetro flame Photometer 410 y el P en un fotolorímetro modelo Spectronic 20D.

El nitrógeno se cuantificó mediante el método Kjeldahl, realizando digestión a la muestra en tubos de ensaye colocando 0.1 g de materia vegetal (tallos y hojas) previamente seca y molida, adicionando 1 g de mezcla catalizadora (K_2SO_4 , HgO y CuSO_4) y 2 mL de H_2SO_4 , Los tubos se colocaron en la parrilla eléctrica a 350 °C durante 2 horas. Luego se procedió a la destilación de las muestras en los tubos, se colocó un matraz de salida en el que se recogieron 10 mL de H_3BO_3 al 4% y 3 gotas de indicador mixto, se agregó 10 mL de NaOH al 50% al destilador. Consecuentemente, se tituló con H_2SO_4 al 0.025N hasta que se obtuvo tonalidad rosa y finalmente se estimó la concentración total del nitrógeno con los mililitros consumidos durante la titulación.

9.6. Análisis estadístico

Para evaluar la funcionalidad de los hidrogeles superabsorbentes sintetizados y comercial como enmendadores de suelo, se evaluaron las variables fenológicas: porcentaje de emergencia, número de hojas, altura de las plántulas, longitud de raíz, ancho de tallo, así como el contenido de micronutrientes y macronutrientes en plantas. Los resultados obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza ANOVA con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). El análisis estadístico se llevó a cabo con un software minitab, Versión 10.0.19044 (2022 Minitab).

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1. Trabajo de laboratorio

10.1.1. Síntesis de hidrogeles superabsorbentes GA/AN/PAM

La reacción de síntesis se varió con respecto a la concentración de agar nutritivo y goma arábica (cadena principal) para obtener un hidrogel con alto porcentaje de hinchamiento o hidratación asistido por radiación de microondas. Las concentraciones de las variables de reacción desempeñan una función importante en el curso de la síntesis de hidrogeles y por ello, es esencial estudiar el efecto de algunas concentraciones con respecto al % de hinchamiento.

Las síntesis de biopolímeros naturales como goma arábica, alginato, quitosano, hialuronano y carboximetilcelulosa (CMC), se pueden realizar por diversas técnicas de preparación como: reticulación física, química, polimerización por injerto y la reticulación por radiación. Estas síntesis pueden mejorar las propiedades mecánicas y la viscoelasticidad para aplicaciones en múltiples áreas.

La síntesis de hidrogeles asistida por microondas es un método conveniente y económico en virtud del mecanismo de calentamiento que es diferente a los métodos convencionales, permitiendo a la vez una mejora en la microestructura de los polímeros sinterizados. La reducción de los tiempos de síntesis y energía es el principal atributo que ofrece el método, puesto que en numerosas situaciones la velocidad de la reacción puede aumentar de 2 a 3 órdenes de magnitud, en cuanto al calentamiento convencional. Teniendo como resultado una mejora significativa en el rendimiento y reducción de reacciones secundarias, consiguiendo productos más puros con una mejora en la calidad y las propiedades de los materiales procesados.

En la Tabla 4, se muestra la variación de las proporciones de alimentación de goma arábica y agar nutritivo, manteniendo constante la concentración del iniciador ($K_2S_2O_8$), entrecruzante (MBA) y el monómero (AA).

Tabla 4. *Proporciones de alimentación utilizadas para la síntesis de los hidrogeles GA/AN/PAM variando la concentración de goma arábica y agar nutritivo*

HGS	H ₂ O desionizada (mL)	GA/AN (g)	K ₂ S ₂ O ₈ (mol/L)	MBA (mol/L)	AA (mol/L)	Tiempo de irradiación (s)	Lavado (h)
HGS-0.25	25	0.25 / 0.25	0.0438	0.0106	0.1441	40	24
HGS-0.50		0.50 / 0.50					
HGS-0.75		0.75 / 0.75					
HGS-1.00		1.00 / 1.00					
HGS-1.25		1.25 / 1.25					
HGS-1.50		1.50 / 1.50					

El valor óptimo del disolvente fue 25 mL para la síntesis de reacción de los hidrogeles. Las moléculas de agua en el disolvente producen radicales hidroxilo al exponerse a irradiaciones de microondas, que se utilizan en el paso de la propagación de la cadena y dan como resultado un mayor porcentaje de hinchamiento (Sharma *et al.*, 2014; Sharma *et al.*, 2013).

El grado de expansión en los hidrogeles está influenciado por varios factores, que incluyen la afinidad de las cadenas poliméricas por el agua, la densidad de la reticulación de la estructura, la tacticidad y la cristalinidad. Es posible diseñar hidrogeles que respondan a diferentes estímulos, incorporando un comonómero sensible a dichos estímulos, ya sea dentro de la matriz polimérica o como grupos anexos en la estructura reticular. Estos materiales poseen la capacidad de hincharse, contraerse, enrollarse o incluso degradarse en respuesta a una señal específica y se conocen como hidrogeles inteligentes (Güven *et al.*).

Ahora bien, a mayor entrecruzamiento es requerida una mayor cantidad de agente entrecruzante para ser incorporado en la estructura del hidrogel. Sin embargo, los hidrogeles muy entrecruzados poseen una estructura más compacta y una menor capacidad de hinchamiento. Al aumentar el entrecruzamiento, se dificulta la movilidad de las cadenas de polímero, por ende, la disminución en el hinchamiento. La estructura molecular del polímero también afecta el hinchamiento (Ortiz, 2006).

Mientras que, a una concentración demasiado baja de iniciador se tiene igualdad de polimerización en el monómero; caso opuesto, al haber exceso de iniciador produce una elevación en la cantidad de cadenas de acrilamida inadecuadamente cortas (Zumaya, 2005).

Aquellos hidrogeles que contienen grupos hidrófilos en su estructura se hinchan en mayor grado que aquellos que contienen grupos hidrófobos, estos grupos colapsan en presencia de agua, minimizando su interacción con las moléculas de esta y dando como resultado hidrogeles mucho menos hinchados (Ortiz, 2006).

10.2. Caracterización de hidrogeles superabsorbentes GA/AN/PAM

10.2.1. Cinética de hinchamiento

La capacidad de retención de agua y la permeabilidad son los rasgos más importantes de un hidrogel. Los primeros grupos en hidratarse son los hidrófilos polares son al entrar en contacto con el agua, permitiendo la formación de enlaces primarios del agua. Como resultado, se presenta el hinchamiento de la red tridimensional y exposición de los grupos hidrofóbicos que también tienen la capacidad de interactuar con las moléculas de agua. Esto guía a la formación de agua enlazada hidrofóticamente, o bien llamada "agua enlazada secundaria ". La combinación de agua ligada primaria y secundaria se le conoce como "agua ligada total". La red absorbe agua adicional, a causa de la fuerza osmótica que impulsa las cadenas de la red hacia una dilución infinita. A este hinchamiento adicional se oponen los enlaces cruzados covalentes o físicos, conduciendo a una fuerza de retracción de la red elástica. En consecuencia, el hidrogel alcanza un nivel de hinchamiento de equilibrio. Y el agua absorbida adicional (agua libre o agua en masa) se figura que llena el espacio entre las cadenas de la red y/o el centro de poros, macroporos o huecos más grandes. Dependiendo de la naturaleza y composición del hidrogel, el siguiente paso es la disociación y/o disolución si la cadena de red o los enlaces cruzados son degradables. Por consiguiente, los hidrogeles biodegradables, que contienen enlaces lábiles, son provechosos en aplicaciones como la curación de heridas y la administración de fármacos, por mencionar. Estos enlaces pueden estar presentes en la cadena principal del polímero o en los enlaces cruzados, pudiendo ser utilizados para preparar el hidrogel. Los enlaces lábiles que en la mayoría de los casos se pueden romper por hidrólisis, también puede suceder en condiciones fisiológicas (enzimática o químicamente) Los hidrogeles, por causa de su alto contenido de agua, poseen un grado de flexibilidad análogo al

tejido natural. El control de la polaridad, propiedades superficiales, propiedades mecánicas y comportamiento de hinchamiento del hidrogel vuelve viable el cambio de su química.

En la Figura 10, se exhibe las isotermas de hinchamiento con respecto al tiempo para los hidrogeles sintetizado. variando la concentración de goma arábica y agar nutritivo, en donde se observa que el mayor porcentaje de hinchamiento tuvo lugar en los primeros 100 min. En todos los hidrogeles a partir de los 100 min hasta los 450 min se alcanzó el hinchamiento en el equilibrio o equilibrio fisicoquímico. Este estado de equilibrio se produce como resultado de una interacción entre las fuerzas osmóticas, que promueven la entrada de agua entre las cadenas del polímero hidrófilo, y las fuerzas cohesivas que actúan entre estas cadenas, resistiendo la expansión. Durante el proceso de hidratación, las cadenas que forman la estructura se elongan, al mismo tiempo que surgen fuerzas de contracción que actúan en oposición al proceso de hinchamiento. Estas fuerzas de contracción son ejercidas por las cadenas de la estructura sobre el solvente contenido en ella. La hidratación alcanza su valor máximo, o de equilibrio, al momento de obtener un balance entre ambas fuerzas (Peppas *et al.*, 2000; Rivera *et al.*, 2021).

También se puede observar en la Figura 10 que el hidrogel identificado como HGS-1.25 obtuvo el mayor porcentaje de hinchamiento del orden de 1257% con relación a su peso seco en agua. Mientras que para el hidrogel HGS-0.25 fue el de menor porcentaje de hinchamiento de 598%. Es claro que a medida que aumenta el porcentaje de alimentación de la cadena principal aumenta el porcentaje de hinchamiento y esto se debe al mayor grado de entrecruzamiento o reticulación que ocurre en los hidrogeles.

Esta mejora importante en la capacidad de absorción de los hidrogeles sintetizados se debe a que la goma arábica presenta alta solubilidad, de hasta 50% m/m, por lo que suelen utilizarse para la prevención de erosión del suelo, además de la buena solubilidad del agar nutritivo.

Los hidrogeles superabsorbentes a partir de goma arábica y agar nutritivo (Figura 11) se prepararon modificando la síntesis reportada por Hasija *et al.* en 2018, los resultados obtenidos con respecto al porcentaje de hinchamiento fueron mayores comparados con lo reportado por Hasija *et al.*, obteniendo una capacidad de hinchamiento o hidratación máxima de 377% su peso en agua. Por otro lado, Valencia (2022), informó en la síntesis a partir de goma arábica, poliacrilamida y agar nutritivo o coliforme (cadena principal), obteniendo hidrogeles absorbentes con porcentajes del orden de 559.21% y 631.59% respectivamente a 120 minutos, al modificar

las concentraciones de cadena principal, monómero de acrilamida, tiempo de irradiación y volumen de agua.

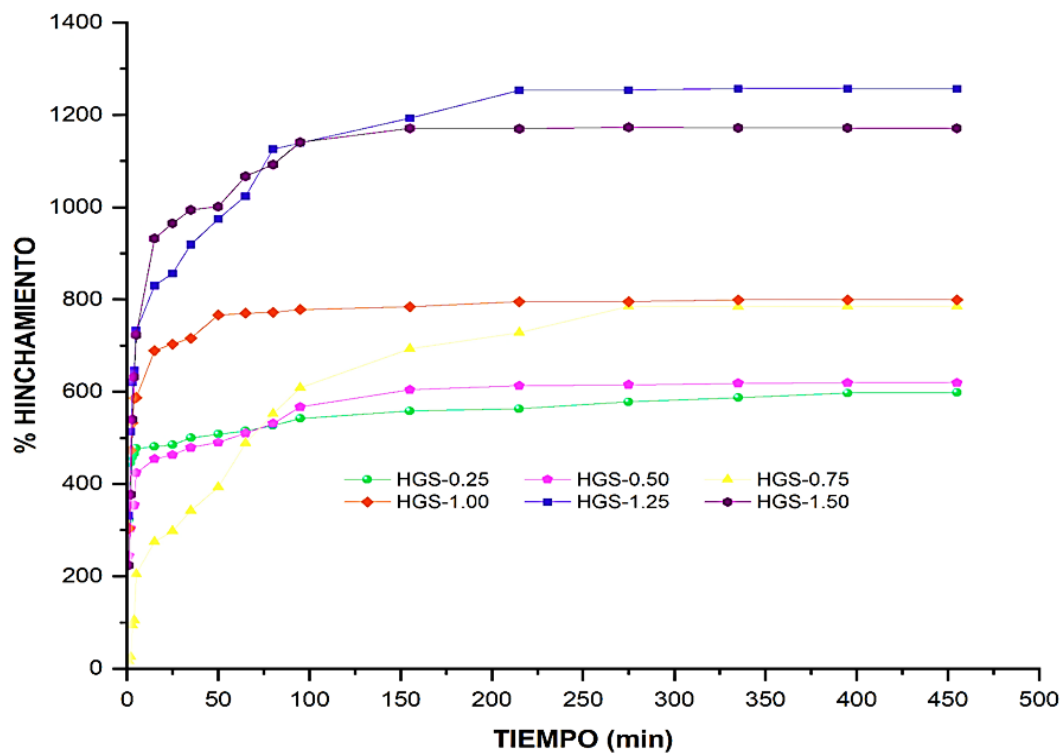


Figura 10. *Isoterma de absorción de hidrogeles sintetizados GA/AN/PAM con variación en la cadena principal a 455 min.*

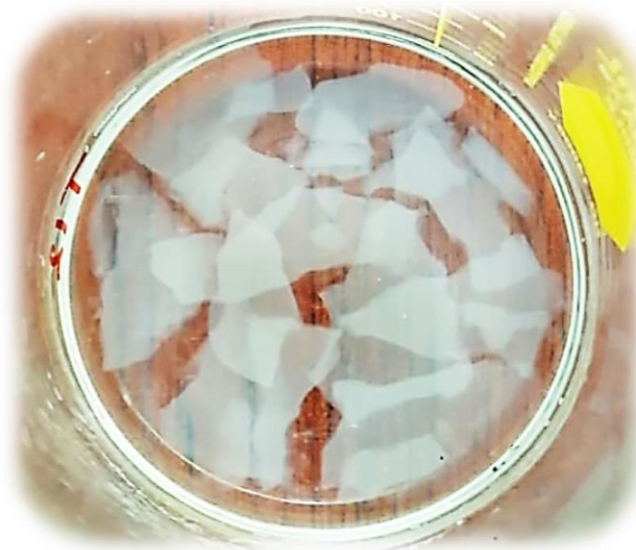


Figura 11. *Hidratación del hidrogel sintetizado en agua desionizada*

La capacidad de absorción entre el hidrogel comercial PAM y el hidrogel sintetizado denominado HGS-1.25 se muestra en la Figura 12, observándose que mientras el hidrogel comercial PAM alcanza un máximo de absorción de 500% (valor reportado por la Comercializadora Internacional de México), el HGS-1.25 alcanza un 1257% su peso seco en agua desionizada, atribuido al aumento de masa de la cadena principal por la característica de tener presentes en su estructura química más grupo hidrofílicos. Por otro lado, la capacidad de absorción de agua de la red municipal conseguida por el hidrogel comercial PAM va de 150 a 200% (valor reportado por la Comercializadora Internacional de México), mientras que el HGS-1.25 logra un hinchamiento del orden de 613% su peso seco en agua potable, esta disminución es atribuida a las cargas iónicas en el agua, a mayor concentración de sales disueltas en el agua, menor absorción de agua.

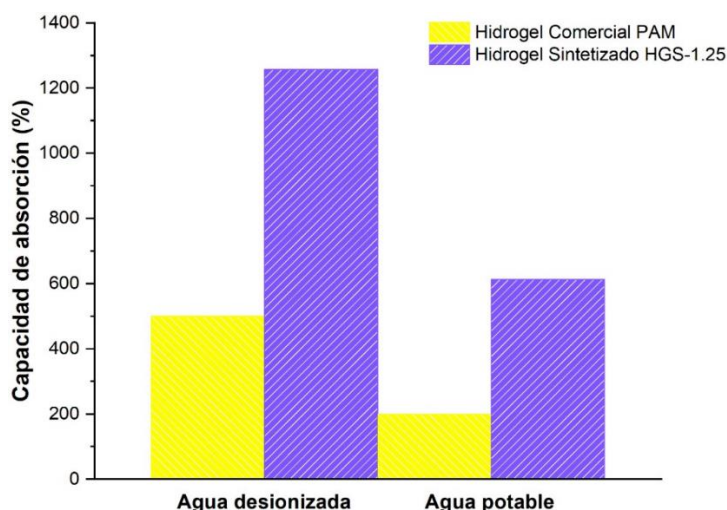


Figura 12. Capacidad de absorción de agua desionizada y de la red municipal del Hidrogel Comercial PAM e Hidrogel Sintetizado HGS-1.25

A partir de los resultados del grado de hinchamiento de los hidrogeles, el hidrogel identificado como HGS-1.25, con mayor porcentaje de hinchamiento fue caracterizado por Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier FTIR y microscopía electrónica de barrido (MEB) y aplicado para el almacigo de chile serrano híbrido y nativo.

10.2.2. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (ATR-FTIR)

Una técnica útil para identificar la estructura química de una sustancia es la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR-ATR) que se basa en el principio

de que los componentes básicos de una sustancia, es decir, los enlaces químicos, habitualmente pueden excitarse y absorber luz infrarroja en frecuencias típicas de los tipos de enlaces químicos. El espectro de absorción IR consecuente representa la huella digital de la muestra. Por ello, esta técnica es utilizada ampliamente para investigar la disposición estructural del hidrogel en comparación con los materiales de partida.

Los espectros de absorción IR tanto de la goma arábica (Figura 13), como del agar nutritivo (Figura 14) mostraron bandas características de polisacáridos en la región de 4000 a 400 cm^{-1} . Así mismo, el monómero de AA mostró las bandas características de absorción en la región IR. Todos estos reactivos químicos fueron utilizados como reactivos de partida para la formación los hidrogeles superabsorbentes.

El espectro IR de la GA presenta una banda ancha de absorción característica alrededor de 3334.70 cm^{-1} y corresponde a la presencia del grupo O-H en la estructura del polisacárido de la cadena principal. La banda a 2919.33 cm^{-1} señalan la presencia de azúcares, galactosa, arabinosa y ramnosa, y la presencia de estiramiento C-H de alcanos y estiramiento de C-H de aldehídos. La goma arábica también mostró la banda característica de estiramiento C=C, alrededor de 1597.41 cm^{-1} . Las vibraciones debidas al estiramiento simétrico C=O y la flexión -OH, corresponden a la banda de 1414.34 cm^{-1} y es característica de los ácidos glucurónicos. Una banda intensa a 1015.45 cm^{-1} está asociada con la flexión C-H del polisacárido (huella digital de carbohidratos). Rabeea *et al.* (2016) reportaron el espectro de absorción IR de la goma arábica de acacia var. Senegal y está de acuerdo con los resultados obtenidos, por lo que podemos sugerir que se trata de la goma arábica a partir del árbol de Acacia. El amplio uso de la GA es debido a su alta solubilidad y baja viscosidad comparada con otros polisacáridos, es un buen emulsificante y no es tóxica.

En el espectro IR para el AN fueron observadas las siguientes bandas: 3284.50 cm^{-1} asignado al grupo -OH (estiramiento del grupo hidroxilo), 1624.56 cm^{-1} banda característica de estiramiento C=C, 1395.50 cm^{-1} asignada a las vibraciones de estiramiento simétrico C=O y la flexión -OH de los ácidos glucurónicos, 1042.19 cm^{-1} , banda intensa asociada con la flexión C-H del polisacárido (huella digital de carbohidratos) y 526.11 cm^{-1} para el balanceo de CH_3 (Figura 14).

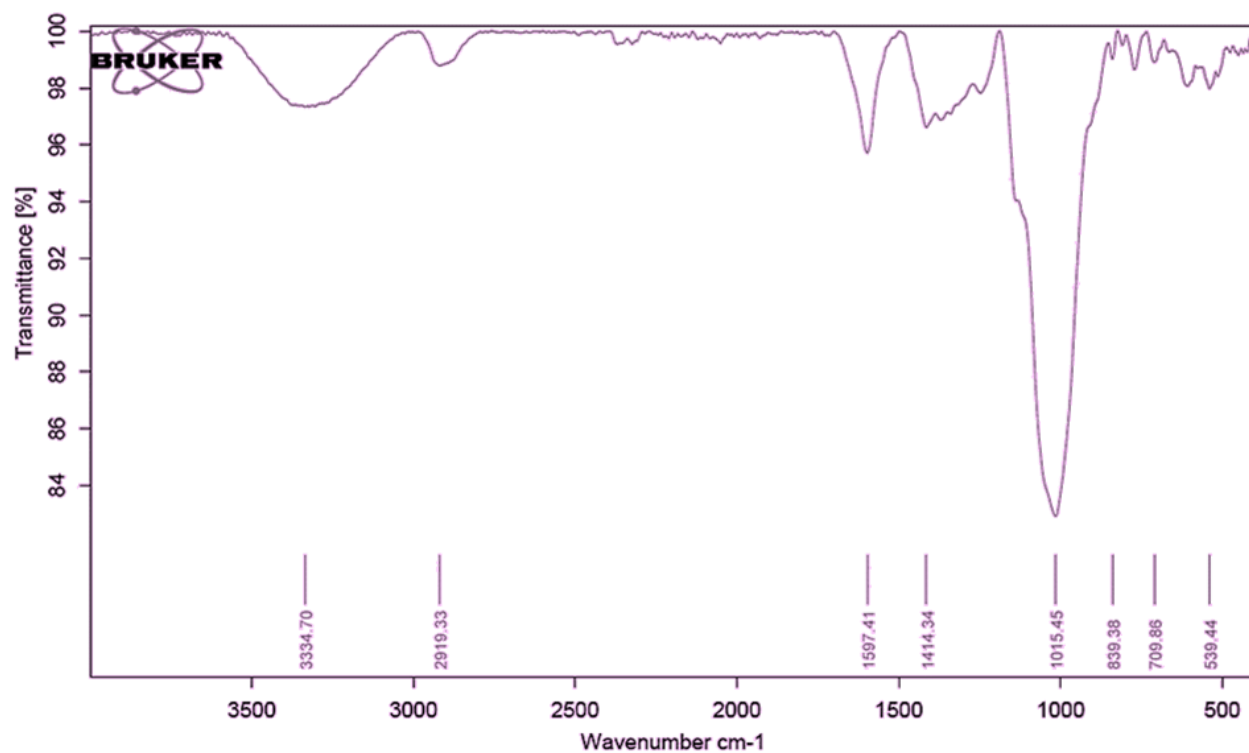


Figura 13. Espectro ATR-FTIR de goma arábica pura y sus bandas más características

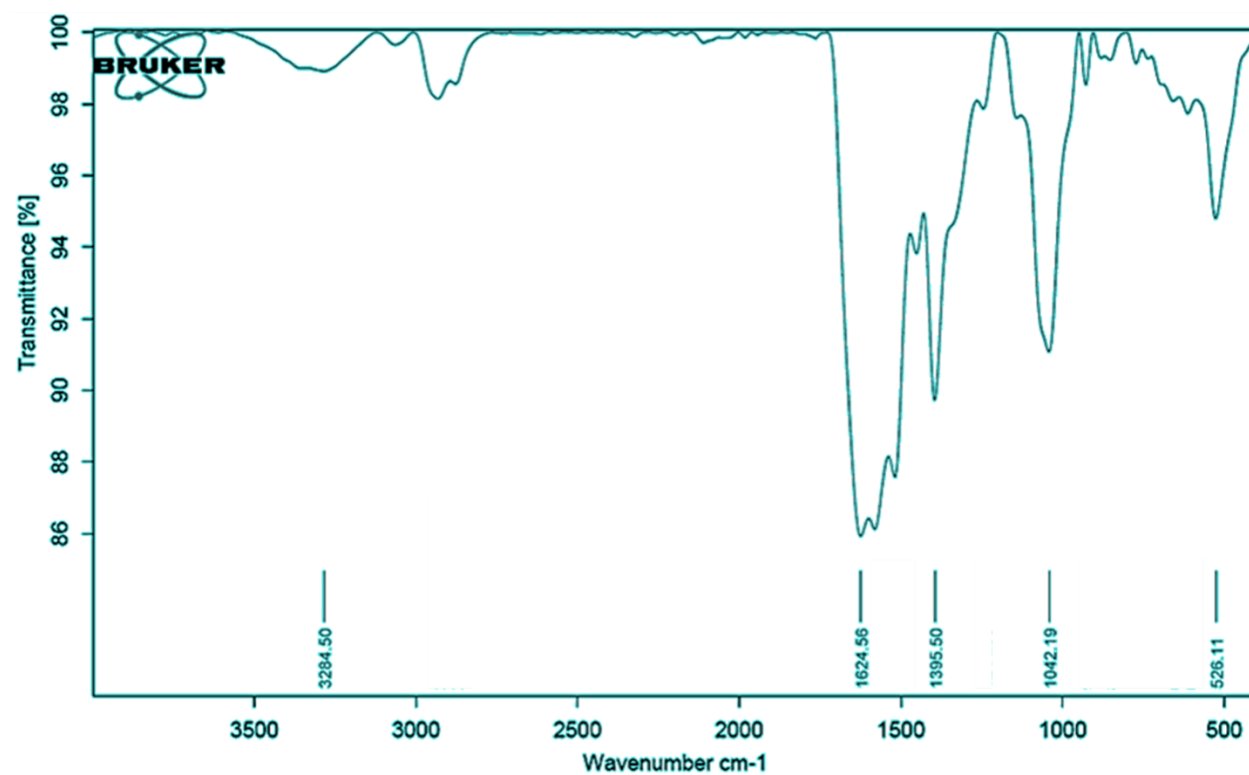


Figura 14. Espectro ATR-FTIR de agar nutritivo y sus bandas más características

En la Figura 15 se muestra el espectro de absorción IR del hidrogel identificado como HGS-1.25, el cual presentó el mayor porcentaje de hinchamiento en estado de xerogel. Un "xerogel" es un hidrogel en estado sólido secado lentamente a temperatura ambiente. Los xerogeles suelen conservar una alta porosidad (25%) y una enorme superficie (150 a 900 m²/g), junto con un tamaño de poro muy pequeño (1 a 10 nm).

La banda de absorción característicos del agar y la goma arábica se observaron a alrededor de 3369.58 cm⁻¹, lo que especifica la presencia de estiramiento por -OH de la estructura sacárido de ambas estructuras. La banda en 1039.02 cm⁻¹ está asociada con la flexión de los alquenos C-H a partir del enlace glicosídico polisacárido. La estructura del agar se confirma por la banda aguda de 930,65 cm⁻¹ que corresponden a puentes de 3,6-anhidro galactosa, 770.56 cm⁻¹ para el balanceo de CH₃ (Samiey y Ashoori, 2012). La presencia de monómero (acrilamida) está validada por la característica banda de absorción agudo a 1642.94 cm⁻¹ que se atribuye al grupo carboxilo (estiramiento > C=O) de la PA (Chaterji *et al.*, 2007). La formación de hidrogel reticulado se confirma aún más a partir de la banda de absorción en 1150.83 cm⁻¹, que representa el estiramiento de NH y el -NH la flexión plana del grupo amida (MBA) (Sharma *et al.*, 2013). Las observaciones de bandas extra y cambio de intensidad de las bandas verificaron el injerto de AA sobre agar y goma arábica (Hasija *et al.*, 2018).

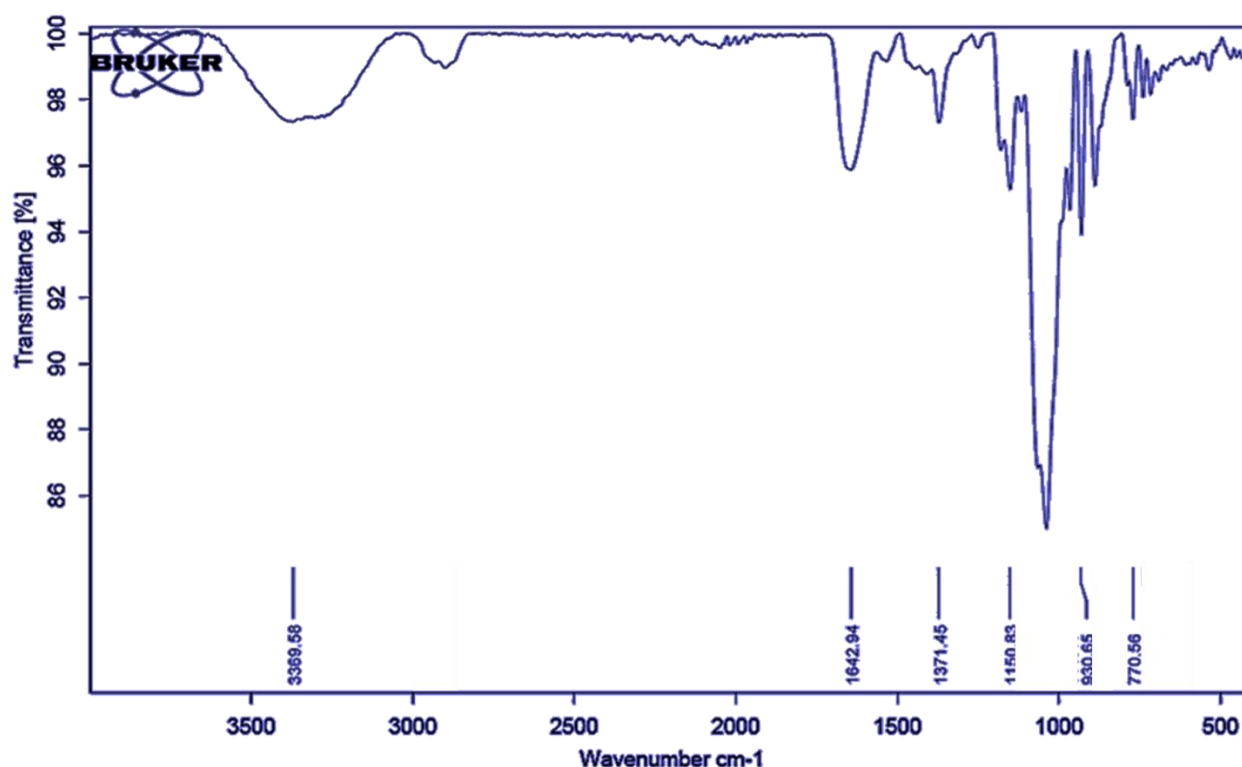


Figura 15. Espectro ATR-FTIR del xerogel HGS-1.25 y sus bandas más características

10.2.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La MEB se puede utilizar para proporcionar información sobre la topografía, composición y otras propiedades de la superficie de la muestra, como la conductividad eléctrica. La ampliación en MEB se puede controlar en un rango de hasta 6 órdenes de magnitud, desde aproximadamente 10 a 500.000 veces. Esta es una técnica ampliamente utilizada para capturar la estructura característica de "red" en los hidrogeles.

Los resultados de la caracterización por microscopía electrónica de barrido (MEB) muestran la morfología superficial de la muestra de HGS-1.25 (en estado de xerogel) en la Figura 16 y 17. En la Figura 16 se presenta la muestra de xerogel HGS-1.25 con aumentos de 62X, 175X y 215X, en donde se observa que la superficie de los hidrogeles es irregular y porosa, se puede apreciar la formación de pequeños cráteres en la superficie y es posible que pueden producirse durante el secado del hidrogel. En los hidrogeles se puede observar la formación de cavidades porosas.

Teniendo en cuenta estos resultados, se puede observar que el proceso por el cual los hidrogeles retienen agua es un fenómeno de absorción en donde el agua entra en el hidrogel debido a la existencia de un gradiente de presión del agua siendo mayor fuera del hidrogel.

En la Figura 17 se muestra la morfología superficial del hidrogel HGS-1.25 (en estado de xerogel) a magnitud de 100X en diferentes regiones de la muestra. Muestra la formación de gran número de poros en la estructura con variación en el tamaño, con ello, facilitando la entrada de agua a través de la estructura del polímero, además de ser superficie rugosa y con presencia de vesículas formadoras de poros. A través del histograma de frecuencia de poros del xerogel HGS-1.25 realizado de la micrografía MEB, se estimó que los tamaños de poros son heterogéneos, en un intervalo de entre 0.069 a 1.079 mm con predominancia en los poros más pequeños (0.1 a 0.2 mm). De acuerdo con Dave y Gior (2018), el tamaño y volumen del poro son efecto de la densidad del entrecruzamiento, por consiguiente, importante para el hinchamiento del polímero.

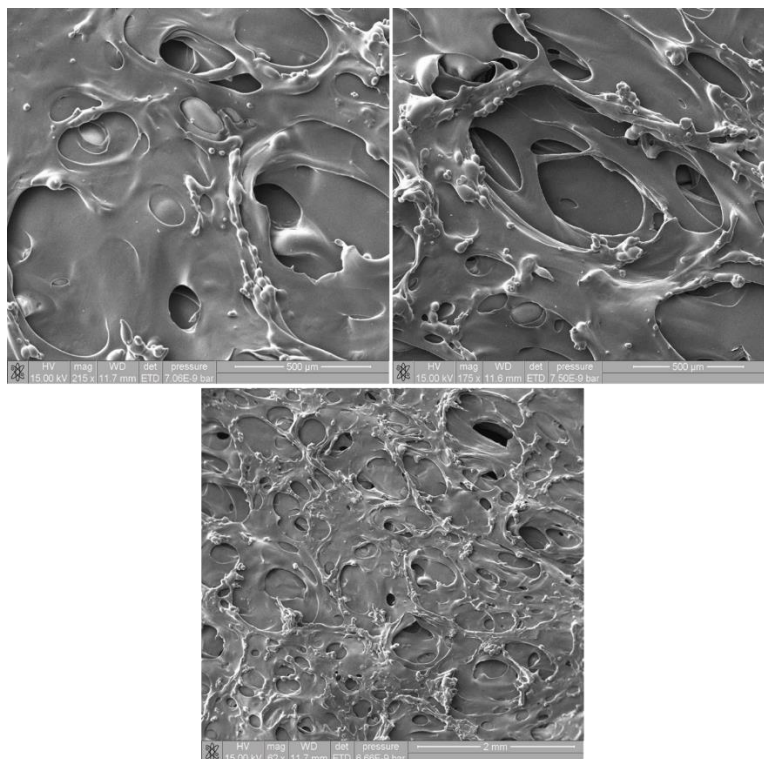


Figura 16. Imagen de MEB del xerogel con aumentos de 62X, 175X y 215X en la muestra

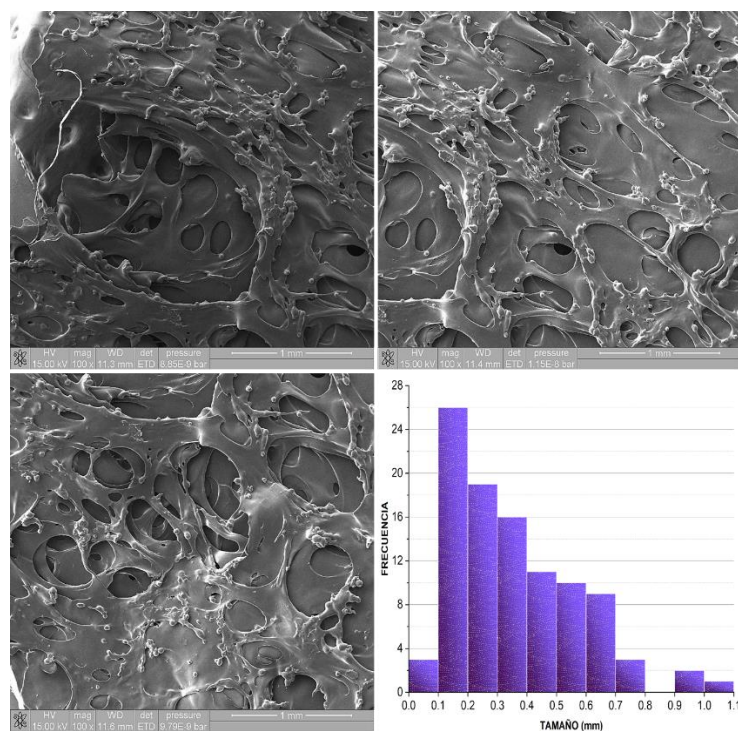


Figura 17. Imagen de MEB del xerogel HGS-1.25 con aumentos de 100X, en diferentes regiones de la muestra e histograma de la estimación del tamaño de poro

10.3. Trabajo de campo

10.3.1. Evaluación de variables fenológicas

En esta parte del trabajo se registraron las medidas de los parámetros a evaluar, después de la siembra de semilla y cultivo de la plántula de chile serrano y fueron: porcentaje de emergencia, número de hojas, altura de la plántula, longitud de raíz y diámetro de tallo, micronutrientes y macronutrientes en función de los tratamientos aplicados considerando las variables de los hidrogeles sintetizado y comercial con 0.25, 0.35 y 0.45% aplicados a chile serrano híbrido incluyendo el testigo.

Para analizar la fisiología del cultivo es conveniente dividir las etapas fenológicas del cultivo de chile serrano. Por lo general, se suele clasificar la fenología de la planta en distintas etapas que incluyen: germinación y emergencia, desarrollo de la plántula (etapas de análisis), crecimiento vegetativo acelerado, proceso de floración y fase de fructificación.

10.3.2. Porcentaje de emergencia

En la Tabla 5 se observan los porcentajes de emergencia de los diversos tratamientos aplicados en los días 5, 8 y 12 después de la siembra de semillas de chile serrano híbrido y nativo.

En la Tabla 5, también se puede observar que el mayor porcentaje de emergencia de las plántulas a partir del día 5 fue con el tratamiento HC1 (3.50%) respecto al resto de los tratamientos en estudio, con diferencias estadísticamente significativas (e.s.) ($p \leq 0.05$). Para el día 8, el tratamiento HC1 presentó el 44.17% de emergencia, que corresponde a chile híbrido con el hidrogel comercial al 0.25%, seguido de los tratamientos HC2 (41.83%), HS2 (41.83%) y HC3 (41.67%) con diferencias e.s. ($p \leq 0.05$) respecto a los demás tratamientos.

Posteriormente a los 12 días se alcanzó el mayor porcentaje de emergencia en las plántulas de chile híbrido, el mayor porcentaje se presentó en el tratamiento HC1 (99.50%), luego, los tratamientos HS1 (99.17%), HS2 (99.00%) y HC2 (98.83%), valores superiores al resto de los tratamientos con diferencias e.s. ($p \leq 0.05$).

Tabla 5. Comparación de medias para la variable porcentaje de emergencia de plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos

Tratamiento	Porcentaje de emergencia (%)		
	Día 5	Día 8	Día 12
TH	0 _b	37.33 ± 1.06 _e	98.67 ± 0.2 _c
HS1	0 _b	38.00 ± 0.73 _{de}	99.17 ± 0.64 _{ab}
HS2	0 _b	41.83 ± 1.48 _b	99.00 ± 0.73 _{ab}
HS3	0 _b	39.50 ± 2.91 _{cd}	98.67 ± 0.2 _c
HC1	3.50 ± 0.73 _a	44.17 ± 1.75 _a	99.50 ± 0.42 _a
HC2	0 _b	41.83 ± 1.35 _b	98.83 ± 0.24 _{ab}
HC3	0 _b	41.67 ± 0.24 _b	98.67 ± 0.64 _c
TN	0 _b	36.50 ± 2.34 _e	84.69 ± 0.58 _f
NS1	0 _b	40.17 ± 1.48 _{ab}	90.00 ± 0.50 _e
NS2	0 _b	40.67 ± 2.16 _{ac}	92.84 ± 0.29 _d
NS3	0 _b	38.00 ± 1.93 _{de}	92.15 ± 0.58 _d
NC1	0 _b	39.33 ± 2.16 _{cd}	90.76 ± 2.08 _e
NC2	0 _b	36.17 ± 0.64 _e	90.91 ± 1.26 _e
NC3	0 _b	40.50 ± 0.73 _{ab}	90.83 ± 0.58 _e

Letras diferentes significa que hay diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$)

Es claro que a los días 5, 8 y 12 el porcentaje de emergencia con el tratamiento HC1, siempre fue mayor con respecto a los demás tratamientos. En general, estadísticamente se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos por lo que la variable porcentaje de emergencia se vio afectada con la adición tanto del polímero comercial como sintetizado.

El suceso de cualquier daño durante este periodo comprenderá consecuencias desfavorables, considerando que ésta es la etapa en la que se presenta la mortalidad máxima. En la Figura 18 se presenta el porcentaje de emergencia de las plántulas de chile serrano durante el almácigo.



Figura 18. *Emergencia de plántula de chile serrano*

10.3.3. Número de hojas

Una vez terminado el progreso de las hojas cotiledonales, empieza el desarrollo de las hojas verdaderas, con características de ser más pequeñas y alternas a diferencia de las hojas de una planta adulta. Luego de aquí, en la parte aérea se percibe su crecimiento lento, durante ese tiempo, el desarrollo del alargamiento y profundización de la raíz (sistema radicular) continúa, además se origina la formación de algunas raíces secundarias laterales. En este momento es cuando la plántula aumenta su tolerancia a los daños, empero, aún es muy vulnerable.

La aparición de hojas verdaderas (Figura 19) se presentó a los 29 días después de la siembra y se contabilizó el mismo día para todas las plantas de chile serrano evaluadas en este trabajo. Se realizaron las medidas de número de hojas verdaderas en cuatro ocasiones, en los días 29, 43, 64 y 71 después de la siembra.



Figura 19. *Número de hojas verdaderas durante el desarrollo de plántulas de chile serrano*

El análisis de varianzas (Tabla 6) con respecto al número de hojas, señala que para el día 29 en la plántula de chile serrano nativo los resultados superiores se obtuvieron con el tratamiento NS2 con 4.28 hojas, en el día 43 el mismo tratamiento resultó mejor, al registrar 5.65 hojas, siguiendo la misma tendencia, al día 64 se señaló una media de 6.83 y 6.72 hojas con los tratamientos NS2 y NS1, respectivamente. Finalmente, en el último día de evaluación (71) se alcanzó 7.98, 7.62 y 7.54 hojas con NS2, NS1 y NS3, respectivamente, valores superiores con relación a los demás tratamientos en estudio con diferencia e.s. ($p \leq 0.05$).

Tabla 6. Comparación de medias para la variable número de hojas de plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos

Tratamiento	Número de hojas			
	Día 29	Día 43	Día 64	Día 71
TH	2.00 ± 4.48 _b	3.36 ± 7.47 _c	4.50 ± 3.85 _c	5.86 ± 10.49 _c
HS1	2.06 ± 5.30 _b	3.53 ± 5.06 _c	5.97 ± 5.87 _b	6.51 ± 5.72 _b
HS2	2.06 ± 5.24 _b	3.46 ± 4.92 _c	4.93 ± 6.42 _c	5.97 ± 7.62 _c
HS3	2.11 ± 5.32 _b	3.67 ± 4.63 _{bc}	5.50 ± 5.50 _b	6.00 ± 10.93 _b
HC1	2.06 ± 4.37 _b	3.63 ± 6.08 _c	5.72 ± 4.83 _b	6.35 ± 4.23 _b
HC2	2.06 ± 5.21 _b	3.71 ± 7.15 _{bc}	5.83 ± 8.92 _b	6.38 ± 5.13 _b
HC3	2.00 ± 5.39 _b	3.65 ± 5.06 _{bc}	5.91 ± 5.49 _b	5.91 ± 7.15 _c
TN	2.17 ± 6.57 _b	3.70 ± 8.46 _{bc}	5.72 ± 5.67 _b	6.41 ± 7.62 _b
NS1	2.56 ± 5.66 _{ab}	5.13 ± 3.50 _{ab}	6.72 ± 6.67 _a	7.62 ± 5.51 _a
NS2	4.28 ± 5.31 _a	5.65 ± 8.07 _a	6.83 ± 6.71 _a	7.98 ± 4.68 _a
NS3	2.33 ± 4.69 _{ab}	5.08 ± 8.07 _{ab}	6.22 ± 5.65 _{ab}	7.54 ± 5.47 _a
NC1	2.28 ± 5.57 _b	5.00 ± 10.50 _{ab}	6.15 ± 6.44 _{ab}	7.16 ± 9.41 _{ab}
NC2	2.22 ± 5.43 _b	5.01 ± 9.44 _{ab}	6.18 ± 5.25 _{ab}	7.20 ± 8.62 _{ab}
NC3	2.17 ± 5.38 _b	5.03 ± 5.90 _{ab}	6.20 ± 5.74 _{bc}	7.23 ± 9.09 _{ab}

Letras diferentes significa que hay diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$)

10.3.4. Altura de plántulas

La variable altura de plántula fue medida exclusivamente al día 71. En la Tabla 7 se muestran los resultados de la variable altura de plántula de chile serrano híbrido al día 71 donde se observa que el tratamiento HS2 (17.69 cm) mostró mayor respuesta, seguido, de los tratamientos HS1 (16.30 cm), HS3 (16.08 cm). En la Tabla 7, también se puede apreciar que el tratamiento NS2 (15.87cm) tienen diferencias e.s. ($p \leq 0.05$) en las plántulas de chile serrano nativo. La disparidad en la altura de las plantas en los distintos tratamientos es evidente y estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$), a pesar de que todas fueron sembradas simultáneamente. Esta variación podría estar relacionada con el comportamiento divergente de las variedades utilizadas, tanto la nativa como la híbrida. Estas diferencias pueden deberse a factores genéticos, adaptaciones específicas al entorno o a la variabilidad inherente (tipo de hidrogel aplicado) en el crecimiento de las plantas, lo que subraya la importancia de tener en cuenta la diversidad genética y las interacciones complejas en los estudios agrícolas.

Tabla 7. Comparación de medias para la variable altura de plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos

Tratamiento	Altura de plántulas (cm)
	Día 71
TH	$13.83 \pm 0.57_e$
HS1	$16.30 \pm 0.47_b$
HS2	$17.69 \pm 0.40_a$
HS3	$16.08 \pm 0.33_b$
HC1	$14.04 \pm 0.38_{de}$
HC2	$14.51 \pm 0.45_{cd}$
HC3	$14.04 \pm 0.45_{de}$
TN	$12.84 \pm 0.65_f$
NS1	$14.88 \pm 0.49_c$
NS2	$15.87 \pm 0.68_b$
NS3	$15.77 \pm 0.50_b$

NC1	$12.42 \pm 0.98_f$
NC2	$13.56 \pm 0.63_e$
NC3	$13.83 \pm 0.31_e$

Letras diferentes significa que hay diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$)

En la Figura 20 se muestra el crecimiento (altura) de las plántulas de chile serrano durante el almácigo.



Figura 20. *Altura de plántulas de chile serrano*

10.3.5. Longitud de raíz

El análisis de longitud de raíz (Figura 21) se realizó a partir del día 50 hasta el día 71 con 4 mediciones durante ese periodo, la Tabla 8 exhibe que particularmente para el chile serrano híbrido el tratamiento que destacó al día 50 hasta el día 71 fue HS2 (70.99 mm, 84.48 mm, 88.56 mm, y 97.79), con diferencias e.s. ($p \leq 0.05$) a los demás tratamientos aplicados. Ahora bien, el tratamiento HC1 con chile serrano híbrido se consiguieron los siguientes mejores valores, 62.66 79.77, 79.82 y 96.86 mm. Por último, en el día 71, HS2 (97.79 mm), NS2 (97.01 mm) y HC1 (96.86 mm) consiguieron mayor longitud de raíz con diferencias e.s. ($p \leq 0.05$) en relación con los tratamientos empleados.



Figura 21. *Plántula de chile serrano con sus raíces lavadas*

Tabla 8. *Comparación de medias para la variable longitud de raíz de plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos*

Tratamiento	Longitud de raíz (mm)			
	Día 50	Día 57	Día 64	Día 71
TH	61.96 ± 7.11 _c	70.58 ± 7.43 _b	78.78 ± 8.11 _{bcd}	83.66 ± 7.75 _f
HS1	69.28 ± 10.71 _a	80.12 ± 14.37 _{ab}	85.64 ± 6.32 _{ab}	88.67 ± 8.74 _{cde}
HS2	70.99 ± 6.23 _a	84.48 ± 8.89 _a	88.56 ± 8.16 _a	97.79 ± 2.01 _a
HS3	69.60 ± 5.85 _a	79.08 ± 5.21 _b	79.31 ± 9.22 _{bcd}	91.92 ± 8.84 _{bcd}
HC1	62.66 ± 5.15 _c	79.77 ± 13.79 _{ab}	79.82 ± 9.78 _{bcd}	96.86 ± 6.92 _a
HC2	67.18 ± 5.80 _{ab}	84.29 ± 7.99 _{ab}	88.45 ± 2.89 _a	92.20 ± 6.71 _{bcd}
HC3	64.70 ± 3.67 _{bc}	71.62 ± 6.15 _c	78.47 ± 7.10 _{bcd}	87.15 ± 7.71 _{ef}
TN	45.01 ± 6.47 _f	50.14 ± 5.74 _f	68.19 ± 9.34 _e	80.24 ± 8.89 _f
NS1	56.46 ± 3.70 _d	70.49 ± 10.46 _c	82.39 ± 8.15 _{abc}	90.04 ± 8.25 _{cde}
NS2	49.38 ± 5.61 _e	71.20 ± 5.17 _c	85.28 ± 8.50 _{ab}	97.01 ± 3.07 _a
NS3	49.27 ± 5.84 _e	71.59 ± 6.42 _c	84.52 ± 9.37 _{ab}	94.91 ± 5.63 _{ab}
NC1	49.73 ± 3.77 _e	62.53 ± 7.64 _{de}	79.54 ± 11.62 _{bcd}	89.99 ± 7.87 _{cde}
NC2	51.51 ± 5.76 _e	62.80 ± 4.62 _{de}	74.52 ± 4.14 _{cde}	86.29 ± 3.58 _{ef}
NC3	56.53 ± 3.49 _d	60.81 ± 8.44 _e	78.89 ± 11.63 _{bcd}	94.02 ± 6.09 _{abc}

Letras diferentes significa que hay diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$)

10.3.6. Diámetro de tallo

A partir de la sexta a la octava hoja, se observa una disminución gradual en la tasa de crecimiento del sistema radicular. En contraste, el crecimiento de las hojas y los tallos experimenta un aumento significativo. Durante este período, las hojas alcanzan su tamaño máximo, y el tallo principal se bifurca. Conforme la planta continúa su crecimiento, ambos tallos se ramifican aún más.

Se realizaron las medidas del diámetro de tallo en cuatro ocasiones (Figura 22), en los días 50, 57, 64 y 71 después de la siembra. En la Tabla 9 se muestra que el chile serrano híbrido presentó los mayores valores al día 50, 57, 64 y 71 con el tratamiento HS2 1.87, 2.13, 2.40 y 2.60 mm, respectivamente, evidenciando así, mayor eficacia en la variable en cuestión. Y los tratamientos HS1, HS3 y HC2 con diferencias e.s. ($p \leq 0.05$) obtuvieron mayores valores después del tratamiento HS2, sobre los demás tratamientos.



Figura 22. *Medición de diámetro de tallo de plántulas de chile serrano*

Tabla 9. Comparación de medias para la variable diámetro de tallo de plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos

Tratamiento	Diámetro del tallo (mm)			
	Día 50	Día 57	Día 64	Día 71
TH	1.47 ± 0.05 _d	1.77 ± 0.06 _d	2.17 ± 0.05 _d	2.40 ± 0.00 _b
HS1	1.73 ± 0.06 _b	2.00 ± 0.02 _b	2.30 ± 0.00 _b	2.53 ± 0.05 _{ab}
HS2	1.87 ± 0.06 _a	2.13 ± 0.10 _a	2.40 ± 0.00 _a	2.60 ± 0.02 _a
HS3	1.70 ± 0.00 _{bc}	1.97 ± 0.05 _{bc}	2.27 ± 0.10 _{bc}	2.50 ± 0.15 _{ab}
HC1	1.70 ± 0.00 _{bc}	1.97 ± 0.10 _{bc}	2.27 ± 0.01 _{bc}	2.49 ± 0.01 _{ab}
HC2	1.73 ± 0.09 _b	2.00 ± 0.00 _b	2.30 ± 0.00 _b	2.57 ± 0.10 _a
HC3	1.63 ± 0.12 _c	1.93 ± 0.06 _c	2.23 ± 0.05 _{dc}	2.40 ± 0.07 _b
TN	1.10 ± 0.03 _h	1.33 ± 0.06 _h	1.53 ± 0.05 _h	1.93 ± 0.41 _e
NS1	1.30 ± 0.00 _f	1.50 ± 0.00 _f	1.77 ± 0.05 _{fg}	2.00 ± 0.08 _{de}
NS2	1.30 ± 0.05 _f	1.57 ± 0.05 _e	2.13 ± 0.05 _d	2.25 ± 0.00 _c
NS3	1.30 ± 0.00 _f	1.50 ± 0.00 _f	1.80 ± 0.02 _f	2.10 ± 0.00 _{de}
NC1	1.30 ± 0.00 _f	1.50 ± 0.00 _f	1.80 ± 0.01 _f	2.03 ± 0.05 _{de}
NC2	1.33 ± 0.05 _{ef}	1.57 ± 0.06 _e	1.90 ± 0.00 _e	2.20 ± 0.00 _c
NC3	1.20 ± 0.10 _g	1.40 ± 0.00 _g	1.73 ± 0.10 _g	1.93 ± 0.10 _e

Letras diferentes significa que hay diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$)

10.3.7. Contenido de micronutrientes en plántula

De acuerdo con los micronutrientes en tallo y hojas la comparación de medias al día 71, expresa que las plántulas de chile nativo con el tratamiento NS2 dieron el valor más alto de Fe con 209.44 ppm y con el tratamiento TH (testigo) fue el valor más bajo del orden de 117.22 ppm. De manera similar para Mn el tratamiento NS2 (20.56 ppm) fue el de mayor valor y para los tratamientos TH y TN (testigo híbrido y nativo), los valores resultaron ser los valores más bajos (10.56 ppm). Para Zn el mayor valor se registró con HS2 (294.97 ppm), seguido de HS1 (262.36 ppm), mientras que los valores más bajos fueron los testigos, TH del 47.04 y TN de 34.44 ppm. Los valores sobresalientes de Cu fueron con HS2 (5.56 ppm) con diferencias e.s. ($p \leq 0.05$) a los demás tratamientos aplicado a las plántulas, pero para los tratamientos de los

testigos fueron los valores más bajo, TH con 3.56 ppm y TN de 3.44 ppm, como se puede observar en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparación de medias para la variable micronutrientes en plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos.

Tratamiento	Micronutrientes (ppm) Día 71			
	Fe	Mn	Zn	Cu
TH	117.22 ± 3.52 _l	10.56 ± 0.81 _f	47.04 ± 4.09 _l	3.56 ± 0.32 _d
HS1	169.44 ± 2.14 _c	17.00 ± 1.01 _c	262.36 ± 6.26 _b	4.43 ± 0.22 _{bc}
HS2	169.58 ± 8.80 _c	17.06 ± 0.58 _c	294.97 ± 7.31 _a	5.56 ± 0.81 _a
HS3	141.11 ± 4.92 _{ef}	14.82 ± 0.17 _d	191.64 ± 12.16 _d	4.92 ± 0.12 _{ab}
HC1	136.11 ± 8.44 _{fg}	12.22 ± 0.90 _e	162.27 ± 6.40 _e	4.44 ± 0.81 _{bc}
HC2	134.44 ± 3.52 _g	14.67 ± 0.28 _d	131.17 ± 3.15 _f	3.99 ± 0.74 _{cd}
HC3	131.67 ± 7.00 _{gh}	12.22 ± 0.81 _e	65.57 ± 1.60 _h	3.89 ± 0.81 _{cd}
TN	126.75 ± 1.49 _h	10.56 ± 0.56 _f	34.44 ± 1.62 _j	3.44 ± 0.15 _d
NS1	171.20 ± 8.15 _c	19.44 ± 1.62 _b	101.18 ± 1.71 _g	4.92 ± 0.12 _{ab}
NS2	209.44 ± 9.00 _a	20.56 ± 0.81 _a	131.17 ± 3.15 _c	4.44 ± 0.81 _{ab}
NS3	180.00 ± 2.80 _b	18.89 ± 0.81 _b	188.89 ± 16.17 _d	4.99 ± 0.02 _{ab}
NC1	173.89 ± 3.52 _{bc}	19.17 ± 2.10 _b	67.70 ± 1.50 _h	4.91 ± 0.11 _{bc}
NC2	143.33 ± 7.00 _e	19.44 ± 0.81 _b	101.25 ± 1.81 _g	4.50 ± 0.44 _{bc}
NC3	156.69 ± 4.23 _d	18.70 ± 0.34 _b	104.55 ± 6.62 _g	5.00 ± 1.40 _{ab}

Letras diferentes significa que hay diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$)

10.3.8. Contenido de macronutrientes en plántula

En la Tabla 11 se presenta los valores de los macronutrientes en tallo y hoja de plántula de chile serrano a los 71 días después de la siembra. Se observa que para N (nitrógeno), el chile serrano híbrido destaca con el tratamiento NS2 (2.57%), después HS2 (2.54%). Para P (fósforo) el mejor valor se encontró con el tratamiento NS2 (0.26%), seguido de los tratamientos NS3 (0.17%) y HS2 (0.17%). Mientras que en K (potasio) el tratamiento NS2 (2.69%) fue el

mejor, seguido de NS3 (2.59%). En el caso de Ca (calcio), el tratamiento sobresaliente fue NS2 (1.50%), posterior a este fueron HS2 (1.48%), NS3 y NS1, todos los tratamientos con un valor de 1.47%. Finalmente, para Mg los tratamientos NS2 (1.53%) y HS2 (1.52%) destacaron con diferencias e.s. ($p \leq 0.05$) con relación a los tratamientos aplicados.

Tabla 11. Comparación de medias para la variable macronutrientes en plántulas de chile serrano nativo e híbrido con diferentes tratamientos.

Tratamiento	Macronutrientes (%) Día 71				
	N	P	K	Ca	Mg
TH	$1.93 \pm 0.07_h$	$0.09 \pm 0.08_l$	$2.22 \pm 0.04_{fg}$	$1.21 \pm 0.17_e$	$1.10 \pm 0.03_h$
HS1	$2.11 \pm 0.05_f$	$0.12 \pm 0.08_e$	$2.47 \pm 0.10_d$	$1.44 \pm 0.03_b$	$1.28 \pm 0.08_f$
HS2	$2.54 \pm 0.01_{ab}$	$0.17 \pm 0.16_b$	$2.56 \pm 0.02_{bc}$	$1.48 \pm 0.09_{ab}$	$1.52 \pm 0.05_a$
HS3	$2.36 \pm 0.01_c$	$0.09 \pm 0.09_h$	$2.54 \pm 0.08_{bc}$	$1.39 \pm 0.07_c$	$1.48 \pm 0.07_b$
HC1	$2.00 \pm 0.06_g$	$0.09 \pm 0.18_l$	$2.37 \pm 0.03_e$	$1.44 \pm 0.02_b$	$1.27 \pm 0.05_f$
HC2	$2.31 \pm 0.09_{cd}$	$0.12 \pm 0.06_d$	$2.38 \pm 0.04_e$	$1.35 \pm 0.08_c$	$1.28 \pm 0.06_{ef}$
HC3	$1.93 \pm 0.01_h$	$0.09 \pm 0.12_l$	$2.27 \pm 0.07_f$	$1.28 \pm 0.10_d$	$1.27 \pm 0.07_f$
TN	$2.10 \pm 0.11_f$	$0.09 \pm 0.11_l$	$2.19 \pm 0.12_g$	$1.26 \pm 0.21_d$	$1.22 \pm 0.16_g$
NS1	$2.48 \pm 0.03_b$	$0.12 \pm 0.20_{ef}$	$2.49 \pm 0.06_{cd}$	$1.47 \pm 0.06_{ab}$	$1.47 \pm 0.01_b$
NS2	$2.57 \pm 0.03_a$	$0.26 \pm 0.10_a$	$2.69 \pm 0.09_a$	$1.50 \pm 0.07_a$	$1.53 \pm 0.04_a$
NS3	$2.30 \pm 0.01_{de}$	$0.17 \pm 0.07_b$	$2.59 \pm 0.03_b$	$1.47 \pm 0.04_{ab}$	$1.38 \pm 0.02_c$
NC1	$2.13 \pm 0.05_f$	$0.11 \pm 0.09_g$	$2.39 \pm 0.04_e$	$1.45 \pm 0.03_b$	$1.37 \pm 0.08_{cd}$
NC2	$2.26 \pm 0.02_e$	$0.11 \pm 0.01_f$	$2.51 \pm 0.03_{cd}$	$1.46 \pm 0.03_{ab}$	$1.31 \pm 0.07_e$
NC3	$2.32 \pm 0.01_{cd}$	$0.14 \pm 0.10_c$	$2.52 \pm 0.04_{bcd}$	$1.45 \pm 0.14_b$	$1.35 \pm 0.03_d$

Letras diferentes significa que hay diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$)

La Figura 23 muestra el material vegetal seco correspondiente al tallo y hojas (a), y molido (b) utilizado para las cuantificaciones de micronutrientes y macronutrientes de las plántulas de chile serrano nativo e híbrido.



Figura 23. Tallo y hojas de plántula de chile serrano seca (a) y molida (b) para la cuantificación de micronutrientes y macronutrientes

En la Tabla 12 se concentran los valores más sobresalientes con diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) del último día de evaluación de cada variable (71 días), incluyendo el porcentaje de emergencia a los 12 días. En donde se muestra que el tratamiento HC1 fue mayor para porcentaje de emergencia con el 99.50%, mientras que HS2 resultó ser significativamente mayor en: altura de plántulas (17.69 cm), longitud de raíz (97.79 mm), diámetro de tallo (2.60 mm), los micronutrientes Zn (294.97 ppm) y Cu (5.56 ppm), y el macronutriente Mg (1.52%). Finalmente, los notables efectos de NS2 se presentaron en: número de hojas (7.98 hojas), en micronutrientes para Fe (209.44 ppm) y Mn (20.56 ppm), y en macronutrientes: N (2.57%), P (0.26%), K (2.69%) y Ca (1.50%).

Durante el desarrollo de este trabajo de investigación no se encontró información sobre evaluación de variables fenológicas anteriores a la etapa de trasplante, tampoco de la aplicación de hidrogel ni de trabajo en invernadero para chile serrano híbrido y menos para el nativo, por lo tanto, la importancia de emitir los datos obtenidos que son determinantes para la calidad de las plántulas con repercusión en su vigor, adaptabilidad al trasplante, buen desarrollo

y libre de enfermedades, con la finalidad de la obtención de una extraordinaria producción de chile con alta calidad. Además de la conservación del chile criollo.

Se ha observado un efecto significativo de los hidrogeles, tanto comerciales como sintetizados, en las dos variedades de chile serrano, es decir, el nativo y el híbrido.

Un factor determinante en la germinación de la semilla es la absorción de agua y oxígeno a través de la testa (activa el rompimiento de la latencia). Por lo que, la variación de dureza de la testa, al igual que la impermeabilidad de la capa cerosa de estas semillas se vieron influidas los tratamientos aplicados de hidrogeles comercial como sintetizado, además de la variedad en la cual se aplicó, teniendo en cuenta que, en el caso del chile híbrido, se tiene reporte de porcentaje de germinación del 90%, mientras se conoce que el promedio de germinación es del 80 al 85%. sobre chile serrano nativo

Es importante mencionar que todos los tratamientos a base de hidrogeles superabsorbentes sintetizados y comerciales no solo superaron el porcentaje de emergencia del testigo, sino en todas las variables evaluadas debido al contacto continuo con la humedad a partir del hidrogel, ocasionando la actividad de la enzima tipo hidrolasa que tiene como función la debilitación de la pared celular donde se lleva a cabo la emergencia de la semilla, también se atribuye a la actividad de las enzimas en las semillas de cada variedad, las diferencias de la concentración y tipo de polímero.

Por lo que respecta al tratamiento HS2, el crecimiento (altura), longitud de raíz y diámetro de tallo de las plántulas, resultados favorables con los tratamientos a base de hidrogel sintetizado. Urrestarazu y Mazuela en 2005, señalaron que la buena oxigenación en la raíz (respiración), posiblemente causa el eficiente desarrollo debido a la disponibilidad en la absorción de agua y los nutrientes, influyendo favorablemente el rendimiento, es así como la dispersión del hidrogel y la porosidad del el sustrato mantuvieron esa disponibilidad.

El tratamiento NS2 presentó una mayor diferencia e.s., ($p \leq 0.05$) en el número de hojas, esto se puede deber a la mayor y constante disponibilidad de nutrientes, abasteciendo los requerimientos de la plántula del chile serrano durante su crecimiento (Gorbe y Calatayud, 2010).

Los tratamientos HS2 y NS2 tuvieron una fuerte influencia de los hidrogeles sintetizados, tanto en chile serrano híbrido como en nativo, además de un aporte en el contenido de micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu) y macronutrientes (N, P, K y Mg) que se aportaron por medio de la solución nutritiva tuvieron una lixiviación en menor grado en el sustrato al incorporar los

hidrogeles, se propone que presenta una tasa lenta de mineralización y una mayor capacidad de intercambio iónico. Arancon et al. en 2004, aseveran que a parte de la nutrición aplicada también se debe tener en cuenta las propiedades físicas de los sustratos, a pesar de ello, no se toma en cuenta en la mayoría de los trabajos relacionados.

Conforme con los resultados obtenidos se sugieren que la presencia del polímero para el abastecimiento de agua y nutrientes está disponible constantemente, mientras que, sin polímero, los nutrientes están disponibles de manera inmediata pudiendo agotarse por filtración, evaporación, lixiviación, entre otros. Además, que el uso de peat moss como sustrato también ejerce efecto positivo debido a que aumenta la capacidad de intercambio catiónico.

De acuerdo con los resultados obtenidos se sugiere que la presencia de biopolímeros o hidrogeles superabsorbentes de goma arábiga de acacia para el abastecimiento de agua y nutrientes se encuentran disponible constantemente. Se ha demostrado la viabilidad del uso de hidrogeles para optimizar la capacidad de absorción de agua en el sustrato, disminuir la evaporación de esta, reducir la lixiviación de nutrientes y mejorar la aireación y drenaje del sustrato, lo cual permite favorecer el proceso del sistema radical y el desarrollo de la planta, así como mejorar la actividad biológica e incrementar la producción. Debido a su gran capacidad de retención hídrica los hidrogeles han sido diseñados para mejorar el crecimiento vegetal en suelos de ambientes áridos, pero es claro que tienen un efecto importante en condiciones de invernadero en el cultivo de chile serrano nativo e híbrido. Por lo que, es posible un manejo más eficiente del agua y para la agricultura, además constituye una alternativa limpia, sin perder de vista la sustentabilidad, así como la preservación del acuífero, sin deterioro del ambiente. Además, si tomamos en cuenta que el chile es una hortaliza de importancia alimentaria, económica y cultural en México y que se ubica entre las cinco principales hortalizas del país

Tabla 12. Concentrado de valores más altos con diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$) de las variables evaluadas al final de su evaluación (día 12 y 71)

Día	12	71												
Tratamiento	Porcentaje de emergencia (%)	Número de hojas	Altura de plántulas (cm)	Longitud de raíz (mm)	Diámetro de tallo (mm)	Micronutrientes (ppm)				Macronutrientes (%)				
						Fe	Mn	Zn	Cu	N	P	K	Ca	Mg
HC1	99.50 ± 0.42													
HS2			17.69 ± 0.40	97.79 ± 2.01	2.60 ± 0.02			294.97 ± 7.31	5.56 ± 0.81					1.52 ± 0.05
NS2		7.98 ± 4.68				209.44 ± 9.00	20.56 ± 0.81			2.57 ± 0.03	0.26 ± 0.10	2.69 ± 0.09	1.50 ± 0.07	1.53 ± 0.04

11. CONCLUSIÓN

Los hidrogeles de GA/AN de 1.25 g asistido por microondas alcanzó un porcentaje de hinchamiento de 1257 y 613 con agua desionizada y de la red municipal, respectivamente. Así también, los espectros IR verificaron la obtención de hidrogeles superabsorbentes al mostrar las nuevas bandas y el cambio en su intensidad, demostrando el entrecruzamiento sobre la cadena principal y el monómero. Finalmente, la técnica de MEB informó que el tamaño de poros del xerogel es heterogéneo con superficie rugosa. Las condiciones de reacción optimas fueron mejoradas al sintetizar con 1.25 g de GA y AN, el iniciador, entrecruzante y monómero al 0.0438, 0.0106 y 0.1441 mol/L, respectivamente, llevado a un volumen de 25 mL de agua desionizada con un tiempo de irradiación de microondas de 40 s y un lavado durante 24 hrs para obtener un hidrogel superabsorbente con un porcentaje de absorción de agua mayor al reportado por Hasija y colaboradores.

Los efectos en el desarrollo fenológico en el cultivo de chile serrano son mayores al aplicar hidrogel sintetizado de goma arábica en comparación al Hidrogel de Poliacrilamida comercial y el testigo.

En base a los análisis realizados entre las diferentes dosis de hidrogel comercial y sintetizado (0.25, 0.35% y 0.45%) se evidencia que, si existe diferencia estadísticamente significativa con respecto al tipo y dosis de hidrogel entre los tratamientos considerando entre ellos el testigo, donde el mejor tratamiento para porcentaje de emergencia fue HC1, mientras que HS2 para altura de plántula, longitud de raíz, diámetro de tallo, los micronutrientes (Zn y Cu) y el macronutriente Mg. En número de hojas, los micronutrientes (Fe y Mn) y macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg), NS2 resultó tener mayores resultados permitiendo mejorar las variables.

En particular, los tratamientos HS2 y NS2 al 0.35% demostraron ser los más satisfactorios en ambas variedades de chile serrano, según los resultados obtenidos.

12. SUGERENCIAS

- ◆ Realizar modificación en las variables: disolvente, monómero, iniciador y entrecruzante, con el fin de encontrar el hidrogel con mayor capacidad de absorción y así disminuir el volumen de riego en la agricultura.
- ◆ Realizar estudio completo de la vida útil del hidrogel para proporcionar información valiosa sobre cuánto tiempo el hidrogel puede funcionar de manera efectiva y cuándo podría ser necesario reemplazarlo o renovarlo, considerando: el almacenamiento y condiciones ambientales, degradación y descomposición, efectos de contaminantes, pruebas de funcionalidad, análisis microbiológico, estudios de toxicidad y pruebas de rendimiento a largo plazo.
- ◆ Realizar el análisis de costo de producción del hidrogel y de plántulas en invernadero.
- ◆ Cuantificar el volumen de agua utilizada durante la etapa de campo para determinar la cantidad de agua ahorrada y la frecuencia de riego.
- ◆ Efectuar estudios hasta la etapa de plántula en virtud de la obtención de un óptimo crecimiento y desarrollo de la planta, además del aumento en la calidad y rendimiento de los frutos.

13. ANEXO

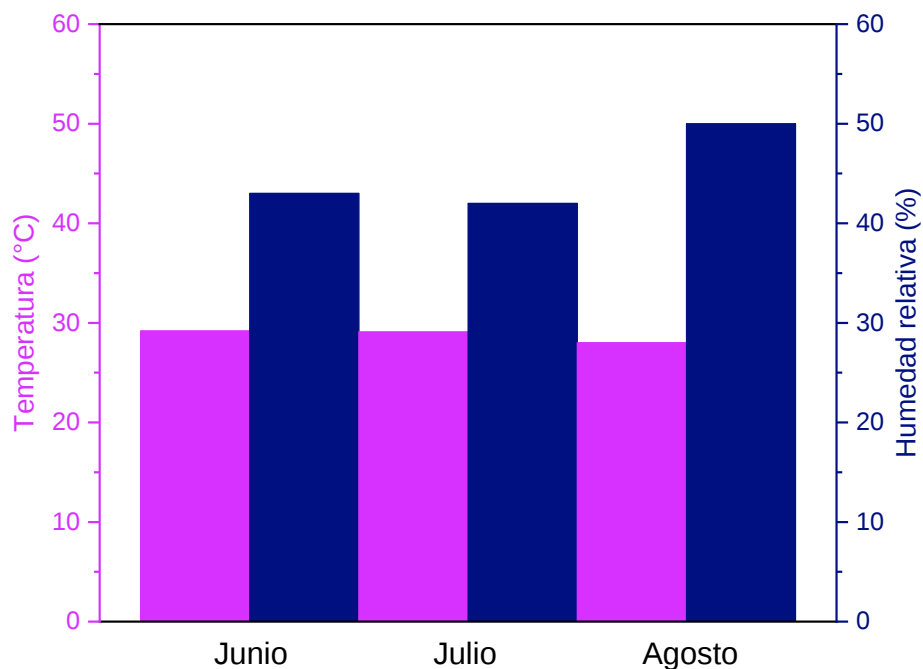


Figura 24. Gráfica de temperatura y humedad relativa en el invernadero junio-agosto 2022



Figura 25. Microscopio Electrónico de Barrido utilizado para la obtención de micrografía y tamaño de poros del xerogel de HGS-1.25



Figura 26. Micro destilador Kjeldahl para cuantificación de nitrógeno para su cuantificación en plántulas de chile serrano



Figura 27. Flamómetro para la cuantificación de potasio en plántulas de chile serrano



Figura 28. Horno de microondas para la digestión



Figura 29. Espectrómetro de absorción atómica para la cuantificación de calcio, magnesio y micronutrientes en plántulas de chile serrano

14. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar Rincón, Víctor H. (2012). *Cultivo del chile en México*. Revista fitotecnia mexicana, 35(4), 264. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802012000400001&lng=es&tlng=es.
- Aguirre Hernández, E. y Muñoz Ocotero, V. (2015). *El chile como alimento*. Revista Ciencia. Academia Mexicana de Ciencias, 3 (66), 16-23.
- Araméndiz Tatis, H., Cardona Ayala, C., y Correa Álvarez, E. (2013). *Efecto de diferentes sustratos en la calidad de plántulas de berenjena (Solanum melongena L.)*. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 7(1), 55-61.
- Baños, A.S. (1991). *El pimiento*. Mundiprensa.
- Benavides, A., Moreno, M., Sosa, M., Puga, M., Alcalá, J. y Quintana, C. (2008). *Evaluación de la calidad del agua en las principales lagunas del estado de Chihuahua*. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 4(2), 84-88.
- B. Samiey, y F. Ashoori, *Chem. Centavo*. J.6. (2012) 14.
- Castaños C. M. (1992). *Horticultura: manejo simplificado*. Universidad Autónoma de Capingo México.
- Castillo Valdivia, M., López Montes, A., Espejo, T., Vílchez, J., y Blanc, R. (2011). *Caracterización de la goma arábiga y estudio de los cambios inducidos por envejecimiento artificial*. In ICOM-CC 16th Triennial Meeting Lisbon Preprints (pp. 1-10).
- Castro Espinoza, L., Gortáres-Moroyoqui, P., Mondaca-Fernández, I., Meza-Montenegro, M., Balderas-Cortez, J., López-Cervantes, J. y Lares-Villa, F. (2009). *Patógenos emergentes como restricción para el reúso de las aguas residuales municipales tratadas en Ciudad Obregón, Sonora*. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 5(1), 9-21.
- Chaterji, S., Kwon, I. K., y Park, K. (2007). *Smart polymeric gels: Redefining the limits of biomedical devices*. Progress in polymer science, 32(8-9), 1083-1122.

- Cifuentes, E., Blumenthal, U., Ruiz, G. y Bennett, S. (1994). *Escenario epidemiológico de uso agrícola del agua residual: el Valle de Mezquital, México*. Salud Pública de México, 36(1), 3-9.
- Cisneros, O. X., y Saucedo, H. (2016). *Reúso de aguas residuales en la agricultura*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Córdova, A. R. (enero de 2003). *El cultivo de chile serrano en la zona media de San Luis Potosí*. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/125.pdf>
- Cruz Crespo, E. Can Chulim, A. Bugarin Montoya, R. Pineda Pineda, J. Flores Canales, R. Juárez López, P. y Alejo Santiago, G., (2014). *Concentración nutrimental foliar y crecimiento de chile serrano en función de la solución nutritiva y el sustrato*. Revista fitotecnia mexicana, 37(3), 289-295.
- Dave, P. N., y Gor, A. (2018). *Natural polysaccharide-based hydrogels and nanomaterials: Recent trends and their applications*. *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813351-4.00003-1>
- Del Ángel Sánchez, R. (1997). *Comportamiento fenológico del cultivo de chile serrano capsicum annum l. y su relación con las unidades calor* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/47568>
- Domínguez, J. (2018). *La gobernanza del agua en México y el reto de la adaptación en zonas urbanas: el caso de la Ciudad de México*. Anuario de espacios urbanos, historia, cultura y diseño, (13).
- Ekebafé, L. O., Ogbeifun, D. E., y Okieimen, F. E. (2011). *Polymer applications in agriculture*. Biokemistri, 23(2).
- Fernandes D. S. D. F., Carmo O. M., Pinheiro M. L. H., Noda H., Manoares M. F. (17 de julio de 2004). *Diversidades Fenotípicas en Pimenteirias Cultivadas de Amazona*. *Asociación Brasileira de Horticultura*. Anais CBO 2004. <http://www.abhorticultura.com.br/CBO/>
- Fideicomiso de Riesgo Compartido FIRCO, F. (2016). *El cultivo bajo invernadero detona proyectos competitivos con calidad exportación*. gob.mx.

<https://www.gob.mx/firco/articulos/el-cultivo-bajo-invernadero-detona-proyectos-competitivos-con-calidad-exportacion>

Fondo para la comunicación y la educación ambiental, A.C. (2023). *Tomas clandestinas*. <https://agua.org.mx/tag/tomas-clandestinas/>

Fonteno W. C. y Bilderback T. E. (1993). "Impact of Hydrogel on Physical Properties of Coarse-structured Horticultural Substrates," J. Am. Soc. Hortic. Sci., vol. 118, no. 2, pp. 217–222.

Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. (2008). *Propuestas de nuevos trabajos para Normas del Codex sobre el Chile Fresco y el Ajo*. 14ª reunión. Ciudad de México, México.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). <https://www.fao.org/news/story/es/item/1141818/icode/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. (2020). *Cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Garcés León, J. M. (2021). *Evaluación de dosis, formas de aplicación y frecuencias de riego de un hidrogel comercial en el cultivo de Sandía Citrullus lanatus (Thunb.) en condiciones semicontroladas en Montería-Colombia*. [Tesis de maestría, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional de la Universidad de Córdoba <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/4162>

García Vázquez, D. (2022). *Producción de chile (Capsicum annum) como respuesta a dos tipos de poda* [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/77ec8980-485c-4d8c-9a0e-ccdd3acca323>

Garrido López, Ó. D. (2013). *Uso de un polímero hidrófilo en el cultivo de chile serrano (Capsicum annum L.) en condiciones de invernadero* [Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora]. <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/handle/20.500.12984/3176>

Gorbe E. y A. Calatayud (2010) *Optimization of nutrition in soilless systems: a review. Advances in Botanical Research* 53:193-245.

Guadarrama Brito, M. E. y Galván Fernández, A. (2015). *Impacto del uso de agua residual en la agricultura. Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*.4(7), 4-7.

- Guenkov. (1987). *Fundamentos de la horticultura cubana*. Instituto Cubano del libro.
- Hansen, A. M. (2012). *Nota técnica: Programa de monitoreo y evaluación de STPB en cuencas hidrológicas y acuíferos*. Tecnología y Ciencias del Agua, 3(4): 167–195.
- Güven, O., Şen, M., Karadağ, E., & Saraydın, D. (1999). *A review on the radiation synthesis of copolymeric hydrogels for adsorption and separation purposes*. Radiation Physics and Chemistry, 56(4), 381-386.
- Hasija, V., Sharma, K., Kumar, V., Sharma, S., y Sharma, V. (2018). *Green synthesis of agar/Gum Arabic based superabsorbent as an alternative for irrigation in agriculture*. Vacuum, 157, 458-464.
- Hassing, J., Ipsen, N., Clausen, T.J., Larsen, L., y Lindgaard-Jørgensen, P. (2009). *Integrated Water Resources Management in Action*. United Nations Educational, World Water Development Report 3. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001818/181891E.pdf>
- Hernández Acosta, E., Quiñones Aguilar, E. E., Cristóbal Acevedo, D., y Rubiños Panta, J. E. (2014). *Calidad biológica de aguas residuales utilizadas para riego de cultivos forrajeros en Tulancingo, Hidalgo, México*. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente, 20(1), 89-100.
- Hernández, O. G. (2007). *Hidrogeles mejoradores de cultivos agrícolas* [Caso de estudio para especialidad, Centro de Investigación en Química Aplicada]. Repositorio institucional del Centro de Investigación en Química Aplicada. <http://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/404>
- Hernández Romero, M. (2016). *Evaluación agronómica de ecotipos de chile serrano en la sierra norte de Puebla* [Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/c655fa97-c21d-4165-a5b5-346d86c34011/content>
- Hoffman, A. S. (2012). *Hydrogels for biomedical applications*. Advanced drug delivery reviews, 64, 18-23.
- Idrobo, H. J., Rodríguez, A. M., y Ortiz, J. E. D. (2010). *Comportamiento del hidrogel en suelos arenosos*. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, (9), 33-37.

- Instituto Mexicano para la Competencia A.C. (7 de febrero de 2023). Situación del agua en México. <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-} Kkkkkkmexico/>
- INTAGRI (Instituto para la innovación tecnológica en la agricultura). (2020). *cultivo de chile en México*. Serie hortalizas. artículos técnicos de intagri.(21), 6.
- Jáuregui Medina, C., Ramírez Hernández, S., Espinosa Rodríguez, M., Tovar Rodarte, R., Quintero Hernández, B. y Rodríguez-Castañeda, I. (2007). *Impacto de la descarga de aguas residuales en la calidad del río Mololoa (Nayarit, México) y propuestas de solución*. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, 3(1), 65-73.
- López Baltazar, J.; Méndez Matías, A.; Pliego Marín, L.; Aragón Robles, E. y Robles Martínez, M. L. (2013). *Evaluación agronómica de sustratos en plántulas de chile 'onza' (Capsicum annuum) en invernadero*. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 4(especial):1139-1150.
- Sharma, K., Kaith, B. S., Kumar, V., Kumar, V., Som, S., Kalia, S., y Swart, H. C. (2013). *Synthesis and properties of poly (acrylamide-aniline)-grafted gum ghatti based nanospikes*. RSC advances, 3(48), 25830-25839.
- Sharma, K., Kaith, B. S., Kumar, V., Kalia, S., Kumar, V., y Swart, H. C. (2014). *Water retention and dye adsorption behavior of Gg-cl-poly (acrylic acid-aniline) based conductive hydrogels*. Geoderma, 232, 45-55.
- Kalhapure, A., Kumar, R., Singh, V. P., y Pandey, D. S. (2016). *Hydrogels: a boon for increasing agricultural productivity in water-stressed environment*. Current science, 1773-1779.
- Mariana AM, LB María, V. Lorena y DB Claudio. (2012). *Goma arábica: Más que un emulsionante comestible*.
- Marschner, P. (2012). *Mineral nutrition of higher plants*. 3rd edition. London: Elsevier. p. 561.
- Morin, D. R. L. (2009). *El uso de aguas residuales en la agricultura en México*. Ambiente y Desarrollo, 13(24), 9-28.
- MMM Saikh, MS Lonikar, SV Lonikar, Asian J. Res. Química. 7 (2014) 232-234.
- Méndez Ramírez, I., Namihira, D., Moreno, L., y Sosa, C. (2001). *El protocolo de investigación*. México DF: Trillas, 1-7.

- Mundarain S., Coa M. y Cañizares A. (2005). *Fenología del crecimiento y desarrollo de plántulas de ají dulce (Capsicum Frutescens L.)*. [Tesis de Maestría. Universidad de Oriente. Instituto Nacional de investigaciones Agrícolas. San Agustín de la Pica.]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2221603>
- Nonogaki H, Bassel GW y Bewley JD. (2010). *Germination-Still a mystery*. Plant Science 179: 574-581.
- Olaya Reátegui, M. M., y Tovar Rodriguez, Y. I. (2022). *Revisión sistemática: Polímeros naturales para el almacenamiento de agua en suelos*.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2007). *Lucha contra las enfermedades transmitidas por el agua en los hogares / Red internacional para la promoción del tratamiento y el almacenamiento seguro del agua doméstica*. www.who.int/entity/household_water/advocacy/combating_disease_es.pdf (25 de septiembre 2012)
- Ortiz Lucio, E. (2006). *Síntesis y caracterización de un hidrogel a partir de metilcelulosa y acrilamida*. [Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de CD. Madero]. <http://repositorio.tecnm.mx:8080/jspui/handle/123456789/376>
- Pacheco, R. (2007). *Participación de la comisión nacional del agua en el tratamiento de aguas residuales en la cuenca Lerma-Chapala*. Estadísticas federales y realidades estatales. Región y Sociedad, 19(39), 55-76.
- Peppas, N. A., Bures, P., Leobandung, W. S., y Ichikawa, H. (2000). *Hydrogels in pharmaceutical formulations*. European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics, 50(1), 27-46.
- Pérez, O. (2002). *Efecto de la aplicación de aguas residuales industriales en las propiedades físicas y químicas del suelo*. Agrociencia, 36(3), 279-290.
- Prado Urbina, G., Lagunes Espinoza, L. D. C., García López, E., Bautista Muñoz, C. D. C., Camacho Chiu, W., Mirafuentes, F., y Aguilar-Rincón, V. H. (2015). *Seed germination of wild chili peppers in response to pre-germination treatments*. Ecosistemas y recursos agropecuarios, 2(5), 139-149.

Proain. (15 de octubre de 2020). *Factores importantes en la producción de pimienta*.
<https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/factores-importantes-en-la-produccion-de-pimienta#:~:text=Los%20factores%20clim%C3%A1ticos%2C%20son%20fundamentales,oscila%20de%2050%2D70%25>.

PROFECO (Procuraduría Federal del Consumidor). (2021). *Chile serrano*
<https://www.gob.mx/profeco/articulos/consume-chile-serrano-esta-temporada?idiom=es>

Pineda, N. A. Baresch, L. y C. A. Fajardo (2003). *Hidrogeles de acrilamida en plantas de Chile (Capsicum annum.)* feria de química.

Prieto García, F., Constantino, L., Poggi, H., Álvarez, M. y Barrado, E. (2007). *Caracterización físicoquímica y extracción secuencial de metales pesados y elementos trazas en suelos de la región Actopan-Ixmiquilpan del distrito de riego 03, Valle de Mezquital, Hidalgo, México*. Ciencia Ergo Sum, 14(1), 69-80.

Rabeea D, Aarif E, Misni M, Elfatih H y Mohammed O. (2016). *Characterization and functional properties of some natural Acacia gums*. Rev. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences.17, 241–249.

Ramírez, A., Astudillo, H., Prin, J., Moya, L., y Rojas de Gáscue, B. (2012). *Evaluación de hidrogeles de acrilamida-co-ácido itacónico en la disminución de iones de Fe con potenciales usos en plantas para tratamientos de aguas potabilizadas*. Rev. LatinAm. Metal. Mat. 2012, 32–35.

Richmond, F. (2010). *Evaluación de distintas materias primas para la producción de almácigo de tomate*. Agronomía Costarricense. 34(1):85-91.

Rivera Armenta, J. L., Saucedo Rivalcoba, V., y Guevara, M. M. S. (2021). *Evaluation of a cross-linking agent in the preparation of films based on pectin and chitosan for food packing applications*.

Hernández Romero, M. (2016). *Evaluación agronómica de ecotipos de chile serrano en la sierra norte de Puebla* (Master's thesis, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).
<https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/b7311306-41c8-4491-aae0-3b089f4bd476>.

- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y alimentación). (2017). *Producción de chile verde en México*. <https://www.gob.mx/sagarpa/sanluispotosi/es/articulos/crece-42-porciento-produccion-de-chile-verde-hecho-en-mexico?idiom=es>
- Salusso, F.; Plevich, J. O.; Delgado, A. R. S.; Grosso, L. y Ramos, D. (2015). *Calidad de plántulas de lechuga en diferentes volúmenes de celdas y su influencia en el rendimiento*. Revista Engenhariana Agricultura-Revang. 23(6):575-583.
- Santos, N. M. de S. S., Queiroz, M. A. Á., de Araújo, G. G. L., Costa, S. A. P., de Albuquerque, Í. R. R., Moura, J. H. A. y Manera, D. B. (2014). *Salinidade na água de beber de ovinos e uso dos dejetos em cultivo de plântulas de milho*. Ciência Rural. 44(3):531-537.
- Sarduy, D. M.; Díaz, A. I.; Castellanos, G. L.; Soto, O. R. y Pérez, R. Y. (2016). *Sustratos y soluciones nutritivas para la obtención de plántulas de pimiento y su influencia en la producción en cultivos protegido*. Centro Agrícola. 43(4):42-48.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2019). *Es tiempo de frenar uso de plaguicidas de alta peligrosidad que contaminan agua, suelos y aire*. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/es-tiempo-de-frenar-o-de-plaguicidas-de-alta-peligrosidad-que-contaminan-agua-suelos-y-aire>.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020). *México es primer lugar mundial en la producción de chile verde*. <https://www.gob.mx/siap/prensa/mexico-es-primer-lugar-mundial-en-la-produccion-de-chile-verde-38656#:~:text=San%20Luis%20Potos%C3%AD,M%C3%A9xico%20es%20el%20primer%20exportador%20de%20chile%20verde%20a%20nivel,del%20imaginario%20culinari%20y%20cultural>.
- Soto, D., y Oliva, H. (2012). *Métodos para preparar hidrogeles químicos y físicos basados en almidón: Una revisión*. Revista Latinoamericana de Metalurgia y materiales, 32(2), 154-175.
- Souri, M. K. y Sooraki, F. Y. (2019). *Benefits of organic fertilizers spray on growth quality of chili pepper seedlings under cool temperature*. Journal of Plant Nutrition. 42(6):650-656.

SNIARN. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. *Agua*. Disponible en <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html#tema0>. Fecha de consulta: noviembre de 2021.

UNESCO. *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: agua y cambio climático*. <https://es.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2020>.

Urrestarazu M. and P. C. Mazuela (2005) *Effect of slow-release oxygen supply by fertigation on horticultural crops under soilless culture*. *Scientia Horticulturae* 106:484-490.

Valadez, A. (2001). *La producción de hortalizas en México* [Archivo PDF]. https://www.uaaan.mx/academic/Horticultura/Memhort01/Ponencia_08.pdf

Valencia Colores, E. (2022). *Obtención de hidrogeles entrecruzados a partir de goma arábica* [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/d5d8d9e9-305f-4655-adb9-6130f9d346b6>

Verbeken, D., S. Dierckx y K. Dewettinck. (2003). *Exudado de encías: aparición, producción y aplicaciones*. *Microbiol aplicado. Biotecnología.*, 63: 10-21. DOI 10.1007/s00253-003-1354-z

Zumaya Quiñones, R. (2013). [Tesis de Doctorado, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero]. *Liberación controlada de fármacos a partir de hidrogeles de PAAM y derivados de celulosa*. <http://200.188.131.162:8080/jspui/handle/123456789/138>