



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA  
CALIFORNIA**



---

**Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño**

---

**Simulación de propiedades físicas y comportamiento de sustratos de hidrogel macroporosos mediante modelado implícito en el cultivo sin suelo**

**T E S I S**

que presenta para obtener el grado de MAESTRO EN INGENIERÍA:

**ANGEL IVAN BELMONTE TORRES**

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JULIAN ISRAEL AGUILAR DUQUE

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. GUILLERMO AMAYA PARRA

Ensenada Baja California, México. Junio 2025

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

**Simulación de propiedades físicas y comportamiento de sustratos de hidrogel macroporosos mediante modelado implícito en el cultivo sin suelo**

**TESIS**

Que para obtener el grado de Maestría en Ingeniería / Doctorado en Ciencias presenta:

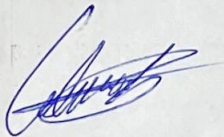
**Angel Ivan Belmonte Torres**

Aprobada por:

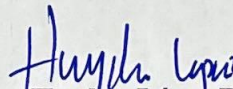


**Dr. Julián Israel Aguilar Duque**

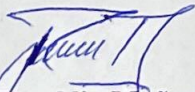
Director de tesis



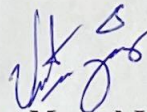
**Dr. Guillermo Amaya Parra**  
Codirector



**Dra. Haydee López Rodríguez**  
Miembro del comité



**Dr. Franklin Muñoz Muñoz**  
Miembro del comité



**Dr. Víctor Manuel Juárez Luna**  
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. junio 2025

## CONTENIDO

I.	Agradecimientos.....	6
II.	Resumen.....	8
III.	Introducción .....	8
3.1	Antecedentes del proyecto .....	10
3.2	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	11
3.3	Hipótesis.....	11
3.4	Objetivo general .....	12
3.5	Objetivos específicos .....	12
3.6	Alcance y limitaciones.....	12
3.7	Limitaciones: .....	13
3.8	Justificación .....	13
IV.	Marco Teórico .....	14
4.1	Importancia del cultivo agrícola .....	14
4.2	El cultivo protegido.....	15
4.3	Relevancia del cultivo sin suelo .....	16
4.4	Sustratos y su clasificación .....	17
4.5	Sustratos utilizados en la actualidad.....	18
4.6	Propiedades ideales de un sustrato.....	19
4.7	Importancia de las propiedades físicas.....	22
4.8	Distribución y tamaño de poros .....	24
4.9	Tamaño y distribución de partícula.....	25
4.10	Granulometría .....	26
4.11	Densidad aparente.....	27
4.12	Compactación en sustratos .....	28
4.13	Oxigenación en raíces .....	29
4.14	Retención de agua en sustratos.....	30
4.15	Potencial Matricial .....	31
4.16	Contenedor .....	32
4.17	Solución nutritiva, agua y pH.....	32
4.18	Hidrogeles .....	33
4.19	Clasificación de hidrogel .....	34
4.20	Hidrogel en la agricultura.....	35

4.21	Hidrogeles no porosos .....	36
4.22	Manufactura aditiva.....	37
4.23	Clasificación de polimerización VAT .....	38
4.24	Hidrogeles Fotocurables.....	40
4.25	Superficies mínimas triplemente periódicas .....	42
4.26	Porosidad en geometrías basada en TPMS .....	43
	Superficie Giroide .....	46
V.	Marco contextual.....	47
VI.	Metodología .....	50
6.1	Materiales .....	50
6.2	Métodos .....	50
	4.2.1 Diseño y preparación del modelo .....	50
VII.	Resultados .....	51
7.1	Investigación documental .....	51
	Conceptos clave .....	51
	Librerías utilizadas .....	53
	Componentes del código .....	53
	Función de Cálculo.....	54
	Modelado implícito.....	59
	Diseño asistido por computadora (CAD).....	65
	Parámetros del diseño controlables .....	65
	Parámetros del diseño no controlables .....	67
	Diseño y Simulación en Python .....	69
	Discusión .....	71
VIII.	Conclusiones.....	71
IX.	Referencias .....	73

## Índice de Tablas

Tabla 1.	Clasificación de sistemas hidropónicos según sus diferentes aspectos.-----	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabla 2.	Propiedades óptimas para un sustrato-----	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabla 3.	Clasificación de hidrogeles -----	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Tabla 4.	Celdas unitarias TPMS comunes utilizadas en el diseño de metamateriales-----	43

## Índice de figuras

Figura 1: Medios de crecimiento hidropónicos o sustratos.....	18
Figura 2: Nueva clasificación del tamaño de los poros comparada con el esquema actual de la IUPAC Las cifras en negrita en el nuevo esquema se refieren a los puntos de referencia para cada clase principal de tamaño de poro.....	24
Figura 3: Imágenes representativas de las formas de las partículas proporcionadas por el dispositivo QicPic. ....	26
Figura 4: Comparación de raíces con un nivel óptimo de aireación y una deficiencia oxígeno ...	30
Figura 5: Curva de liberación del agua de un sustrato de De Boodt .....	30
Figura 6: Relación entre el potencial mátricial, o fuerza necesaria para drenar el agua .....	32
Figura 7: Diagrama esquemático de la preparación de hidrogel .....	34
Figura 8: clasificación de métodos de manufactura aditiva. ....	37
Figura 9: Fotopolímero líquido (a la izquierda), polimerización inducida por luz (círculo pequeño: monómero, círculo grande: oligómero, estrella: fotoiniciador).....	38
Figura 10:10: Componentes de una máquina SLA típica.....	39
Figura 11: Componentes de una máquina DLP típica: 1: pieza impresa, 2: resina líquida, 3: plataforma de construcción, 4: fuente de luz, 5: proyector digital, 6: haz de luz, 7: tanque de resina, 8: ventana y 9: elevación capa por capa, obtenido.....	40
Figura 12: Impresión 3D de hidrogeles y sus aplicaciones versátiles en campos biomédicos y de ingeniería. ....	41
Figura 13. Descripción general de estructuras porosas de TPMS. ....	45
Figura 14. Andamios TPMS con la definición del tamaño de poro. Células unitarias de andamios compuestos con (a) superficie-P, (b) superficie-G, (c) superficie-D). Las correspondientes celdas unitarias repetidas (d-f). ....	46
Figura 15. Estructuras TPMS encontradas en la naturaleza .....	46
Figura 16. Procesos de impresión 3D a diferentes escalas de longitud para imitar características naturales.....	48
Figura 17: Comportamiento del empaquetamiento de partículas en sustratos: A) Acomodo de partículas giroides en un contenedor asumiendo un empaquetamiento ideal, B) Acomodo aleatorio convencional de mezcla de sustratos, C) segregación de partículas pequeñas en sustratos.....	66
Figura 18: sustrato ideal y sustrato óptimo.....	67
Figura 19: Esfera giroide gris, esfera café, se atribuye al espacio vacío que representa la macroporosidad interconectada (porosidad efectiva).....	67
Figura 20: Sinergismo de tamaño de partícula, distribución y porosidad en propiedades físicas relevantes,.....	68
Figura 21: modelado implícito de esfera giroide, A) Cu 0.75 mm en XYZ, y espesor de 0.001 mm. B) Cu 0.75 mm en XYZ, y Rc 0.15 mm. C) vista isométrica: Esfera giroide de 2 mm con celda unitaria 0.75 mm C) Corte transversal en eje X. ....	69
Figura 22: Resultados obtenidos de esfera giroide de 2 mm, Cu:0.75 mm y Rc:0.15. ....	70

## I. Agradecimientos

Hoy culmina una etapa que dejará una huella imborrable en mi vida. Un camino lleno de aprendizajes, desafíos y crecimiento personal que no habría sido posible sin el compromiso y la guía de quienes me acompañaron.

Agradezco profundamente las enseñanzas y el apoyo de mis maestros, quienes con su conocimiento y dedicación sembraron en mí la pasión por aprender y avanzar. Pero, sobre todo, agradezco el amor incondicional de mi familia, en especial de mi esposa e hijo, quienes fueron mi motor, mi lugar seguro y mi mayor fuente de inspiración en los momentos difíciles. Este logro es tanto mío como suyo.

Deseo agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) ahora conocido como Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por su apoyo fundamental para alcanzar esta meta académica.

A la Universidad Autónoma del Estado de Baja California (UABC) por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente en un ambiente de excelencia académica y desarrollo personal.

A la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño (FIAD) por su apoyo constante, uso de sus instalaciones que fomentan un espacio que impulsa la innovación y el crecimiento profesional.

Al Dr. Julián Israel Aguilar Duque, director de esta tesis, por su invaluable enseñanza, sus consejos y por la confianza que depositó en mí al permitirme desarrollar este tema. Su apoyo y guía han sido fundamentales para la realización de este trabajo y para mi crecimiento académico y personal.

Al Dr. Guillermo Amaya Parra, mi codirector de esta tesis, un maestro que demuestra una auténtica pasión por su profesión, por dedicarme su tiempo, brindarme valiosos consejos y ser un mentor excepcional. Gracias por siempre motivarme, por sus enseñanzas académicas y personales.

Agradezco sinceramente a los integrantes de mi comité, la Dra. Haydee López Rodríguez, el Dr. Franklin Muñoz Muñoz y el Dr. Víctor Manuel Juárez Luna, por sus acertados comentarios, valiosos consejos y por el tiempo dedicado a la revisión y mejora de este trabajo. Su apoyo ha sido fundamental para enriquecer esta tesis.

A Isaac Coutiño, por su valiosa participación y asesoría en la elaboración del código de programación en Python. Su apoyo técnico fue clave para el desarrollo de esta tesis.

A la Sociedad Mexicana de Especialistas en Agricultura Protegida (SMEAP), por compartir su valioso conocimiento, el cual fue pieza clave para la realización de esta tesis. Su disposición y experiencia aportaron significativamente al desarrollo de este trabajo.

A mis padres, Jorge Alfredo Belmonte Lara y Claudia Lucía Torres Cruz, con todo mi amor y gratitud. Gracias por siempre buscar lo mejor para mí, por darme tanto, incluso aquello que ustedes mismos nunca tuvieron. Me han entregado más de lo que podría devolver, y todo lo que soy se debe en gran parte a ustedes.

A mi hijo, Ángel Damián Belmonte Retolaza, y a mi esposa, Ashley Scarleth L. Retolaza Cárdenas, a quienes amo profundamente y son lo más valioso en mi vida. No tengo palabras suficientes para expresar toda mi gratitud hacia ustedes.

Mi esposa, gracias por estar siempre a mi lado incondicionalmente, por tus palabras certeras que me alientan a ser cada día una mejor versión de mí mismo.

Ángel Damián, mi motor, la semilla que da sentido a cada uno de mis esfuerzos. Deseo nutrirte con conocimiento, consejos y enseñanzas que fortalezcan tus raíces, para que crezcas firme en tus aspiraciones, que desarrolles la resiliencia necesaria para adaptarte ante las adversidades, que te fortalezcas con nuestro amor, y que, puedas florecer plenamente.

Este logro no habría sido posible sin ustedes. Los amo.

## II. Resumen

Palabras Clave: Giroide, hidrogel, Manufactura aditiva, Superficies mínimas triplemente periódicas, Sustrato

El presente trabajo propone una metodología para el diseño y simulación de sustratos agrícolas elaborados a partir de hidrogeles fotopolimerizables mediante tecnologías de manufactura aditiva tipo VAT. A través de modelado implícito, se generaron estructuras con topologías tipo Superficies Mínimas Triplemente Periódica (TPMS), particularmente la superficie giroide, con el objetivo de inducir macroporosidad conectada y controlada. Estas geometrías permiten el diseño de estructuras con alto grado de porosidad y conectividad interna, características deseables para optimizar el balance aire-agua en los cultivos. Se desarrolló un código en Python empleando para calcular propiedades físicas relevantes como densidad aparente, porosidad total, distribución de tamaño de poro y capacidad de aireación en base al modelado de esferas gyroides.

Los resultados muestran que el uso de geometrías TPMS permite un control preciso sobre la macroporosidad del sustrato (100–500  $\mu\text{m}$ ), complementando la microporosidad intrínseca del hidrogel (0.2–50  $\mu\text{m}$ ), y mejorando significativamente las propiedades de aireación, en comparación con sustratos convencionales como la fibra de coco o la perlita, además de permitir una porosidad inteconectada. Esta investigación propone una alternativa tecnológica para el desarrollo de sustratos de hidrogel con propiedades físicas personalizables, que podrían aplicarse en sistemas de cultivo sin suelo de alto valor.

## Capítulo 1

### III. Introducción

El cultivo en sustrato se presenta como una alternativa a la agricultura convencional, esta técnica sustentable del cultivo protegido tiene la capacidad de ahorrar hasta un 85% en agua, y un 55 % en fertilizantes [1], ante un inminente incremento poblacional y la preocupación de no poder producir el suficiente alimento para una población cada vez mayor [2], se debe reconsiderar la manera en la que producimos nuestros alimentos, tomando en cuenta que la agricultura tradicional

es una de las principales fuentes de contaminación en el suelo, aire y agua [3], [4]. Un sustrato se define como cualquier medio físico diferente a la tierra que permita el anclaje de raíces, y mejores condiciones físicas, químicas y biológicas que favorezcan el crecimiento para la planta [5], siendo las propiedades físicas las más importantes.

Las propiedades físicas de los sustratos se relacionan con el tamaño y distribución de partículas, así como la porosidad total determinan la capacidad de retención y movimiento del agua que son importantes para el crecimiento de las plantas [6]. Un sustrato debe tener suficientes poros pequeños para retener el agua que va a absorber la planta y suficientes poros grandes para permitir el drenaje del agua y permitir una oxigenación en la raíz. Al igual que tener una densidad aparente ligera, evitando un sustrato muy pesado, pero lo suficientemente firme para dar un buen anclaje a la planta. En general, se considera que el equilibrio aire-agua del sustrato es el principal factor que determina la calidad del sustrato [7]. Además, debe presentar una estructura física que sea capaz de mantener un equilibrio favorable entre el almacenamiento de aire y agua durante y entre eventos de riego para prevenir la asfixia de las raíces y el estrés por sequía [8], se espera que la importancia del cultivo sin suelo aumente en los siguientes años, es fundamental que los investigadores colaboren con los fabricantes de sustratos para identificar nuevos y mejores materiales que sean sostenibles, comercialmente viables y con propiedades excepcionales superando a los actuales [9].

Los hidrogeles se presentan como candidatos para su uso como sustrato en el cultivo sin suelo debido a su capacidad de retener grandes cantidades de agua sin disolverse, biodegradabilidad, y propiedades fisicoquímicas ajustables [10], [11], en cultivo convencional se han utilizado en regiones áridas para mejorar las propiedades del suelo aumentando la capacidad de retención de agua, mejorando la eficiencia del riego [12], para retener y liberar fertilizantes de manera controlada [13], y para la germinación de semillas [14], [15], [16], sin embargo, para su uso como sustrato se necesita un equilibrio entre microporos y macroporos, la falta de poros grandes en materiales utilizados como medio de cultivo dificultan la oxigenación en raíces generando problemas adversos como hipoxia y anoxia [17].

La manufactura Aditiva (MA) inventada hace más de 3 décadas, tras la expiración de algunas de patentes en 2009, ha tenido un enorme crecimiento de la industria, así como enormes pasos para

hacer avanzar la tecnología para hacerla más eficiente y rentable [18], la MA coloquialmente conocida como impresión 3D es una técnica de fabricación digital avanzada que crea directamente un modelo físico de estructuras y geometrías complejas a partir de modelos del diseño asistido por computadora (CAD) añadiendo materiales capa por capa[19], esta técnica ha tenido una gran demanda en la fabricación de estructuras complejas con el uso de hidrogel como biotinas en la medicina regenerativa [20], y en la ingeniería de tejidos principalmente por la necesidad de crear estructuras denominados andamios para el crecimiento celular con dimensiones pequeñas y una porosidad inducida mediante CAD [21], [22].

En cuanto a la impresión 3D con hidrogel en la agricultura, es un concepto novedoso, que inspirado en la ingeniería de tejidos y la medicina se plantea su viabilidad y la posibilidad de integrar nutrientes y organismos benignos, además de las técnicas de MA que pueden lograr esta visión siendo las técnicas VAT las más viables [23].

Sabemos el potencial de la MA y los beneficios que conlleva el uso de hidrogeles en aplicaciones agrícolas, este concepto de impresión 3D con hidrogeles necesita de un método estandarizado para desarrollar conocimiento en esta nueva línea de investigación, se propone el diseño de partículas con estructuras porosas complejas inspiradas en superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS) por medio del modelado implícito, que tenga un efecto significativo en las propiedades físicas esperadas en un sustrato, se utilizó un software soportado en Anaconda para determinar la viabilidad de los diseños propuestos.

### 3.1 Antecedentes del proyecto

La agricultura es la base de la seguridad alimentaria, los ingresos de exportación y el desarrollo rural de la gran mayoría de países en desarrollo, por lo que se considera una de las mayores fuentes de ingresos a nivel mundial [24]. Sin embargo, las prácticas agrícolas convencionales representan la principal fuente de degradación del suelo en México. Debido a la salinización/alcalinización por uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, y la compactación del suelo que conllevan la pérdida de porosidad y permeabilidad [4], las malas prácticas agrícolas como el uso excesivo de fertilizantes, pesticidas y herbicidas puede contaminar el suelo, el agua y el aire, lo que repercute principalmente en la salud humana y el medioambiente [3]. Además de que la viabilidad del suelo agrícola ha ido decreciendo, esto debido a la falta de agua, nutrientes disponibles en el suelo, y el cambio climático [25]. Ante una posible crisis en la alimentación pronosticada por el aumento poblacional[2]. Es

fundamental buscar alternativas a la agricultura tradicional que reduzca los problemas generados por esta, sin menguar el rendimiento y calidad en los cultivos.

Los hidrogeles muestran propiedades interesantes para su uso como sustrato en el cultivo sin suelo, por sus propiedades higroscópicas, baja toxicidad y pH ajustable [26], sin embargo, por lo general los hidrogeles en su estado prístino no presentan macroporosidad [16], que es de vital importancia para un balance agua-aire, evitando la falta de oxigenación [51], el nivel de oxígeno a nivel radical es fundamental para el desarrollo óptimo de las plantas, ya que se requiere en diferentes procesos metabólicos prioritarios [27], evitando problemas como la hipoxia radicular[28]. Con la innovación tecnológica en la manufactura aditiva se tiene la posibilidad de fabricar estructuras porosas con geometrías complejas y altamente reproducibles [29], donde ya se ha planteado su aplicación en sustratos de hidrogel, exponiendo su viabilidad y sustentabilidad [23], este concepto es un campo poco explorado, por lo que requiere de una metodología de Diseño para la reproducción de sustratos macroporosos de hidrogel con base en las propiedades físicas adecuadas en el cultivo en sustrato, por medio una simulación con la capacidad de aproximarse a las propiedades esperadas en un sustrato, de esta manera se evita una falta de planificación experimental debido a que este tipo de procesos suele consumir mucho tiempo y recursos, que puede evitarse al integrar herramientas como simulaciones computacionales más estructurados.

### 3.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo influye el diseño de esferas giroides en la optimización de la macroporosidad y la porosidad total de los sustratos de hidrogel?

¿Cómo afecta la forma y tamaño uniforme de las esferas giroides a la isotropía y homogeneidad del sistema poroso en comparación con sustratos producidos con partículas de formas y tamaños heterogéneos?

¿Cuál es el impacto de la porosidad inducida por diseño CAD en la eficiencia en el sustrato para el cultivo sin suelo?

¿Qué efecto tiene la distribución y tamaño de los poros inducidos en la estructura del sustrato sobre la capacidad de retención de agua y aireación en cultivos sin suelo?

¿Qué tan reproducible es el proceso de impresión 3D mediante métodos VAT en la fabricación de sustratos de hidrogel con porosidad controlada?

### 3.3 Hipótesis

El uso de la Manufactura Aditiva como método de fabricación de sustrato agrícola se presenta como un método de fabricación preciso que permite optimizar la macroporosidad y la interconectividad del sustrato mejorando la isotropía y la homogeneidad dando como resultado un sustrato más estandarizado en comparación con los métodos industriales tradicionales de producción de sustratos, lo cual facilita condiciones más estables para el manejo de agua y aire en el cultivo sin suelo.

La propuesta de Utilizar Superficies mínimas triplemente periódicas TPMS en el diseño de sustrato como la superficie giroide con una geometría esférica en el diseño del sustrato de hidrogel, podría mejorar el balance aire-agua en las plantas en comparación con sustratos convencionales, favoreciendo un entorno físico óptimo para el desarrollo del sistema radicular en cultivos sin suelo.

La simulación computacional del sistema permitirá predecir y calcular las propiedades físicas deseadas del sustrato, como la porosidad total, y su capacidad de aireación, favoreciendo condiciones más estables para el manejo de agua y aire en cultivos sin suelo.

### 3.4 Objetivo general

Optimizar mediante simulación las propiedades físicas de sustratos de hidrogel para cultivo sin suelo mediante el diseño y simulación de esferas giroide, controlando la porosidad total, capacidad de aireación y dándole una geometría favorable al sustrato, a fin de mejorar la distribución de agua y aire en el sistema radicular.

### 3.5 Objetivos específicos

- Diseñar esferas giroide por modelado implícito para inducir macroporosidad
- Evaluar distintos tamaños de esfera, tamaño y espesor de la celda unitaria en el giroide
- Desarrollar un programa que permita determinar la porosidad total de la esfera giroide
- Evaluar su efecto en la porosidad total del sustrato mediante simulación.

### 3.6 Alcance y limitaciones

**El alcance del presente trabajo será hasta el Diseño y simulación CAD:** Se desarrollarán modelos específicamente de esferas giroide en CAD por modelado implícito, optimizados para inducir macroporosidad interconectada en sustratos de hidrogel. La simulación se enfocará en analizar las propiedades físicas de las esferas giroide, como la porosidad total, microporosidad y macroporosidad, para determinar si sus propiedades físicas pueden aproximarse a las óptimas, incluso ideales.

### 3.7 Limitaciones:

El estudio se enfocará exclusivamente en las propiedades físicas del sustrato agrícola, dejando fuera el análisis de propiedades químicas y biológicas, La optimización de las propiedades físicas, como la macroporosidad, su interconectividad y su porosidad total, se evaluará principalmente mediante simulaciones computacionales basadas en el diseño de superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS). Estas simulaciones proporcionarán predicciones sobre el rendimiento físico del sustrato en cultivos sin suelo, pero no considerarán pruebas experimentales extensivas en entornos reales.

### 3.8 Justificación

La creciente demanda de métodos de producción agrícola eficientes y sostenibles ha generado interés en cultivos sin suelo [1], se requieren sustratos con propiedades físicas óptimas que promuevan una adecuada retención de agua y aireación de las raíces. Sin embargo, los sustratos utilizados en la actualidad como la turba suelen compactarse fácilmente lo que lleva a una pérdida de aireación y su extracción repercute en un impacto ambiental significativo, liberando grandes cantidades de carbono y destruyendo hábitats naturales[30], otros sustratos como la perlita y vermiculita también presentan problemas debido a sus elevados costos y al daño ambiental causado en su extracción [31], los sustratos se producen con tamaños y formas variables, lo que afecta su capacidad para proporcionar un entorno físico estable y uniforme. Esto da como resultado un manejo inconsistente del riego y dificultad en el manejo del agua y oxigenación en el sustrato, factores importantes para optimizar el crecimiento de las raíces.

El uso de la manufactura aditiva, reconocida por reproducir piezas de alta complejidad que otros métodos de manufactura no pueden [18], representa una innovación en la producción de sustratos agrícolas. Este método permite el diseño de partículas con geometrías precisas, al tiempo que

permite el control de la porosidad total y la estructura de macroporos del diseño CAD, lo que permite una isotropía entre partículas. Adicionalmente, las simulaciones computacionales basadas en estas geometrías permiten predecir propiedades físicas clave, como la porosidad total y la capacidad de aireación. Estas simulaciones no solo optimizan el diseño antes de la fabricación, sino que también reducen el tiempo y los costos asociados con el desarrollo experimental.

La propuesta incluye un programa de cálculo de porosidad que facilita la evaluación de las propiedades físicas del sustrato desde las etapas iniciales del diseño. Esto asegura que las partículas diseñadas sean adecuadas para proporcionar un entorno físico uniforme, mejorando la consistencia en el manejo del riego y la aireación del sustrato, y eliminando las limitaciones de los métodos tradicionales.

Esta tecnología es abiertamente utilizada en la ingeniería de tejidos para la fabricación de andamios de hidrogel donde la porosidad precisa inducida por dicha técnica permite una difusión de nutrientes y oxígeno, especialmente en ausencia de un sistema vascular funcional[32]. La impresión 3D puede abordar las necesidades de esta investigación, y no solo explora nuevos métodos de producción de sustratos agrícolas, sino que también contribuir al desarrollo de sistemas de cultivo más eficientes y sostenibles que pueden reducir la dependencia de sustratos dañinos contra el medioambiente y mejorar la eficiencia de la agricultura, donde podríamos denominarlo como “sustratos de Precisión” en el diseño de medios de cultivo sin suelo.

## **Capítulo 2**

### **IV. Marco Teórico**

#### **4.1 Importancia del cultivo agrícola**

Desde los inicios de la humanidad, el cultivo agrícola ha sido de vital importancia para el desarrollo de la población mundial. La agricultura es la base de la seguridad alimentaria, los ingresos de exportación y el desarrollo rural de la gran mayoría de los países en desarrollo. La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) señala que la agricultura continúa siendo la única fuente de ingresos de alrededor del 70 % de la población rural de ingresos superiores al 70 % del mundo, y la mayoría de ellas son pequeños campesinos. Los medios de subsistencia de millones de personas en el planeta dependen de la agricultura, directa o indirectamente [3]. En 2021 se alcanzaron 1.155 millones de toneladas métricas de hortalizas producidas [33].

La agricultura Moderna presenta el gran desafío de producir el suficiente alimento para una población cada vez mayor, de acuerdo con la FAO Las proyecciones muestran que para alimentar una población mundial de 9.7 mil millones de personas en 2050 sería necesario aumentar la producción de alimentos en un 70 % [2]. Esto implica aumentar la superficie de tierra destinada a la agricultura, de aproximadamente 5 000 Megahectáreas (Mha) a nivel mundial o el 38 % de la superficie de tierra mundial [3][3]. Tomando en cuenta que la agricultura tradicional puede ser una fuente importante de contaminación ambiental. De acuerdo con la Secretaría Medioambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), las prácticas agrícolas representan la principal fuente de degradación del suelo en México. Debido a la salinización/alcalinización por uso excesivo de fertilizantes y pesticidas (degradación química), y la compactación del suelo que conllevan la pérdida de porosidad y permeabilidad (degradación física)[4].

El uso desmedido de fertilizantes, pesticidas y herbicidas puede contaminar el suelo, el agua y el aire, lo que puede tener efectos adversos en el medioambiente y la salud [3]. Por lo que aumentar el área cultivable del planeta podría ser muy contraproducente. Es crucial replantear la manera en la que producimos alimentos en el campo mexicano. En el censo agropecuario 2022 por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) declaro que en México hay 32.1 millones de hectáreas de uso agrícola, de las cuales solo 26.1 millones de hectáreas están activas, Dichas hectáreas inactivas se deben a que se encuentran en descanso, por mal temporal, por enfermedad de suelo entre otras causas [34].

#### 4.2 El cultivo protegido

La agricultura protegida (AP) es un método de producción que se lleva a cabo en diferentes tipos de estructuras con el objetivo de resguardar los cultivos y reducir las limitaciones y efectos causados por las condiciones climáticas. Dada la naturaleza incierta de la agricultura, este sistema se caracteriza principalmente por su capacidad para mitigar los riesgos asociados a esta actividad. Estos riesgos pueden ser de tipo climático, económico (como la rentabilidad y el mercado) o relacionados con la escasez de recursos productivos (como el agua o el terreno). Además, se reconoce que la AP ha transformado las maneras de producir alimentos y ofrece numerosos beneficios para los horticultores [35][35]. La AP ofrece Mayor control sobre el clima, lo que permite ajustar la temperatura, la humedad y la iluminación para crear un ambiente ideal para el crecimiento de los cultivos, además permite una producción más alta y constante, debido a que se puede cultivar durante todo el año, lo que aumenta la producción total[36]. En el 2021, México registró 47 mil 795 hectáreas de superficie sembrada bajo cubierta para la producción de hortalizas, frutales y ornamentales, de las cuales el 58 % es para hortalizas [37].

“El tamaño del mercado de invernaderos comerciales se estima en 47,76 mil millones de dólares en 2024, y se espera que alcance los 66,86 mil millones de dólares en 2029, creciendo a una tasa compuesta anual del 7 % durante el período previsto (2024-2029)” [38].

#### 4.3 Relevancia del cultivo sin suelo

El cultivo sin suelo es una técnica del AP que ha tenido una excelente respuesta debido a la baja demanda de nutrientes y al corto período de crecimiento de los cultivos [39]. De acuerdo con N. Sharma [40], en la producción de hortalizas, la definición de cultivo sin suelo engloba todos los sistemas que permiten la producción de plantas sin necesidad de tierra en las que el suministro de agua y de minerales se realiza en soluciones nutritivas con o sin un medio de cultivo tabla 1.

Características	Categoría	Ejemplo
Cultivo sin suelo	Sin sustrato	NFT (técnica de película nutritiva)
		Aeroponía

		DWC (Técnica de flujo profundo) y raíz flotante
	Con sustrato	Orgánico: fibra de coco, restos de madera, turba, cascarilla de arroz
		inorgánico: tezontle, perlita, arena, lana de roca
		Sintético: polímeros absorbentes, espumas
Sistema abierto/cerrado	Abierto o no recirculante	las plantas se alimentan continuamente con solución nutritiva nueva, sin recuperar la solución drenada por los módulos de cultivo
	Cerrado o recirculante	la solución nutritiva drenada se recicla y se rellena con los nutrientes que faltan hasta alcanzar el nivel de EC adecuado
Suministro de agua	Continúo	NFT, DWC
	periódico	Riego por goteo, flujo y reflujos y aeroponía

Tabla 1. Clasificación de sistemas hidropónicos según sus diferentes aspectos. Modificado de [41].

Estas técnicas surgen de la necesidad de buscar alternativas a la agricultura tradicional en la cual la mayoría de las áreas agrícolas ya no son tan productivas como lo fueron alguna vez, esto debido a los escasos del agua, la falta de nutrientes disponibles en el suelo, los cambios climáticos [25]. En el cultivo en sustrato, el sustrato reemplaza el suelo (la tierra), la tierra suele haber perdido sus propiedades para el cultivo debido a limitaciones químicas, físicas y biológicas)[5], en cultivo sin suelo, todos los nutrientes necesarios para las plantas se obtienen por medio de una solución nutritiva, la cual debe estar bien balanceada para satisfacer cualquier demanda de nutrientes de manera precisa. Que no es más que una concentración de cada ion nutriente en la solución, esta técnica tiene la capacidad de controlar la disponibilidad de agua, el pH y las concentraciones de nutrientes en la zona radical [42], [43]. De esta manera no hay un uso excesivo de fertilizantes por lo que el impacto ambiental es mucho menor, estos sistemas se dividen en sistemas estacionarios, en los que la solución nutritiva sobrante no se recicla, y sistemas recirculantes en los que el exceso de flujo de nutrientes de las raíces se recoge y se recicla de nuevo en el sistema.

#### 4.4 Sustratos y su clasificación

Siendo el sustrato el componente principal de esta técnica. Un sustrato se define como todo aquel material sólido, solo o mezclado adecuadamente que pueda ofrecer al sistema radicular mejores condiciones (en términos de uno o más aspectos del crecimiento de la planta) que las que ofrece la tierra [40] Estos sustratos son contenidos en una maceta o bolsa de polietileno que está conectado a un sistema recirculante donde viaja la solución nutritiva cíclicamente, los sustratos comerciales utilizados actualmente se dividen principalmente en sustratos orgánicos (fibra de coco, turba, restos de madera, cascarilla de arroz, entre otros) sustratos inorgánicos (perlita, lana de roca, piedra volcánica, arena, etc.) y sintéticos (hidrogeles, espumas) [44] como se observa en la fig. 1, aunque también pueden clasificarse por su origen (orgánico, inorgánico) según su actividad química (inertes, activos) el uso de cada uno dependerá de los requerimientos de cada planta [45].



Figura 1: Medios de crecimiento hidropónicos o sustratos obtenidos de [46].

Un sustrato con una capacidad de intercambio catiónico alta es químicamente activo el cual tendrá la capacidad de proporcionar nutrientes a las plantas, como la vermiculita y la turba, que pueden contener nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas [47], en cambio, un sustrato químicamente inerte cuenta con una mínima o nula cantidad de nutrientes para las plantas, es decir, que no actúa como fuente de nutrientes. Como la arena de río, la perlita y la roca volcánica, que no contienen nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. [44][44] Un sustrato químicamente inerte es mejor en la mayoría de los casos debido a que los nutrientes requeridos por la planta son proporcionados por la solución nutritiva formulada para el cultivo. De esta manera, se obtiene un mejor control de sobre nuestros cultivos, dándole justo lo que necesita.

#### 4.5 Sustratos utilizados en la actualidad

En México, la turba y la tierra de monte (sustratos orgánicos) son los sustratos principales para la producción de plantas ornamentales. La sobreexplotación de estos recursos provoca problemas de erosión y deterioro de los ecosistemas [48]. La turba se considera ahora un recurso limitado, además de que tiene impactos negativos en el medioambiente [49].

La lana de roca (sustrato inorgánico) es producida por la fusión de roca de granito. Este proceso exige mucha energía (1650 °C), además de que su eliminación después de su uso es difícil. La lana de roca debe ser tratada con un químico para volverla hidrofílica, por lo que presenta una desventaja [50].

Los sustratos orgánicos suelen presentar una descomposición gradual; esto puede conducir a la contracción del sustrato, lo que ocasiona cambios negativos de las características físicas, como la disminución de la porosidad, aireación y el aumento de la densidad aparente [51]. Esto es especialmente perjudicial para los cultivos que tienen un largo periodo de producción, para los cultivos de larga duración es obligatorio que el sustrato muestre una contracción mínima [52].

La arena presenta una capacidad de aireación muy baja, menor a un 7.2 % y una densidad elevada [53].

La vermiculita es una arcilla de estructura laminar, que por tratamiento térmico a más de 1.000 °C pierde el agua interlaminar y se hincha unas 10 veces, quedando convertida en un material ligero, de elevada porosidad, sin embargo, su capacidad de intercambio catiónico es muy alta [54], lo cual lo hace un material poco recomendado para el cultivo sin suelo.

La fibra de coco requiere varios lavados en agua dulce y un tratamiento 'buffering' (se añade nitrato de calcio al material para desplazar concentraciones nocivas de sodio y potasio) antes de que sea adecuado para su uso como medio de cultivo [55].

#### 4.6 Propiedades ideales de un sustrato

En el uso de sustratos, se toman en cuenta 3 aspectos importantes: se espera que tengan alta disponibilidad, deben ser económicos, y su uso no debe afectar el ambiente [56]. Los sustratos de cultivo sin suelo eficaces deben tener una estructura física que cree un equilibrio adecuado de aire y agua para el desarrollo saludable de las raíces. Este equilibrio debe mantenerse durante todo el ciclo de producción de cultivos, que puede durar desde varias semanas hasta más de un año [1].

“Durante décadas se buscó el Sustrato Ideal para cada especie, e incluso para cada situación de cultivo. No obstante, hoy se conoce que debe realizarse la mejor elección del sustrato en cuanto a sus propiedades físicas, químicas y biológicas [57]. Cualquier material sólido, orgánico, inorgánico o sintético, puede servir como sustrato, siempre y cuando cumpla con ciertas condiciones, ver tabla 2.

<b>PROPIEDADES</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>VALOR ÓPTIMO</b>
<b>Propiedades físicas</b>		
Granulometría	Expresa a la distribución de las partículas como porcentaje de la masa de cada fracción de tamaño, en relación con la masa total seca al aire.	Tamaño de partícula: 0.25 - 7 mm
Densidad Real	Expresa la relación de la masa del material seco y el volumen real ocupado por las partículas, sin incluir el espacio de poros intermedio.	1,45 - 2,65 gcm <sup>-3</sup>
Densidad aparente	Masa del volumen del sustrato definida como la relación entre la masa del material seco y el volumen ocupado, incluido el espacio de poros intermedio.	0,50 a 0,75 g.cm <sup>-3</sup>
Porosidad total	Es el volumen total del sustrato de cultivo no ocupado por partículas orgánicas o minerales, El total de poros se mide en microporos, que son los encargados de retener el agua, y los macroporos que permiten la correcta aireación y drenaje del sustrato.	85% o superior Tamaño de microporo 0.2 a 30 µm Tamaño de macroporo 50-500 µm
Capacidad de aireación	Es la proporción de volumen de sustrato de cultivo que contiene aire después de que dicho sustrato ha sido saturado con agua y dejado drenar, capacidad de suministrar oxígeno a las raíces	10-30 %
Agua fácilmente disponible	es el volumen de agua que libera el sustrato al aumentar la tensión de succión de 10 a 50 cm de columna de agua	20-30 %
Agua de reserva	Es la cantidad de agua (% (de volumen) que libera un sustrato al pasar de 50 a 100 cm de columna de agua de desorción.	El valor óptimo es del 4-10 %.

Agua total disponible	Viene dada por la suma del agua fácilmente disponible más el agua de reserva.	24 y el 40 % de volumen.
Distribución del tamaño de las partículas	Las partículas pequeñas hacen disminuir la porosidad y aumentar la cantidad de agua retenida. En un sustrato, es también importante la distribución del tamaño de sus partículas.	El material más adecuado es el de textura media a gruesa, con distribución de tamaño de los poros entre 30 y 300 micras.
Estructura estable	Que permita una buena durabilidad del material y una manipulación adecuada., servir de soporte a la raíz	-----
<b>Propiedades químicas</b>		
Capacidad de intercambio catiónico C.I.C.	Se define como la suma de cationes que pueden ser adsorbidos por unidad de peso del sustrato, es decir, la capacidad de retener cationes nutrientes e intercambiarlos con la solución acuosa.	Baja o nula actividad C.I.C.
Disponibilidad de los nutrientes	Cantidad de nutrientes iniciales que tiene el sustrato (antes de agregar solución nutritiva)	Casi nulo o sin ningún nutriente inicial
Salinidad	concentración de sales existentes en el sustrato cuando es suministrado.	Nulos (inicialmente) en valores de conductividad eléctrica superior a 3,5 mS/cm son excesivamente altos
pH.	El pH influye en la asimilabilidad de los nutrientes por la planta. Un pH muy ácido puede provocar una deficiencia de macronutrientes, mientras que un pH alcalino provoca deficiencia de micronutrientes	Entre 5.5 y 6.8 (varía dependiendo el cultivo)
Relación C/N	Es una relación entre el contenido de carbono y de nitrógeno en una sustancia. Tener mucho contenido en nitrógeno frente a carbono en el suelo o viceversa reduce el potencial que podemos obtener de nuestros cultivos y es algo fácilmente corregible.	-----
<b>Propiedades biológicas</b>		
Velocidad de descomposición	La descomposición de los sustratos se da generalmente en los orgánicos, siendo deseable para el manejo de sistemas de cultivo sin suelo que tengan una baja velocidad de descomposición por degradación biológica.	Que sea de larga duración
Actividad reguladora del crecimiento	Se conocen determinadas sustancias existentes en los sustratos orgánicos que tienen un cierto efecto estimulador sobre el crecimiento de las plantas.	Se soluciona con la solución nutritiva

Estar libre de semillas de malas hierbas y de patógenos	No debe contener patógenos (hongos, nematodos, bacterias y virus), y semillas de malezas	-----
fitotóxico	Compuestos, de origen natural o antropogénico, que impiden el normal crecimiento y desarrollo de uno o más tipos de plantas cuando estas se exponen a una dosis determinada de dicho compuesto, pudiendo llegar a provocar la muerte del vegetal.	Baja o nula

Tabla 2. Propiedades óptimas para un sustrato [53], [54], [58], [59].

#### 4.7 Importancia de las propiedades físicas.

“Los sustratos utilizados en los sistemas de cultivos sin suelo deben presentar propiedades físicas óptimas para el desarrollo del cultivo, ya que, una vez que el sustrato está en el contenedor, y la planta está creciendo en él, no es posible modificar las características básicas del sustrato seleccionado. A diferencia de las propiedades químicas” [60]. Las propiedades físicas de los sustratos relacionadas con el tamaño y distribución de partículas, así como la porosidad total, determinan la capacidad de retención y movimiento del agua que son importantes para el crecimiento de las plantas [6]. Un sustrato de cultivo eficaz debe tener una estructura física que sea capaz de mantener un equilibrio favorable entre el almacenamiento de aire y agua durante y entre eventos de riego para prevenir la asfixia de las raíces y el estrés por sequía [8], La estructura del sustrato está determinada por el tamaño, la forma, la textura y la disposición física de las partículas que lo componen [61]. Los sustratos más utilizados suelen ser la fibra de coco, perlita, tezontle, vermiculita, lana de roca, turba y arena de río; sin embargo, estos carecen de una o más propiedades vitales para el desarrollo de la planta. Hasta la fecha no se ha reportado un sustrato que sea idóneo para la siembra de hortalizas [57].

#### Porosidad total

Considerando la información expuesta en la tabla 2, la porosidad total ideal debe ser  $\geq 85\%$ , aunque otro autor como Di Lorenzo[62] exponen que los materiales con una elevada porosidad (óptima del 75 %) y con el equilibrio adecuado entre microporos (40-60 %) y macroporos (15-35 %) garantizan una mejor relación agua/aire.

Un material poroso se define como cualquier sólido con una estructura porosa que le aporte cierta funcionalidad [63]. La porosidad es la fracción volumétrica de poros del material. Estos poros pueden situarse en su superficie como porosidad interparticular (poros formados entre el conjunto de partículas) o en su estructura interna, porosidad intraparticular. La porosidad está asociada con la densidad del material, y con la naturaleza de sus compuestos y la existencia de espacios vacíos entre ellos [64][53]. En el cultivo sin suelo, el tamaño de los microporos se encarga de retener el agua y que esté disponible para la planta, mientras que los macroporos en el sustrato son importantes para permitir un adecuado flujo de agua, oxígeno y nutrientes a las raíces de las plantas. Estos son necesarios para asegurar un drenaje eficiente y evitar la saturación del sustrato, lo cual podría dañar las raíces y afectar el crecimiento de las plantas.

La distribución del tamaño de los poros es valiosa para la caracterización de suelos utilizados para diversas aplicaciones relacionadas con interacciones suelo-planta, aireación, riego, drenaje [7].

La porosidad de un sustrato puede ser aproximada mediante la ecuación (1)

$$Pt(\%) = 100 * \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) \quad (1)$$

Dónde:  $Pt$  (%) = porcentaje de porosidad;  $Da$  = densidad aparente ( $g\ cm^3$ );  $Dr$  = densidad real ( $g\ cm^3$ ) [65]. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta fórmula asume una porosidad total, es decir, no distingue entre diferentes tamaños o tipos de poros en el material. Pueden cometerse errores que llevan a un cálculo erróneo de la porosidad total cuando el sustrato tiene una parte de porosidad cerrada u ocluida, es decir, un volumen de poros que se encuentran aislados del exterior y que, por lo tanto, no intervienen en la distribución del aire y el agua en el sustrato [66].

Dependiendo del tipo de porosidad, se puede clasificar según la comunicación de los poros y según su origen [67], por ejemplo:

Porosidad efectiva: También conocida como porosidad interconectada o porosidad abierta, se denomina así al porcentaje de espacio vacío (poros) conectados entre sí, es decir, que se pueden

comunicar uno con otro, con respecto al volumen total del material. Este tipo de porosidad facilita la circulación de los fluidos.

Porosidad no efectiva. También conocida como porosidad no interconectada o porosidad cerrada, se denomina así al porcentaje de espacio vacío (poros) que no están conectados entre sí, es decir, poros aislados o cerrados. Por lo tanto, el fluido no podrá salir ni desplazarse por esta zona.

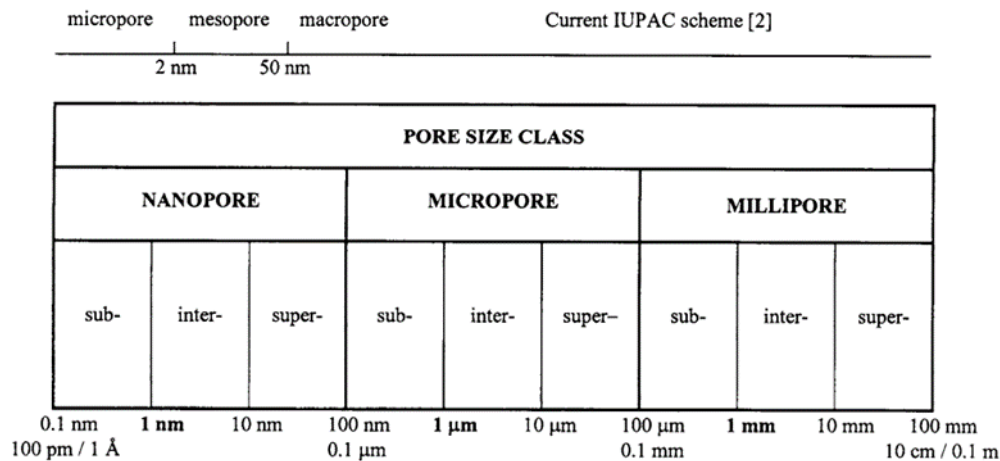
Porosidad parcial: Una combinación de porosidad efectiva y no efectiva.

Porosidad absoluta. También conocida como porosidad total, se denomina así al porcentaje del espacio vacío (poros) total, tanto los poros interconectados como los no interconectados, con respecto al volumen total de la roca, es decir, es la sumatoria de la porosidad efectiva y la no efectiva.

#### 4.8 Distribución y tamaño de poros

De acuerdo con la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada), los materiales porosos se clasifican por su diámetro de poro. Materiales con un tamaño de poro  $\leq 2$  nm son microporos, poros en un rango de 2 a 50 nm son mesoporos, y de 50 nm a 1 mm son macroporos [68].

Por el contrario, se han propuesto clasificaciones más precisas [69]. propone una nueva clasificación del tamaño de los poros. Se basa en una escala logarítmica (en base 10), y se considera que todos los poros de interés no son menores de 0,1 nm ni mayores de 0,1 m figura. 2.



*Figura 2: Nueva clasificación del tamaño de los poros comparada con el esquema actual de la IUPAC. Las cifras en negrita en el nuevo esquema se refieren a los puntos de referencia para cada clase principal de tamaño de poro obtenido de: [69].*

Sin embargo, en el contexto de cultivo sin suelo. En general, se divide en macroporos y microporos. Los denominados macroporos tienen un tamaño (50-500  $\mu\text{m}$ ), los cuales permiten el intercambio gaseoso, proporcionan oxígeno a las raíces y permiten el flujo de agua gravitacional, permitiendo el drenaje y evitando una saturación de agua. Por otro lado, los microporos (<30  $\mu\text{m}$ ) permiten retención de agua del suministro y solutos, esto permite tener la humedad necesaria para el cultivo [70]. La distribución de tamaño de los microporos es importante, ya que un sustrato con un solo tamaño de poro liberará toda el agua ante una cierta presión negativa o fuerza matricial. Es decir, el agua se drenará con forma de succión. Si todos sus microporos comparten el mismo diámetro, no habrá un drenaje constante, por lo tanto, se recomienda usar un sustrato con distintos tamaños de microporos para liberar el agua ante diferentes presiones [71].

#### 4.9 Tamaño y distribución de partícula

Los fabricantes de medios de cultivo modifican el tamaño de las partículas de los componentes de los medios de cultivo para proporcionar al sistema de raíces de las plantas el entorno físico más adecuado en la producción en contenedores. Las fracciones por tamaño se desarrollan mediante diferentes procesos industriales [72]. (1) separación mediante tamizado y/o cribado, (2) molienda, (3) corte y/o (4) desfibración o expansión de materias primas. Estas acciones dan como resultado la fabricación de partículas con rangos de tamaño predefinidos y también modifican la forma y los aspectos superficiales de las partículas figura 3.

La determinación de las propiedades de los sustratos se lleva a cabo generalmente en muestras a granel, lo que genera que el sustrato presente un bajo ordenamiento, por la amplia variedad de tamaños y formas de partículas [73].

Los sustratos fabricados para la producción de hortalizas se presentan en diversas formas, como material suelto; partículas, pellets, materiales a granel compactados y losas. Las muestras para las pruebas se toman siempre del medio de cultivo final. Una muestra a granel representativa del material debe prepararse de forma estandarizada para que los resultados sean representativos de todo el lote de material investigado [74], por lo tanto, pueden existir grandes diferencias entre muestras del mismo material entre cada lote, lo que es más importante, entre distintas fechas de

producción del mismo producto. Contrariamente, un solo tamaño de partícula en una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos incrementa la isotropía en el sistema poroso[73], “la importancia que tiene la homogeneidad del sustrato, tanto dentro del mismo lote como entre los diferentes lotes.” La curva de retención de agua es sensible a las variaciones de la granulometría o de la longitud de fibra del material que constituye el sustrato. Si el lote de sustrato no se ha homogeneizado, puede ocurrir que algunas partes del mismo sustrato tengan diferentes propiedades físicas. En estas condiciones, cuando unas partes tengan un contenido adecuado de agua, en otras se darán condiciones de asfixia o de falta de agua, haciendo difícil un buen manejo del agua de riego [75].

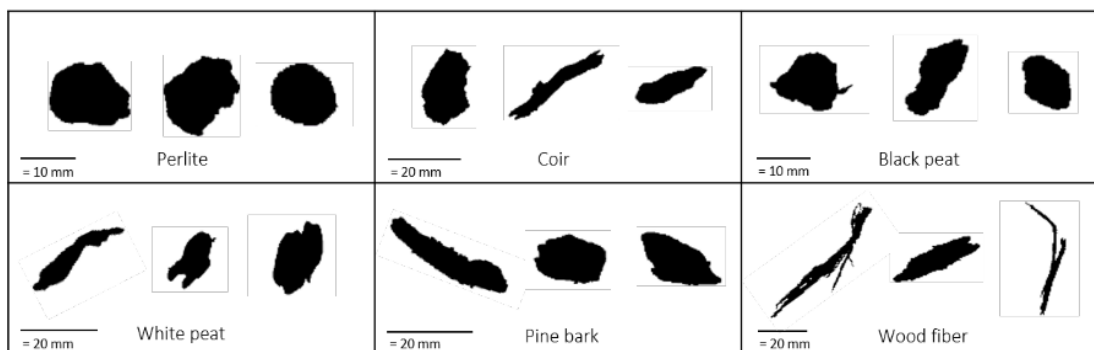


Figura 3: Imágenes representativas de las formas de las partículas proporcionadas por el dispositivo QicPic obtenido de [72].

#### 4.10 Granulometría

La distribución del tamaño de partículas (PSD) en sustratos se considera uno de los principales factores que describen las propiedades físicas. La PSD determina la disposición de las partículas y por ende, la distribución de tamaños de poros. Esto influye en la retención de agua, la porosidad llena de aire y las propiedades de flujo en los medios de cultivo. En general, partículas más grandes tienden a tener mayor porosidad llena de aire y menor retención de agua. Por lo que se ha observado que el tamaño de partícula influye en la relación agua-aire en algunos materiales de sustrato, ya sea de forma individual o en mezcla [72], [76].

En los materiales utilizados como sustratos se ha encontrado que en cada tamaño de partícula presenta un comportamiento diferente en sus propiedades de retención de humedad y oxigenación. Sin embargo, no se dispone de información *in situ* sobre lo variable que puede ser el porcentaje de poros, y su función (macropercolación y microalmacenamiento, cerrado e interconectados) en mezclas de sustratos a granel o con un solo tamaño de partícula, así mismo no hay suficiente

información sobre cómo se relaciona la variabilidad de los poros con las propiedades hidrológicas [77].

El material del que se compone la fase sólida del medio incluye partículas minerales discretas de diversas formas y tamaños, así como compuestos amorfos como la materia orgánica. El conjunto de partículas puede dividirse en grupos según su tamaño, y la fase sólida media en su conjunto puede caracterizarse en función de las proporciones relativas de sus grupos de tamaño de partícula. El tamaño de las partículas y la composición mineral determinan en gran medida la naturaleza y el comportamiento del suelo: su geometría interna, su porosidad, su composición mineral y su composición química. El término. La textura del medio se refiere a la gama de tamaños de las partículas del medio, es decir, si las partículas que componen un medio concreto tienen un rango de tamaños amplio o relativamente estrecho, y si son principalmente grandes, pequeñas o de algún tamaño intermedio. Como tal, el término tiene connotaciones cualitativas y cuantitativas. Cualitativamente, indica si el material es grueso y arenoso, o fino y liso. Cuantitativamente, denota la distribución de partículas y las proporciones de las distintas gamas de tamaños de partículas en un medio determinado [70], [74], [78].

Las partículas finas generalmente están asociadas con poros pequeños y, por lo tanto, tienen una alta capacidad de retención de agua y conductividad hidráulica del medio. Por otro lado, las partículas gruesas forman poros más grandes, lo que favorece la aireación de las raíces [70]. Los medios utilizados en horticultura generalmente tienen partículas que varían, arbitrariamente, de 0,125 a 2 mm, en este tamaño se puede alcanzar un óptimo agua-aire disponible [79].

La granulometría se define como la diferencia de tamaño de partículas que conforman el sustrato, la importancia de cuantificar el tamaño de las partículas está ligada a una correlación directa con el tamaño de los poros situados en los sustratos. Además, las partículas de los sustratos no presentan un tamaño único ni es esférico, lo que establece que la porosidad aumenta a medida que lo hace el tamaño medio de la partícula y viceversa [80].

#### 4.11 Densidad aparente

La densidad aparente ( $D_a$ ) es la cantidad de masa de un material contenida en una unidad de volumen que incluye tanto la sustancia sólida como los espacios vacíos entre las partículas del material. Este parámetro es importante en cultivo sin suelo, ya que está relacionado con que tan compacto es el sustrato. Por lo general, se busca un sustrato con una densidad baja para permitir el enraizamiento y que tenga espacio vacío que permita la aireación [81]. La  $D_a$  tiene un ligero efecto en la porosidad total, un efecto moderado en la capacidad del contenedor y un gran efecto en la capacidad de aireación [79], es decir el espacio vacío generado por una baja  $D_a$  contribuye a llenar el contenedor con menor cantidad de sustrato y su vez permitir una mayor aireación. Muchos sustratos se componen de más de un material, las características de cada uno de ellos contribuyen a la densidad aparente total del medio.

Al mezclarse los materiales, cambia la disposición de las partículas, la densidad aparente y la compactación. En particular, los componentes que difieren significativamente en el tamaño de las partículas tienen mayores densidades aparentes como mezcla [74]. Del mismo modo, tienen una porosidad total, una capacidad de retención de agua y una porosidad llena de aire inferiores a la de los medios, con un tamaño de partícula diferente a los medios compuestos por tamaños de partículas similares [66], [70], [78].

La densidad aparente en sustratos particulados resulta difícil de estimar, debido a una heterogeneidad de tamaño de partícula y su porosidad ocluida, que no participa en una porosidad real [82].

La densidad aparente puede ser determinada mediante la ecuación (2) [66], [83].

$$\text{Densidad aparente } \left( \frac{mg}{cm^3} \right) = \frac{P_s}{V_c} \quad (2)$$

Donde:  $P_s$  = peso seco de la muestra (g) y  $V_c$  = volumen del contenedor ( $cm^3$ )

#### 4.12 Compactación en sustratos

La compactación puede dificultar la penetración de las raíces en el medio de cultivo, disminuye la cantidad de porosidad, lo que repercute en la infiltración de agua, la aireación del suelo y la circulación de nutrientes, por lo tanto, se reduce la capacidad de las plantas para acceder a agua, nutrientes y oxígeno necesarios para su crecimiento y desarrollo [84]. la compactación del suelo

conlleva una alta densidad aparente, creando un entorno desfavorable para el desarrollo de las raíces de las plantas, lo que a su vez afecta negativamente su crecimiento, absorción de agua y nutrientes, y, en última instancia, la salud y productividad de las plantas. Es crucial evitar la compactación del suelo y mantener condiciones óptimas para el crecimiento saludable de las raíces y el rendimiento de los cultivos [85].

#### 4.13 Oxigenación en raíces

La oxigenación disponible en el sistema radical es indispensable para cualquier tipo de cultivo, al igual que cualquier ser vivo aeróbico [86]. El nivel de oxígeno a nivel radical es fundamental para el desarrollo óptimo de las plantas, ya que se requiere en distintos procesos metabólicos principales como: el metabolismo de carbohidratos, la reducción de nitratos, la fijación simbiótica de nitrógeno, la renovación de proteínas, el mantenimiento del gradiente de protones y la absorción de nutrientes por raíces [27], la presencia de oxígeno puede influir en la orientación del crecimiento de las raíces, a este fenómeno conocido como oxitropismo, donde las raíces pueden dirigir su crecimiento hacia gradientes de oxígeno [28].

La hipoxia (baja concentración de oxígeno) y la anoxia (ausencia total de oxígeno) en las raíces de las plantas son causadas principalmente por la falta de oxígeno disponible en el suelo. Esto puede ocurrir debido a factores como el exceso de agua en el entorno de las raíces, que puede bloquear el intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera. Estas condiciones pueden llevar a que las raíces experimenten una transición de un ambiente completamente aeróbico a uno anaeróbico, lo que ocasiona hipoxia o anoxia en las raíces lo cual ocasiona lesiones celulares, estrés oxidativo, degradación de proteínas clorofilas, una menor expansión en raíz, cierre estomático además de Inhibición del crecimiento y desarrollo de la planta [17], [87]. Novoplansky [88], determinó que las raíces de las plantas son capaces de percibir y responder a señales de estrés emitidas por las raíces de plantas vecinas que están experimentando sequía u otros tipos de estrés. Se demostró que las plantas no estresadas pueden cerrar sus estomas en respuesta a estas señales de estrés, lo que sugiere una forma de comunicación entre las plantas a través de las raíces. Además, se observó que las plantas no estresadas también emiten señales de advertencia que son percibidas por otras plantas no estresadas, lo que sugiere un sistema de comunicación más amplio entre las plantas en respuesta a condiciones estresantes.

En cultivo en sustrato, los medios mal aireados pueden concentrar las raíces en la parte superior del contenedor Figura 4, y aumentar la susceptibilidad a patógenos de pudrición de raíces y deficiencias de micronutrientes [89]. A media Que la CA cae por debajo del 10 %el crecimiento del cultivo se ve perjudicado [90], solo es necesario 10 minutos de interrupción en el suministro de oxígeno, para que el crecimiento de las raíces puede detenerse, y 30 minutos para producir la muerte de la zona de elongación arriba de la punta de la raíz [91].



*Figura 4: Comparación de raíces con un nivel óptimo de aireación y una deficiencia oxígeno. obtenida de Joel Pineda Pineda*

#### 4.14 Retención de agua en sustratos

El método más utilizado para determinar la curva de liberación de agua en sustratos es el de De Boodt, Verdonck y Cappaert [92], el cual sigue vigente desde 1974, figura 5. Este permite conocer la curva de liberación de agua del material.

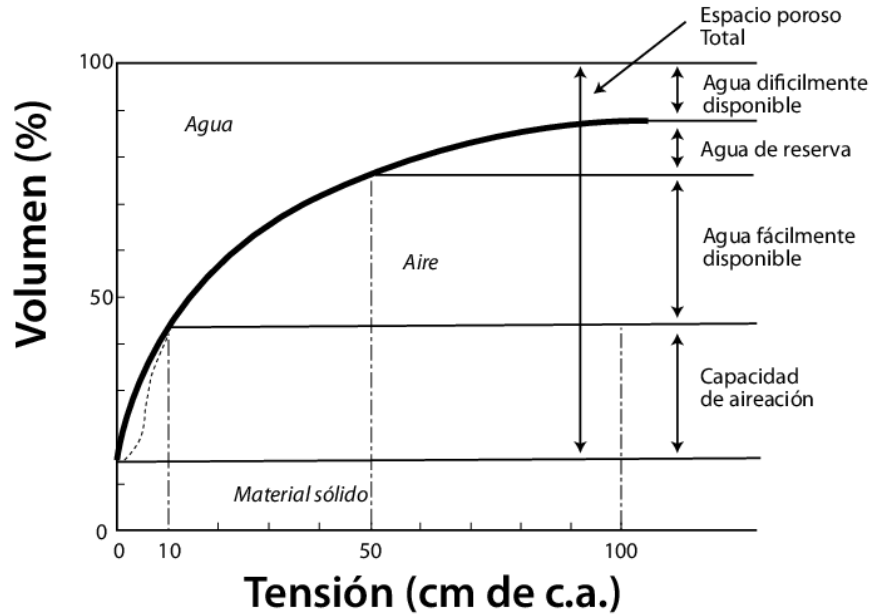


Figura 5 Curva de liberación del agua de un sustrato de De Boodt [66].

Agua fácilmente disponible (AFD): Es el volumen de agua que libera el sustrato al aumentar la tensión de succión de 10 a 50 cm de columna de agua (-1 a -5 kPa) y se considera que en estas condiciones hídricas la planta tiene un crecimiento óptimo. Se considera como óptimo un rango de valores de agua fácilmente disponible de acuerdo con la tabla 2, (propiedades óptimas para un sustrato).

Agua de reserva (AR): volumen que se libera cuando la tensión de succión en el sustrato aumenta de 50 a 100 cm de c.a. El valor óptimo se encuentra en el rango de 4 a 10 % y se considera la suma de AFD y AR como agua disponible (AD) para la planta, con un rango óptimo entre el 24 y el 40 %. acorde a la tabla 2.

Capacidad de aireación (CA): La capacidad de aire del sustrato es la diferencia entre el volumen de porosidad total y el volumen de agua a 10 cm de tensión de c.a. Este volumen coincide empíricamente con el de poros vacíos de agua cuando, después de saturar el sustrato, se deja drenar. Su óptimo se sitúa entre 10 y 30%.

Agua difícilmente disponible (ADO): Es el agua, en tanto por ciento en volumen, que queda retenida en el sustrato tras aplicar una tensión de 100 cm de columna de agua [66], [93]. Cuando un sustrato tiene insuficiente retención de agua fácilmente disponible, puede deberse a una baja porosidad o a tener un exceso de poros grandes que pierdan el agua por gravedad después del riego.

En cambio, un exceso de microporos conlleva un estancamiento y un estrés hídrico en las plantas por ser retenida con excesiva tensión[66].

#### 4.15 Potencial Matricial

El agua disponible para el cultivo se considera en términos de estrés hídrico equivalente, es decir, la energía necesaria para eliminar el agua del medio. El estrés hídrico total del suelo ( $\Psi_t$ ) tiene dos componentes, el potencial mátricial ( $\Psi_m$ ), y el potencial osmótico ( $\Psi_s$ ), ecuación (3).

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_s \quad (3)$$

El rango de potencial matricial para el cultivo en contenedor puede medirse en el laboratorio. Mediante un aparato de placa sinterizada o en contenedores mediante tensiómetros. Las partículas de una mezcla varían considerablemente en diámetro, forma y textura, por consiguiente, los poros entre las partículas también varían en diámetro y forma. La relación entre el potencial matricial, o la fuerza necesaria para el agua, y el diámetro de los poros figura 6. A medida que el diámetro de los poros cae por debajo de 100  $\mu\text{m}$ , la energía requerida aumenta bruscamente. El rango de potencial matricial en el que normalmente se cultivan las plantas en contenedor, es decir, de 10 a 100 mbars, corresponde a diámetros de poro del orden de 30-300  $\mu\text{m}$ . Tras el riego, los poros grandes pierden parte de su agua por la fuerza gravitacional, proporcionando así aireación a las raíces. A medida que el agua se extrae del medio, se vacía de los poros más pequeños. Sin embargo, los poros no se drenan completamente, sino que se retiene una película de agua alrededor de las partículas. La película disminuye a medida que el medio se seca [90].

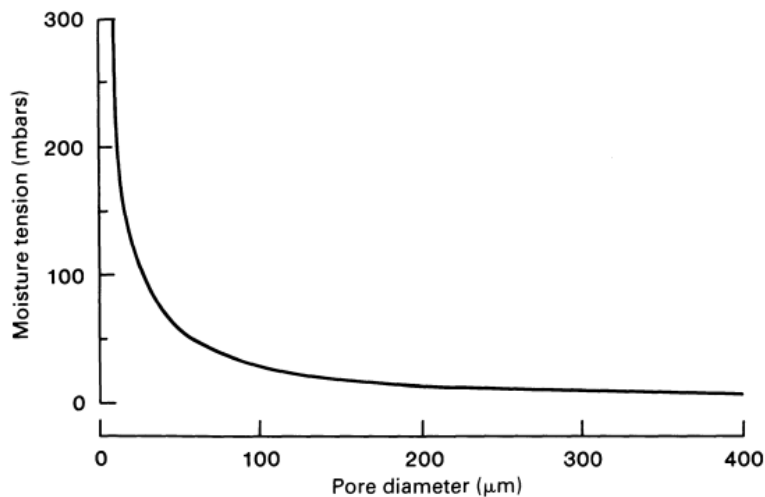


Figura 6: Relación entre el potencial mátricial, o fuerza necesaria para drenar el agua [90]

#### 4.16 Contenedor

El tamaño del contenedor puede afectar la densidad de siembra y tiene impactos en la tasa de crecimiento de las plantas, el crecimiento de las raíces y la capacidad de retención de agua de los sustratos [94]. A medida que disminuye la profundidad del sustrato en el contenedor, se reduce su porosidad llena de aire. Para conseguir un buen drenaje y una aireación óptima, se deberían elegir contenedores con la profundidad adecuada para cada cultivo. La sección del contenedor afecta a la calidad del sistema radicular, encontrándose un incremento en dicha calidad con el aumento de la sección [95]. Es conveniente comprobar que el tamaño del contenedor no va a afectar a los parámetros de crecimiento a medir. En cuanto a la forma del contenedor, ésta debería guardar relación con el tipo de raíz de la planta a cultivar, que puede ser de crecimiento vertical en profundidad, o de crecimiento lateral y superficial. Otros factores relacionados con el contenedor (color, material, etc) pueden también afectar el crecimiento de las plantas [96].

#### 4.17 Solución nutritiva, agua y pH.

Existe un control sobre la nutrición vegetal gracias al uso de soluciones nutritivas; permitiendo obtener un fruto estandarizado, de mejor tamaño y calidad.

La solución nutritiva es el alimento de la planta, se prepara con sales minerales solubles en agua con una proporción balanceada, y que es adaptable para cada planta con el pH adecuado, una fórmula mal balanceada y un pH inadecuado puede ocasionar trastornos de crecimiento y producción a las plantas [97].

Solamente 16 elementos se consideran como esenciales para el crecimiento de la mayoría de las plantas. Estos elementos se dividen en macronutrientes y micronutrientes [44]:

- **Macronutrientes:** Carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno(N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), azufre (S) y magnesio (Mg). son llamados así por ser requeridos en mayor cantidad para un buen desarrollo de la planta
- **Micronutrientes:** hierro (Fe), cloro (Cl), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), cobre (Cu) y molibdeno (Mo). Estos elementos son requeridos en baja cantidad, pero muy importantes, aunque no son necesarios en algunas hortalizas.

El agua es nuestro punto de partida para la preparación de la solución nutritiva, a partir de la ppm (partes por millón) que presente el agua a utilizar se tendrá que hacer los ajustes necesarios si buscamos un mayor rendimiento, el agua ya puede contener algunos de los Microelementos como cloro, sodio, magnesio fosfatos, entre otros, el agua utilizada debe ser examinada antes. Un agua con 500-700 ppm de sales totales está en un rango Óptimo, mientras que un agua con 3000 ppm o superior no debe ser utilizada sin hacer un análisis previo y ajustar la solución nutritiva a esos parámetros [44][97].

#### 4.18 Hidrogeles

Los hidrogeles superabsorbentes son matrices tridimensionales (3D) constituidas por polímeros hidrófilos lineales (o ramificados) que están entrecruzados química o físicamente, con capacidad de absorber grandes cantidades de agua o fluidos biológicos sin disolverse hasta un 99 % (p/p) de agua de su peso en seco [98], [99]. El hidrogel se define como un sistema de dos o más componentes, que consiste en una red tridimensional de cadenas de polímeros y agua que llena el espacio entre macromoléculas [100]. los hidrogeles son altamente hidrófilos por naturaleza debido a la presencia de grupos funcionales como carboxilo ( $-COOH$ ), amino ( $NH_2$ )hidroxilo( $-OH$ ), amidas ( $-CONH$ ) y sulfatos ( $-SO_3H$ ) [101]. Se pueden producir a partir de algunos de los polímeros más abundantes en la tierra, típicamente derivados de proteínas o polisacáridos. Estos representarían materiales adecuados para aplicaciones a gran escala debido a su gran disponibilidad y bajo coste [23].

Los hidrogeles se pueden sintetizar de varias formas químicas. Estos incluyen procedimientos de un solo paso como la polimerización y el entrecruzamiento paralelo de monómeros multifuncionales, así como procedimientos de múltiples pasos que implican la síntesis de moléculas poliméricas que tienen grupos reactivos y su posterior entrecruzamiento, un hidrogel es simplemente una red polimérica hidrofílica reticulada de alguna manera para producir una estructura elástica. Por lo tanto, cualquier técnica que pueda usarse para crear un polímero reticulado puede usarse para producir un hidrogel [102].

En general, se necesita de un monómero, iniciador y reticulante para la preparación de un hidrogel. Para controlar el calor de polimerización y las propiedades finales de los hidrogeles, se pueden usar diluyentes, como agua u otras soluciones acuosas. Luego, la masa de hidrogel debe lavarse para eliminar las impurezas que quedaron del proceso de preparación [102]. Estos incluyen

monómero sin reaccionar, iniciadores, reticuladores y productos no deseados producidos a través de reacciones secundarias figura 7.

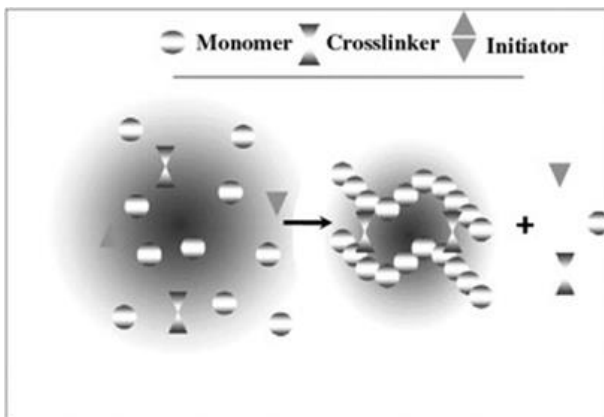


Figura 7: Diagrama esquemático de la preparación de hidrogel [102].

#### 4.19 Clasificación de hidrogel

Los hidrogeles se pueden clasificar en función de diferentes Dependien de los materiales involucrados, la fuente, método de reticulación, respuesta a los estímulos y su carga iónica. Los polímeros involucrados en los hidrogeles son naturales, sintéticos, híbridos. Estos polímeros pueden formar hidrogeles como hidrogeles de homopolímero, hidrogeles de copolímero, hidrogeles de copolímero de bloque, terpolímeros, etc. Además, los hidrogeles se preparan reticulando polímeros y la reticulación puede ser física, química o ambas simultáneamente [103].

Clasificación	
Origen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímeros naturales (polisacáridos y proteínas)</li> <li>• Polímeros sintéticos</li> <li>• Híbridos</li> </ul>
Preparación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polimerización por radicales libres</li> <li>• Polimerización por irradiación (UV, gamma)</li> <li>• Redes interpenetrantes</li> <li>• Mezcla simple</li> </ul>
Reticulación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Física</li> <li>• Química</li> <li>• Híbrida</li> </ul>

Carga	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Iónico (catiónico, aniónico)</li> <li>• Neutral (no iónica)</li> <li>• Electrolito anfótero</li> </ul>
Sensibilidad a estímulos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Físico</li> <li>• Químicos</li> <li>• bioquímicos</li> </ul>

Tabla 3. Clasificación de hidrogeles, modificada de: [102], [103]

#### 4.20 Hidrogel en la agricultura.

Los hidrogeles se modifican constantemente para obtener nuevas propiedades y aplicaciones. La elección de polímeros con las características deseadas y los métodos de reticulación junto con los grados de reticulación son pasos vitales para producir calidades aceptables de hidrogeles para una aplicación específica, especialmente para fines agrícolas [10]. los investigadores informaron que los hidrogeles naturales derivados de celulosa pueden servir como medios de cultivo para conservar el agua y los nutrientes, por lo tanto, tienen un gran potencial en el cultivo sin suelo para el crecimiento de las hortalizas [15], [26], [104], debido a su propiedad de retención de agua, los hidrogeles tienen la capacidad de mejorar la soltura y la porosidad del medio de cultivo mejorar la capacidad de acumulación de humedad y promover la capacidad de los sistemas de raíces de las plantas, la germinación de semillas y la supervivencia de las plantas, en la agricultura puede contribuir a la sostenibilidad ambiental al reducir la contaminación del suelo con agroquímicos no biodegradables.

Estos materiales ofrecen una alternativa respetuosa con el medioambiente debido a su biodegradabilidad, renovabilidad y no toxicidad [26], [105]. Sin embargo, cuando se utiliza como sustrato para el crecimiento de plantas, el hidrogel debe cumplir requisitos adicionales para sus propiedades, como propiedades mecánicas para soportar plantas más grandes y simular la rigidez del suelo, mayor concentración de aire para favorecer la respiración de las raíces y mejor estabilidad para resistencia a largo plazo, resistencia iónica y amplio rango de pH debido a períodos de crecimiento más prolongados para las plantas y exudados de raíces complejos liberados en el hidrogel. Por ello, es importante destacar el diseño único y minucioso del hidrogel como sustrato para el crecimiento de las plantas [11].

#### 4.21 Hidrogeles no porosos

Anteriormente, hemos planteado la importancia de tener un porcentaje adecuado de poros grandes (macroporos) que permitan la oxigenación en raíz y el drenaje.

Se utilizó un hidrogel de polietilenglicol (PEG) como medio de cultivo. Se observó que las raíces cultivadas en soluciones de PEG con baja disponibilidad de oxígeno experimentaron una disminución en las tasas de elongación radicular, un aumento en las concentraciones de alanina en las puntas de las raíces y una disminución en las concentraciones de prolina en las puntas de las raíces. Estos cambios indican que la deficiencia de oxígeno en las soluciones de PEG afectó el metabolismo en el sistema radical [106].

En cambio, [107] hizo una comparación de agar convencional, con agar poroso como medio de cultivo. Un medio de agar poroso mejora el crecimiento de las plantas en condiciones estériles. Argumenta que un agar convencional se asemeja a un suelo encharcado en términos de la difusión gaseosa. En un suelo encharcado, la presencia de agua impide la difusión eficiente de gases, como el oxígeno, a través del suelo hacia las raíces de las plantas, lo que puede causar estrés y afectar el crecimiento de las raíces. De manera similar, el agar no poroso presenta una limitada difusión de gases, lo que puede crear un entorno desfavorable para el crecimiento de las raíces de las plantas cultivadas en él. se encontró que las raíces crecieron un 80-90 % más grande en el agar poroso en comparación con el agar no poroso.

#### 4.22 Manufactura aditiva

La manufactura aditiva (AM) puede describirse como una técnica de combinación de materiales mediante fusión, unión o solidificación de materiales como resina líquida, polímeros y polvos. Construye piezas capa por capa utilizando modelado CAD 3D. La AM es muy útil cuando se requieren volúmenes de producción bajos, alta complejidad de diseño y cambios de diseño frecuentes. Ofrece la posibilidad de producir piezas complejas superando las limitaciones de diseño de los métodos de fabricación tradicionales [108], esta fue inventada originalmente hace más de tres décadas, ahora ha madurado lo suficiente como para ver usos reales en una variedad de industrias como aeroespacial, automotriz e ingeniería de tejidos [109], donde se prevé que los ingresos mundiales por materiales AM crezcan a \$ 23 mil millones para 2029 [110], con las

mayores cuotas de mercado para las industrias, se presenta como pieza clave para la denominada industria 4.0 [111].

“La impresión 3D permite la creación de formas geométricas complejas que se pueden personalizar en masa. porque no se requiere matriz ni molde y los conceptos de diseño se traducen en productos a través de la fabricación digital directa.” [112] Existen varios métodos de manufactura aditiva, que pueden ser clasificados por el tipo de material figura 8.

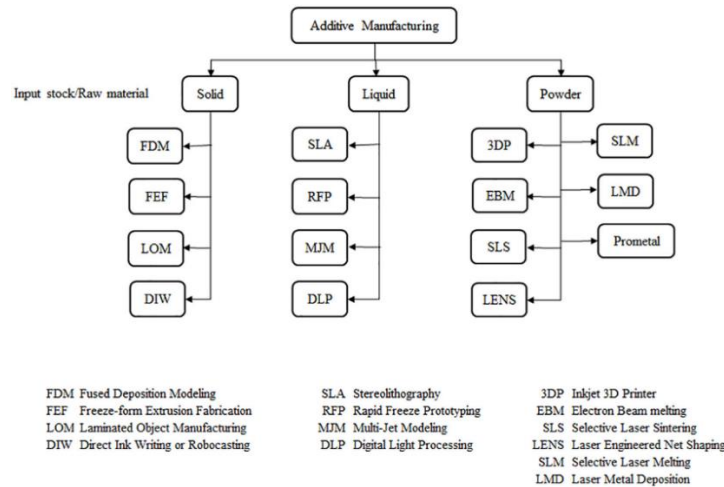


Figura 8: clasificación de métodos de manufactura aditiva[113][114].

La manufactura aditiva, coloquialmente conocida como impresión 3D, comienza con un modelo 3D diseñado con software de diseño asistido por computadora (CAD) o escaneado en 3D a partir de un objeto físico. Posteriormente, el modelo 3D se convierte al formato STL por sus siglas (Standard Triangle Language). Dicho formato describe únicamente la superficie del modelo 3D con una red de triángulos de diferentes tamaños, según la resolución requerida [113].

El fundamento de la impresión 3D tipo VAT que viene del acrónimo "Vat Photopolymerization" que se refiere a la polimerización en depósito, ya que implica el uso de un tanque o depósito (VAT), se basa en la fotopolimerización, se requiere de monómeros/oligómeros en estado líquido que pueden curarse/fotopolimerizarse al exponerse a una fuente de luz de longitud de onda específica y formar termoestables [114], Se requiere un fotoiniciador o un sistema fotoiniciador con coeficientes de absorción relativamente altos para convertir la energía fotolítica en especies reactivas (radicales o cationes) que pueden impulsar el crecimiento de la cadena a través de un mecanismo radical o catiónico. Por lo general, en el rango UV [115].

En la impresión 3D por fotopolimerización, se utiliza un fotopolímero, que normalmente es una resina curable con luz, se almacena en una tina y se trata con luz visible o ultravioleta. La luz de polimerización desencadena y manifiesta la reacción de polimerización, que luego forma cadenas de polímeros o la red para formar un objeto sólido. Figura 9. tres elementos de la mezcla de fotopolímeros son monómeros, oligómeros y fotoiniciadores. Cuando se exponen a la luz de curado, los fotoiniciadores liberan especies reactivas que funcionan como catalizadores para la formación de cadenas entre monómeros y oligómeros. El proceso químico-térmico de formación de cadenas es irreversible y los prototipos no pueden volver a su forma líquida. Utilizando este principio, se fabrican gradualmente capas consecutivas de resina a partir de un archivo STL [116], [117], [118].

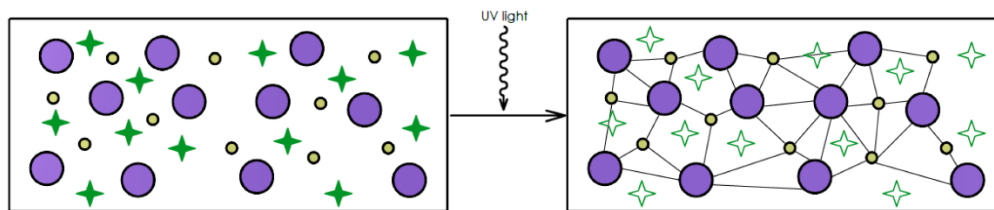


Figura 9: Fotopolímero líquido (a la izquierda), polimerización inducida por luz (círculo pequeño: monómero, círculo grande: oligómero, estrella: fotoiniciador) obtenido de: [121].

#### 4.23 Clasificación de polimerización VAT

**Estereolitografía:** La estereolitografía (SLA) fue la primera tecnología AM conocida, patentada por Chuck w. Hull (US4575330A), imprime un objeto 3D escaneando un rayo láser enfocado sobre la superficie de la resina para curar la resina irradiada. Para realizar el escaneo, por lo general se utilizan espejos galvanométricos o platina de traslación para controlar el rayo láser que se mueve a lo largo de la dirección x-y, mientras que se adopta una etapa motorizada para cambiar la posición de cada capa. Durante la impresión, el punto láser enfocado permanece fijo en la resina y la etapa de traslación X-Y está diseñada para mover todo el sistema óptico o la plataforma de impresión sobre la que se imprime el objeto figura 10 [119].

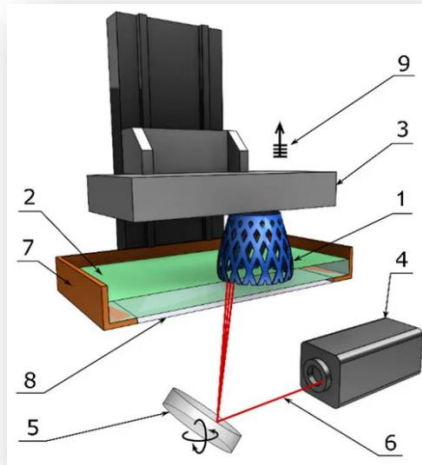


Figura 1010. Componentes de una máquina SLA típica obtenido de [123].

**Procesamiento de luz digital:** El procesamiento de luz digital (DLP), esta tecnología es muy similar a SLA, la principal diferencia es la fuente de luz, donde la imagen se crea mediante una lámpara de arco o mediante espejos microscópicos pequeños dispuestos en una matriz en un chip semiconductor, conocido como dispositivo de microespejo digital (DMD). Cada espejo representa uno o más píxeles de la imagen proyectada. El número de espejos corresponde a la resolución de la imagen proyectada figura 11 [120].

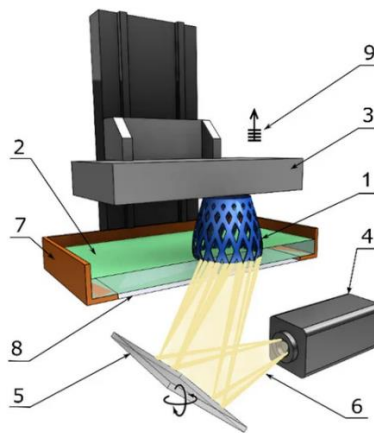


Figura 11: Componentes de una máquina DLP típica: 1: pieza impresa, 2: resina líquida, 3: plataforma de construcción, 4: fuente de luz, 5: proyector digital, 6: haz de luz, 7: tanque de resina, 8: ventana y 9: elevación capa por capa obtenido de: [123].

La penetración de la luz es crucial en todos los métodos VAT, ya que afecta la absorción y transmisión de la luz a través de las fotorresinas [121]. En consecuencia, este proceso afecta a la

generación de componentes reactivos a lo largo del camino del haz de luz, afectando así en la transformación de líquido a sólido, fase denominada punto de gel. En los métodos de impresión que operan capa por capa, la profundidad de penetración dicta la presencia de irregularidades relacionadas con las capas [122].

#### 4.24 Hidrogeles Fotocurables

Los hidrogeles ya son utilizados en el tratamiento de heridas dérmicas utilizando el mismo fundamento VAT, por lo general como una forma de vendaje para heridas. la bioimpresión utiliza un dispositivo de impresión 3D CAD (diseño asistido por computadora) para depositar con precisión células y biomateriales en geometrías precisas con el objetivo de crear estructuras anatómicamente correctas [123].

Existen varias técnicas de la manufactura aditiva que ya han sido probadas para la elaboración de hidrogeles para aplicaciones médicas en ingeniería de tejidos [124], [125], [126], que va desde prótesis, injertos de huesos hasta órganos artificiales figura 12. Esto demuestra la capacidad de la manufactura aditiva para resolver problemáticas complejas, y de cierto modo da certeza de que es posible producir un sustrato de hidrogel mediante estas técnicas.

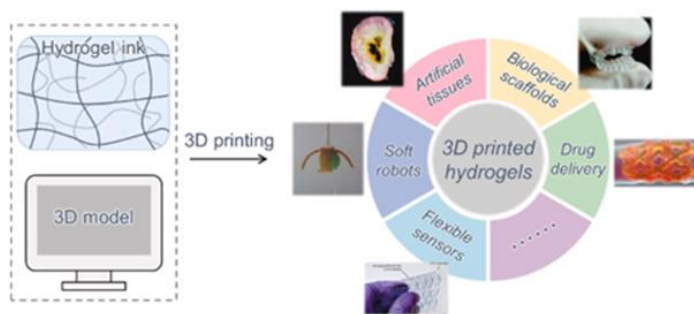


Figura 12: Impresión 3D de hidrogeles y sus aplicaciones versátiles en campos biomédicos y de ingeniería obtenido de [130].

En cuanto hidrogeles, las sustancias que se utilizan como tintas o biotinas deben tener ciertas propiedades. Lo más importante es tener una formulación que se pueda cargar e imprimir en la celda, que tenga la viscosidad óptima durante el proceso de impresión y que pueda solidificarse en la estructura y el esqueleto deseados después de la impresión [127]. Existen una amplia variedad de fotoiniciadores, cada uno de ellos con un espectro de absorción singular, y a su vez, se desarrollan con frecuencia. Un fotón de una fuente de luz excita o disocia al fotoiniciador en un estado radical de alta energía. Este radical luego induce la polimerización de una solución de

macrómero, sin embargo, la creación de una especie radical de alta energía en este sistema crea el potencial de daño oxidativo [128] lo que radica en citotoxicidad y enfermedades cancerígenas [129]. Por lo que es de vital importancia la elección de un fotoiniciador con una toxicidad muy baja.

En la ingeniería de tejidos, los hidrogeles macroporosos juegan un papel importante en la dirección de la formación y función del tejido mediante andamios de hidrogel. Utilizan la porosidad del andamio para permitir una distribución e interconexión celular homogénea en los tejidos diseñados. Además, el aumento de la porosidad puede tener un efecto beneficioso sobre la difusión de nutrientes y oxígeno, especialmente en ausencia de un sistema vascular funcional [32]. La principal función en la producción de andamios por AM es mantener altos niveles de control preciso sobre sus propiedades macro (por ejemplo, forma espacial, resistencia mecánica, densidad, porosidad) y microestructurales (por ejemplo, tamaño de poro, distribución de poros, interconectividad de poros), si bien existen diversas técnicas para crear porosidad como la lixiviación de partículas o porogenos [130], descongelación y deshielo/Liofilización [131], espuma gas [132] y electrohilado [133]. Sin embargo, la mayoría de ellas permiten ajustar de forma aproximada solo unos pocos parámetros, como la porosidad y el tamaño de los poros, más no la distribución, interconectividad y geometría [134][135].

#### 4.25 Superficies mínimas triplemente periódicas

Las superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS) se componen de infinitas estructuras superficiales periódicas, no autointersectivas en XYZ, y se asocian a estructuras cristalográficas. Tabla 4 [136]. Se puede fabricar una variedad de sólidos inorgánicos, meso y macroporosos mediante sus transcripciones estructurales. Los materiales con TPMS y geometrías afines han producido un gran interés en los campos de investigación de las matemáticas, la física biología, química y ciencia de los materiales debido a sus estructuras complicadas y simétricas, con propiedades físicas optimizadas para numerosas aplicaciones, como catálisis, separación administración de fármacos y conversión de energía [137].

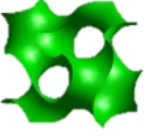
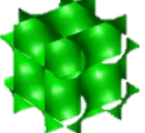

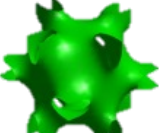

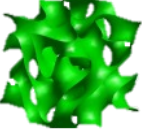
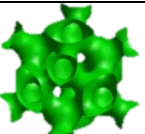
Superficie	Celda unitaria	Ecuación
G		$Sen(x)Cos(y) + Sen(y)Cos(z) + Sen(Z)Cos(X) = 0$
D		$cos(X) cos(Y) cos(Z) + sin(X) sin(Y) sin(Z) = 0$
P		$Cos (X) + Cos (Y) + Cos (Z) = 0$
N		$3[Cos(x) + Cos(Y) + Cos(Z)]$ $+ 4Cos(y)Cos(y)Cos(Z) = 0$
IWP		$2[cos(X) cos(Y) + cos(Y) cos(Z)$ $+ cos(Z) cos(X)] - [cos(2X) +$ $cos(2Y) + cos(2Z)] = 0$
Fk		$cos(2X) sin(Y) cos(Z) + cos(X) cos(2Y) sin(Z)$ $+ sin(X) cos(Y) cos(2Z) = 0$
FRD		$4[cos (X)cos (Y)cos (Z)]$ $- [cos (2X)cos (2Y)$ $+ cos (2Z)cos (2X)$ $+ cos (2Y)cos (2Z)] = 0$

Tabla 1 Celdas unitarias TPMS comunes utilizadas en el diseño de metamateriales obtenido de [142].

#### 4.26 Porosidad en geometrías basada en TPMS

En cuanto hidrogel, las sustancias que se utilizan como tintas o biotinas deben tener ciertas propiedades. Lo fundamental es contar con una formulación que sea adecuada para cargar e imprimir en la celda, que posea la viscosidad ideal durante el proceso de impresión y que, tras ser impresa, pueda solidificarse formando la estructura y el esqueleto requeridos [131]. Existen una

variedad de fotoiniciadores, cada uno con su espectro de absorción único, y continuamente se desarrollan más. Un fotón de una fuente de luz excita o disocia al fotoiniciador en un estado radical de alta energía. Este radical luego induce la polimerización de una solución de macrómero, sin embargo, la creación de una especie radical de alta energía en este sistema crea el potencial de daño oxidativo [132], lo que radica en citotoxicidad y enfermedades cancerígenas [133]. Por lo que es de vital importancia la elección de un fotoiniciador con una toxicidad muy baja.

En la ingeniería de tejidos, los hidrogeles macroporosos juegan un papel importante en la dirección de la formación y función del tejido mediante andamios de hidrogel. Utilizan la porosidad del andamio para permitir una distribución e interconexión celular homogénea en los tejidos diseñados. Además, el aumento de la porosidad puede tener un efecto beneficioso sobre la difusión de nutrientes y oxígeno, especialmente en ausencia de un sistema vascular funcional [32]. La principal función en la producción de andamios por AM es mantener altos niveles de control preciso sobre sus propiedades macro (por ejemplo, forma espacial, resistencia mecánica, densidad, porosidad) y microestructurales (por ejemplo, tamaño de poro, distribución de poros, interconectividad de poros), si bien existen diversas técnicas para crear porosidad como la lixiviación de partículas o porogenos [134], descongelación y deshielo/Liofilización [135], espuma gas [136] y electrohilado [137]. Sin embargo, la mayoría de ellas permiten ajustar de forma aproximada solo unos pocos parámetros, como la porosidad y el tamaño de los poros, más no la distribución, interconectividad y geometría [138][139]. Superficies mínimas triplemente periódicas Las superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS) se componen de infinitas estructuras superficiales periódicas, no autointersectivas en XYZ, y se asocian a estructuras cristalográficas. Tabla 4 [140].

Se puede fabricar una variedad de sólidos inorgánicos, meso y macroporosos mediante sus transcripciones estructurales. Los materiales con TPMS y geometrías afines han producido un gran interés en los campos de investigación de las matemáticas, la física biología, química y ciencia de los materiales debido a sus estructuras complicadas y simétricas, con propiedades físicas optimizadas para numerosas aplicaciones, como catálisis, separación administración de fármacos y conversión de energía. [136][138], [139]

[140]

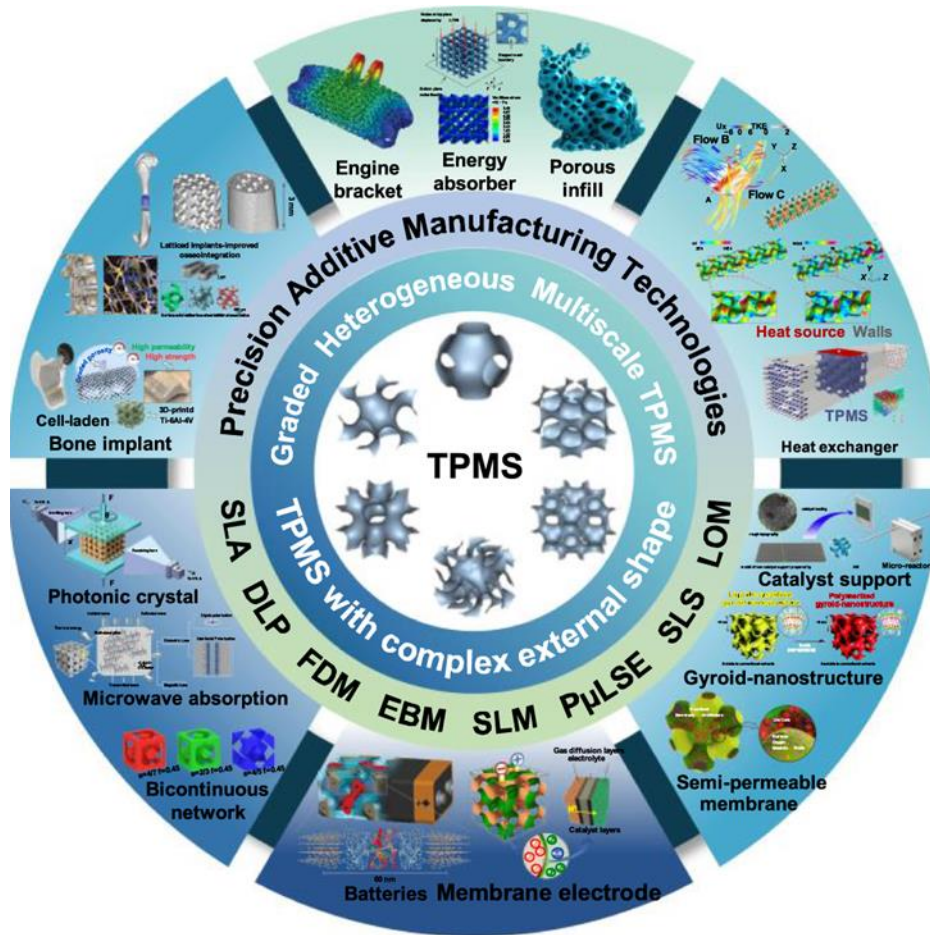


Figura 13. Descripción general de estructuras porosas de TPMS obtenido de:[143].

La porosidad de una estructura TPMS puede ser medida considerando que son láminas delgadas con espesor  $0$  figura 14, las densidades relativas son proporcionales al espesor de la lámina,  $t$  mediante ecuación (4).

$$\rho(a, t) = \frac{S(a)t}{a^3} \quad (4)$$

$S(a)$  expresa la superficie del TPMS, que depende del tamaño de la celda unitaria. El tamaño de poro se define como el diámetro de una esfera capaz de atravesar el canal más pequeño del andamio. El tamaño de poro,  $P$  depende del tamaño de celda y espesor de la celda, ecuación 5 [135].

$$P(a, t) = \frac{P(a_0)a}{a_0}t \quad (5)$$

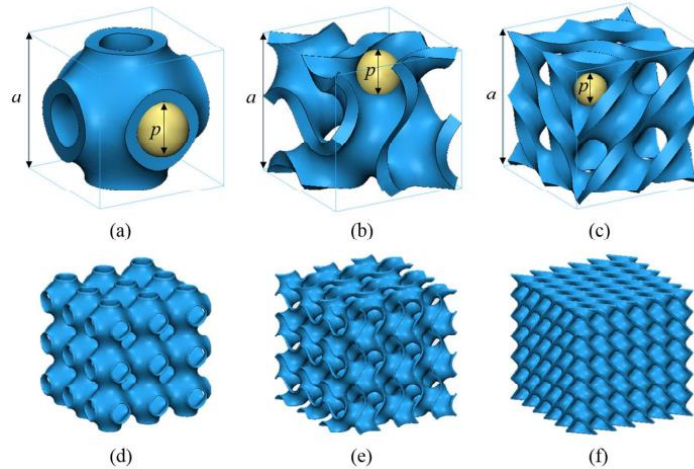


Figura 14. Andamios TPMS con la definición del tamaño de poro. Células unitarias de andamios compuestos con (a) superficie-P, (b) superficie-G, (c) superficie-D, Las correspondientes celdas unitarias repetidas (d-f) obtenido de:[139].

## Superficie Giroide

En un informe de la NASA de 1970, Alan H. Schoen describió 17 TPMS, siendo la superficie G, (Giroide), el invento más espectacular de Schoen. Siendo incluida junto a las superficies de Schwarz como TPMS. El giroide se describe como una superficie infinitamente conectada que no contiene líneas rectas ni curvas de simetría plana con un ángulo de asociación aproximado de  $38,015^\circ$  [141]. Esta estructura puede ser encontrada en la naturaleza en las alas de algunas especies de mariposas, figura 15.

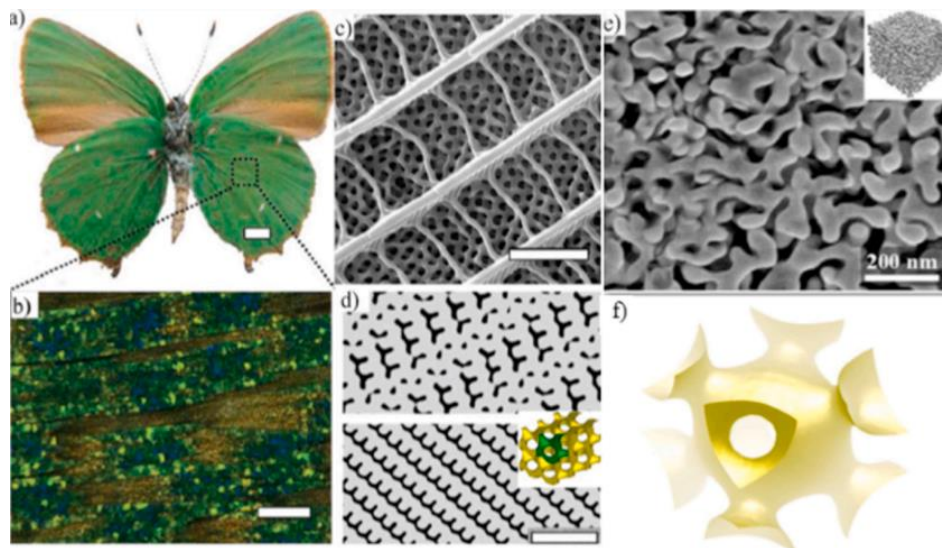


Figura 15. Estructuras TPMS encontradas en la naturaleza obtenido de: 147

Figura 15: Estructuras TPMS encontradas en la naturaleza. (a-d) Color estructural en la mariposa *C. rubí*: (a) Imagen óptica de *C. rubí* desde el lado dorsal que muestra el color verde procedente de la estructura giroide (barra de escala 0,5 cm), (b) Imagen óptica de escamas de mariposa con estructura giroide apiladas en las superficies de las alas (barra de escala 30  $\mu\text{m}$ ), (c) Vista superior (barra de escala: 2  $\mu\text{m}$ ) y (d) Imagen SEM transversal del giroide (barra de escala: 1  $\mu\text{m}$ ), (e) Microestructura del oro nanoporoso, y (f) Superficie de Fermi del cobre, obtenido de:[142].

En un estudio investigaron las propiedades mecánicas de estructuras TPMS fabricadas mediante impresión 3D por fabricación por filamento fundido (FDM) [143], donde la estructura giroide mostró mayor rendimiento en términos de rigidez y módulo elástico en comparación con otras estructuras de TPMS, solo superada por la estructura Schwarz D (diamante), esta superficie no presentan juntas ni discontinuidades lo que favorece a minimizar los efectos de la concentración de tensiones, mostrando resistencia ante una fuerza de compresión[144], en [145] se probaron 2 andamios con valores comparables de porosidad y distribución del tamaño de poro, el tipo giroide reveló una permeabilidad 10 veces mayor, que un andamio echo por lixiviación de porogeno, lo que es beneficioso para el suministro de nutrientes y oxígeno.

## V. Marco contextual

Hasta la fecha solo se encuentran un par de artículos referentes a la fabricación de sustratos de cultivo sin suelo utilizando hidrogeles mediante impresión 3D. Kalossaka, Sena, Barter, et.al [23], siendo los pioneros en introducir este concepto, su investigación radica en explorar el potencial de los hidrogeles en la agricultura a través de técnicas de AM. Los principales desafíos en imprimir una estructura que no presente fitotoxicidad, que sea bioreceptiva y que tenga una resolución de impresión que permita la creación de poros para la aireación y el transporte nutrientes. Al mismo tiempo, las características de la estructura impresa que pueda soportar el crecimiento de las plantas y anclaje de raíces. Y la propuesta de los procesos de AM que tienen el potencial de crear sustratos de hidrogel para cultivos sin suelo fig 16, dando paso a las ventajas que podría tener esta tecnología como aumento de producción, innovación y sostenibilidad.

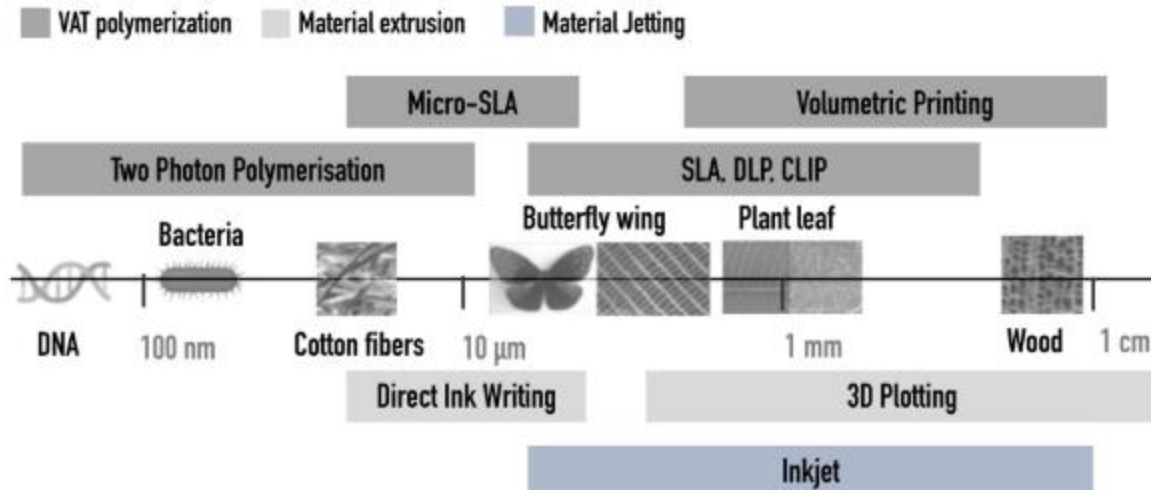


Figura 16. Procesos de impresión 3D a diferentes escalas de longitud para imitar características naturales[23].

Algunos artículos han reportado el uso de tomografías computarizadas de rayos X como método de obtención de imágenes de alta resolución en suelos porosos para su comprensión y experimentación, y posteriormente reproducir estructuras mediante técnicas de impresión 3D con el uso de sinterizado selectivo por láser (SLS) con nylon 12 [146], modelado de inyección múltiple con resina a base de dietoxilato de bisfenol A, oligómeros de acrilato de uretano y diacrilato de tripropilenglicol [147], y Fabricación por filamento fundido (FDM), sinterizado selectivo por láser y estereolitografía utilizando ABS, Mezcla de polvo de poliamida y aluminio y resina epoxi respectivamente [148].

Dado a los obstáculos que se pueden presentar en la producción de alimentos en el espacio, [149] plantea el uso de sustrato de hidrogel de carboximetilcelulosa CMC impreso mediante la técnica FDM como medio de germinación en semillas de soya evaluando la orientación de la semilla, no obstante, no hacen mención sobre la importancia de la porosidad en el sustrato.

En [150] describen un medio poroso que permite la obtención de imágenes de sistemas de raíces sin restricciones in vivo mediante fotografía y microscopía y el fenotipado de raíces resuelto en el tiempo. El medio consta de poros interconectados que están rodeados por una solución nutritiva, contenida en perlas esféricas de hidrogel. Estas perlas tienen tamaño y dureza controlables limitado a 0.5 mm a 5.5 mm, y se producen de forma sencilla, rápida y económica dejando caer una solución de goma gellan y alginato en una solución agitada de  $MgCl_2$ , argumentan que el conjunto de perlas esféricas siempre tiene una porosidad conectada independientemente de su disposición. Esto permite una mejor comprensión de los fenotipos de las raíces, su interacción con el entorno y

propiedades mecánicas, lo cual es fundamental para mejorar la producción de cultivos y comprender mejor los mecanismos de crecimiento de las plantas.

En un estudio sobre medios de cultivo para microvegetales [16], se utilizó un hidrogel de agarosa relleno de partículas de mezcla de crecimiento poroso (GMP), creando una estructura porosa aumentando el rendimiento del cultivo en un 44 %, la porosidad llena de aire aceleró el transporte de agua y oxigenación, los autores argumentan que un hidrogel es su forma prístina, tiene una deficiencia de falta de drenaje y oxigenación en el cultivo, debido a la falta de macroporos por la naturaleza de estos materiales lo que puede ocasionar una hipoxia a la planta. Sin embargo, la distribución de tamaño de poro fue muy variado desde 0.1 a 75  $\mu\text{m}$ , siendo un rango de poros más apegado a la microporosidad que necesita un sustrato.

## Capítulo 3

### VI. Metodología 6.1 Materiales

#### Software y Herramientas digitales

- PTC CREO v 7.0 o superior
- Anaconda v 24.5.0 o superior
- Librería Trimesh v 4.3.2 o superior
- Librería Tkinter v 8.6
- Librería Traceback (librería estándar de Python)

#### Hardware

- Memoria física (RAM) mínimo 16gb
- Procesador Intel Core i7-8750H 6 núcleos o superior
- Sistema operativo Windows 10 o superior

### 6.2 Métodos

#### 4.2.1 Diseño y preparación del modelo

- Diseño de modelo en software PTC CREO, optimizando geometrías para las simulaciones con una precisión de 0.0001 MKS.
- Dimensiones del diseño dentro del estándar de 0.25-7 mm
- Aplicación del modelado implícito con Lattice giroide gobernada por la función  $Sen(x)Cos(y) + Sen(y)Cos(z) + Sen(Z)Cos(X) = 0$
- Ajustamos el tamaño de celda en sus 3 dimensiones X, Y, Z

#### Simulación

- Cálculo del volumen del sustrato y de la referencia a partir de los archivos STL utilizando la librería Trimesh
- Determinación del volumen sólido real del hidrogel tras considerar la microporosidad inicial.
- Cálculo de macroporosidad y porosidad total
- Interfaz gráfica: Desarrollo de una aplicación con Tkinter que permite al usuario cargar archivos STL y definir parámetros (microporosidad, hinchamiento, densidad).

## Capítulo 4

### VII. Resultados

#### 7.1 Investigación documental

El objetivo de este estudio es optimizar las propiedades físicas de sustratos agrícolas de hidrogel utilizando diseño asistido por computadora y simulación mediante código en Python. Un aspecto crítico en este proceso es entender cómo la inducción de macroporosidad afecta la porosidad total del hidrogel, que ya posee una microporosidad intrínseca.

#### Conceptos clave

El porcentaje de porosidad del material es una propiedad intrínseca del hidrogel, representando la fracción de volumen ocupada por poros pequeños, típicamente en el rango de 0.2 a 50 micrómetros. Por ejemplo, si un hidrogel tiene una microporosidad del 50 %, esto significa que el 50 % del volumen total del material está ocupado por espacio vacío ocupado por poros.

**La macroporosidad** es inducida por modificaciones en el diseño estructural del hidrogel, creando poros más grandes en el rango de 100 a 500 micrómetros. Esta macroporosidad no es una propiedad intrínseca del material, sino que resulta de procesos de diseño y manufactura.

#### Interacción entre Microporosidad y Macroporosidad

**Superposición de Volúmenes:** Cuando se induce macroporosidad en un hidrogel, se redistribuye el volumen del material. Los macroporos creados reemplazan parte del volumen sólido y pueden intersectar los microporos existentes, afectando así la distribución de la microporosidad.

**Volumen total de la partícula:** El volumen total del hidrogel, denotado como,  $V_{total}$  permanece constante. Sin embargo, la introducción de macroporos modifica cómo se distribuyen los volúmenes de sólido, microporosidad y macroporosidad dentro de ese volumen total.

#### Cálculos de Porosidad:

Para calcular la porosidad total después de inducir macroporosidad, se considera la siguiente lógica:

total=Vsolido\_mod+Vmicroporosidad\_mod+Vmacroporosidad

$$V_{total} = V_{solido_{mod}} + V_{microporosidad} + V_{macroporosidad}$$

- $V_{solido_{mod}}$  es el nuevo volumen sólido después de inducir macroporosidad.
- $V_{microporosidad_{mod}}$  es el nuevo volumen de microporosidad después de inducir macroporosidad.

### **Porosidad Total:**

Porosidad total=Microporosidad modificada+Macroporosidad

### **Ejemplo numérico**

Supongamos un hidrogel con un volumen total de 100 mm<sup>3</sup> y una microporosidad inicial del 70 %, es decir, 70 mm<sup>3</sup> ocupados por microporos y 30 mm<sup>3</sup> por el material sólido. Al inducir macroporosidad creando macroporos de 20 mm<sup>3</sup>:

- Nuevo volumen sólido  $V_{solido_{mod}} = 30\text{mm}^3 - 20\text{mm}^3 = 10\text{mm}^3$
- La microporosidad se ajusta considerando la intersección con los macroporos, pero el volumen total de referencia sigue siendo el mismo.

**programación de código para determinar propiedades físicas relevantes en Archivos STL**

**Software utilizado**

Se utilizó Anaconda Distribution[151], para gestionar paquetes y entornos de Python3.12[152]. Para desarrollar y ejecutar nuestro código, utilizamos Jupyter Notebook, que está incluido en Anaconda Distribution.

### **Librerías utilizadas**

**Trimesh**[153]: biblioteca diseñada para cargar y utilizar mallas triangulares en formato STL para determinar distintas mediciones.

**Tkinter**: librería del lenguaje de programación Python para la creación y desarrollo de aplicaciones de escritorio con una interfaz gráfica.

Este código tiene como objetivo calcular el porcentaje sólido, porcentaje de microporosidad (%), porcentaje de macroporosidad(%), porosidad total(%), capacidad de aireación(%), densidad real(g/cm<sup>3</sup>) y densidad aparente(g/cm<sup>3</sup>). Estos parámetros determinan de manera teórica las propiedades físicas que puede tener una partícula o pellet de sustrato de hidrogel utilizando modelos CAD en formato STL, con dimensiones, geometría, y microarquitectura deseadas de acuerdo con la literatura. La interfaz gráfica de usuario (GUI) permite seleccionar los archivos STL necesarios, un archivo debe ser la propuesta de partícula o pellet con el tamaño y geometría deseado, y el 2.º archivo debe ser la misma geometría y dimensiones, pero completamente sólido, es decir, sin porosidad inducida mediante CAD. Además, se deben proporcionar los datos del hidrogel a simular, como el porcentaje de porosidad (hinchamiento(%), y la densidad del material (mg/mm<sup>3</sup>). Este código está pensado para determinar propiedades físicas de sustratos de hidrogel Fotocurables particulados.

### **Componentes del código**

- **Importación de bibliotecas y módulos**

```
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox, filedialog
import trimesh
import traceback
```

- Se importan las bibliotecas necesarias para la GUI, la manipulación de archivos STL por **Trimesh** y la gestión de errores por el módulo **Traceback** incluido en la

biblioteca, la estándar de Python, y **Tkinter** con los módulos **messagebox** paramostrar cuadros de mensaje emergentes (pop-ups). **filedialog** para abrir cuadros de diálogo de archivos, permitiendo al usuario seleccionar archivos o directorios en el sistema de archivos, con la finalidad de interactuar con el usuario de manera visual y amigable.

- **Selección de Archivos**

```
def seleccionar_archivo(entry_widget):  
    archivo = filedialog.askopenfilename(filetypes=[("STL files", "*.stl"), ("All files", "*.*")])  
    if archivo:  
        entry_widget.delete(0, tk.END)  
        entry_widget.insert(0, archivo)
```

- **Definición de la función:** Se define una función llamada **seleccionar\_archivo** que toma un parámetro llamado **entry\_widget**. Este parámetro se espera que sea un widget de entrada (Entry) de tkinter donde se mostrará la ruta del archivo seleccionado.
- **Abrir Cuadro de Diálogo:** Esta línea utiliza **filedialog.askopenfilename** para abrir un cuadro de diálogo que permite al usuario seleccionar un archivo.
- **Parámetro filetypes:** Este parámetro especifica los tipos de archivos que el cuadro de diálogo mostrará:
  - ("STL files", "\*.stl"): Solo mostrará archivos con la extensión. STL.
  - ("All files", "\*.\*"): Mostrará todos los tipos de archivos.
- **Variable archivo:** La ruta del archivo seleccionado se almacena en la variable archivo.
- **Eliminar el contenido actual del Widget de Entrada:** Esta línea borra cualquier texto que ya esté presente en el widget de entrada (**entry\_widget**).
- **delete(0, tk.END):** Elimina el texto desde el primer carácter (**índice 0**) hasta el final (**tk.END**).
- **Insertar la Ruta del Archivo en el Widget de Entrada:** Esta línea inserta la ruta del archivo seleccionado en el widget de entrada.
- **insert(0, archivo):** Inserta el texto (ruta del archivo) en la posición inicial (**índice 0**) del widget de entrada.

## **Función de Cálculo**

Definición de la función **cálculos()**

### **1. Inicio de la función**

- La función **cálculos()** se define para realizar una serie de cálculos relacionados con las propiedades físicas de sustratos de hidrogel.
- Se utiliza un bloque try para manejar excepciones y asegurar que cualquier error se capture y se muestre adecuadamente.

## 2. Extracción de Datos de Entrada

- **archivo\_sustrato = entrada\_archivo\_sustrato.get ()**: Obtiene la ruta del archivo STL del sustrato desde el widget de entrada.
- **archivo\_referencia = entrada\_archivo\_referencia.get()**: Obtiene la ruta del archivo STL de referencia desde el widget de entrada.
- **porcentaje\_microporosidad = float(entrada\_porcentaje\_microporosidad.get())**: Obtiene el porcentaje de microporosidad del widget de entrada y lo convierte a un número flotante.
- **porcentaje\_hinchamiento = float(entrada\_porcentaje\_hinchamiento.get())**: Obtiene el porcentaje de hinchamiento del widget de entrada y lo convierte a un número flotante.
- **densidad\_hidrogel = float(entrada\_densidad\_hidrogel.get())**: Obtiene la densidad del hidrogel del widget de entrada y lo convierte a un número flotante.

## 3. Carga de Mallas STL

- **mesh\_sustrato = trimesh.load\_mesh(archivo\_sustrato)**: Carga la malla STL del sustrato utilizando la biblioteca trimesh.
- **mesh\_referencia = trimesh.load\_mesh(archivo\_referencia)**: Carga la malla STL de referencia utilizando la biblioteca trimesh.

## 4. Cálculo de volúmenes

- **volumen\_sustrato = mesh\_sustrato.volume**: Calcula el volumen de la malla del sustrato.
- **volumen\_referencia = mesh\_referencia.volume**: Calcula el volumen de la malla de referencia.

## 5. Cálculo del Volumen Sólido Real

- **volumen\_solido\_real = volumen\_sustrato \* (100 - porcentaje\_microporosidad) / 100**: Calcula el volumen sólido real del sustrato teniendo en cuenta la microporosidad.

## 6. Cálculo del Espacio Vacío y la Microporosidad

- **espacio\_vacio = volumen\_referencia - volumen\_sustrato**: Calcula el volumen de espacio vacío (macroporosidad) en la malla de referencia.
- **volumen\_microporosidad = volumen\_sustrato - volumen\_solido\_real**: Calcula el volumen de microporosidad en la malla del sustrato.

## 7. Conversión de volúmenes a porcentajes

- **porcentaje\_solido\_real = (volumen\_solido\_real / volumen\_referencia) \* 100**: Calcula el porcentaje de volumen sólido real en relación con el volumen de referencia.
- **porcentaje\_microporosidad = (volumen\_microporosidad / volumen\_referencia) \* 100**: Calcula el porcentaje de volumen de microporosidad en relación con el volumen de referencia.
- **porcentaje\_espacio\_vacio = (espacio\_vacio / volumen\_referencia) \* 100**: Calcula el porcentaje de volumen de espacio vacío (macroporosidad) en relación con el volumen de referencia.

## 8. Cálculo de la Porosidad Total y la Capacidad de Aireación

- **porosidad\_total = porcentaje\_microporosidad + porcentaje\_espacio\_vacio**: Calcula la porosidad total sumando la microporosidad y la macroporosidad.
- **capacidad\_aireacion = porcentaje\_espacio\_vacio**: Asumimos que toda la macroporosidad contribuye a la capacidad de aireación.

## 9. Cálculo del volumen y la masa del Hidrogel Hinchado

- **volumen\_hinchado\_cm3 = volumen\_solido\_real \* (1 + porcentaje\_hinchamiento / 100)**: Calcula el volumen del hidrogel hinchado, considerando el porcentaje de hinchamiento.

- **masa\_hinchado\_mg = densidad\_hidrogel \* volumen\_hinchado\_cm3 \* 1000:**  
Calcula la masa del hidrogel hinchado en miligramos.

## 10. Cálculo de Densidades

- **densidad\_real = (masa\_hinchado\_mg / 1000) / volumen\_solido\_real:** Calcula la densidad real de la partícula.
- **densidad\_aparente = (masa\_hinchado\_mg / 1000) / volumen\_referencia:**  
Calcula la densidad aparente de la partícula.

## 11. Visualización de resultados

- **messagebox.showinfo("Resultados", mensaje):** Muestra un cuadro de diálogo con los resultados calculados, que incluyen porcentajes de sólido, microporosidad, espacio vacío, porosidad total, capacidad de aireación, volumen del hidrogel hinchado, densidad real y densidad aparente.

## 12. Manejo de excepciones

- **except Exception as e:** Captura cualquier excepción que ocurra durante la ejecución de los cálculos.
- **messagebox.showerror("Error", str(e)):** Muestra un cuadro de diálogo con el mensaje de error.
- **print("Error:", str(e)):** Imprime el mensaje de error en la consola.
- **print(traceback.format\_exc()):** Imprime el rastreo del error en la consola para facilitar la depuración.

- **Interfaz Gráfica (GUI)**

Este bloque de código define y configura la interfaz gráfica de usuario (GUI) utilizando la biblioteca Tkinter.

### **Ventana principal**

```
root = tk.Tk()
root.title("Aplicación")
```

- Se crea la ventana principal de la aplicación usando **tk.Tk()**. Se asigna un título a la ventana principal con **root.title("Aplicación")**.

## Etiqueta y entrada para el Archivo del Sustrato

```
tk.Label(root, text="Archivo sustrato:").pack()
entrada_archivo_sustrato = tk.Entry(root)
entrada_archivo_sustrato.pack()
btn_archivo_sustrato = tk.Button(root, text="Seleccionar archivo sustrato", command=lambda: seleccionar_archivo(entrada_archivo_sustrato))
btn_archivo_sustrato.pack()
```

- **Etiqueta:** Se crea una etiqueta que dice "Archivo sustrato:" para indicar al usuario que debe seleccionar un archivo de sustrato.
- **Entrada:** Se crea un widget de entrada (**Entry**) donde el usuario puede ver y editar el nombre del archivo seleccionado.
- **Botón:** Se crea un botón que, al ser presionado, abre un cuadro de diálogo para seleccionar el archivo de sustrato. El comando **command=lambda: seleccionar\_archivo(entrada\_archivo\_sustrato)** llama a la función **seleccionar\_archivo** pasando el widget de entrada como argumento.

## Etiqueta y entrada para el Archivo de Referencia

```
tk.Label(root, text="Archivo de referencia:").pack()
entrada_archivo_referencia = tk.Entry(root)
entrada_archivo_referencia.pack()
btn_archivo_referencia = tk.Button(root, text="Seleccionar archivo de referencia", command=lambda: seleccionar_archivo(entrada_archivo_referencia))
btn_archivo_referencia.pack()
```

- **Etiqueta:** Se crea una etiqueta que dice "Archivo de referencia:".
- **Entrada:** Se crea un widget de entrada para el archivo de referencia.
- **Botón:** Se crea un botón que abre un cuadro de diálogo para seleccionar el archivo de referencia, utilizando la función **seleccionar\_archivo**.

## Etiquetas y entradas para Parámetros Numéricos

```
tk.Label(root, text="Porcentaje de microporosidad (%):").pack()
entrada_porcentaje_microporosidad = tk.Entry(root)
entrada_porcentaje_microporosidad.pack()

tk.Label(root, text="Porcentaje de hinchamiento (%):").pack()
entrada_porcentaje_hinchamiento = tk.Entry(root)
entrada_porcentaje_hinchamiento.pack()

tk.Label(root, text="Densidad del hidrogel (mg/mm³):").pack()
entrada_densidad_hidrogel = tk.Entry(root)
entrada_densidad_hidrogel.pack()
```

- **Etiquetas:** Se crean etiquetas para cada uno de los parámetros numéricos necesarios: **porcentaje de microporosidad, porcentaje de hinchamiento y densidad del hidrogel.**
- **Entradas:** Se crean widgets de entrada para que el usuario introduzca los valores de estos parámetros.

### Botón Salir, Calcular y bucle principal

```
btn_salir = tk.Button(root, text="Salir", command=root.destroy)
btn_salir.pack(side=tk.RIGHT, padx=5, pady=5)
btn_calcular = tk.Button(root, text="Calcular", command=calculos)
btn_calcular.pack(side=tk.LEFT, padx=5, pady=5)

root.mainloop()
```

**Botón de salida:** Se crea un botón que cierra la aplicación cuando se presiona. El comando **root.destroy** termina la ejecución de la ventana principal.

**Botón de calcular:** Se crea un botón que ejecuta la función **cálculos** cuando se presiona. Este botón inicia el proceso de cálculo basado en los archivos y parámetros introducidos por el usuario.

**Root.mainloop():** Este comando inicia el bucle principal de la aplicación, lo que permite que la interfaz gráfica esté en espera de eventos (como clics de botones y entrada de datos) y responda a ellos.

### Modelado implícito

Softwares utilizados

Se eligió el software **PTC Creo** debido a su capacidad para crear representaciones implícitas de estructuras complejas como estructuras giroides.

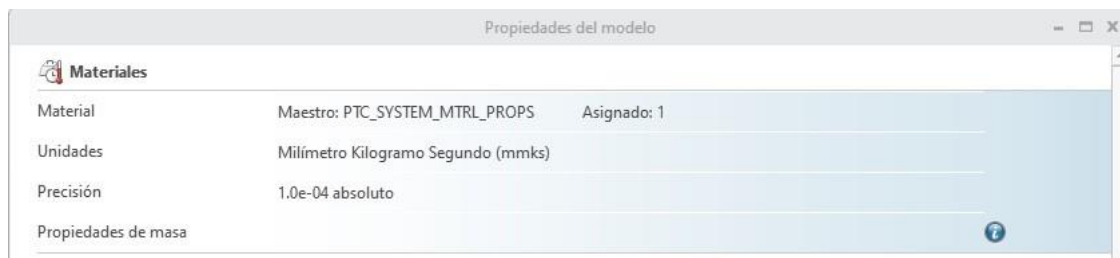
### Definición de geometría y estructura

La forma base seleccionada para este diseño es una esfera, debido a su capacidad para optimizar el acomodo dentro de un contenedor y maximizar la uniformidad de distribución. Se estableció la

forma de esfera giroide como base para la estructura del sustrato de hidrogel. La esfera giroide presenta espacios vacíos interconectados, los cuales de manera teórica permiten el flujo de agua y oxígeno.

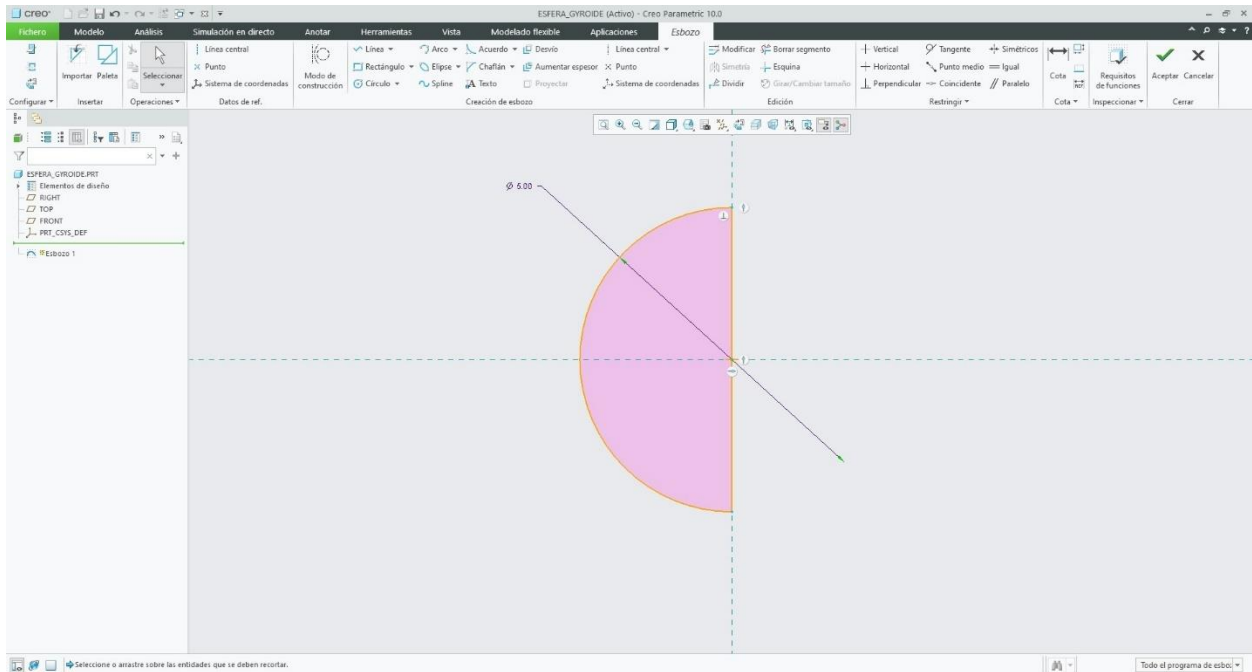
### **Creación del diseño por modelado implícito**

Para el diseño por modelado implícito por medio de PTC CREO, es necesario ajustar las unidades a milímetro kilogramo segundo (MMKS) y la precisión a  $1 \times 10^{-4}$  absoluto, es decir, se busca una precisión alta debido a las pequeñas dimensiones de lo que se busca modelar. En el contexto de partículas o pellets, se busca que el diámetro de la partícula sea de 0.25 a 7 mm, y que las canales creados por la estructura giroide tengan una distancia de 50 500  $\mu\text{m}$ .



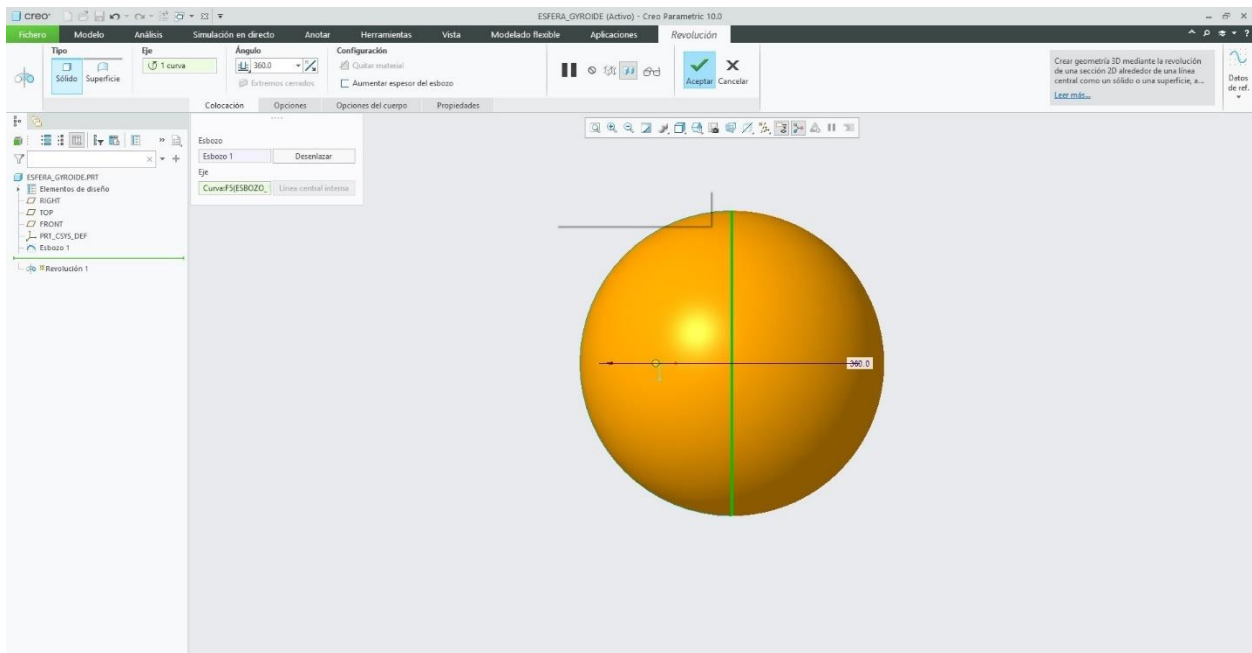
### **Esbozo de partícula**

En un plano vista frontal abriremos un esbozo (croquis) y trazaremos media circunferencia centrada en el origen, con una dimensión dentro de 0.25-7 mm,



## Revolución del sólido

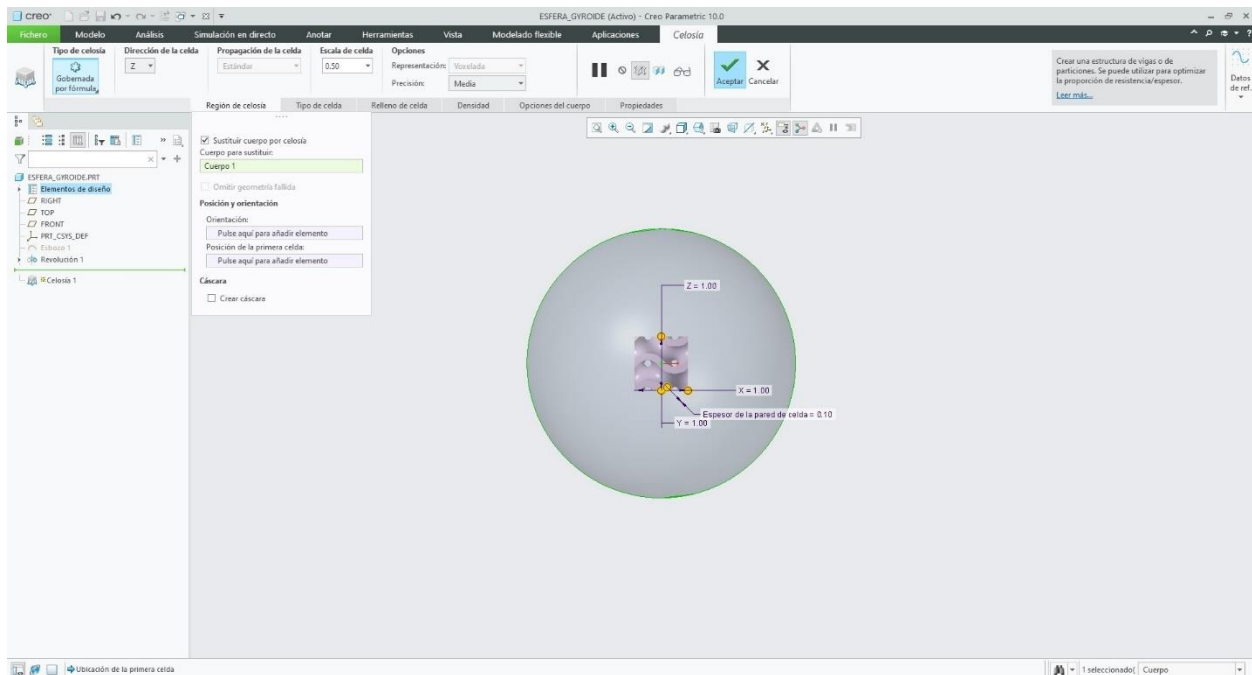
Hacemos una extrusión en revolución a  $360^\circ$  para generar el sólido, seleccionando la línea que atraviesa el origen como eje de revolución.



## Lattice en geometría esférica

En la pestaña Modelo > Ingeniería, seleccionamos la operación celosía (lattice) esto nos permite sustituir el cuerpo esférico por una celosía en una región específica o en todo el cuerpo, en tipo de celosía seleccionamos gobernada por fórmula y el tipo de celda seleccionamos giroide donde podremos controlar lo siguiente:

- **Tamaño de celda:** el tamaño de celda define las dimensiones que tendrá la celda unitaria en x, y, z.
- **Relleno de celda:** El relleno de celda es el espesor que tendrá la celda unitaria en todas sus direcciones.
- **Precisión:** es el grado de cercanía o error mínimo de las medidas deseadas, toma en cuenta el tamaño y espesor asignado en la celda unitaria y genera la esfera giroide conforme al número de celdas unitarias que cubran todo el volumen de la esfera sólida.



## Determinación de diámetro de la macroporosidad interconectada o canales en la esfera

Para aproximar el diámetro de poro que tendrá la esfera giroide, podemos partir de la siguiente ecuación.

$$\varnothing_{macroporo} = cu_{xyz} - 2rc$$

Donde:  $cu_{xyz}$  = tamaño de celda unitaria,  $rc$  = espesor de la celda unitaria, sin embargo, esta ecuación solo aplica cuando las dimensiones,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  de la celda unitaria, son iguales. En cambio, cuando una o todas las direcciones son distintas entre sí, podemos aproximar el diámetro de poro por medio del siguiente razonamiento.

$$d_x = cu_x - 2rc$$

$$d_y = cu_y - 2rc$$

$$d_z = cu_z - 2rc$$

$$\varnothing_{promedio} = \sqrt[3]{(d_x \cdot d_y \cdot d_z)}$$

Donde:  $d_x d_y d_z$  son las dimensiones en cada plano. Este modelo asume que el espesor del material es uniforme en todas las direcciones, lo cual puede no ser el caso en estructuras giroidales complejas. Por lo tanto, estas formulaciones son una forma simplificada de obtener el diámetro de poro.

### **Uso de interfaz de usuario, Calculadora de propiedades físicas en sustratos de hidrogel.**

#### **1. Ejecutar el script de Python:**

- Abra el entorno de desarrollo de Python o la terminal de comandos.
- Navegue al directorio donde se encuentra guardado el script y ejecútelo.

#### **2. Cargar el Archivo STL de Sustrato:**

- En la ventana de la aplicación, haga clic en el botón "**Seleccionar archivo sustrato**".
- Se abrirá un cuadro de diálogo de archivo.
- Navegue y seleccione el archivo STL correspondiente al sustrato del hidrogel.
- El nombre del archivo seleccionado se mostrará en el cuadro de texto junto al botón.

#### **3. Cargar el Archivo de Referencia:**

- En la ventana de la aplicación, haga clic en el botón "**Seleccionar archivo de referencia**".
- Se abrirá un cuadro de diálogo de archivo.
- Navegue y seleccione el archivo STL correspondiente a la referencia del hidrogel (será la geometría que tenga el sustrato a evaluar completamente sólido).

- El nombre del archivo seleccionado se mostrará en el cuadro de texto junto al botón.

#### **Paso 4: Ingreso de parámetros**

##### **Ingresar el porcentaje de microporosidad:**

- En el cuadro de texto etiquetado "**Porcentaje de microporosidad (%)**", ingrese el valor correspondiente a al porcentaje de porosidad inicial del hidrogel.

##### **Ingresar el porcentaje de hinchamiento:**

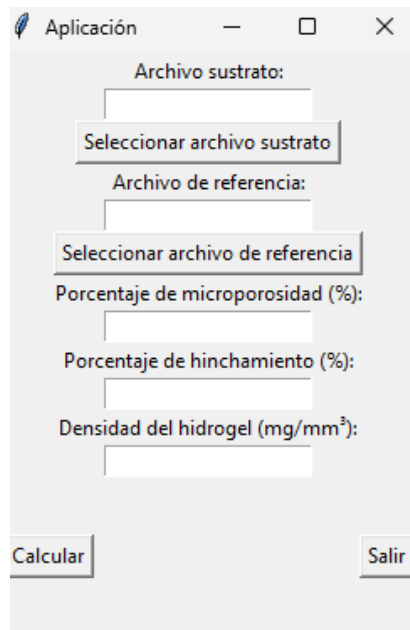
- En el cuadro de texto etiquetado "**Porcentaje de hinchamiento (%)**", ingrese el valor correspondiente al porcentaje de hinchamiento del hidrogel.

##### **Ingresar la densidad del Hidrogel:**

- En el cuadro de texto etiquetado "**Densidad del hidrogel (mg/mm<sup>3</sup>)**", ingrese el valor de la densidad del hidrogel mg/mm<sup>3</sup>.

#### **Paso 5: Visualización de resultados**

- El cuadro de diálogo mostrará los siguientes resultados:
  - Porcentaje de sólido en la partícula.
  - Porcentaje de microporosidad en la partícula.
  - Porcentaje de espacio vacío (macroporosidad) en la partícula.
  - Porosidad total en la partícula.
  - Capacidad de aireación de la partícula.
  - Volumen del hidrogel hinchado.
  - Densidad real de la partícula.
  - Densidad aparente de la partícula.



Aplicación

Archivo sustrato:

Seleccionar archivo sustrato

Archivo de referencia:

Seleccionar archivo de referencia

Porcentaje de microporosidad (%):

Porcentaje de hinchamiento (%):

Densidad del hidrogel (mg/mm<sup>3</sup>):

Calcular

Salir

## **Diseño asistido por computadora (CAD)**

En el modelado de objetos para un área específica, es imprescindible tener contexto y conocimiento sobre dicha área. Es necesario conocer qué función debe cumplir, qué restricciones tendrá (peso, dimensiones, propiedades mecánicas del material) y así proponer y estudiar los posibles beneficios. para el diseño de partículas o pellets de hidrogel Fotocurables se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros

### **Parámetros del diseño controlables**

Con base en las propiedades físicas ideales de un sustrato Tabla 2. Se debe considerar:

Granulometría y distribución de tamaño de partícula: la granulometría en sustratos se refiere la diferencia de tamaño de partículas que componen el sustrato, ya sea solo o mezclado, se espera que el tamaño de partícula este dentro del rango de 0.25-7 mm, se asocia que un tamaño de partícula pequeño tendrá una porosidad pequeña, es decir las partículas pequeñas tendrán una mayor retención de agua debido a que no hay cabida de macroporos en ella. En cambio, el tamaño de partícula grande se vincula a una mayor cantidad de porosidad llena de aire o capacidad de aireación, tanto porosidad intraparticular como interparticular [70]. Considerando que el tamaño y forma de cada partícula en un sustrato puede variar entre diferentes lotes incluso en un mismo lote [74] y el diámetro de un sustrato suele ser representado por un promedio de tamaño de partícula, diseñar un conjunto de diferentes tamaños de partícula sería una tarea ardua, en general, lo que se busca al tener una mezcla de sustratos es compensar sus deficiencias complementando sus propiedades mutuamente, un sustrato con un tamaño de partícula pequeño y una alta capacidad de retención de humedad, probablemente presentara una baja capacidad de aireación, y viceversa [74], lo cual puede promover la segregación de las partículas pequeñas [154]. En cambio, un solo tamaño de partícula presentará un sustrato con propiedades isotrópicas fig 18 [73].



*Figura 17: Comportamiento del empaquetamiento de partículas en sustratos: A) Acomodo de partículas giroides en un contenedor asumiendo un empaquetamiento ideal, B) Acomodo aleatorio convencional de mezcla de sustratos, C) segregación de partículas pequeñas en sustratos. Imagen propia.*

En cuanto a la forma de la partícula no se cuenta con los suficientes estudios sobre que geometría sería más óptima en sustratos, sin embargo [155], argumenta que la forma de las partículas, ya sean esféricas o no esféricas, tiene implicaciones pronunciadas para las propiedades macro y micromecánicas de los medios granulares. por lo que se plantea que una geometría esférica en un rango de 2-4 mm permite un mejor empaquetamiento evitando grandes volúmenes vacíos que provoquen un anclaje de raíz débil.

**Porosidad Total:** La porosidad total es indispensable para un equilibrio agua-aire en el medio de cultivo se divide en microporos con un diámetro de 0.2-50  $\mu\text{m}$  y en una proporción 55-80%, que es el espacio vacío ocupado por agua en el contenedor cuando el sustrato está saturado, por otro lado, la macroporosidad con un diámetro de 100-500  $\mu\text{m}$  es considerado el espacio vacío en una proporción de 15-30%, en el cual la fuerza de gravedad vence la fuerza matricial que no es suficientemente fuerte para mantener el agua almacenada, permitiendo el intercambio de gases, a esto se le conoce como porosidad total, siendo la suma de la microporosidad(%) más la macroporosidad (%) la cual se espera que sea  $\geq 85\%$  de manera ideal, por otro lado [62] propone que una porosidad óptima es de 75% con microporos (40-60%) y macroporos (15-35%) fig 19.

El diseño de estructuras porosas por MA ha tenido una variedad de propuestas en diferentes áreas [138], [156], [157], siendo las superficies mínimas triplemente periódicas TPMS las más utilizadas, se tomó como referencia La TPMS tipo G, la cual presenta una buena resistencia mecánica y permeabilidad [158], además permite controlar la distribución buscando un empaquetamiento más óptimo y una interconectividad interparticular.

La macroporosidad puede ser controlada mediante los parámetros del diseño ajustando el tamaño forma y conectividad asegurando una porosidad efectiva fig 20, sin embargo, la microporosidad está ligada a la porosidad inicial como material que es deseable que contenga una porosidad de 0.2-50  $\mu\text{m}$ , por lo tanto, estos son parámetros independientes del diseño.

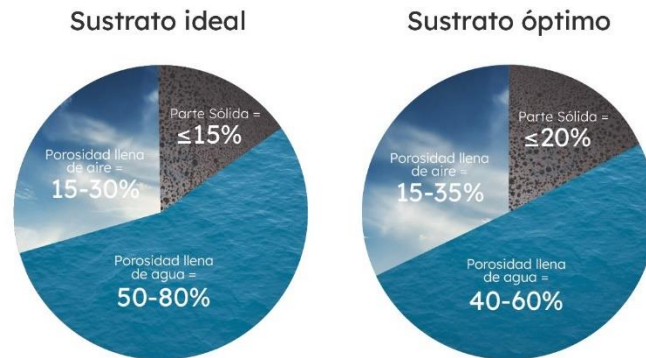


Figura 18: sustrato ideal y sustrato optimo imagen propia



Figura19: Esfera gyroide gris , esfera café se atribuye al espacio vacio que representa la macroporosidad interconectada (porosidad efectiva) imagen propia

### Parámetros del diseño no controlables

**Capacidad de Retención de Humedad:** la CRH siendo dependiente de la capacidad del de absorber agua del material, para este caso de estudio tomando en cuenta que los hidrogeles absorben agua dependiendo sus grupos funcionales y principalmente de su porosidad [157],

debemos considerar que su porosidad inicial tenga diámetros  $> 0.2 \mu\text{m}$  y  $< 100 \mu\text{m}$ , la distribución de poro es importante debido a que a mayor diámetro de poro habrá mayor capacidad de almacenamiento de agua, pero será liberada más rápidamente por la fuerza gravitacional ante una tensión negativa, en cambio un tamaño de poro más pequeño retiene una cantidad menor de agua, pero la libera lentamente, la distribución de poro es importante, por lo que la elección del material es determinante.

**Densidad real, densidad aparente y capacidad de aireación:** El Tamaño de partícula, la distribución de la partícula tamaño de poro y porosidad total controlan indirectamente la densidad aparente (DA), a la capacidad de aireación (CA) y la capacidad de retención de humedad (CRH) fig 21. ya que si tenemos un tamaño de partícula muy grande en teoría habrá más CA por el volumen vacío interparticular, el diámetro y distribución de poro también influye en la CA, a un mayor diámetro y distribución de poro mayor aireación, pero menor será la retención de humedad, del mismo modo, un tamaño de partícula grande ayuda a llenar el contenedor con menos sustrato[74], el tamaño de partícula y la porosidad en cada partícula influye en la DA

**Densidad Real:** la DA excluye cualquier espacio poroso, tomando en cuenta el peso y el volumen del material, depende de la densidad por lo que un hidrogel que típicamente tiene densidad menores a  $1 \text{ g/cm}^3$ .

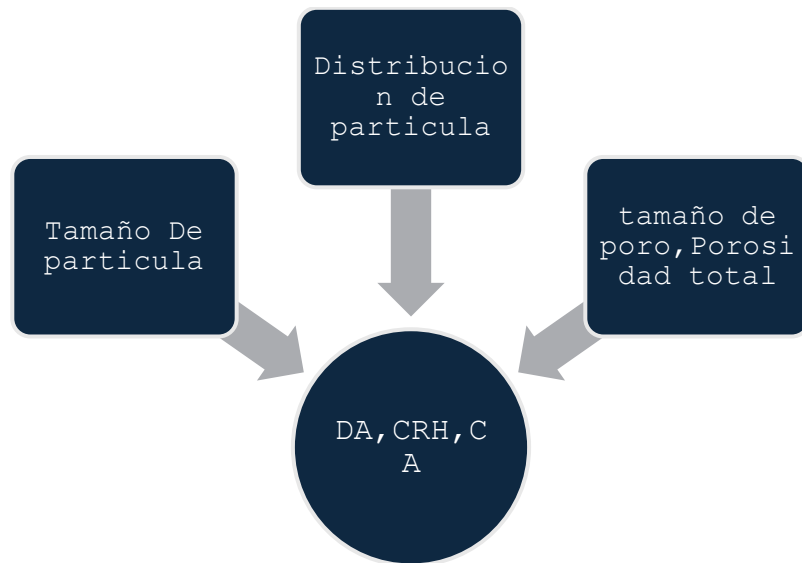


Figura 20: Sinergismo de tamaño de partícula, distribución y porosidad en propiedades físicas relevantes imagen propia.

## Diseño y Simulación en Python

El objetivo del software es determinar que diseño se ajusta mejor a las propiedades físicas esperadas en un sustrato, Es sabido que un hidrogel puede presentar diferencias significativas en sus propiedades en distintos lotes especialmente los hidrogeles derivados de polisacáridos, por ello se planteó un método para ajustar de manera sencilla los parámetros del diseño para llegar al equilibrio agua-aire deseado en las partículas mediante el uso del Software PTC CREO, que permite modelado implícito de estructuras TPMS.

Para tener un resultado con mayor veracidad se toma como referencia el trabajo de [159] donde sintetizaron e imprimieron varias pruebas con hidrogel de metacrilato-carboximetilcelulosa (Me-CMC) para su uso como andamio en ingeniería de tejidos, en el cual el hidrogel  $AMS_5 - MC$  presento un porcentaje de porosidad de 63.92 %, una distribución de porosidad de 2-70  $\mu m$  un hinchamiento de 90% tras 8 horas a 25 °C, los autores no compartieron información acerca de la densidad del material pero podemos deducir en base a que la densidad de un hidrogel de carboximetilcelulosa es de 0.7-0.9  $\frac{mm}{mm^3}$ . Para el modelado se probaron distintos diámetros de esfera, dimensiones de celda unitaria (Cu) y relleno de celda unitaria (Rc), siendo Esfera giroide de 2mm, celda unitaria 0.75 mm y espesor 0.15 mm la que más se aproximó a una porosidad total optima de 75% fig 22. en este caso específico conforme las dimensiones de la Cu y Rc eran más pequeñas el porcentaje de macroporosidad superaba, el porcentaje de microporosidad debido a que había más volumen ocupado por la porosidad inducida por el diseño, además el diámetro de la macroporosidad decrecía y el porcentaje de solido se acercaba a 10-15 %, por lo que la microporosidad también disminuía.

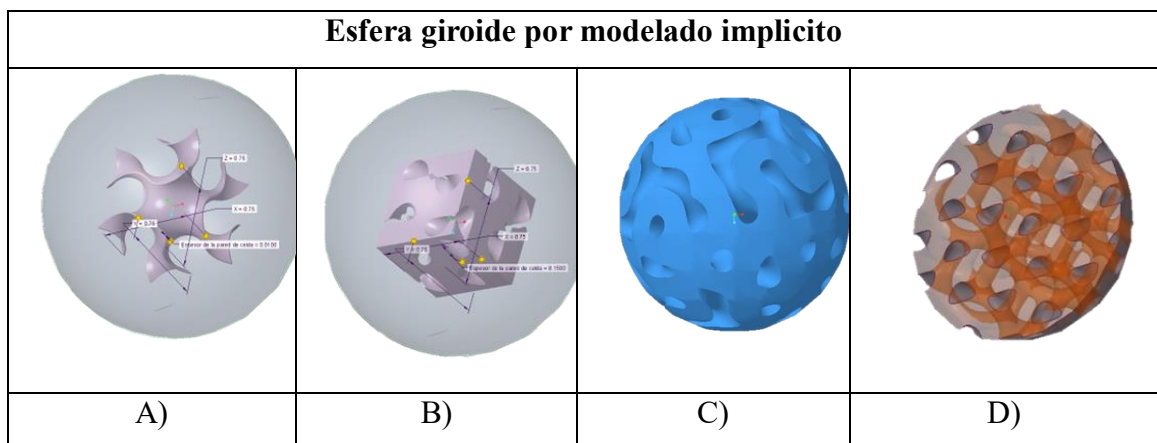


Figura 21: modelado implícito de esfera giroide, A) Cu 0.75 mm en XYZ, y espesor de 0.001 mm. B) Cu 0.75 mm en XYZ, y Rc 0.15 mm. C) vista isométrica Esfera giroide de 2 mm con Celda unitaria 0.75 mm C) Corte transversal en eje X.

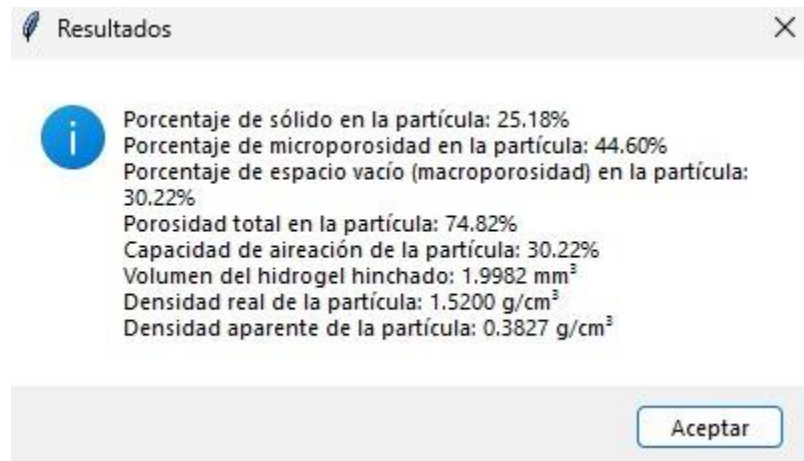


Figura 22: Resultados obtenidos de Esfera giroide de 2mm, Cu:0.75mm y Rc:0.15.

Con estas dimensiones el diámetro de macroporo fue de 450  $\mu\text{m}$ , siendo un poco grande tomando en cuenta que el diámetro máximo que debe ser de 500  $\mu\text{m}$ , esto se debe a que el hidrogel de Me-CMC no presenta la suficiente porosidad inicial como para tener una porosidad que se aproxime a  $\geq 85\%$ , porque conforme el tamaño de celda es menor a 0.5mm habra un tamaño de poro más pequeño pero una mayor distribución de poro que se traduce a una macroporosidad mayor, dejando poco espacio para microporos y parte sólida, en cambio una porosidad inicial muy elevada cercana al 99%, presentaría la posibilidad de una mayor distribución de poros grandes por medio de diseño y poros pequeños por el material, pero sus propiedades mecánicas serían muy pobres.

Este software nos ayuda a obtener la porosidad total, porcentaje de microporos, macroporos, parte solida de manera eficiente en una partícula individual, sin embargo, en la realidad su precisión puede variar debido al acomodo o distribución de las partículas, por lo que no toma en cuenta el acomodo aleatorio de partículas, así como el espacio vacío generados entre partículas (porosidad interparticular) la cual participa en la porosidad total y en la densidad aparente. Diversos estudios de simulación de partículas han determinado distintos métodos [160], por lo que planteamos la complementación el método de elementos discretos (DEM) para obtener datos más precisos en trabajos posteriores.

## **Discusión**

Es sabido que un sustrato puede variar en cuanto a sus propiedades físicas cuando son provenientes de diversas regiones, principalmente por el efecto de la distribución del tamaño de partículas en estas propiedades, en [161] se estudiaron 13 polvos de coco de diferentes regiones (costa rica, india, costa de marfil, México, entre otros), la importancia de la distribución del tamaño de partículas en las propiedades físicas del polvo del coco, lo que sugiere que la manipulación de estas características (como el grado de molienda y el tamaño de malla) puede permitir la creación de sustratos con propiedades específicas para diferentes cultivos pudiendo controlar la retención de agua y la aireación para mejorar las prácticas de gestión del riego, y tener claro de las grandes diferencias que puede presentar un mismo sustrato proveniente de diferente región o lote.

## **Capítulo 5**

### **VIII. Conclusiones**

- El uso de la manufactura aditiva, en conjunto con el diseño de superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS) representa una propuesta innovadora para optimizar las propiedades físicas de los sustratos agrícolas, TPMS como el giroide son conocidas por su alta porosidad, y distribución uniforme de macroporos que permiten controlar y mejorar la porosidad total, la macroporosidad y la isotropía del sustrato. Estas características contribuyen a un manejo más uniforme de agua y aireación, factores críticos para el crecimiento adecuado del sistema radicular en cultivos sin suelo, Los valores calculados de capacidad de aireación y densidad aparente en las simulaciones respaldan que el giroide podría optimizar condiciones necesarias para el sistema radicular, lo que puede favorecer un crecimiento más uniforme de las plantas.
- Las dimensiones reportadas del giroide de 2mm de diámetro, celda unitaria 0.75 mm y espesor 0.15 mm fueron las que más se aproximaron a una porosidad total óptima (75%), sin embargo, esto puede ser mejorable, se requiere de más estudios con distintas TPMS para aproximarnos más al 85%, del mismo modo, experimentar con materiales de vanguardia.

- El uso de herramientas digitales en la innovación de productos agrícolas, como el diseño asistido por computadora, simulaciones e impresión 3D, es clave para transformar los métodos tradicionales de producción. Estas tecnologías permiten no solo explorar nuevos enfoques en la fabricación de sustratos agrícolas, sino que también abren la posibilidad de desarrollar “sustratos de precisión”. Estas estructuras diseñadas específicamente optimizan el manejo del riego y la aireación, promoviendo un sistema agrícola más eficiente y sostenible.
- Sin embargo, es importante destacar que, aunque la propuesta de diseño de sustratos mediante TPMS es prometedora, esta tecnología aún no se ha aplicado experimentalmente en la horticultura. Su implementación podría marcar un antes y un después en la gestión de recursos hídricos y en la mejora de la productividad agrícola en el cultivo sin suelo. Esto subraya la necesidad de continuar investigando y desarrollando esta área para convertir estas posibilidades en soluciones aplicables.
- La propuesta aborda problemas asociados a los sustratos tradicionales, como el daño ambiental causado por la extracción de recursos (e.g., turba, perlita, vermiculita) y la falta de uniformidad en las propiedades físicas, lo que resulta en una alternativa más sostenible.

#### Investigación futura

- Ampliar el estudio para incluir pruebas experimentales de cultivos utilizando sustratos fabricados con hidrogel, evaluando su desempeño en términos de crecimiento de raíces y producción vegetal.
- Explorar la combinación de propiedades físicas, químicas y biológicas del hidrogel de distintas procedencias para maximizar los beneficios en cultivos específicos.
- Investigar el escalamiento del proceso para su implementación a nivel industrial y la comparación económica con métodos tradicionales.

## IX. Referencias

- [1] A. Shrouf and A. Alshrouf, "Hydroponics, Aeroponic and Aquaponic as Compared with Conventional Farming," *American Scientific Research Journal for Engineering*, Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <http://asrjetsjournal.org/>
- [2] FAO, *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*, 1st ed. Roma.
- [3] FAO, *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura : la gestión de los sistemas en situación de riesgo*. Mundi-Prensa, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2011.
- [4] SEMARNAT, "Informe de la Situación del Medio Ambiente en México," 2019.
- [5] N. Gruda, "Sustainable peat alternative growing media," *Acta Hortic*, vol. 927, pp. 973–980, Feb. 2012, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2012.927.120.
- [6] R. Anicua Sánchez *et al.*, "TAMAÑO de pArTÍCULA y reLACIÓN MICRoMorFoLÓGICA eN propledAdeS FÍSICAS de perLITA y ZeoLITA \* pArTICULe SIZE AND MICRoMorpHoLoGICAL reLATIoN oN pHySICAL properTieS of perLITe AND ZeoLITe," vol. 35, pp. 147–156, 2009.
- [7] U. Brückner, "Physical properties of different potting media and substrate mixtures - Especially air-and water capacity," *Acta Hortic*, vol. 450, pp. 263–270, 1997, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.1997.450.31.
- [8] G. E. Barrett, P. D. Alexander, J. S. Robinson, and N. C. Bragg, "Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems – A review," *Sci Hortic*, vol. 212, pp. 220–234, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2016.09.030.
- [9] G. E. Barrett, P. D. Alexander, J. S. Robinson, and N. C. Bragg, "Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems – A review," *Sci Hortic*, vol. 212, pp. 220–234, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2016.09.030.
- [10] S. D. Palanivelu *et al.*, "Hydrogel Application in Urban Farming: Potentials and Limitations—A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/POLYM14132590.
- [11] L. Ma, C. Chai, W. Wu, P. Qi, X. Liu, and J. Hao, "Hydrogels as the plant culture substrates: A review," *Carbohydr Polym*, vol. 305, p. 120544, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2023.120544.
- [12] W. Abobatta, "Impact of hydrogel polymer in agricultural sector," *Adv Agr Environ Sci*, vol. 1, no. 2, 2018, doi: 10.30881/aaea.00011.
- [13] P. Calcagnile, T. Sibillano, C. Giannini, A. Sannino, and C. Demitri, "Biodegradable poly(lactic acid)/cellulose-based superabsorbent hydrogel composite material as water and fertilizer reservoir

- in agricultural applications," *J Appl Polym Sci*, vol. 136, no. 21, p. 47546, Jun. 2019, doi: 10.1002/APP.47546.
- [14] L. Q. Luan and D. H. Xo, "Preparation of Oligoalginate Immobilized Hydrogel by Radiation and Its Application for Hydroponic Culture," *Radioisotopes*, vol. 66, no. 5, pp. 171–179, May 2017, doi: 10.3769/RADIOISOTOPES.66.171.
- [15] L. Cao and N. Li, "Activated-carbon-filled agarose hydrogel as a natural medium for seed germination and seedling growth," *Int J Biol Macromol*, vol. 177, pp. 383–391, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2021.02.097.
- [16] Z. Teng *et al.*, "Agarose hydrogel composite supports microgreen cultivation with enhanced porosity and continuous water supply under terrestrial and microgravitational conditions," *Int J Biol Macromol*, vol. 220, pp. 135–146, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2022.08.046.
- [17] M. C. Drew, "Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and Acclimation under Hypoxia and Anoxia," *Annu Rev Plant Biol*, vol. 48, no. Volume 48, 1997, pp. 223–250, Jun. 1997, doi: 10.1146/ANNUREV.ARPLANT.48.1.223/CITE/REFWORKS.
- [18] M. Attaran, "The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing," *Bus Horiz*, vol. 60, no. 5, pp. 677–688, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.BUSHOR.2017.05.011.
- [19] J. L. Amaya-Rivas *et al.*, "Future trends of additive manufacturing in medical applications: An overview," *Heliyon*, vol. 10, no. 5, p. e26641, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.HELİYON.2024.E26641.
- [20] M. Deptuła, M. Zawrzykraj, J. Sawicka, A. Banach-Kopeć, R. Tylingo, and M. Piķuła, "Application of 3D-printed hydrogels in wound healing and regenerative medicine," *Biomedicine & Pharmacotherapy*, vol. 167, p. 115416, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.BIOPHA.2023.115416.
- [21] A. K. Tamo, L. D. W. Djouonkep, and N. B. S. Selabi, "3D Printing of Polysaccharide-Based Hydrogel Scaffolds for Tissue Engineering Applications: A Review," *Int J Biol Macromol*, vol. 270, p. 132123, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2024.132123.
- [22] F. Mukasheva *et al.*, "Design and characterization of 3D printed pore gradient hydrogel scaffold for bone tissue engineering," *Bioprinting*, vol. 39, p. e00341, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.BPRINT.2024.E00341.
- [23] L. M. Kalossaka, G. Sena, L. M. C. Barter, and C. Myant, "Review: 3D printing hydrogels for the fabrication of soilless cultivation substrates," *Appl Mater Today*, vol. 24, p. 101088, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.APMT.2021.101088.
- [24] FAO, "Agricultura, expansión del comercio y equidad de género," *Roma*, pp. 1–4, 2006. Accessed: Sep. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/a0493s/a0493s00.htm#Contents>
- [25] Y. Montiel, "USO DE GRAVILLA COMO SUSTRATO EN SEIS ESPECIES HORTÍCOLAS EN SISTEMA HIDROPÓNICO CERRADO," 2016.
- [26] C. Liu, F. Lei, P. Li, J. Jiang, and K. Wang, "Borax crosslinked fenugreek galactomannan hydrogel as potential water-retaining agent in agriculture," *Carbohydr Polym*, vol. 236, p. 116100, May 2020, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2020.116100.

- [27] M. de J. Moreno Roblero *et al.*, “El oxígeno en la zona radical y su efecto en las plantas,” *Rev Mex De Cienc Agric*, vol. 11, no. 4, pp. 931–943, Jun. 2020, doi: 10.29312/REMEXCA.V11I4.2128.
- [28] D. M. Porterfield and M. E. Musgrave, “The tropic response of plant roots to oxygen: Oxytropism in *Pisum sativum* L.,” *Planta*, vol. 206, no. 1, pp. 1–6, 1998, doi: 10.1007/S004250050367/METRICS.
- [29] M. Askari *et al.*, “Additive manufacturing of metamaterials: A review,” *Addit Manuf*, vol. 36, p. 101562, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.ADDMA.2020.101562.
- [30] G. E. Barrett, P. D. Alexander, J. S. Robinson, and N. C. Bragg, “Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems – A review,” *Sci Hortic*, vol. 212, pp. 220–234, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2016.09.030.
- [31] G. Schmilewski, “Growing medium constituents used in the EU,” *Acta Hortic*, vol. 819, pp. 33–46, 2009, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2009.819.3.
- [32] A. Khademhosseini and R. Langer, “Microengineered hydrogels for tissue engineering,” *Biomaterials*, vol. 28, no. 34, pp. 5087–5092, Dec. 2007, doi: 10.1016/J.BIOMATERIALS.2007.07.021.
- [33] statista, “Volumen de hortalizas producidas a nivel mundial entre 2000 y 2022.” Accessed: Sep. 05, 2023. [Online]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/635301/produccion-de-hortalizas-a-nivel-mundial/>
- [34] INEGI, “Comunicado. Resultados oportunos del Censo Agropecuario 2022.”
- [35] A. Moreno, J. Aguilar, and A. Luevano, “CARACTERÍSTICAS DE LA AGRICULTURA PROTEGIDA Y SU ENTORNO EN MÉXICO,” Torreon. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14119052014>
- [36] O. Axayacatl, “¿Qué es la agricultura protegida y cuál es su importancia?” Accessed: May 06, 2024. [Online]. Available: <https://blogagricultura.com/importancia-agricultura-protegida/>
- [37] SADER, “Agricultura protegida ubica a México entre los principales productores de frutas y hortalizas,” Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Accessed: May 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/agricultura-protegida-ubica-a-mexico-entre-los-principales-productores-de-frutas-y-hortalizas?idiom=es%C2%A0>
- [38] MORDOR INTELLIGENCE, “Análisis del tamaño y la participación del mercado de invernaderos comerciales - Informe de investigación de la industria - Tendencias de crecimiento.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/commercial-greenhouse-market>
- [39] M. S. Gumisiriza, J. M. L. Kabirizi, M. Mugerwa, P. A. Ndakidemi, and E. R. Mbega, “Can soilless farming feed urban East Africa? An assessment of the benefits and challenges of hydroponics in Uganda and Tanzania,” *Environmental Challenges*, vol. 6, p. 100413, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.ENVC.2021.100413.
- [40] N. Sharma and N. Singh, “Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview Diversity and products from Seabuckthorn View project M.sc work View project,” 2019, doi: 10.5958/2455-7145.2018.00056.5.

- [41] M. Carmelo and N. Carlo, "Department of Agriculture, Food, Natural Resources, Animals and Environment," *University of Padova, Italy*.
- [42] S. Tsukagoshi and Y. Shinohara, "Nutrition and Nutrient Uptake in Soilless Culture Systems," *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*, pp. 165–172, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-801775-3.00011-1.
- [43] A. Silber and A. Bar-Tal, "NUTRITION OF SUBSTRATE-GROWN PLANTS," *Soilless Culture: Theory and Practice*, pp. 291–339, Jan. 2008, doi: 10.1016/B978-044452975-6.50010-1.
- [44] m resh Howard, *CULTIVOS HIDROPONICOS Nuevas técnicas de producción*, 5th ed., vol. 1. Barcelona: Mundi-prensa, 2001.
- [45] C. A. G. and J. M. G. María Fernanda, *Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte*. 2011.
- [46] "Best Hydroponic Growing Mediums for Everyday Hobbyists." Accessed: May 07, 2024. [Online]. Available: <https://ponicslife.com/best-hydroponic-growing-mediums-for-everyday-hobbyists/>
- [47] C. Jones and J. Jacobsen, *Plant Nutrition and Soil Fertility: Nutrient Management Module No.2*, no. 2. 2005. Accessed: Apr. 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.routledge.com/Plant-Nutrition-and-Soil-Fertility-Manual/Jones-Jr/p/book/9781439816097>
- [48] "Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas." Accessed: May 27, 2024. [Online]. Available: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952018000400639](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000400639)
- [49] P. D. Alexander *et al.*, "Peat in horticulture and conservation: the UK response to a changing world," vol. 3, p. 8, 2008, Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <http://www.mires-and-peat.net/>,
- [50] M. A. Nichols, "Coir - A XXIst century sustainable growing medium," *Acta Horti*, vol. 747, pp. 91–95, 2007, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2007.747.8.
- [51] M. Raviv, "Composts in growing media: What's new and what's next?," *Acta Horti*, vol. 982, pp. 39–52, Mar. 2013, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2013.982.3.
- [52] G. E. Barrett, P. D. Alexander, J. S. Robinson, and N. C. Bragg, "Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems – A review," *Sci Horti*, vol. 212, pp. 220–234, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2016.09.030.
- [53] A. Prácticos Experiencias and C. M. Baixauli Soria José Aguilar Olivert, "Cultivo sin Suelo de Hortalizas".
- [54] F. Pedro and R. Dolores, "Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo."
- [55] R. Poulter, "Quantifying differences between treated and untreated coir substrate," *Acta Horti*, vol. 1018, pp. 557–564, Jan. 2014, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2014.1018.61.
- [56] M. Urrestarazu, "State of the art and new trends of soilless culture in Spain and in emerging countries," *Acta Horti*, vol. 1013, pp. 305–312, Nov. 2013, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2013.1013.37.

- [57] M. Leonardo, "Manejo de sustratos para el cultivo de plantas en contenedores," *Ministerio de agricultura, ganaderia y pesca*.
- [58] A. R. Campaña, "Fitotóxicos como alternativa a herbicidas contaminantes".
- [59] E. A. Czyz, "Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley," *Soil Tillage Res*, vol. 79, no. 2, pp. 153–166, Dec. 2004, doi: 10.1016/J.STILL.2004.07.004.
- [60] R. M. Sepúlveda Ing Agrónomo, W. P. Potter Ing Agrónomo Luis Román O, and S. R. Ardiles Ing Ejecución Agropecuario, "Aspectos y manejos de los sistemas de cultivos sin suelo Proyecto: 'Programa integral territorial de hortalizas para la región de Arica y Parinacota' Financia: FIC-FIA".
- [61] J. Chen, "La estructura del sustrato influye en la capacidad de retención de agua | PRO-MIX." Accessed: Nov. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-estructura-del-sustrato-influye-en-la-capacidad-de-retencion-de-agua/>
- [62] R. Di Lorenzo, A. Pisciotta, P. Santamaria, and V. Scariot, "From soil to soil-less in horticulture: Quality and typicity," Dec. 05, 2013, *Page Press Publications*. doi: 10.4081/ija.2013.e30.
- [63] "Porous Materials: Process technology and applications - Kozo Ishizaki, Sridhar Komarneni, Makoto Nanko - Google Libros." Accessed: May 15, 2023. [Online]. Available: [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=s4\\_uBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&ots=sKLDmGGAHV&sig=6ft2hz1Dc6MSZDp-xVbCrRk5t9k&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=s4_uBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&ots=sKLDmGGAHV&sig=6ft2hz1Dc6MSZDp-xVbCrRk5t9k&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [64] "¿Cómo medir la porosidad de los materiales? | ATRIA Innovation." Accessed: May 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.atriainnovation.com/como-medir-la-porosidad-de-los-materiales/>
- [65] A. E. Ortega-Torres *et al.*, "Hidrogel acrilato de potasio como sustrato en cultivo de pepino y jitomate," *Rev Mex De Cienc Agric*, vol. 11, no. 6, pp. 1447–1455, Sep. 2020, doi: 10.29312/REMEXCA.V11I6.2222.
- [66] pedro Florian, "Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo." Accessed: Nov. 16, 2023. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/237100771\\_Sustratos\\_para\\_el\\_cultivo\\_sin\\_suelo\\_Materiales\\_propiedades\\_y\\_manejo](https://www.researchgate.net/publication/237100771_Sustratos_para_el_cultivo_sin_suelo_Materiales_propiedades_y_manejo)
- [67] "ESTUDIO DE LA POROSIDAD COMO CARACTERÍSTICA PETROFÍSICA DE LAS ROCAS — Steemit." Accessed: May 10, 2023. [Online]. Available: <https://steemit.com/stem-espanol/@ennyta/estudio-de-la-porosidad-como-caracteristica-petrofisica-de-las-rocas>
- [68] K. S. W. Sing, "Characterization Of Porous Solids: An Introductory Survey," *Stud Surf Sci Catal*, vol. 62, no. C, pp. 1–9, Jan. 1991, doi: 10.1016/S0167-2991(08)61303-8.
- [69] T. J. Mays, "A new classification of pore sizes," *Stud Surf Sci Catal*, vol. 160, pp. 57–62, Jan. 2007, doi: 10.1016/S0167-2991(07)80009-7.
- [70] G. Gizas and D. Savvas, "Particle Size and Hydraulic Properties of Pumice Affect Growth and Yield of Greenhouse Crops in Soilless Culture," *HortScience*, vol. 42, no. 5, pp. 1274–1280, Aug. 2007, doi: 10.21273/HORTSCI.42.5.1274.

- [71] J. Chen, "La estructura del sustrato influye en la capacidad de retención de agua."
- [72] S. Durand, B. E. Jackson, W. C. Fonteno, and J. C. Michel, "Particle size distribution of growing media constituents using dynamic image analysis: Parametrization and comparison to sieving," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 87, no. 4, pp. 767–780, Jul. 2023, doi: 10.1002/SAJ2.20518.
- [73] M. Gutiérrez, J. Hernandez, and C. Ortiz, "Relación porosidad-retención de humedad en mezclas de sustratos y su efecto sobre variables respuesta en plántulas de lechuga." Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1027-152X2011000300010](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2011000300010)
- [74] C. Blok, A. Baumgarten, R. Baas, G. Wever, and D. Lohr, "Analytical Methods Used With Soilless Substrates," *Soilless Culture: Theory and Practice Theory and Practice*, pp. 509–564, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-444-63696-6.00011-6.
- [75] F. Calderon and F. Cevallos, "Los sustratos."
- [76] O. Verdonck and P. Demeyer, "The influence of the particle sizes on the physical properties of growing media," *Acta Horti*, vol. 644, pp. 99–101, Feb. 2004, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2004.644.10.
- [77] L. Pineda-Marín, M. C. Gutiérrez-Castorena, R. Anicua-Sánchez, L. Cajuste-Bontemps, and E. V. Gutiérrez-Castorena, "Quantification of porosity in substrates using thin sections and image analysis," *Acta Horti*, vol. 947, pp. 105–110, May 2012, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2012.947.11.
- [78] F. Lemaire, "PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF GROWING MEDIUM," *Acta Horti*, no. 396, pp. 273–284, Mar. 1995, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.1995.396.33.
- [79] M. Abad *et al.*, "Physical Properties of Various Coconut Coir Dusts Compared to Peat," *HortScience*, vol. 40, no. 7, pp. 2138–2144, Dec. 2005, doi: 10.21273/HORTSCI.40.7.2138.
- [80] G. Garbanzo - León and M. Vargas - Gutiérrez, "Determinación fisicoquímicas de diez mezclas de sustratos para producción de almácigos, Guanacaste, Costa Rica," *InterSedes*, vol. 15, no. 30, pp. 151–168, 2014, Accessed: Jun. 07, 2024. [Online]. Available: [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2215-24582014000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-24582014000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- [81] J. Caron, S. Pepin, and Y. Périard, "Physics of growing media in a green future," *Acta Horti*, vol. 1034, pp. 309–318, 2014, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2014.1034.38.
- [82] P. C. Bartley, A. Amoozegar, W. C. Fonteno, and B. E. Jackson, "Particle Densities of Horticultural Substrates," *HortScience*, vol. 57, no. 3, pp. 379–383, Mar. 2022, doi: 10.21273/HORTSCI16319-21.
- [83] R. Pire and A. Pereira, "PROPIEDADES FÍSICAS DE COMPONENTES DE SUSTRATOS DE USO COMÚN EN LA HORTICULTURA DEL ESTADO LARA, VENEZUELA. PROPUESTA METODOLÓGICA," *Bioagro*, vol. 15, no. 1, pp. 55–63, 2003.
- [84] P. W. Unger and T. C. Kaspar, "Soil Compaction and Root Growth: A Review," *Agron J*, vol. 86, no. 5, pp. 759–766, Sep. 1994, doi: 10.2134/AGRONJ1994.00021962008600050004X.
- [85] E. A. Czyz, "Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley," *Soil Tillage Res*, vol. 79, no. 2, pp. 153–166, Dec. 2004, doi: 10.1016/J.STILL.2004.07.004.

- [86] K. A. (Kevin A. ) Handreck and N. D. (Neil D. ) Black, *Growing media for ornamental plants and turf*. University of New South Wales Press, 2002. Accessed: Jun. 16, 2024. [Online]. Available: [https://books.google.com/books/about/Growing\\_Media\\_for\\_Ornamental\\_Plants\\_and.html?hl=es&id=d1v5pAmhYXEC](https://books.google.com/books/about/Growing_Media_for_Ornamental_Plants_and.html?hl=es&id=d1v5pAmhYXEC)
- [87] J. de la C. Jiménez S., L. P. Moreno F., and S. Magnitskiy, "Respuesta de las plantas a estrés por inundación. Una revisión," *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 6, no. 1, pp. 96–109, 2012, Accessed: Jun. 16, 2024. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2011-21732012000100010&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2011-21732012000100010&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- [88] A. Novoplansky, "What plant roots know?," *Semin Cell Dev Biol*, vol. 92, pp. 126–133, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.SEMCDB.2019.03.009.
- [89] D. L. Ingram, R. W. Henley, and T. H. Yeager, "Growth Media for Container Grown Ornamental Plants 1", Accessed: May 13, 2024. [Online]. Available: <http://edis.ifas.ufl.edu>.
- [90] Bunt, "MEDIA AND MIXES FOR CONTAINER-GROWN PLANTS," 1998, doi: 10.1007/978-94-011-7904-1.
- [91] J. Pineda, Felipe Sanchez, and A. Ramirez, "Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo." Accessed: Jun. 22, 2024. [Online]. Available: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1027-152X2012000100007](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2012000100007)
- [92] M. De Boodt, O. Verdonck, and I. Cappaert, "METHOD FOR MEASURING THE WATERRELEASE CURVE OF ORGANIC SUBSTRATES.," *Acta Horti*, no. 37, pp. 2054–2063, Sep. 1974, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.1974.37.20.
- [93] S. Calderon, "MÉTODO DE DE BOODT PARA MEDIR LA RETENCION DE HUMEDAD EN SUSTRATOS EN EL RANGO DE 0 A 100 cm DE CABEZA DE AGUA." Accessed: Nov. 16, 2023. [Online]. Available: <http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Curva%20de%20Retencion%20de%20Humedad%20en%20Sustratos.pdf>
- [94] Y. Fang, G. Nunez, P. Fisher, and P. R. Munoz, "Effect of container size, substrate composition, and genotype on growth and fruit quality of young southern highbush blueberry in a container-based intensive production system," *Sci Horti*, vol. 302, p. 111149, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2022.111149.
- [95] C. P. Ronchi, F. M. DaMatta, K. D. Batista, G. A. B. K. Moraes, M. E. Loureiro, and C. Ducatti, "Growth and photosynthetic down-regulation in *Coffea arabica* in response to restricted root volume," *Functional Plant Biology*, vol. 33, no. 11, pp. 1013–1023, Nov. 2006, doi: 10.1071/FP06147.
- [96] M. Abad-Merjón, M. D. Martínez-Herrero, J. Martínez-Corts, and P. F. Martínez-García, "Evaluacion agronomica de los sustratos de cultivo," *electronico*, pp. 141–154, 1993, Accessed: Jun. 16, 2024. [Online]. Available: <https://redivia.gva.es/handle/20.500.11939/8211>
- [97] GO Huterwal, *Hidroponía: cultivo de plantas sin tierra*, 4th ed., vol. 1. 2001.

- [98] F. Bordi, G. Paradossi, C. Rinaldi, and B. Ruzicka, "Chemical and physical hydrogels: two casesystems studied by quasi elastic light scattering," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 304, no. 1–2, pp. 119–128, Feb. 2002, doi: 10.1016/S0378-4371(01)00537-4.
- [99] D. Buenger, F. Topuz, and J. Groll, "Hydrogels in sensing applications," *Prog Polym Sci*, vol. 37, no. 12, pp. 1678–1719, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2012.09.001.
- [100] M. R. Guilherme *et al.*, "Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review," *Eur Polym J*, vol. 72, pp. 365–385, Nov. 2015, doi: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2015.04.017.
- [101] G. S. Kaliaraj, D. K. Shanmugam, A. Dasan, and K. K. A. Mosas, "Hydrogels—A Promising Materials for 3D Printing Technology," *Gels 2023, Vol. 9, Page 260*, vol. 9, no. 3, p. 260, Mar. 2023, doi: 10.3390/GELS9030260.
- [102] S. Burkert, T. Schmidt, U. Gohs, H. Dorschner, and K. F. Arndt, "Cross-linking of poly(N-vinyl pyrrolidone) films by electron beam irradiation," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 76, no. 8–9, pp. 1324–1328, Aug. 2007, doi: 10.1016/J.RADPHYSHEM.2007.02.024.
- [103] S. Bashir *et al.*, "Fundamental Concepts of Hydrogels: Synthesis, Properties, and Their Applications," *Polymers 2020, Vol. 12, Page 2702*, vol. 12, no. 11, p. 2702, Nov. 2020, doi: 10.3390/POLYM12112702.
- [104] O. Adrianes and G. M. Soto Zarazúa, "Potassium acrylate: A novelty in hydroponic substrates," in *2017 13th International Engineering Congress, CONIIN 2017*, 2017. doi: 10.1109/CONIIN.2017.7968177.
- [105] S. M. F. Kabir, P. P. Sikdar, B. Haque, M. A. R. Bhuiyan, A. Ali, and M. N. Islam, "Cellulose-based hydrogel materials: chemistry, properties and their prospective applications," *Progress in Biomaterials 2018 7:3*, vol. 7, no. 3, pp. 153–174, Sep. 2018, doi: 10.1007/S40204-018-0095-0.
- [106] P. E. Verslues, E. S. Ober, and R. E. Sharp, "Root Growth and Oxygen Relations at Low Water Potentials. Impact of Oxygen Availability in Polyethylene Glycol Solutions," *Plant Physiol*, vol. 116, no. 4, pp. 1403–1412, Apr. 1998, doi: 10.1104/PP.116.4.1403.
- [107] E. G. Barrett-Lennard and M. Dracup, "A porous agar medium for improving the growth of plants under sterile conditions," *Plant Soil*, vol. 108, no. 2, pp. 294–298, May 1988, doi: 10.1007/BF02375663/METRICS.
- [108] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, and S. H. Mian, "Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 2, Feb. 2019, doi: 10.1177/1687814018822880/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\_1687814018822880-FIG20.JPEG.
- [109] Y. Takeuchi, "3D Printable Hydroponics: A Digital Fabrication Pipeline for Soilless Plant Cultivation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35863–35873, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905233.
- [110] V. S. D. Voet, J. Guit, K. Loos, V. S. D. Voet, J. Guit, and K. Loos, "Sustainable Photopolymers in 3D Printing: A Review on Biobased, Biodegradable, and Recyclable Alternatives," *Macromol Rapid Commun*, vol. 42, no. 3, p. 2000475, Feb. 2021, doi: 10.1002/MARC.202000475.

- [111] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, "The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0," *Procedia Manuf*, vol. 11, pp. 545–554, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROMFG.2017.07.148.
- [112] E. MacDonald and R. Wicker, "Multiprocess 3D printing for increasing component functionality," *Science (1979)*, vol. 353, no. 6307, Sep. 2016, doi: 10.1126/SCIENCE.AAF2093/ASSET/EBF82CEF-73AB-4A9D-8C88-548C0D6FA95D/ASSETS/GRAPHIC/353\_AAF2093\_FA.JPEG.
- [113] "ISO/ASTM 52900:2021(en), Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary." Accessed: Feb. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>
- [114] J. Fu *et al.*, "Combination of 3D printing technologies and compressed tablets for preparation of riboflavin floating tablet-in-device (TiD) systems," *Int J Pharm*, vol. 549, no. 1–2, pp. 370–379, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.IJPHARM.2018.08.011.
- [115] R. J. Mondschein, A. Kanitkar, C. B. Williams, S. S. Verbridge, and T. E. Long, "Polymer structure-property requirements for stereolithographic 3D printing of soft tissue engineering scaffolds," *Biomaterials*, vol. 140, pp. 170–188, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.BIOMATERIALS.2017.06.005.
- [116] P. Fiedor, M. Pilch, P. Szymaszek, A. Chachaj-Brekiesz, M. Galek, and J. Ortyl, "Photochemical Study of a New Bimolecular Photoinitiating System for Vat Photopolymerization 3D Printing Techniques under Visible Light," *Catalysts 2020, Vol. 10, Page 284*, vol. 10, no. 3, p. 284, Mar. 2020, doi: 10.3390/CATAL10030284.
- [117] J. V. Crivello and E. Reichmanis, "Photopolymer materials and processes for advanced technologies," *Chemistry of Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 533–548, Jan. 2014, doi: 10.1021/CM402262G/ASSET/IMAGES/MEDIUM/CM-2013-02262G\_0025.GIF.
- [118] A. Ravve, "Light-associated reactions of synthetic polymers," *Light-Associated Reactions of Synthetic Polymers*, pp. 1–369, 2006, doi: 10.1007/0-387-36414-5/COVER.
- [119] J. Huang, Q. Qin, and J. Wang, "A Review of Stereolithography: Processes and Systems," *Processes 2020, Vol. 8, Page 1138*, vol. 8, no. 9, p. 1138, Sep. 2020, doi: 10.3390/PR8091138.
- [120] A. A. Nasef, A. R. El-Beialy, and Y. A. Mostafa, "Virtual techniques for designing and fabricating a retainer," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 146, no. 3, pp. 394–398, 2014, doi: 10.1016/j.ajodo.2014.01.025.
- [121] K. L. Sampson *et al.*, "Multimaterial Vat Polymerization Additive Manufacturing," *ACS Appl Polym Mater*, vol. 3, no. 9, pp. 4304–4324, Sep. 2021, doi: 10.1021/ACSAPM.1C00262/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AP1C00262\_0011.GIF.
- [122] A. Bagheri and J. Jin, "Photopolymerization in 3D Printing," *ACS Appl Polym Mater*, vol. 1, no. 4, pp. 593–611, Apr. 2019, doi: 10.1021/ACSAPM.8B00165/ASSET/IMAGES/LARGE/AP-2018-00165Y\_0007.JPEG.
- [123] S. v. Murphy, A. Skardal, and A. Atala, "Evaluation of hydrogels for bio-printing applications," *J Biomed Mater Res A*, vol. 101A, no. 1, pp. 272–284, Jan. 2013, doi: 10.1002/JBM.A.34326.

- [124] F. B. Coulter *et al.*, “Bioinspired Heart Valve Prosthesis Made by Silicone Additive Manufacturing,” *Matter*, vol. 1, no. 1, pp. 266–279, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.MATT.2019.05.013.
- [125] M. M. Germaini, S. Belhabib, S. Guessasma, R. Deterre, P. Corre, and P. Weiss, “Additive manufacturing of biomaterials for bone tissue engineering – A critical review of the state of the art and new concepts,” *Prog Mater Sci*, vol. 130, p. 100963, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.PMATSCI.2022.100963.
- [126] A. J. Sheoran, H. Kumar, P. K. Arora, and G. Moona, “Bio-Medical applications of Additive Manufacturing: A Review,” *Procedia Manuf*, vol. 51, pp. 663–670, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROMFG.2020.10.093.
- [127] C. D. Spicer, “Hydrogel scaffolds for tissue engineering: the importance of polymer choice,” *Polym Chem*, vol. 11, no. 2, pp. 184–219, Jan. 2020, doi: 10.1039/C9PY01021A.
- [128] C. G. Williams, A. N. Malik, T. K. Kim, P. N. Manson, and J. H. Elisseeff, “Variable cytocompatibility of six cell lines with photoinitiators used for polymerizing hydrogels and cell encapsulation,” *Biomaterials*, vol. 26, no. 11, pp. 1211–1218, Apr. 2005, doi: 10.1016/J.BIOMATERIALS.2004.04.024.
- [129] D. Manojlovic, M. D. Dramićanin, V. Miletic, D. Mitić-Ćulafić, B. Jovanović, and B. Nikolić, “Cytotoxicity and genotoxicity of a low-shrinkage monomer and monoacylphosphine oxide photoinitiator: Comparative analyses of individual toxicity and combination effects in mixtures,” *Dental Materials*, vol. 33, no. 4, pp. 454–466, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.DENTAL.2017.02.002.
- [130] R. L. and J. V. Robert Lanza, *Principles of Tissue Engineering*, 4th ed., vol. 1. 2014.
- [131] W. X. Waresindo *et al.*, “Freeze–thaw hydrogel fabrication method: basic principles, synthesis parameters, properties, and biomedical applications,” *Mater Res Express*, vol. 10, no. 2, p. 024003, Feb. 2023, doi: 10.1088/2053-1591/ACB98E.
- [132] P. A. M. Lips, I. W. Velthoen, P. J. Dijkstra, M. Wessling, and J. Feijen, “Gas foaming of segmented poly(ester amide) films,” *Polymer (Guildf)*, vol. 46, no. 22, pp. 9396–9403, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.07.052>.
- [133] N. Annabi *et al.*, “Controlling the Porosity and Microarchitecture of Hydrogels for Tissue Engineering,” *Tissue Eng Part B Rev*, vol. 16, no. 4, p. 371, Aug. 2010, doi: 10.1089/TEN.TEB.2009.0639.
- [134] D. J. Yoo, “Porous scaffold design using the distance field and triply periodic minimal surface models,” *Biomaterials*, vol. 32, no. 31, pp. 7741–7754, Nov. 2011, doi: 10.1016/J.BIOMATERIALS.2011.07.019.
- [135] S. Vijayavenkataraman, L. Zhang, S. Zhang, J. Y. H. Fuh, and W. F. Lu, “Triply periodic minimal surfaces sheet scaffolds for tissue engineering applications: An optimization approach toward biomimetic scaffold design,” *ACS Appl Bio Mater*, vol. 1, no. 2, pp. 259–269, Aug. 2018, doi: 10.1021/ACSABM.8B00052/ASSET/IMAGES/MEDIUM/MT-2018-000523\_0008.GIF.
- [136] J. Feng, B. Liu, Z. Lin, and J. Fu, “Isotropic porous structure design methods based on triply periodic minimal surfaces,” *Mater Des*, vol. 210, p. 110050, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.MATDES.2021.110050.

- [137] L. Han and S. Che, "An Overview of Materials with Triply Periodic Minimal Surfaces and Related Geometry: From Biological Structures to Self-Assembled Systems," Apr. 25, 2018, *Wiley-VCH Verlag*. doi: 10.1002/adma.201705708.
- [138] J. Feng, J. Fu, X. Yao, and Y. He, "Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications," *International Journal of Extreme Manufacturing*, vol. 4, no. 2, p. 022001, Mar. 2022, doi: 10.1088/2631-7990/AC5BE6.
- [139] O. Al-Ketan and R. K. Abu Al-Rub, "Multifunctional Mechanical Metamaterials Based on Triply Periodic Minimal Surface Lattices," *Adv Eng Mater*, vol. 21, no. 10, p. 1900524, Oct. 2019, doi: 10.1002/ADEM.201900524.
- [140] H. A. Schwarz, "Gesammelte Mathematische Abhandlungen," *Gesammelte Mathematische Abhandlungen*, 1890, doi: 10.1007/978-3-642-50665-9.
- [141] H. Karcher, "The triply periodic minimal surfaces of Alan Schoen and their constant mean curvature companions," *Manuscr Math*, vol. 64, no. 3, pp. 291–357, Sep. 1989, doi: 10.1007/BF01165824/METRICS.
- [142] Z. A. Qureshi, S. A. B. Al-Omari, E. Elnajjar, O. Al-Ketan, and R. Abu Al-Rub, "Nature-inspired triply periodic minimal surface-based structures in sheet and solid configurations for performance enhancement of a low-thermal-conductivity phase-change material for latent-heat thermal-energy-storage applications," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 173, p. 107361, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.IJTHERMALSCI.2021.107361.
- [143] N. Kladovasilakis, K. Tsongas, and D. Tzetzis, "Mechanical and FEA-Assisted Characterization of Fused Filament Fabricated Triply Periodic Minimal Surface Structures," *Journal of Composites Science 2021, Vol. 5, Page 58*, vol. 5, no. 2, p. 58, Feb. 2021, doi: 10.3390/JCS5020058.
- [144] D. W. Abueidda, M. Elhebeary, C. S. (Andrew) Shiang, S. Pang, R. K. Abu Al-Rub, and I. M. Jasiuk, "Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study," *Mater Des*, vol. 165, p. 107597, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.MATDES.2019.107597.
- [145] S. M. Giannitelli, D. Accoto, M. Trombetta, and A. Rainer, "Current trends in the design of scaffolds for computer-aided tissue engineering," *Acta Biomater*, vol. 10, no. 2, pp. 580–594, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.ACTBIO.2013.10.024.
- [146] W. Otten, R. Pajor, S. Schmidt, P. C. Baveye, R. Hague, and R. E. Falconer, "Combining X-ray CT and 3D printing technology to produce microcosms with replicable, complex pore geometries," *Soil Biol Biochem*, vol. 51, pp. 53–55, Aug. 2012, doi: 10.1016/J.SOILBIO.2012.04.008.
- [147] N. D. Ferro and F. Morari, "From Real Soils to 3D-Printed Soils: Reproduction of Complex Pore Network at the Real Size in a Silty-Loam Soil," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 79, no. 4, pp. 1008–1017, Jul. 2015, doi: 10.2136/SSSAJ2015.03.0097.
- [148] M. Bacher, A. Schwen, and J. Koestel, "Three-Dimensional Printing of Macropore Networks of an Undisturbed Soil Sample," *Vadose Zone Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 1–10, Feb. 2015, doi: 10.2136/VZJ2014.08.0111.

- [149] Y. Huang, L. Yu, L. Jiang, X. Shi, and H. Qin, "3D printing of hydrogel-based seed planter for in-space seed nursery," *Manuf Lett*, vol. 33, pp. 103–108, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.MFGLET.2022.07.045.
- [150] L. Ma *et al.*, "Hydrogel-based transparent soils for root phenotyping in vivo," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 166, no. 22, pp. 11063–11068, May 2019, doi: 10.1073/PNAS.1820334116/SUPPL\_FILE/PNAS.1820334116.SM03.MP4.
- [151] "Anaconda Distribution," 2.5.0.
- [152] Python Software Foundation, "Python Language Reference, version 3.12," 2024.
- [153] mike Dawson, "trimesh." Accessed: May 30, 2024. [Online]. Available: <https://trimesh.org/>
- [154] A. Jain, M. J. Metzger, and B. J. Glasser, "Effect of particle size distribution on segregation in vibrated systems," *Powder Technol*, vol. 237, pp. 543–553, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.POWTEC.2012.12.044.
- [155] Y. Huang, W. Sun, Q. Xie, H. You, and K. Wu, "Discrete Element Simulation of the Shear Behavior of Binary Mixtures Composed of Spherical and Cubic Particles," *Applied Sciences 2023, Vol. 13, Page 9163*, vol. 13, no. 16, p. 9163, Aug. 2023, doi: 10.3390/APP13169163.
- [156] A. E. Jakus, N. R. Geisendorfer, P. L. Lewis, and R. N. Shah, "3D-printing porosity: A new approach to creating elevated porosity materials and structures," *Acta Biomater*, vol. 72, pp. 94–109, May 2018, doi: 10.1016/J.ACTBIO.2018.03.039.
- [157] Z. Cai, Z. Liu, X. Hu, H. Kuang, and J. Zhai, "The effect of porosity on the mechanical properties of 3D-printed triply periodic minimal surface (TPMS) bioscaffold," *Biodes Manuf*, vol. 2, no. 4, pp. 242–255, Dec. 2019, doi: 10.1007/S42242-019-00054-7/METRICS.
- [158] S. Zou *et al.*, "Mechanical and biological properties of enhanced porous scaffolds based on triply periodic minimal surfaces," *Mater Des*, vol. 219, p. 110803, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.MATDES.2022.110803.
- [159] J. Zhang *et al.*, "Water soluble photocurable carboxymethyl cellulose-based bioactive hydrogels for digital light processing," *J Appl Polym Sci*, vol. 139, no. 20, p. 52155, May 2022, doi: 10.1002/APP.52155.
- [160] A. Elrahmani, R. I. Al-Raoush, H. Abugazia, and T. Seers, "Pore-scale simulation of fine particles migration in porous media using coupled CFD-DEM," *Powder Technol*, vol. 398, p. 117130, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.POWTEC.2022.117130.
- [161] M. Abad *et al.*, "Physical Properties of Various Coconut Coir Dusts Compared to Peat," *HortScience*, vol. 40, no. 7, pp. 2138–2144, Dec. 2005, doi: 10.21273/HORTSCI.40.7.2138.