



# Sustrato de hidrogel de celulosa modificado con macroporosidad mediante microtomografía computarizada e impresión 3D para cultivo sin suelo

## *Cellulose hydrogel substrate modified with macroporosity by computed microtomography and 3D printing for soil-less cultivation*

Ángel Iván Belmonte Torres , Julián Israel Aguilar Duque , Guillermo Amaya Parra 

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México

**Autor de correspondencia:** Guillermo Amaya Parra, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México. E-mail: [amaya@uabc.edu.mx](mailto:amaya@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0001-5375-1092.

**Enviado:** 10 de Mayo del 2023

**Aceptado:** 31 de Julio del 2023

**Publicado:** 17 de Septiembre del 2023

**Resumen.** *El cultivo sin suelo es una técnica de la agricultura que permite un mayor rendimiento en los cultivos, mostrando varias ventajas sobre la agricultura tradicional, esta técnica requiere de mejoras en los sustratos utilizados para obtener mayor producción y calidad. Los hidrogeles derivados de celulosa prometen ser una buena alternativa como sustrato por sus propiedades hidrofílicas sin embargo carecen de una buena aireación. Se propone utilizar la celulosa como materia prima para la síntesis de hidrogeles a base de celulosa asistido por la microtomografía computarizada para generar un modelo con una porosidad de 15-30% y reproducirlo mediante impresión 3D por procesamiento de luz digital (DLP). Por lo tanto, se busca obtener un sustrato de hidrogel de celulosa con mejores propiedades que los sustratos comerciales, e implementar la impresión 3D en la agricultura.*

**Palabras clave:** Hidrogel de celulosa; Sustrato; Impresión 3D; Cultivo sin suelo; Microtomografía computarizada.

**Abstract.** *Soilless cultivation is an agricultural technique that allows higher crop yields, showing several advantages over traditional agriculture, this technique requires improvements in the substrates used to obtain higher production and quality. Cellulose-derived hydrogels promise to be a good alternative as substrate due to their hydrophilic properties; however, they lack good aeration. It is proposed to use cellulose as raw material for the synthesis of cellulose hydrogels assisted by computerized microtomography to generate a model with a porosity of 15-30% and reproduce it by 3D printing by digital light processing (DLP). The aim is to obtain a cellulose hydrogel substrate with better properties than commercial substrates, and to implement 3D printing in agriculture.*

**Keywords:** Cellulose hydrogel; Substrate; 3D printing; Soilless culture; Computed microtomography.

## 1. Introducción

En la agricultura, la creciente escasez de tierra cultivable y el aumento de las condiciones climáticas extremas ha llevado a que una gran proporción de cultivos, especialmente hortalizas, se cultiven con métodos de cultivo protegidos sin suelo para proporcionar a las personas alimentos suficientes y de alta calidad [1].

La agricultura del siglo XXI presenta el gran desafío de producir el suficiente alimento para una población cada vez mayor, de acuerdo con la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)”.

Las proyecciones muestran que para alimentar una población mundial de 9 100 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].

Tomando en cuenta que la agricultura tradicional puede ser una fuente importante de contaminación ambiental.

El uso excesivo de fertilizantes, pesticidas y herbicidas puede contaminar el suelo, el agua y el aire, lo que puede tener efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente [3], por lo que aumentar el área cultivable del planeta podría ser muy contraproducente.

El cultivo sin suelo es una técnica de cultivo en la que no se requiere del suelo. En comparación con las técnicas agrícolas tradicionales, el cultivo sin suelo tiene como objetivo reducir el uso de la tierra, el consumo de agua y aumentar el rendimiento por unidad de superficie [4].

En el cultivo sin suelo, el sustrato reemplaza el suelo (la tierra), el suelo natural suele ser poco adecuado para el cultivo debido a limitaciones químicas (reacción, disponibilidad de

nutrientes, etc.), físicas (densidad, estructura, retención de agua, etc.) o biológicas (presencia de hongos, virus, bacterias etc.) [5], en cultivo sin suelo, todos los nutrientes se suministran a las plantas mediante una solución nutritiva suficiente para satisfacer las demandas de las plantas.

La composición de la solución significa la 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 de raíces [6, 7].

De esta manera no hay un uso excesivo de fertilizantes por lo que impacto ambiental es mucho menor.

Uno de los componentes principales de esta técnica es el sustrato, los sustratos se definen como todos aquellos materiales utilizados solos o mezclados adecuadamente que pueden proporcionar al sistema radicular mejores condiciones (en términos de uno o más aspectos del crecimiento de la planta) que las que ofrece la tierra [8].

Estos sustratos son contenidos en una maceta o bolsa de polietileno que esta conectado a un sistema recirculante donde viaja la solución nutritiva cíclicamente, los sustratos comerciales utilizados actualmente se dividen en sustratos orgánicos (fibra de coco, turba, restos de madera, cascarilla de arroz, entre otros) y sustratos inorgánicos (perlita, lana de roca, piedra volcánica, arena, etc.), dichos sustratos suelen presentar algunas deficiencias como una compactación del sustrato [9, 10] en el caso de los orgánicos, la necesidad de tratamientos químicos para que el sustrato sea inerte en la fibra de coco [11, 12].

En los últimos años, los investigadores informaron que los hidrogeles naturales a base 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 [13–15], debido a su propiedad de retención de agua, los hidrogeles tienen la capacidad de mejorar la soltura y la porosidad del suelo, 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 [15].

La Microtomografía Computarizada (Micro-CT) es una técnica de imágenes en 3D que utiliza rayos X para ver el interior de un objeto, corte por corte.

Las muestras se pueden visualizar con tamaños de píxeles tan pequeños como 100 nm y los objetos se pueden escanear con un diámetro de hasta 200 milímetros. Estos cortes pueden procesarse aún más en modelos 3D e incluso imprimirse como objetos físicos 3D para su análisis [16].

Se ha reportado el uso de Micro-CT para obtener modelos digitales que se pueden imprimir en 3D con una alta porosidad [17], [18] sin embargo, estos modelos fueron impresos con nylon y resina.

La manufactura aditiva (AM), mejor conocida como impresión 3D, es un proceso de fabricación en el cual se construye un objeto tridimensional capa por capa. Uno de los principales beneficios de la AM es la capacidad de producir objetos altamente personalizados y complejos.

La AM no tiene restricciones geométricas, lo que significa que puede producir formas y tamaños personalizados sin necesidad de herramientas de producción adicionales [19].

Existen varias técnicas de la AM, como el procesamiento de luz digital (DLP) que ya han sido probadas utilizando hidrogeles para aplicaciones médicas en ingeniería de tejidos [20–22].

Sin embargo, en la literatura las aplicaciones reportadas en horticultura son casi nulas. Se busca modelar un material poroso que cumpla

con la macroporosidad necesaria en un sustrato mediante micro-CT, sintetizar un hidrogel de celulosa en solución acuosa con propiedades químicas y biológicas adecuadas para un sustrato

, y reproducirlo por DLP para obtener un sustrato con una macroporosidad ideal que permita una buena aireación en la raíz, sin perder retención de agua, esto permitirá obtener un medio de anclaje para la planta con mejores propiedades físicas, químicas y biológicas.

## 2. Estado del arte

### 2.1. Sustratos

Un punto importante en la clasificación de sustratos es su capacidad de intercambio catiónico C.I.C, existen sustratos químicamente inertes y activos.

Un sustrato químicamente activo es aquel que tiene la capacidad de proporcionar nutrientes a las plantas, es decir, que actúa como fuente de nutrientes.

Como la lana de roca, la fibra de coco y la perlita, que pueden contener nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas [23].

Por otro lado, un sustrato químicamente inerte es aquel que no proporciona nutrientes a las plantas, es decir, que no actúa como fuente de nutrientes.

Como la arena, la vermiculita y la arcilla expandida, que no contienen nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas [24].

Un sustrato químicamente inerte es mejor ya 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.

Los sustratos por lo general, son confinados en una maceta o bolsa de polietileno, son suministrados mediante un sistema de goteo el cual proporciona la solución nutritiva a la planta, este sistema puede ser abierto (las plantas se alimentan continuamente con solución nutritiva nueva, sin recuperar la solución drenada por los módulos de cultivo) o un sistema cerrado (la solución nutritiva drenada se recicla y se rellena con los nutrientes que faltan hasta alcanzar el nivel de EC

adecuado) [25] siendo el sistema cerrado mas amigable con el medio ambiente ver imagen 1.



**Imagen 1:** Cultivo De Arándano Sin Suelo Extraído de [26]

Cualquier material orgánico, inorgánico o sintético puede servir como sustrato, siempre y cuando cumpla con ciertas condiciones ver tabla 1. “No existe un sustrato o mezcla universal que sea válido para todas las especies y en todas las situaciones de cultivo.

Por lo tanto, es conveniente seleccionar cuidadosamente los materiales individuales en función de las diferentes condiciones en las que se van a utilizar: el entorno, las especies que se van a cultivar, la fase de cultivo (germinación, enraizamiento de esquejes, producción de plantas, cultivo de plantas) y el sistema de cultivo” [8].



**Tabla 1.** Propiedades óptimas para un sustrato [10, 27–29].

Propiedades	Definición	Valor óptimo
<b>Propiedades físicas</b>		
<b>Granulometría</b>	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.	-----
<b>Densidad Real</b>	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 g.cm <sup>-3</sup>
<b>Densidad aparente</b>	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>
<b>Porosidad total</b>	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
<b>Capacidad de aireación</b>	Es la proporción de volumen de sustrato de cultivo que contiene aire después de que dicho sustrato ha sido saturado con agua y dejado drena, capacidad de suministrar oxígeno a las raíces	10-30%
<b>Agua fácilmente disponible</b>	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%
<b>Agua de reserva</b>	Es la cantidad de agua (% de volumen) que libera un sustrato al pasar de 50 a 100 cm de columna de agua de desorción.	Valor óptimo es del 4-10%.
<b>Agua total disponible</b>	Viene dada por la suma del agua fácilmente disponible más el agua de reserva.	24 y el 40% de volumen.
<b>Distribución del tamaño de las partículas</b>	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
<b>Estructura Estable</b>	Que permita una buena durabilidad del material y una manipulación adecuada., servir de soporte a la raíz	-----
<b>Propiedades químicas</b>		
<b>Capacidad de intercambio catiónico C.I.C.</b>	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.
<b>Disponibilidad de los nutrientes</b>	Cantidad de nutrientes iniciales que tiene el sustrato (antes de agregar solución nutritiva)	Casi nulo o sin ningún nutriente inicial
<b>Salinidad</b>	Concentración de sales existente en el sustrato cuando es suministrado	Nulos (inicialmente) e valores de conductividad eléctrica superior a 3.5 mS/cm son excesivamente altos
<b>PH</b>	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)
<b>Relación C/N</b>	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	Depende de la solución nutritiva
<b>Propiedades biológicas</b>		
<b>Velocidad de descomposición</b>	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
<b>Actividad reguladora del crecimiento</b>	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
<b>Estar libre de semillas de malas hierbas y de patógenos</b>	No debe contener patógenos (hongos, nematodos, Bacterias y virus), y semillas de malezas	No aplica
<b>Fitotóxico</b>	Compuestos, de origen natural o antropogénico, que impiden el normal crecimiento y desarrollo de uno o más tipos de plantas cuando estas son expuestas a una dosis determinada de dicho compuesto, pudiendo llegar a provocar la muerte del vegetal	Baja o nula



## 2.2. Celulosa

La celulosa es un polisacárido compuesto exclusivamente de moléculas de glucosa es rígido, insoluble en agua, y contiene desde cientos hasta varios miles de unidades de  $\beta$ -glucosa. La celulosa es la biomolécula orgánica más abundante ya que forma la mayor parte de la biomasa terrestres [30], Cuenta con excelente biocompatibilidad y biodegradabilidad y se puede obtener de muchos desechos agrícolas [31]. Esto lo vuelve un material prometedor para ser utilizado como sustrato.

## 2.3. Hidrogeles naturales

Los hidrogeles son redes poliméricas que tienen un alto nivel de hidratación y microestructuras tridimensionales que tienen similitudes con los tejidos naturales, ofreciendo una variedad de características como microestructurado intrínseco que promueven el transporte de cargas iónicas y moléculas [32].

De acuerdo con Burket [33] es posible diseñar y sintetizar redes de polímeros con control a escala molecular sobre la estructura, como la densidad de reticulación con propiedades personalizadas, como la biodegradación, la resistencia mecánica, la respuesta química y biológica a los estímulos. pueden responder a diferentes estímulos como temperatura, pH, luz, fuerza mecánica, entre otros.

En la actualidad, hay pocos informes sobre hidrogel como sustratos de cultivo sin suelo directamente. Por lo tanto, es muy necesaria la fabricación de hidrogel para el cultivo sin suelo de forma ecológica [13], lo cual abre una gran área de oportunidad para el desarrollo de hidrogeles naturales como sustrato, que a diferencia de hidrogeles sintéticos estos tienen la característica de ser biocompatibles bajos niveles de toxicidad, biodegradables y de bajo costo.

Sin embargo, en comparación con sus contrapartes sintéticas estándar, los hidrogeles naturales muestran propiedades mecánicas más bajas [34], esto puede afectar la resolución del modelo impreso en 3D.

## 2.4. Hidrogel de Celulosa

Los hidrogeles de Celulosa tienen la capacidad de ser utilizados como sustrato solos o mezclados, puede mejorar la retención de agua en el suelo y dar un buen anclaje radicular. El hidrogel de acetato de celulosa [35] y Hidrogel a base de paja de trigo (fuente de celulosa y lignina) [36] puede mejorar la retención del agua del suelo y liberar fertilizante de manera controlada, en este caso hablamos de 2 hidrogeles químicamente activos que tienen la función de acondicionar el suelo para afrontar sequías, que podrían ser utilizados como sustrato.

Es importante mencionar que el hidrogel de celulosa puede ser químicamente inerte o activo, dependiendo del tratamiento al que se someta durante su producción. En general, la celulosa es un polímero naturalmente inerte y no reacciona químicamente con otros compuestos. Sin embargo, los hidrogeles de celulosa se pueden fabricar a partir de diferentes tipos de celulosa y mediante diferentes procesos de modificación química para mejorar sus propiedades [37]. Es importante seleccionar la fuente de la celulosa, así como el reticulante e iniciador [33], para nuestro caso de estudio, buscamos que nuestro hidrogel tenga una C.I.C baja o nula.

## 2.5. Hidrogel de Carboximetilcelulosa

La carboximetilcelulosa (CMC) es un derivado de la celulosa obtenido por modificación química. Se obtiene reemplazando el grupo hidroxilo en las cadenas de glucopiranosas de la celulosa con los grupos carboximetilo ( $-\text{CH}_2\text{COOH}$ ) [38]. La CMC cuenta con



propiedades mecánicas aceptables, es altamente hidrofílico su PH es ajustable, tiene una buena capacidad de formación de hidrogel bajo control químico y biocompatibilidad. Además, que es biocompatible y biodegradable debido a su naturaleza por lo que este material es aprobado por la FDA (Food and Drug Administration) [39–41].

Los hidrogeles de CMC ya han sido utilizados para la fabricación de andamios en ingeniería de tejidos, existen varios informes sobre su aplicación como tintas de base biológica para AM [42].

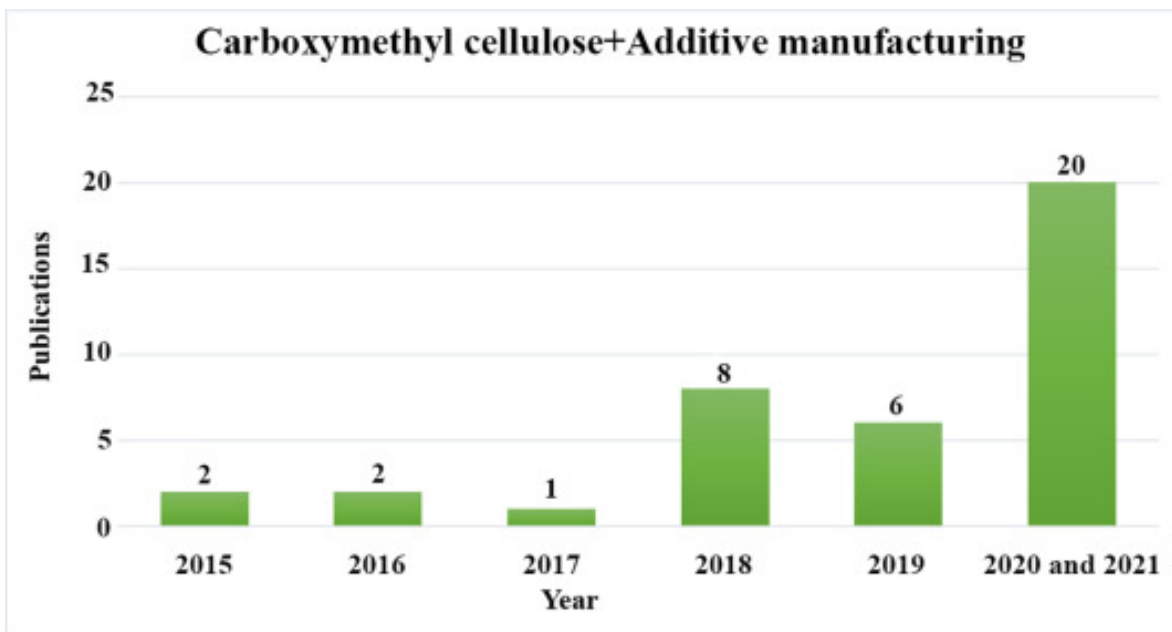
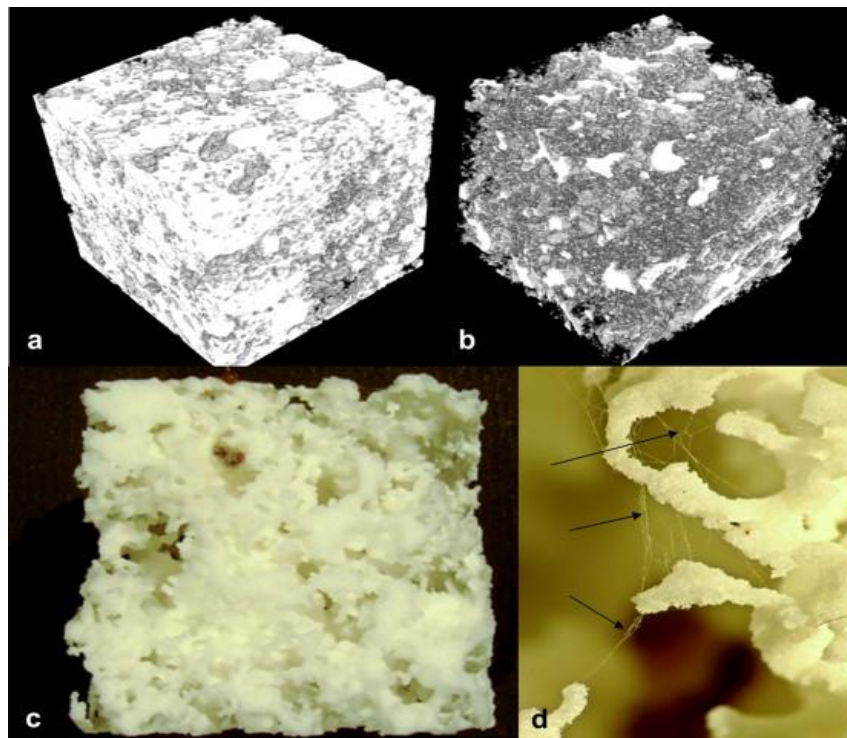


Figura 1. El número de publicaciones sobre la aplicación de nanocompositos CMC en fabricación aditiva [42].

## 2.6. Microtomografía computarizada de rayos X

En los artículos [43, 44] los autores describen cómo utilizaron imágenes de tomografía computarizada de alta resolución de materiales porosos para crear modelos virtuales de las estructuras de poros. Se utilizó micro-estereolitografía (micro-SLA) en ambos casos, técnica de impresión 3D para producir las réplicas de las estructuras de poros utilizando

Nylon 12 y resina fotosensible. Estas réplicas permitieron a los investigadores crear microcosmos con geometrías de poros altamente controladas y precisas. En [44] se hicieron pruebas de las propiedades hidráulicas y de retención de agua de las réplicas impresas en 3D en comparación con el suelo original.



**Figura 2.** La tomografía computarizada de rayos X permite la visualización del volumen sólido (a) y el volumen de poro (b) a una resolución espacial de 30  $\mu\text{m}$  [43].

Esta técnica podría permitirnos replicar un material altamente poroso para aplicaciones en el cultivo sin suelo, hay que tener en cuenta que un hidrogel tiene la propiedad de retención de agua debido a su microporosidad, sin embargo un sustrato ideal se conforma de una porosidad total mayor al 85% con un 40–60 % de microporos (que retienen agua) y 15–30 % de macroporos (drenan el agua y permiten que fluya el aire) [17], esto es importante para obtener un buen drenaje y la solución nutritiva circule, evitando un estrés hídrico y aparición de algas.

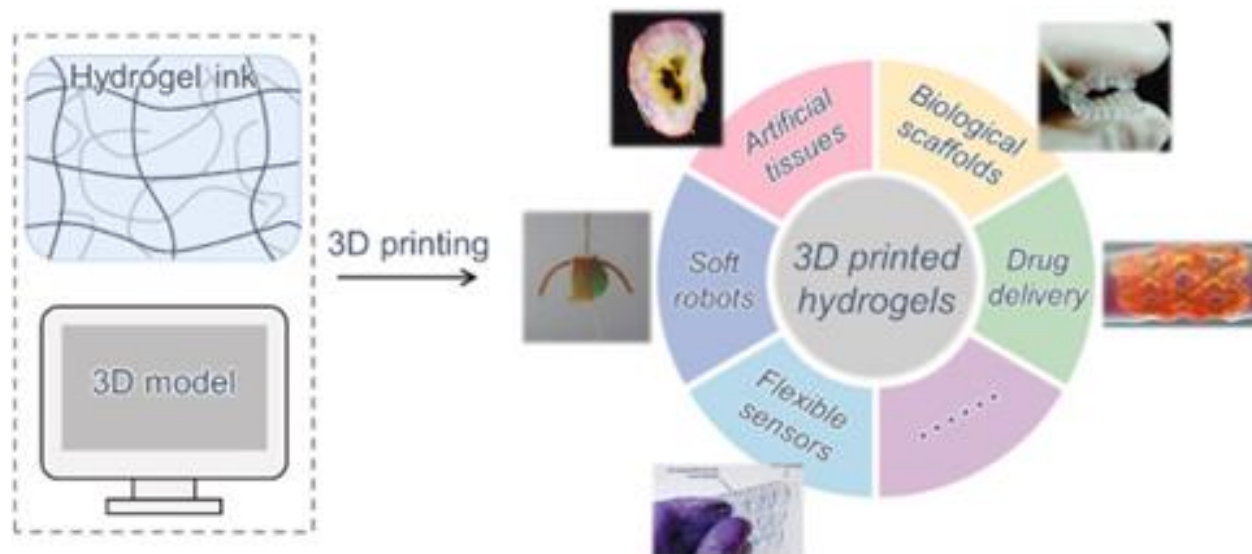
Savvas [45] reportó un hidrogel macroporoso de agarosa como sustrato para germinación de microvegetales, los autores utilizaron un método de fabricación de hidrogel de agarosa con

partículas de sílice porosas como agentes de reticulación. Estas partículas de sílice porosas se mezclaron con la solución de agarosa antes de la solidificación para crear una estructura de agarosa-sílice porosa. Después se removieron para dejar una red interconectada de macroporos en la estructura del hidrogel, aumentando el rendimiento del cultivo en un 54%. Si se logra modelar un material poroso mediante Micro-CT podríamos obtener un resultado similar, pero con mayor precisión.

## 2.7. Impresión 3D con hidrogel

Los hidrogeles impresos en 3D facilitan las aplicaciones de materiales de gel en diversos campos [46] (figura 3).





**Figura 3.** Impresión 3D de hidrogeles y sus aplicaciones versátiles en campos biomédicos y de ingeniería [46].

Los hidrogeles junto con los procesos AM tienen el potencial de crear sustratos de cultivo sin suelo [47], esto sería un área de oportunidad para la AM en la agricultura, pues esta técnica permite un control arquitectónico de los hidrogeles con alta precisión, con el potencial de integrar aún más los elementos que permiten el cambio de las configuraciones del hidrogel [44]. Lo cual podría ser un área de oportunidad en las ciencias agrícolas.

Un estudio de impresión volumétrica de tejidos [48] reportó que en los procesos DLP (procesamiento de luz digital) el tiempo de impresión aumenta linealmente en función de la altura de la construcción, independientemente del área a imprimir en cada capa individual. Por lo tanto, las tecnologías DLP tienen un potencial prometedor para usarse en la reproducción de sustratos de hidrogel a partir de modelos de Micro-Ct que equilibren la resolución y la velocidad de impresión.

la impresión DLP por lo general, utiliza una fuente de luz para curar selectivamente una resina líquida fotosensible en capas sucesivas hasta que se forma un objeto sólido en 3D. La

imagen digital de la pieza deseada se proyecta a través de una pantalla LCD o DMD (Dispositivo de Microespejos Digital) y se enfoca en la capa de resina líquida fotosensible. El proceso se repite para cada capa hasta que se completa toda la pieza deseada [48].

En cuanto hidrogeles, las sustancias que se utilizan como tintas o biotintas 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 [49].

El fundamento de la impresión 3D tipo 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 [50], 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 [51].

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 el 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 [52] lo que radica en citotoxicidad y enfermedades cancerígenas [53].

Por lo que es de vital importancia la elección de un fotoiniciador con una toxicidad muy baja.

Para este estudio se revisaron hidrogeles de CMC ya estudiados en el área médica, debido a la falta de información relacionada al tema en la agricultura, En el artículo [54] los autores reportan un hidrogel de CMC metacrilado con nanocristales de celulosa con ácido bismesitoilfosfínico (BAPO-OH) como fotoiniciador.

En [55] se utilizó carboximetilcelulosa metacrilada (M-CMC) y fenil-2,4,6-trimetilbenzoilfosfinato de litio (LAP) como fotoiniciador.

## 2.7. Porosidad en hidrogeles

La porosidad es la fracción volumétrica de poros del material. Estos poros pueden situarse en su superficie o en su estructura interna. La porosidad está asociada con la densidad del material, y con la naturaleza de sus compuestos y la existencia de espacios vacíos entre ellos [56]. Un material poroso se define como cualquier sólido con una estructura porosa que le aporte cierta funcionalidad [57]. Los diferentes materiales porosos incluyen metales, cerámicos y

polímeros, son de gran importancia en aplicaciones industriales, en la química, la ingeniería mecánica, la biotecnología y la electrónica. La mayoría de estas aplicaciones exigen la existencia de porosidad abierta e interconectada, tal es el caso de filtros y membranas. Por su parte, la porosidad cerrada es útil en aplicaciones como aislantes térmicos y acústicos y componentes estructurales de baja densidad [58].

Dependiendo el tipo de porosidad se puede clasificar según la comunicación de los poros y según su origen, por ejemplo:

Según la comunicación de los poros

- *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 de la roca. Este tipo de porosidad facilita la circulación de los fluidos por las rocas.
- *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 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.
- *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 [59].

En el cultivo sin suelo el tamaño de los macroporos en el sustrato es importante para permitir un adecuado flujo de agua, oxígeno y nutrientes a las raíces de las plantas. En este rango de tamaño es necesario para asegurar un drenaje adecuado y evitar la saturación del sustrato, lo cual podría dañar las raíces y afectar el crecimiento de las plantas.

En la fabricación de andamios de hidrogel para ingeniería de tejidos, presenta ciertas similitudes

con los sustratos de hidrogel, la porosidad en los andamios ayuda a la dirección de la formación y función del tejido, esto permite 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 [60].

A continuación, se presenta una comparación de materiales sólidos porosos que podrían ser replicados mediante microtomografía tabla 2:

**Tabla 2.** Materiales porosos que pueden ser replicados mediante Micro-CT.

Nombre	Tipo de Porosidad	Diámetro de poro	% Porosidad	Ref.
Espumas de poliuretano	Porosidad efectiva	0.35-1.05mm	88.6%	[61]
Poliestireno supermacroporoso (CPP)	Porosidad no efectiva	500 µm	91%	[62]
Poliestireno con macroporos interconectados	Porosidad efectiva	200 µm interconectado con 20 µm	68-76%	[62]
Espuma de polietileno				
Areniscas	Porosidad efectiva	5-65 µm	1-28%	[63]
Pumita	Porosidad efectiva	0.01-1mm	60-90%	[64]
Tezontle	Efectiva y no efectiva	138 µm	67.9%	[65]
Espuma de aluminio	Porosidad efectiva y no efectiva	100 µm a 10000 µm	84 - 95 %	[66]

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

$$POROSIDAD (\%) = \frac{W_2 - W_1}{V} \times 100 \quad (1)$$

Donde W1 y W2 son los pesos de un hidrogel antes y después de sumergirlo en agua, respectivamente. ρ es la densidad del agua y V el volumen de un hidrogel [67].

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 hidrogel. Si se desea determinar información más detallada sobre la distribución de tamaño de poro o porosidad específica, pueden ser necesarios métodos de caracterización más avanzados, como porosimetría de mercurio y Microscopias electrónicas.

### 3. Materiales y métodos

Para esta sección se plantea el uso de un hidrogel ya reportado con ciertas modificaciones [55], se utilizó sal sódica de CMC con anhídrido



metacrílico y fenil-2,4,6-trimetilbenzoilfosfinato de litio como fotoiniciador, el pH será ajustado a 6, Se utilizara una impresora que opere con una fuente de luz de diodo emisor de luz (385 nm) , se utilizó el archivo STL obtenido mediante microtomografía computarizada de rayos X (microCT) que cumpla con las características necesarias (dimensiones de 10 a 50 mm, porosidad interconectada con un diámetro de 100 a 500  $\mu\text{m}$ ) de manera que se obtenga una porosidad total  $\geq 85\%$  tomando en cuenta la porosidad inicial del hidrogel, para una aireación adecuada para la raíz.

Se utilizó Microscopia electrónica de barrido (SEM) como método de caracterización morfológico y complementaremos con una caracterización de la porosimetría de mercurio, para obtener la porosidad total y el diámetro de la porosidad haya sido replicado correctamente, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para determinar la presencia de grupos funcionales en la matriz del hidrogel principalmente evaluar la toxicidad que podría generar el fotoiniciador, relación aire-agua del sustrato, permite conocer la curva de liberación de agua del material. y pruebas de tracción uniaxial para obtener un diagrama de tensión-deformación para obtener el módulo de elasticidad.

Se probó el hidrogel para el cultivo de hortalizas locales y se evalúa el rendimiento tiempo de crecimiento, y biomasa de cada órgano del cultivo.

#### 4. Resultados y discusiones

Se espera obtener un hidrogel como sustrato producido por impresión 3D como una alternativa a los sustratos convencionales que se utilizan en el cultivo sin suelo, es posible adecuar las propiedades químicas y biológicas requeridas por los cultivos en este sustrato a base

de hidrogel de celulosa, y darle una estructura favorable por medio de un modelo poroso mediante Micro-CT y reproducirlo por DLP.

Con el desarrollo de esta investigación se obtendrá un sustrato más adecuado para el desarrollo de hortalizas de , lo cual se traduce a una mayor producción de hortalizas, y la implementación de un sustrato que mantenga un balance de rendimiento y economía, por otro lado, la implementación de la AM en la agricultura, técnica poco utilizada en esta área a diferencia de aeroespacial e ingeniería de tejidos, lo cual abre un área de oportunidad de innovación.

Dar a conocer las grandes ventajas del cultivo sin suelo ante la agricultura tradicional como, el ahorro de agua y fertilizantes, una alternativa ante la contaminación del suelo, una técnica con mayor valor en la comercialización de las cosechas, una optimización de tiempo de cultivo y espacio.

El uso de hidrogeles como sustrato para el cultivo sin suelo es una propuesta prometedora para aumentar el rendimiento en el cultivo sin suelo, esta técnica presenta varias ventajas a diferencia de la agricultura tradicional, recalcando el menor uso del agua, menor uso de fertilizante y la optimización del espacio.

Hasta la fecha solo el hidrogel de acrilato de potasio es reconocido comercialmente, implementar nuevos hidrogeles con propiedades más adecuadas para el cultivo sin suelo tendría un gran impacto en esta técnica debido a la mejora del rendimiento del cultivo que el hidrogel promete, sintetizar un hidrogel a partir de celulosa es una ruta muy viable para obtener un sustrato con buenas propiedades y económico, además de la implementación de la impresión 3D en la agricultura.



Un punto para considerar es que cada cultivo se comporta diferente y tiene necesidades específicas, la ventaja del uso de un hidrogel es su capacidad de cambiar sus propiedades acordes a los requerimientos del cultivo, se requiere de más investigación para tener una base sólida de

#### 4. Conclusiones

Los Hidrogeles de celulosa son prometedores para su uso como sustrato en el cultivo sin suelo, estos hidrogeles cuentan con propiedades de retención de agua, microporosidad y PH ajustable, dichas características que la mayoría de los sustratos utilizados actualmente carecen.

Por otro lado, la microtomografía computarizada e impresión 3D podría ser una excelente adición para el desarrollo de dichos sustratos debido a su versatilidad de fabricar arquitecturas complejas que favorezcan el anclaje, aireación y desarrollo de las hortalizas, sin embargo; se conoce muy poco sobre el uso de la impresión 3D e hidrogel para un uso afín a la hidroponía por lo que se requiere de una investigación exhaustiva sobre el tema, no obstante el uso de la manufactura aditiva ha reportado avances en la producción del uso de estas técnicas, aplicado en órganos artificiales y andamios, la investigación sobre la impresión 3D mediante fotopolimerización en esta área ha crecido durante los últimos años, por lo que da la oportunidad a una transferencia interseccional, se estima un mayor rendimiento y un medio mas adecuado para los cultivos.

que puede aportar el uso de hidrogeles al cultivo sin suelo.

#### 5. Reconocimiento de autoría

*Ángel Iván Belmonte Torres:* Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Investigación, Escritura - Borrador original, Escritura: revisión y edición. *Julián Israel Aguilar Duque:* Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Escritura, revisión y edición. *Guillermo Amaya Parra:* Conceptualización, Análisis formal, Escritura - Borrador original, Escritura: revisión y edición, Supervisión.



## Referencias

- [1] A. Nerlich and D. Dannehl, “Soilless Cultivation: Dynamically Changing Chemical Properties and Physical Conditions of Organic Substrates Influence the Plant Phenotype of Lettuce,” *Front Plant Sci*, vol. 11, Jan. 2021, doi: 10.3389/fpls.2020.601455.
- [2] FAO. 2018. The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050. Rome. 224 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- [3] FAO and Earthscan, 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), 2012.
- [4] S. Saha, A. Monroe, and M. R. Day, “Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (*Ocimum basilicum* L.) under soilless agricultural systems,” *Annals of Agricultural Sciences*, vol. 61, no. 2, pp. 181–186, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.AOAS.2016.10.001.
- [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] 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.
- [7] A. Silber and A. Bar-Tal, “Nutrition of Substrate-Grown Plants,” *Soilless Culture: Theory and Practice*, pp. 291–339, Jan. 2008, doi: 10.1016/B978-0-44452975-6.50010-1.
- [8] R. DiLorenzo, Antonio Pisciotta, Pedro Santamaría, and Valentina Scariote, “View of from soil to soil-less in horticulture: quality and typicity,” *Revista Italiana de Agronomía*, 2013. <https://www.agronomy.it/index.php/agro/article/view/ija.2013.e30/511> (accessed Nov. 26, 2022).
- [9] M. Raviv, “Composts in growing media: What’s new and what’s next?,” *Acta Hortic*, vol. 982, pp. 39–52, Mar. 2013, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2013.982.3.
- [10] A. Prácticos Esperiencias and C. M. Baixauli Soria José Aguilar Olivert, “Cultivo sin Suelo de Hortalizas”.
- [11] M. A. Nichols, “Coir - A XXIst century sustainable growing medium,” *Acta Hortic*, vol. 747, pp. 91–95, 2007, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2007.747.8.
- [12] R. Poulter, “Quantifying differences between treated and untreated coir substrate,” *Acta Hortic*, vol. 1018, pp. 557–564, Jan. 2014, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2014.1018.61.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Micro photonics. “What is Micro-CT? An Introduction | Micro Photonics”. Micro Photonics. Accedido el 14 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.microphotonics.com/what-is-micro-ct-an-introduction/>
- [17] 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.
- [18] 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.



- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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>
- [24] M. Resh Howard, *Cultivos Hidroponicos Nuevas técnicas de producción*, 5th ed., vol. 1. Barcelona: Mundiprensa, 2001.
- [25] M. Carmelo and N. Carlo, “Department of Agriculture, Food, Natural Resources, Animals and Environment.” University of Padova, Italy.
- [26] “Ventajas de los métodos de cultivo de arándano sin suelo frente al cultivo en suelo - Projargroup Site.” <https://www.projargroup.com/ventajas-de-los-metodos-de-cultivo-de-arandano-sin-suelo-frente-al-cultivo-en-suelo/> (accessed Jul. 13, 2023).
- [27] F. Pedro and R. Dolores, “Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo.” pp. 3–42.
- [28] A. R. Campaña, “Fitotóxicos como alternativa a herbicidas contaminantes,” *Revista de ciencias de la universidad pablo de olavide*, pp. 71–73, 2018.
- [29] 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.
- [30] “Celulosa.” <https://www.quimica.es/enciclopedia/Celulosa.html> (accessed Apr. 08, 2023).
- [31] Z. Zhao et al., “Sustainable Nutrient Substrates for Enhanced Seedling Development in Hydroponics,” *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 10, no. 26, pp. 8506–8516, Jul. 2022, doi: 10.1021/acssuschemeng.2c01668/suppl\_file/sc2c01668\_si\_003.mp4.
- [32] L. Pan et al., “Hierarchical nanostructured conducting polymer hydrogel with high electrochemical activity,” *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 109, no. 24, pp. 9287–9292, Jun. 2012, doi: 10.1073/pnas.1202636109/-/dcsupplemental.
- [33] 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.radphyschem.2007.02.024.
- [34] G. Janarthanan, H. N. Tran, E. Cha, C. Lee, D. Das, and I. Noh, “3D printable and injectable lactoferrin-loaded carboxymethyl cellulose-glycol chitosan hydrogels for tissue engineering applications,” *Materials Science and Engineering: C*, vol. 113, p. 111008, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.msec.2020.111008.
- [35] A. M. Senna and V. R. Botaro, “Biodegradable hydrogel derived from cellulose acetate and EDTA as a reduction substrate of leaching NPK compound fertilizer and water retention in soil,” *Journal of Controlled Release*, vol. 260, pp. 194–201, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.JCONREL.2017.06.009.
- [36] K. Heise et al., “From Agricultural Byproducts to Value-Added Materials: Wheat Straw-Based Hydrogels as Soil Conditioners?,” *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 7, no. 9, pp. 8604–8612, May 2019, doi: 10.1021/acssuschemeng.9b00378/asset/images/large/sc-2019-003782\_0006.jpeg.
- [37] L. S. Nair and C. T. Laurencin, “Biodegradable polymers as biomaterials,” *Prog Polym Sci*, vol. 32, no. 8–



9, pp. 762–798, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2007.05.017.

[38] Y. S. Abdullaevich, Y. K. Ergashovich, S. A. Abdukhalilovich, and G. I. Shavkat o'g'li, "Synthesis and characterization of sodium-carboxymethylcellulose from cotton, powder, microcrystalline and nanocellulose," *Polym Eng Sci*, vol. 62, no. 3, pp. 677–686, Mar. 2022, doi: 10.1002/PEN.25874.

[39] S. Ariaeenejad, H. Lanjanian, E. Motamedi, K. Kavousi, A. A. Moosavi-Movahedi, and G. Hosseini Salekdeh, "The Stabilizing Mechanism of Immobilized Metagenomic Xylanases on Bio-Based Hydrogels to Improve Utilization Performance: Computational and Functional Perspectives," *Bioconjug Chem*, vol. 31, no. 9, pp. 2158–2171, Sep. 2020, doi: 10.1021/acs.bioconjchem.0c00361/suppl\_file/bc0c00361\_si\_001.pdf.

[40] Y. Shin et al., "Ph-responsive succinoglycan-carboxymethyl cellulose hydrogels with highly improved mechanical strength for controlled drug delivery systems," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.3390/polym13183197/s1.

[41] S. Mallakpour, M. Tukhani, and C. M. Hussain, "Recent advancements in 3D bioprinting technology of carboxymethyl cellulose-based hydrogels: Utilization in tissue engineering," *Adv Colloid Interface Sci*, vol. 292, p. 102415, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cis.2021.102415.

[42] S. Mallakpour, M. Tukhani, and C. M. Hussain, "Recent advancements in 3D bioprinting technology of carboxymethyl cellulose-based hydrogels: Utilization in tissue engineering," *Adv Colloid Interface Sci*, vol. 292, p. 102415, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cis.2021.102415.

[43] 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.

[44] 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.

[45] D. Savvas and N. S. Gruda, "Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry-A review Tomres: a Novel and Integrated Approach to Increase Multiple and Combined Stress Tolerance In Plants Using Tomato as a Model View Project Plants Special Issue 'Innovative Crop Management Practices for Maximizing the Production of Vegetables' View project," 2018, doi: 10.17660/ejhs.2018/83.5.2.

[46] X. N. Zhang, Q. Zheng, and Z. L. Wu, "Recent advances in 3D printing of tough hydrogels: A review," *Compos B Eng*, vol. 238, p. 109895, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.109895.

[47] 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.

[48] J. R. Tumbleston et al., "Continuous liquid interface production of 3D objects," *Science (1979)*, vol. 347, no. 6228, pp. 1349–1352, Mar. 2015, doi: 10.1126/science.aaa2397/suppl\_file/tumbleston.sm.pdf.

[49] 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.

[50] 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.

[51] 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.

[52] 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.





- [53] 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.
- [54] D. Cafiso et al., “3D printing of fully cellulose-based hydrogels by digital light processing,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 32, p. e00444, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.susmat.2022.e00444.
- [55] G. Melilli et al., “DLP 3D Printing Meets Lignocellulosic Biopolymers: Carboxymethyl Cellulose Inks for 3D Biocompatible Hydrogels”, doi: 10.3390/polym12081655.
- [56] “¿Cómo medir la porosidad de los materiales? | ATRIA Innovation.” <https://www.atriainnovation.com/como-medir-la-porosidad-de-los-materiales/> (accessed May 10, 2023).
- [57] K. Ishizaki, S. Komarneni, and M. Nanko, *Porous Materials*, vol. 4. in *Materials Technology Series*, vol. 4. Boston, MA: Springer US, 1998. doi: 10.1007/978-1-4615-5811-8.
- [58] Y. Y. Su, S. U. Su, J. Ortiz-Landeros, H. Pfeiffer, and B. Bstract, “Métodos de síntesis de microesferas poliméricas y su uso en el proceso de síntesis de materiales cerámicos macroporosos,” *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, vol. 13, no. 2, pp. 113–120, 2010, Accessed: May 15, 2023. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-888X2010000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2010000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- [59] “Estudio de la Porosidad como Característica Petrofísica de las Rocas”. <https://steemit.com/>. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://steemit.com/stem-espanol/@ennyta/estudio-de-la-porosidad-como-caracteristica-petrofisica-de-las-rocas>
- [60] 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.
- [61] C. Zhang, J. Li, Z. Hu, F. Zhu, and Y. Huang, “Correlation between the acoustic and porous cell morphology of polyurethane foam: Effect of interconnected porosity,” *Mater Des*, vol. 41, pp. 319–325, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2012.04.031.
- [62] S. Yu, H. Tan, J. Wang, X. Liu, and K. Zhou, “High porosity supermacroporous polystyrene materials with excellent oil-water separation and gas permeability properties,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 7, no. 12, pp. 6745–6753, Apr. 2015, doi: 10.1021/acsami.5b00196/suppl\_file/am5b00196\_si\_003.avi.
- [63] L. I. Net and C. O. Limarino, “Caracterización y origen de la porosidad en areniscas de la sección inferior del Grupo Paganzo (Carbonífero superior), Cuenca Paganzo, Argentina,” *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, vol. 7, no. 1–2, pp. 0–0, 2000, Accessed: May 16, 2023. [Online]. Available: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1853-63602000000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1853-63602000000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=en)
- [64] “Piedra pómez”. <https://1library.com>. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://1library.co/article/piedra-pomez-resultados-discusion-caracterizacion-fisica-micromorfologia-materiales.9yne3nky>
- [65] F. Callejas, “Efecto del uso de soportes inertes en Fermentación Sólida”, XVI Congr. Biotecnol. Bioingeniería, p. 1, 2015.
- [66] F. Diaz. “Espumas Metálicas Espumas Metálicas”. [olimpia.cuautitlan2.unam](http://olimpia.cuautitlan2.unam). Accedido el 15 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/espumas\\_metalicas.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/espumas_metalicas.pdf)
- [67] S. J. Shirbin, F. Karimi, N. J. A. Chan, D. E. Heath, and G. G. Qiao, “Macroporous Hydrogels Composed Entirely of Synthetic Polypeptides: Biocompatible and Enzyme Biodegradable 3D Cellular Scaffolds,” *Biomacromolecules*, vol. 17, no. 9, pp. 2981–2991, Sep. 2016, doi: 10.1021/acs.biomac.6b00817/suppl\_file/bm6b00817\_si\_001.pdf.



Derechos de Autor (c) 2023 Ángel Iván Belmonte Torres, Julián Israel Aguilar Duque, Guillermo Amaya Parra



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)