

Diseño macroporoso mediante manufactura aditiva para optimizar propiedades físicas de sustratos de hidrogel en cultivo sin suelo

Ángel Iván Belmonte Torres A, Dr. Julián Israel Aguilar Duque B, Dr. Guillermo Amaya Parra C.

^a Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, ivan.belmonte@uabc.edu.mx, Ensenada, Baja California México.

^b Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, julian.aguilar@uabc.edu.mx, Ensenada, Baja California México.

^c Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, amaya@uabc.edu.mx, Ensenada, Baja California México.

Resumen

El cultivo sin suelo es una técnica de la agricultura utilizada para el cultivo protegido, esta técnica permite un mayor rendimiento en los cultivos, mostrando varias ventajas sobre el cultivo tradicional como ahorro de agua, nutrientes incluso acortar los tiempos de cosecha, esta técnica requiere de mejoras en los sustratos utilizados para obtener mayor producción y calidad. Los hidrogeles derivados de polisacáridos prometen ser una buena alternativa como sustrato por sus propiedades hidrofílicas biocompatibilidad y baja toxicidad, sin embargo, dichos materiales carecen de una macroporosidad, por lo que no permiten la aireación ni el drenaje en el cultivo, lo que puede ocasionar un estrés hídrico sobre los cultivos, por lo tanto, estos materiales requieren de una macroporosidad del 15-30% para un buen desarrollo en hortalizas. En este estudio se propone generar un modelo mediante el diseño asistido por computadora (CAD) con una porosidad determinada y reproducirlo mediante manufactura aditiva por la técnica de procesamiento de luz digital (DLP), se busca obtener un sustrato de hidrogel con una geometría tamaño y porosidad favorable acorde a los parámetros ideales en los sustratos para obtener un rendimiento lo más aproximado a lo ideal.

Palabras clave—Cultivo sin suelo, Hidrogel, manufactura aditiva, Sustrato

Abstract

Soilless cultivation is an agricultural technique used for protected cultivation, this technique allows higher crop yields, showing several advantages over traditional cultivation such as saving water, nutrients and even shortening harvesting times, this technique requires improvements in the substrates used to obtain higher production and quality. Hydrogels derived from polysaccharides promise to be a good alternative as substrate due to their hydrophilic properties, biocompatibility and low toxicity, however, these materials lack macroporosity, so they do not allow aeration and drainage in the crop, which can cause water stress on crops, therefore, these materials require a macroporosity of 15-30% for a good development in vegetables. In this study it is proposed to generate a model by computer-aided design (CAD) with a porosity and

reproduce it by additive manufacturing by the digital light processing (DLP) technique, it is sought to obtain a hydrogel substrate with a favorable size and porosity geometry according to the ideal parameters in the substrates to obtain a performance as close to the ideal.

Keywords— additive manufacturing, Hydrogel, Soil-less cultivation, Substrate

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura del siglo XXI presenta el gran desafío de producir el suficiente alimento para una población cada vez mayor, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). 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 % [1]. 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 [2]. 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 [2], por lo que aumentar el área cultivable del planeta podría ser muy contraproducente.

El cultivo en sustrato es una técnica que ha tenido una excelente respuesta debido a la baja demanda de nutrientes y al corto período de crecimiento de los cultivos [3].

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 la escasez del agua, la falta de nutrientes disponibles en el suelo, los cambios climáticos [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 radicular [6], [7]. De esta manera no hay un uso excesivo de fertilizantes por lo que impacto ambiental es mucho menor.

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 [8], [9], [10], 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 disposición de los sistemas de raíces de las plantas, la germinación de semillas y la supervivencia de las plantas [10]. A pesar de ello los hidrogeles no son tan utilizados, debido a que no solo se busca una buena retención de agua, sino un equilibrio entre microporosidad y macroporosidad que aporte retención y oxigenación al sistema radicular. La falta de oxigenación en la zona radical puede ocasionar hipoxia [11], al igual que la falta de un buen drenaje puede desencadenar un estrés hídrico y la aparición de algas, por lo que estas propiedades son de vital importancia para un sustrato en el cultivo sin suelo.

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 [12]. 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, [13], [14], [15]. Sin embargo, en la literatura las aplicaciones reportadas en horticultura son casi nulas. Se busca modelar un diseño poroso por medio del diseño asistido por computadora (CAD) que cumpla con las macroporosidad necesaria en un sustrato tomando en cuenta las propiedades físicas ideales en un sustrato, y reproducirlo por DLP para obtener un sustrato con una porosidad óptima que permita una buena aireación en la raíz, esto permitirá obtener un medio de anclaje para la planta con mejores propiedades físicas.

2. CONTENIDO

2. Sustratos y sus propiedades

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 está 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) sustratos inorgánicos (perlita, lana de roca, piedra volcánica, arena, etc.) y sintéticos (hidrogeles, espumas) [16], aunque también pueden clasificarse por su origen (orgánico, inorgánico) según su actividad química (inertes, químicamente activos) el uso de cada uno dependerá de los requerimientos de cada planta [17]. Cualquier material orgánico, inorgánico o sintético puede servir como sustrato, siempre y cuando cumpla con ciertas condiciones ver tabla 1.

Propiedades	Valor optimo
Propiedades físicas	
Granulometría	Tamaño de partícula: 0.25 - 7 mm
Densidad Real	1,45 - 2,65 g.cm-3
Densidad aparente	0,50 a 0,75 g.cm-3
Porosidad total	85% o superior Tamaño de microporo 0.2 a 30 µm Tamaño de macroporo 50-500 µm
Capacidad de aireación	10-30%
Agua fácilmente disponible	20-30%
Agua de reserva	Valor óptimo es del 4-10%.
Agua total disponible	24 y el 40% de volumen.
Distribución del tamaño de las 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	-----
Capacidad de intercambio catiónico C.I.C.	Baja o nula actividad C.I.C.
Disponibilidad de los nutrientes	Casi nulo o sin ningún nutriente inicial
Salinidad	Nulos (inicialmente) e valores de conductividad eléctrica superior a 3,5 mS/cm son excesivamente altos
PH	Entre 5.5 y 6.8 (varía dependiendo el cultivo)
Relación C/N	Depende de la solución nutritiva
Velocidad de descomposición	Que sea de larga duración
Actividad reguladora del crecimiento	Se soluciona con la solución nutritiva
Estar libre de semillas de malas hierbas y de patógenos fitotóxico	----- ----- Baja o nula

Tabla 1: Propiedades óptimas para un sustrato [18], [19], [20], [21].

“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” [22]. 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 [23]. 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 baja 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 [24]. 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 [25], la estructura del sustrato está determinada por el tamaño, la forma, la textura y la disposición física de las partículas que lo componen [26]. 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. Es importante aclarar que las propiedades químicas y biológicas también juegan un papel muy importante en los sustratos, no obstante, en este artículo nos enfocamos en propiedades físicas por la importancia de este. Hasta la fecha no se ha reportado un sustrato que sea idóneo para la siembra de hortalizas [27].

2.1. Porosidad total en sustratos

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 [28]. 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 adecuado 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 [24].

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

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

Donde: Pt (%) = porcentaje de porosidad; Da = densidad aparente (g cm⁻³); Dr = densidad real (g cm⁻³) [29], aunque 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 conllevan 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 [30]. 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, método BET y micromorfología.

La micromorfología es una rama de la ciencia del suelo que se enfoca al estudio del tamaño y distribución de partículas y poros (macros y micros, entre y dentro de partículas) en muestras de suelo inalteradas; por lo que puede ser una alternativa para determinar las formas y tamaños de partícula y su relación con las propiedades físicas de los sustratos [31].

La distribución del tamaño de los poros es valiosa para caracterizar suelos para diversas aplicaciones relacionadas con las interacciones suelo-planta, aireación, riego, drenaje. En general, se divide en macroporos y microporos. Los macroporos (> 100 µm) suministran drenaje y aireación, microporos (<30 µm) retención de agua del suministro [32].

2.2. Tamaño de partícula en sustratos

En algunos materiales utilizados como sustratos se ha determinado que el tamaño de partícula influye en la relación agua-aire, ya sea solo o mezclado [31]. 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 [33]. Los sustratos fabricados para la producción de hortalizas se presentan en diversas formas, como material suelto; partículas, pellets materiales a granel compactado 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 [34], 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 [33].

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 [32]. Los medios utilizados en horticultura generalmente tienen partículas que varían, arbitrariamente, de 0,125 a 6 mm en este tamaño se puede alcanzar un óptimo entre aire y agua disponibles [35].

2.3. Densidad aparente en sustratos

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 a 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 [36]. La densidad aparente 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 [35], es decir el espacio vacío generado por una baja densidad aparente contribuye a poder 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 [34]. Del mismo modo, tienen una porosidad total, una capacidad de retención de agua y una porosidad llena de aire inferiores a las de los medios con un tamaño de partícula diferente a los medios compuestos por tamaños de partículas similares [32], [37], [38].

La densidad aparente puede ser determinada mediante la ecuación 2 [39].

$$D_a \left(\frac{Mg}{cm^3} \right) = \frac{P_s}{V_c} \quad (2)$$

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

2.4. Retención de agua en sustratos

El método más utilizado para determinar la curva de liberación de agua en sustratos es Boodt, Verdonck y Cappaert [40], el cual sigue vigente desde 1974, figura 1. Este permite conocer la curva de liberación de agua del material. La cantidad de agua retenida por el sustrato a 10 cm de tensión matricial corresponde a la capacidad de contenedor después de drenaje libre.

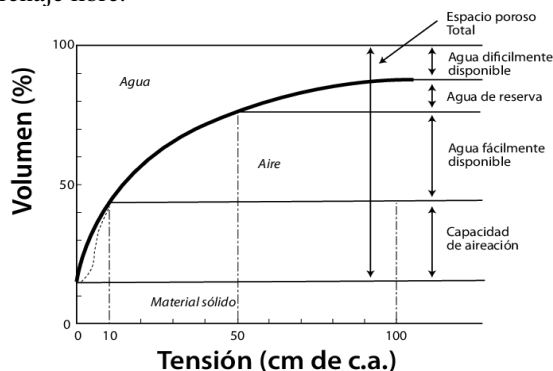


Figura 1: Curva de liberación del agua de un sustrato de Boodt [30].

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. las plantas por ser retenida con excesiva tensión [30].

- **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 1 (propiedades óptimas para un sustrato).
- **Agua de reserva (AR):** Es el 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 1.
- **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.

3. Manufactura aditiva e hidrogeles

La manufactura aditiva (AM), 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 [41]. "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." [12]. 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 [42].

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 [43].

Los hidrogeles ya son utilizados en el tratamiento de heridas dérmicas, por lo general como una forma de vendaje para heridas. la bioimpresión utiliza un dispositivo de impresión 3D CAD para depositar con precisión células y biomateriales en geometrías precisas con el objetivo de crear estructuras anatómicamente correctas [44].

Existen varias técnicas de la manufactura aditiva que ya han sido probadas para la elaboración de hidrogeles para aplicaciones médicas en ingeniería de tejidos [13], [14], [15], que va desde prótesis, injertos de huesos hasta órganos artificiales. Esto demuestra la capacidad de la manufactura aditiva para resolver problemáticas complejas, y de cierto modo da certeza que es posible producir un sustrato de hidrogel mediante estas técnicas.

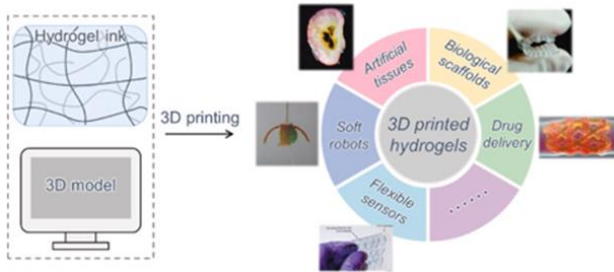


Figura 2: Impresión 3D de hidrogeles y sus aplicaciones versátiles en campos biomédicos y de ingeniería [45].

Los hidrogeles junto con los procesos AM tienen el potencial de crear sustratos de cultivo sin suelo [46], 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 [47]. Lo cual podría ser un área de oportunidad en las ciencias agrícolas sobre todo en el cultivo protegido donde se requiere el uso de sustratos, donde si bien ya se tiene un control sobre los factores abióticos esta implementación permitirá un mayor dominio sobre las propiedades y cuidados de cada cultivo, es posible manipular el tamaño, geometría y porosidad no menor a 50 μm de cada partícula modelada, logrando una reproducción más homogénea sin necesidad de caracterizar el sustrato en cada lote. Tabla 2.

Modelos propuestos	parámetros
	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad: 100 μm. • Tamaño de partícula: 5 mm. • Porosidad interconectada.
	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad: 200 μm • Tamaño de partícula: 2.5 mm • Porosidad interconectada
	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad 100-500 μm • Tamaño de partícula: 5 mm • Porosidad interconectada

Tabla 2: prototipos de partícula propuestos para su uso como sustrato.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las propiedades físicas en los sustratos son de vital importancia para tener un mejor control y manejo a lo largo

del ciclo de cultivo, siempre debe existir un balance entre capacidad de aireación y retención de humedad, el cual puede ser obtenido si controlamos el tamaño distribución y porosidad de cada partícula, tecnologías como la manufactura nos permite crear geometrías con una alta precisión y reproducibilidad, dicha tecnología puede tener un gran impacto el diseño de sustratos, yendo de la mano con un buen material como hidrogeles derivados de polisacáridos con excelentes propiedades químicas y biológicas, teniendo un diseño que pueda ser altamente reproducible y un material que cumpla con dichas propiedades podríamos aproximarnos en la obtención de un sustrato ideal por lo que se buscara trabajar con estos materiales en futuras investigaciones.

4. REFERENCIAS

- [1] FAO, *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*, 1st ed. Roma.
- [2] *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.
- [3] 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.
- [4] C. : Ingeniería *et al.*, "Que presenta la C. MONTIEL MONTIEL YURIDIA N° de Control '12870093,'" 2016.
- [5] N. Gruda, "Sustainable peat alternative growing media," *Acta Hort.*, 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/B978-044452975-6.50010-1.
- [8] 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.
- [9] O. Adriaes 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.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] m resh Howard, *CULTIVOS HIDROPONICOS Nuevas técnicas de producción*, 5th ed., vol. 1. Barcelona: Mundi-prensa, 2001.
- [17] C. A. G. and J. M. G. María Fernanda, *Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte*. 2011.
- [18] A. Prácticos Esperiencias and C. M. Baixauli Soria José Aguilar Olivert, "Cultivo sin Suelo de Hortalizas".
- [19] F. Pedro and R. Dolores, "Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo." pp. 3–42.
- [20] A. R. Campaña, "Fitotóxicos como alternativa a herbicidas contaminantes".
- [21] 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.
- [22] 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".
- [23] 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.
- [24] U. Brückner, "Physical properties of different potting media and substrate mixtures - Especially air-and water capacity," *Acta Horti*, vol. 450, pp. 263–270, 1997, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.1997.450.31.
- [25] 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.
- [26] 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/>
- [27] M. Leonardo, "Manejo de sustratos para el cultivo de plantas en contenedores." Ministerio de agricultura, ganadería y pesca.
- [28] "¿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/>
- [29] 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.
- [30] 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
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] "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
- [34] 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.

- [35] 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. pp. 1008–1017, Jul. 2015, doi: 10.2136/SSSAJ2015.03.0097.
- [36] J. Caron, S. Pepin, and Y. Périard, “Physics of growing media in a green future,” *Acta Hortic*, vol. 1034, pp. 309–318, 2014, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.2014.1034.38.
- [37] P. Florian and D. Roca, “Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo,” 2011.
- [38] F. Lemaire, “PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF GROWING MEDIUM,” *Acta Hortic*, no. 396, pp. 273–284, Mar. 1995, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.1995.396.33.
- [39] 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.
- [40] M. De Boodt, O. Verdonck, and I. Cappaert, “METHOD FOR MEASURING THE WATERRELEASE CURVE OF ORGANIC SUBSTRATES,” *Acta Hortic*, no. 37, pp. 2054–2063, Sep. 1974, doi: 10.17660/ACTAHORTIC.1974.37.20.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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,