

## Aplicación del escaneo 3D para la caracterización de lechugas en invernadero

Armando Figueroa-Martínez, Coral Martínez-Nolasco,  
Víctor M. Sámano-Ortega, José G. Zavala-Villalpando,  
Juan P. Aguilera-Álvarez

Tecnológico Nacional de México, Guanajuato,  
México

(M2403011, coral.martinez, victor.ortega,  
jg.zavala, juan.aguilera)@itcelaya.edu.mx

**Resumen.** En este artículo se explora la eficacia de la tecnología de escaneo 3D para dimensionar con precisión la lechuga en invernaderos. Se utilizó un escáner Revopoint para capturar de forma no destructiva datos tridimensionales de muestras de lechuga. Las mediciones lineales de puntos arbitrarios extraídos de los escaneos se compararon con mediciones físicas para validar la precisión. Además, se propuso un método novedoso para extraer áreas de superficie y medidas máximas a lo largo de los ejes de la lechuga escaneada se aporta una metodología que reduce la complejidad de uso y tiempo de puesta a punto. Los resultados indican que el escaneo 3D produce mediciones con una precisión promedio superior al 90% en comparación con las mediciones físicas. Este enfoque proporciona una alternativa confiable y precisa para dimensionar el tamaño de la lechuga en ambientes de invernadero, con implicaciones potenciales para la agricultura de precisión y la optimización de procesos agrícolas.

**Palabras clave:** Agricultura, escáner 3D, crecimiento, lechuga, caracterización, medición.

### Application of 3D Scanning for Characterization of Lettuce in Greenhouses

**Abstract.** En this article, the effectiveness of 3D scanning technology for accurately sizing lettuce in greenhouses is explored. A Revopoint scanner was used to capture three-dimensional data from lettuce samples in a non-destructive manner. Linear measurements of arbitrary points extracted from the scans were compared with physical measurements to validate accuracy. Additionally, a novel method was proposed for extracting surface areas and maximum measurements along the axes of the scanned lettuce, providing a methodology that reduces complexity of use and setup time. The results indicate that 3D scanning produces measurements with an average accuracy exceeding 90% compared to physical measurements. This approach offers a reliable and precise alternative for sizing lettuce in greenhouse environments, with potential implications for precision agriculture and agricultural process optimization.

**Keywords:** Agriculture, 3D scanner, growth, lettuce, characterization, measure.

## 1. Introducción

Conforme pasa el tiempo, el mundo requiere una mayor cantidad de alimentos debido a ello, las técnicas en diversos sectores de producción han requerido mejoras y cambios. Dentro de las técnicas actuales, la agricultura protegida se encuentra entre los enfoques intensificados para la producción de alimentos, dado que es medible a través de diversas métricas, entre las cuales se encuentran insumos materiales, rendimientos por unidad de área, consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero y costo [1]. También permite controlar de forma parcial o total el microclima y la protección de diferentes elementos ambientales, biológicos y climatológicos para mejorar la producción. Los cultivos de agricultura protegida generalmente logran un mayor rendimiento en comparación con cultivos convencionales [2]. Hoy en día, la agricultura protegida suele ser una base para diversos fines, por ejemplo, su uso en la investigación de la biología vegetal o con fines de comercialización.

Dentro de los cultivos más comunes están el tomate, la lechuga, el apio, el cilantro y el perejil [3]. El uso de este tipo de metodología para el cultivo ha sido acelerado; tan solo en 2020 se estima que la hidroponía en invernadero, que es una técnica representativa de agricultura protegida, tuvo un valor de 2.2 billones de dólares y su CAGR (Compound Annual Growth Rate) entre 2018 y 2021 fue de aproximadamente el 20.7% [4]. Sin embargo, la agricultura protegida aun presenta problemáticas en comparación con las técnicas de cultivo tradicional por ejemplo las lechugas cultivadas mediante técnicas de agricultura protegida poseen menor cantidad de antioxidantes esto se traduce en menor duración de forma óptima tras ser cortadas [5].

Por esta razón existe aún la necesidad de realizar contribuciones en el campo de la caracterización de los cultivos protegidos de manera que pueda reunirse más información y mejorar las técnicas de extracción de datos. En ámbito de la medición de crecimiento se tienen problemáticas con las técnicas actuales como el requerimiento de tiempo excesivo para la captura de datos [6]. Ante esta dificultad surgieron nuevos enfoques haciendo uso de nuevas tecnologías como la inteligencia artificial, en [6] se presenta un ejemplo de esta metodología. Algunos otros autores usan enfoques más convencionales como métodos lógicos que combinados con instrumentación como se describe en [7] también han logrado obtener buenos resultados.

Si bien estas herramientas permiten la identificación rápida y reducción del tiempo en la extracción de datos también aumentan en complejidad de conocimientos lo que dificulta la integración para especialistas de otras ramas distintas a la inteligencia artificial o procesamiento de imágenes. En el sentido del dimensionamiento/medición, el escaneo 3D ha demostrado ser una tecnología que entrega resultados con precisión y exactitud; es una herramienta esencial para los productores que necesitan una inspección dimensional precisa, imágenes virtuales, análisis e incluso fabricación de prototipos físicos [8].

El escaneo 3D aún tiene la posibilidad de explotar sus beneficios en áreas como la agricultura protegida, ya que las diferentes investigaciones que se han realizado suelen hacer uso de escaneo mediante cámaras de profundidad u otras tecnologías, y pocas veces se destaca el uso de algún escáner 3D comercial, abriendo así áreas de

**Tabla 1.** Ponderación de atributos.

	<b>Precisión</b>	<b>Velocidad de escaneo</b>	<b>Distancia de trabajo</b>	<b>Extracción de texturas</b>	<b>Precio</b>
Precisión	1/1	7/1	5/1	5/1	3/1
Velocidad de escaneo	1/7	1/1	3/1	1/5	1/5
Distancia de trabajo	1/5	1/3	1/1	1/3	1/5
Extracción de texturas	1/5	5/1	3/1	1/1	1/3
Precio	1/3	5/1	5/1	3/1	1/1

oportunidad como metodologías y análisis de parámetros para selección de escáner, comprobación de la fiabilidad de escáneres comerciales aplicados a cultivos y la virtualización de cultivos más realistas [9].

Por ello, el aporte de esta investigación es principalmente ejemplificar el uso de un escáner comercial para la caracterización de lechugas crecidas en invernadero, principalmente recolectando datos dimensionales y manteniendo una buena precisión y exactitud. A diferencia de otras investigaciones, no se utilizan sistemas basados en cámaras fotográficas que requieran un montaje y programación [10]. Además, se incluye la extracción de texturas con el escaneo 3D para una visualización más realista.

En comparativa con las técnicas usadas en otras investigaciones, el método propuesto también permite la portabilidad y la poca manipulación del cultivo al momento de realizar el escaneo. Además, es necesario resaltar que es una técnica no invasiva e "in situ", y que posibilita el envío de datos de manera inalámbrica haciéndose uso de baterías como fuente de alimentación.

Por otro lado, no existe la necesidad de un proceso de aprendizaje por parte del sistema, y el tiempo necesario para la captura es menor [11]. Debido a lo anterior el desarrollar esta propuesta permite una exploración inicial de métodos más eficientes y sencillos de utilizar en la caracterización de cultivos.

La caracterización de cultivos presentada es una alternativa importante dado existe una creciente demanda de alimentos y dificultades climáticas que impactan en las cosechas, requiriendo generar un conocimiento y mayor entendimiento de los cultivos para poder ejercer una mejora en el manejo de recursos o cuidado de los diferentes tipos de frutos y cultivos.

Así pues, puede concluirse que es relevante iniciar en la exploración del potencial del escaneo 3D al ser una herramienta que puede ayudar a entender mejor los cultivos y de esta manera de forma indirecta optimizar recursos agrícolas, mejorar la resiliencia ante condiciones climáticas adversas, aumentar la calidad y rendimiento de los cultivos, impulsar la investigación y desarrollo agrícola, y contribuir a la seguridad alimentaria en un contexto de creciente demanda y desafíos climáticos antes mencionada.

Finalmente, cabe destacar que dentro de los objetivos de la investigación están: proponer una alternativa de recolección y extracción de características dimensionales mediante el uso del escaneo 3D, reduciendo el tiempo de puesta en marcha del sistema y con mayor facilidad de uso. También se permite integrar modelos visualmente más

representativos de los cultivos reales para la virtualización y en formatos estandarizados que aporten a trabajos futuros en el ámbito de los gemelos digitales.

La estructura y contenido del artículo se divide en 5 secciones 1) En la introducción se presenta información sobre los cultivos en invernadero y la manera actual para caracterizarlos, principalmente en términos de dimensiones y formas, así como algunos trabajos relacionados y la diferencia con el presente en aporte. 2) Trabajos relacionados; se trata de manera más específica las tecnologías y métodos para la caracterización y dimensionamiento usados en otros trabajos afines. 3) Metodología: se expone principalmente la forma de selección del escáner utilizado, posteriormente se explica y muestra el diseño de pruebas realizadas. 4) Resultados: se muestran y concentran los datos obtenidos de diversos escaneos y pruebas efectuadas; con distintas finalidades.

## 2. Trabajos relacionados

Debido a que en el dimensionamiento de cultivos de lechuga se presentan diversas técnicas aplicadas, se realizó una exploración inicial. A continuación, se expone una recopilación de trabajos enfocados en esta área. Es fundamental destacar que estos trabajos no se limitan exclusivamente al ámbito de la agricultura protegida, sino que abordan el dimensionamiento y la representación tridimensional mediante diversas tecnologías. El propósito es llevar a cabo una primera aproximación a las herramientas disponibles en este campo. Las diversas investigaciones se agrupan acorde a sus herramientas o tecnologías características.

### 2.1. Uso del sensor kinect

De [12] se puede concluir que el artículo se centra en la medición de plantas utilizando el sensor Kinect como sistema de adquisición. La relevancia de este estudio radica en su enfoque en el proceso de calibración, ya que el sistema puede calibrarse de forma autónoma. Sin embargo, es importante destacar que este sistema, aunque útil, se basa en conceptos técnicos avanzados de álgebra lineal y cálculo vectorial. Esto implica que su replicación requiere una mayor inversión de tiempo en la curva de aprendizaje inicial. Además, se han reportado errores de hasta un 10% en las mediciones realizadas para verificar el sistema propuesto.

### 2.2. Uso de cámaras RealSense D415

Dentro de [13], se examina un huerto inteligente desde diversos aspectos económicos y morfológicos. En cuanto al dimensionamiento, destaca la capacidad de recopilar datos de manera autónoma en forma de nubes de puntos cada 15 minutos.

Se propone el uso de cámaras RealSense D415, las cuales emplean la técnica de visión estéreo para capturar imágenes de profundidad, RGB e IR. Todo el proceso de comunicación se realiza a través de computación en la nube utilizando la plataforma Azure, lo que implica la necesidad de acceso a internet, conocimientos de programación y manejo de plataformas en la nube. En sistemas con la misma base, se encuentra como limitante la incapacidad de generar nubes de puntos desde diferentes perspectivas debido a que las cámaras están fijadas en su lugar.

**Tabla 2.** Características escáner.

Atributo	Valor
Precisión	0.1 mm
Velocidad de escaneo	16 fps
Distancia de trabajo	400 - 1300 mm
Extraction de texturas	Si
Precio	799 dólares

Zhiyan et al. en [14] explora un objetivo y metodología distintos al concentrarse en una técnica individual de escaneo de cultivo de hojas de maíz. Para la reconstrucción del cultivo en 3D, se basan en capturar cada 45 grados de rotación para posteriormente usar un procesamiento de imágenes basado en el algoritmo de Otsu, que básicamente permite segmentar las imágenes. Una vez se realiza esto, se propone la fusión de imágenes por pares hasta lograr el modelo 3D. El autor reporta errores de hasta el 16% en las mediciones virtuales comparadas con las medidas manuales del cultivo físico.

### 2.3. Investigaciones basadas en técnicas de escaneo 3D

Dentro de las investigaciones que hacen uso de escáner 3D se encuentra [15]. En esta, se propone el uso de un escáner tipo Artec Space Spyder; no obstante, se limita al escaneo de la geometría, y el escaneo de textura o colores se realiza de manera independiente mediante captura de imágenes 2D. Posteriormente a esto, propone métodos de estimación de crecimiento. Los autores no presentan comparativas con mediciones físicas del objeto.

Las investigaciones basadas en técnicas de escaneo 3D han facilitado la recopilación de datos sobre diversas variables indirectas de los cultivos. Por ejemplo [16] en este trabajo se emplean cámaras de profundidad para realizar escaneos de suelo, centrándose en la clasificación de los escaneos según sus dimensiones de altura. Los datos obtenidos a través de estos escaneos son utilizados para estimar la erosión del suelo, lo que permite al investigador determinar su idoneidad para el cultivo. Es importante destacar que las pruebas se realizaron en pequeñas muestras de suelo y no en un entorno real.

Las distintas investigaciones involucran metodologías de puesta a punto tediosas para usuarios inexpertos requieren además en ocasiones una cantidad preliminar de datos para entrenamientos del sistema o el desarrollo de sistemas de automatización laboriosos y poco portables. Estas diversas problemáticas son reducidas con la propuesta realizada de caracterización mediante escáner 3D al ser un dispositivo de uso rápido, portable al poseer baterías, curva de aprendizaje menor comparada con otras propuestas. En términos de desventajas se encuentra pocas posibilidades de manejo de software del fabricante al no ser de código abierto, así como la sensibilidad ante malas iluminaciones para recoger correctamente la textura de los cultivos.

## 3. Metodología

El enfoque metodológico se orientó hacia la exploración de cultivos, utilizando lechugas como objeto de estudio y empleando la técnica de escaneo 3D a través de un



Fig. 1. Plataforma giratoria para escaneo.

escáner comercial. El principal propósito fue evaluar la fiabilidad del método propuesto y obtener mediciones precisas del área superficial, así como modelos 3D realistas que incluyan texturas. La metodología se divide en dos secciones principales. En primer lugar, se ejecutó una comparación entre dos modelos comerciales de escáneres, junto con la definición de los requisitos básicos para las pruebas planificadas.

La segunda fase de la metodología comprende la descripción detallada de las pruebas, dividida principalmente en dos procesos. El primer proceso consistió en la evaluación de la precisión del método mediante la comparación con mediciones físicas de las lechugas escaneadas. Posteriormente, se extraen mediciones automatizadas de áreas superficiales mediante programación de alto nivel, como un enfoque complementario.

### 3.1. Selección del scanner y aditamentos

Para la selección del escáner, se aplicó el método analítico jerárquico como marco de referencia, determinando la importancia de los parámetros mediante su ponderación (Ver Tabla 1) para seleccionar el parámetro clave.

Los atributos considerados para este propósito fueron: precisión, velocidad de escaneo, distancia de trabajo, capacidad de extracción de texturas y precio. Los resultados del análisis de la Tabla 1 se muestran en la ecuación 1. De ella se concluye que el atributo más determinante para la selección del escáner será la precisión, seguido del precio:

$$\begin{matrix}
 \text{Precisión} \\
 \text{Velocidad de escaneo} \\
 \text{Distancia de trabajo} \\
 \text{Extracción de texturas} \\
 \text{Precio}
 \end{matrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0.4734 \\
 0.0741 \\
 0.0522 \\
 0.1462 \\
 0.2541
 \end{bmatrix}
 \quad (1)$$

Tras el análisis de los atributos, se consideraron dos modelos de escáner para la comparación: el Range 2 y el Pop 2, ya que ambos son escáneres manuales de bajo costo. La decisión se basó principalmente en la precisión; se observó que el Range 2

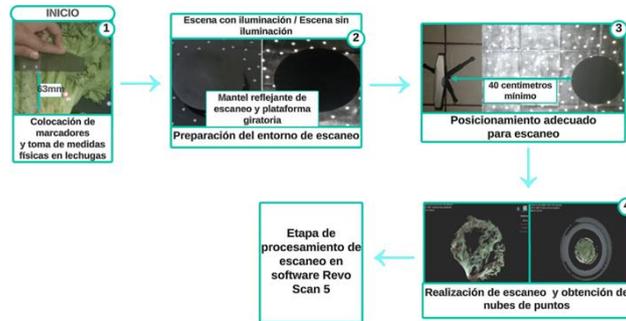


Fig. 1. Proceso de la etapa física de las pruebas.



Fig. 2. Proceso de la etapa de procesamiento de escaneos.

tiene una precisión de 0.1 mm [17], mientras que el Pop 2, según el fabricante, tiene una precisión ligeramente inferior de 0.15 mm.

Es relevante destacar que este parámetro, al ser evaluado en términos cuantitativos, es casi el doble de importante que el segundo parámetro (precio), tal como se observa en la ecuación 1. Los atributos del escáner seleccionado se concentran en la Tabla 2 [18]. Como siguiente paso, se requirió la incorporación de una plataforma giratoria (Ver Fig. 1). En este caso, la selección se centró en una plataforma que pudiera funcionar con un consumo mínimo de energía y de manera inalámbrica. La opción seleccionada tiene una velocidad de 7 rpm y un diámetro de 20 cm.

### 3.2. Diseño de pruebas

El diseño experimental se estructuró en dos fases distintas. Durante la primera etapa, se tomaron mediciones tanto físicas como virtuales con el propósito de evaluar la confiabilidad del escáner.

En la segunda fase, se elaboró un script destinado al análisis de las áreas superficiales de los escaneos, así como a la medición de las dimensiones máximas en los tres ejes cartesianos ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

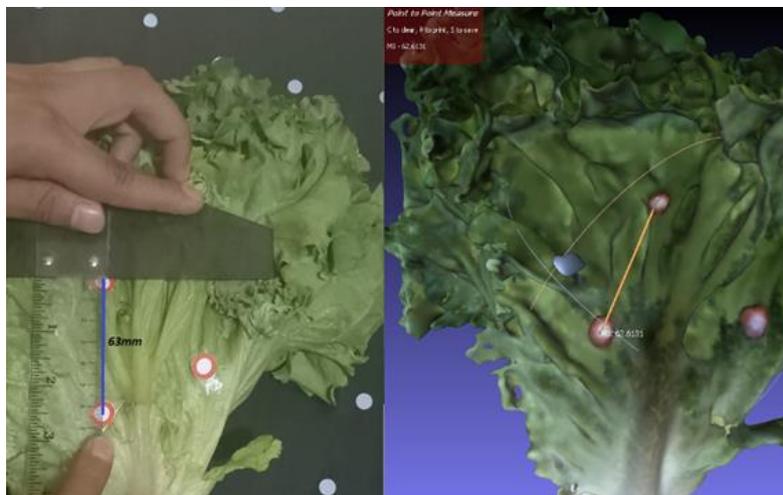


Fig. 4. Comparativa de mediciones físicas vs virtuales.

**Pruebas de fiabilidad.** Para la etapa de verificación de la fiabilidad, se realizaron escaneos de un conjunto de cinco lechugas. Este proceso se dividió en varios pasos: la etapa física y la etapa de procesamiento de los escaneos. El primer conjunto de pasos comenzó con la colocación de marcadores utilizados como referencia tanto para las mediciones físicas como para las virtuales.

Posteriormente, se procedió a preparar el entorno de escaneo, garantizando la ausencia de objetos que pudieran interferir y manteniendo una iluminación tenue para asegurar resultados óptimos. Además, se estableció una distancia mínima de aproximadamente 40 centímetros entre la plataforma giratoria y el escáner (ver Fig. 2).

La etapa de procesamiento de los escaneos se lleva a cabo en una serie de pasos estructurados para llegar desde la nube de puntos hasta los archivos obj y ply dichos archivos son usados comúnmente para almacenar información de figuras y geometrías 3D la diferencia radica en que los ply son más compactos (ver Fig. 3). La ejecución de los pasos se lleva a cabo en el software Revo Scan 5 dichos pasos se describen a continuación:

1. **Eliminación de puntos basura:** Esta etapa se enfoca en eliminar los datos que no son relevantes para el objeto de escaneo.
2. **Fusión de nube de puntos:** Esta operación permite combinar los datos del escaneo para generar una nube de puntos más precisa.
3. **Aislamiento de puntos:** El software detecta puntos aislados dentro de los conjuntos de puntos, lo que facilita la eliminación de datos que no pertenecen al modelo y no son visibles a simple vista.
4. **Detección de superposición:** Consiste en identificar puntos superpuestos y eliminarlos del modelo.
5. **Suavizado:** Esta operación tiene como objetivo eliminar el ruido y las imperfecciones locales del modelo.

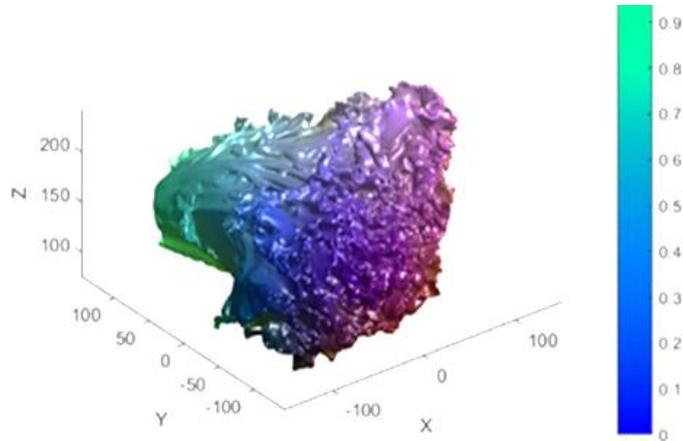


Fig. 5. Gráfico 3D de escaneo.

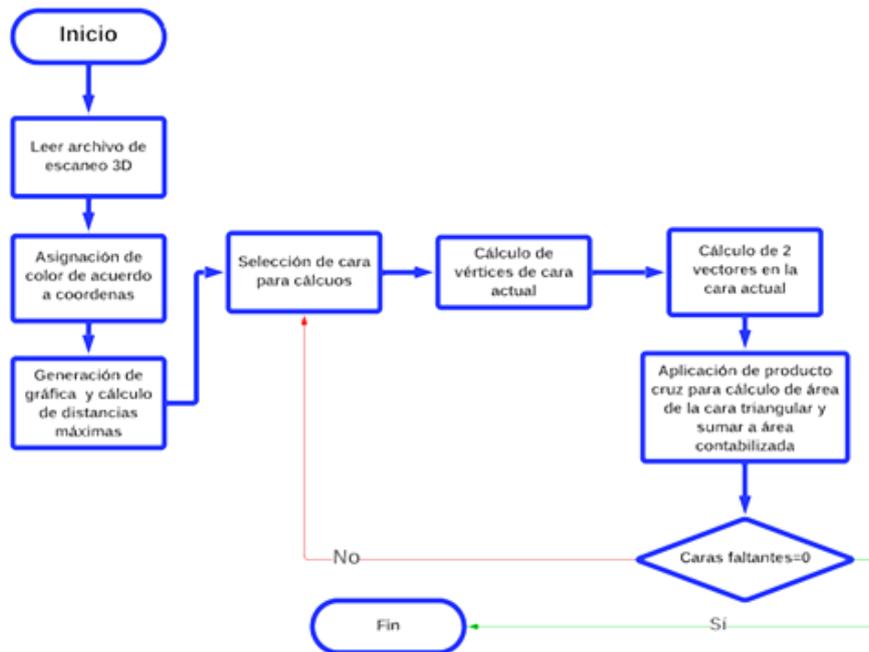


Fig. 6. Diagrama de flujo de estimación de área superficial

6. **Simplificación:** Se reduce el número de datos para mejorar el rendimiento de renderizado y la velocidad de procesamiento.
7. **Fusión de nubes de puntos:** Se refiere al proceso de combinar dos nubes de puntos procesadas en una sola para obtener un modelo mejorado.
8. **Construcción de la malla:** Esta etapa consiste la creación de una malla continua a partir de las nubes de puntos obtenidas.

Una vez finalizados los pasos de procesamiento del escaneo, el modelo fue exportado en formato ply y obj. Estos formatos se usaron posteriormente para realizar mediciones virtuales mediante el software MeshLab y compararlas con las mediciones físicas (Ver Fig. 4).

**Medición de área superficial.** La medición del área superficial se realizó utilizando los archivos obtenidos de los escaneos 3D. Esto implicó la estimación de áreas superficiales y su representación en un gráfico tridimensional, lo que facilitó la extracción de las medidas máximas en los diferentes ejes (Ver Fig. 5). El procedimiento para realizar estas mediciones se llevó a cabo mediante un script de MATLAB. Este script se encargó de asignar colores a los diferentes vértices y caras según las coordenadas en cada uno de los ejes, mientras realizaba el cálculo de las distancias máximas en los ejes coordenados. El siguiente proceso consiste en iterar en cada una de las caras y vértices para obtener una sumatoria y así calcular el valor del área superficial (Ver Fig. 6).

## 4. Resultados

Los resultados de las pruebas de fiabilidad comprenden 5 escaneos, de los cuales se extrajeron 3 medidas de referencia, las cuales fueron comparadas con mediciones virtuales (Ver Tabla 3). La mayoría de las mediciones realizadas presentan una exactitud superior al 90%.

Los valores de exactitud promedio para todos los escaneos se sitúan por encima del 95%. Es importante señalar que las medidas están expresadas en milímetros y fueron definidas como puntos de referencia de manera arbitraria. Los resultados del área superficial, junto con las distancias máximas entre puntos en cada eje, se presentan de manera concisa en la tabla 4.

No obstante, se observó una variación en los valores de las coordenadas dependiendo de la posición en la que se coloque el escaneo 3D al momento de la importación. Aunque los datos exhiben coherencia entre los valores del área y las medidas en los diferentes ejes, es esencial destacar la necesidad de aplicar métodos físicos en futuros trabajos para verificar estas mediciones de manera precisa.

Por último, también es visible que los resultados virtuales son más realistas en términos de texturas y colores al realizarse el escaneo 3D, como se muestra en la Figura 7.

## 5. Conclusiones y trabajos futuros

En este artículo se presenta una alternativa para la extracción de características de cultivos de lechugas, la cual demostró tener un acercamiento significativo a los valores reales en términos dimensionales. Con esto, se concluye que el escaneo 3D es una técnica que merece ser explorada en mayor profundidad, aplicada al estudio de la agricultura protegida. Además, se ejemplificó que es posible obtener estimaciones de áreas superficiales mediante este método.

**Tabla 3.** Resultados comparativos de mediciones reales y virtuales.

No. Lechuga	Medidas reales (mm)	Medidas virtuales (mm)	Exactitud %	Exactitud % Promedio
1	63	62	98.42	92.56
	62	66	93.55	
	56	64	85.72	
2	66	66.5	99.25	98.05
	107	108	99.07	
	48	50	95.84	
3	63	65	96.83	96.09
	59	63	93.23	
	47	45	95.75	
4	65	67	96.93	97.84
	61	60	98.37	
	56	55	98.22	
5	49	51	95.72	97.38
	60	59	98.34	
	104	106	98.08	

**Tabla 4.** Resultados de área superficiales y medidas máximas en ejes.

No. Lechuga	Área superficial cm <sup>2</sup>	Valor máximo de grafica (x, y, z) cm
1	3465.5	30.5
		28.9
		16.6
2	4397.5	34.2
		38.5
		20.6
3	5303.1	36
		27.4
		23.5
4	3747.2	34.7
		25.12
		22.9
5	3643.3	30.5
		26.8
		15.9

Sin embargo, es crucial llevar a cabo más investigaciones en este campo para corroborar la repetibilidad de las pruebas y métodos propuestos, incluso utilizando diferentes equipos de escaneo y durante períodos más prolongados de la vida de los cultivos y en diversas etapas de su crecimiento. Es importante señalar que una vertiente del presente trabajo que queda pendiente de comprobación en términos de exactitud es la estimación del área superficial y las mediciones de longitudes máximas en los ejes. Estas últimas requieren métodos invasivos para poder ser realizadas de manera física, razón por la cual podrían plantearse en investigaciones a futuro.

Por otra parte, las ventajas que se demuestran en la metodología de este artículo están la capacidad de extracción de características de cultivos sin necesidad de una curva de



**Fig. 7.** Resultados de modelo virtualizado realista.

aprendizaje elevada, la recolección de texturas más acordes a los cultivos físicos, la poca infraestructura y equipo comparado con otras metodologías, y finalmente que es un procedimiento fiable en mediciones lineales y sin necesidad de ser invasivo para el cultivo a escanearse.

Siguiendo en el contexto de trabajos futuros, este artículo pretende ser un punto de partida para el desarrollo de gemelos digitales en formato 3D, enfocados en mejorar la gestión y generación de conocimientos de la agricultura protegida, principalmente de lechugas. Esto incluiría no solo el monitoreo en una etapa de crecimiento de los cultivos, sino también la caracterización del crecimiento desde etapas tempranas hasta la cosecha, permitiendo así desarrollar una base de información que contribuya a la mejora de la agricultura protegida.

## Referencias

1. Villagrán, E., Romero-Perdomo, F., Numa-Vergel, S., Galindo-Pacheco, J.R., Salinas-Velandia, D.A.: Life Cycle Assessment in Protected Agriculture: Where are we Now, and Where Should we Go Next? *Horticulturae*, vol. 10, no. 1, pp. 15–49 (2023). DOI: 10.3390/horticulturae10010015.
2. Negra, C., Pratt, L., Manuel-Ortega, J., House, K., Qadir, U.: Protected Agriculture: Mexico the Climate Bonds Standard and Certification Scheme's Protected Agriculture Criteria for Mexico (2019)
3. López-Elías, J.: La producción hidropónica de cultivos. *Idesia (Arica)*, vol. 36, no. 2, pp. 139–141 (2018). DOI: 10.4067/s0718-34292018005000801.
4. Sanchaya, S., Saritha, M., Bhaskar, M., Leul, T., Anushri, T., Subham, A., Anish, J.: Research on Hydroponics Farming. *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 4, no. 4, pp. 825–832 (2023)
5. Lei, C., Engeseth, N.J.: Comparison of Growth Characteristics, Functional Qualities, and Texture of Hydroponically Grown and Soil-Grown Lettuce. *LWT*, vol. 150, pp. 111931 (2021). DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111931.
6. Lei, C., Engeseth, N.J.: Comparison of Growth Characteristics, Functional Qualities, and Texture of Hydroponically Grown and Soil-Grown Lettuce. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*, vol. 150, pp. 111931 (2021). DOI: 10.1016/j.lwt.2021.111931.

7. Wang, Y., Wu, M., Shen, Y.: Identifying the Growth Status of Hydroponic Lettuce based on YOLO-Efficientnet. *Plants*, vol. 13, no. 3, pp. 372–384 (2024). DOI: 10.3390/plants13030372.
8. Ma, Y., Zhang, Y., Jin, X., Li, X., Wang, H., Qi, C.: A Visual Method of Hydroponic Lettuces Height and Leaves Expansion Size Measurement for Intelligent Harvesting. *Agronomy*, vol. 13, no. 8, pp. 1996–2013 (2023). DOI: 10.3390/agronomy13081996.
9. Javaid, M., Haleem, A., Pratap-Singh, R., Suman, R.: Industrial Perspectives of 3D Scanning: Features, Roles and its Analytical Applications. *Sensors International*, vol. 2, pp. 100114 (2021). DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100114.
10. Wada, K.C., Hayashi, A., Lee, U., Tanabata, T., Isobe, S., Itoh, H., Maeda, H., Fujisako, S., Kochi, N.: A Novel Method for Quantifying Plant Morphological Characteristics using Normal Vectors and Local Curvature Data Via 3D Modelling—A Case Study in Leaf Lettuce. *Sensors*, vol. 23, no. 15, pp. 6825 (2023). DOI: 10.3390/s23156825.
11. Xiang, L., Wang, D.: A Review of Three-Dimensional Vision Techniques in Food and Agriculture Applications. *Smart Agricultural Technology*, vol. 5, pp. 100259 (2023). DOI: 10.1016/j.atech.2023.100259.
12. Koyama, K.: Leaf Area Estimation by Photographing Leaves Sandwiched between Transparent Clear File Folder Sheets. *Horticulturae*, vol. 9, no. 6, pp. 709–728 (2023). DOI: 10.3390/horticulturae9060709.
13. Sun, G., Wang, X.: Three-Dimensional Point Cloud Reconstruction and Morphology Measurement Method for Greenhouse Plants based on the Kinect Sensor Self-Calibration. *Agronomy*, vol. 9, no. 10, pp. 596–618 (2019). DOI: 10.3390/agronomy9100596.
14. Petropoulou, A.S., van-Marrewijk, B., de-Zwart, F., Elings, A., Bijlaard, M., van-Daalen, T., Jansen, G., Hemming, S.: Lettuce Production in Intelligent Greenhouses—3D Imaging and Computer Vision for Plant Spacing Decisions. *Sensors*, vol. 23, no. 6, pp. 2929 (2023). DOI: 10.3390/s23062929.
15. Ma, Z., Wan, H., Gan, X.: Research on Crop 3D Model Reconstruction based on RGB-D Binocular Vision. *Scientific Programming*, vol. 2023, pp. 1–10 (2023). DOI: 10.1155/2023/5974981.
16. Shadrin, D., Somov, A., Podladchikova, T., Gerzer, R.: Pervasive Agriculture: Measuring and Predicting Plant Growth using Statistics and 2D/3D Imaging. In: *Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1–6 (2018). DOI: 10.1109/i2mtc.2018.8409700.
17. Kříž, M., Linda, M., Svatoš, J., Hromasová, M.: Application of 3D Cameras in Agriculture when Evaluating the Quality of Soil Tillage. *Research in Agricultural Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 39–49 (2016). DOI: 10.17221/4/2014-rae.
18. REVOPOINT: RANGE 2 3D Scanner. <http://global.revopoint3d.com/pages/handheld-3d-scanner-range2> (2024)
19. REVOPOINT: Revopoint POP 2. <http://www.revopoint3d.com/pages/face-3d-scanner-pop2> (2024)