

MEDICIÓN DE CLADODIOS DE *Opuntia* spp. EN FOTOGRAFÍAS EN TERCERA DIMENSIÓN

MEASUREMENT OF CLADODES OF *Opuntia* spp. IN THREE-DIMENSIONAL PHOTOGRAPHS

Sergio Contreras-Murillo^{1*}, Sergio de-los-Cobos-Silva¹, Roman A. Mora-Gutiérrez¹, Pedro Lara-Velázquez¹, Miguel A. Gutiérrez-Andrade¹, Eric A. Rincón-García¹

¹Posgrado en Ciencias y Tecnologías de la Información. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Dirección: Av. San Rafael Atlixco, núm.186, col. Vicentina, Iztapalapa, Ciudad de México, México, C.P. 09340, A.P. 55-534, (pcyti@xanum.uam.mx) (serconmur@hotmail.com).

RESUMEN

Las especies del género *Opuntia* (nopales) son cactáceas comestibles, nativas de América; sus hojas, transformadas en espinas, dificultan su manejo. En esta investigación se presenta la medición del área de cladodios de *Opuntia* a partir de la toma de fotografías 3D, con la finalidad de que no sea necesario manipular la planta espinosa. El método propuesto es “no destructivo”, el resultado se obtiene de inmediato, puede utilizarse *in situ*, es de bajo costo, emplea tecnología de punta y resuelve los problemas que presentarían los métodos de medición del área foliar citados en la literatura al aplicarse a dichas plantas espinosas. En contraste con las imágenes 2D, con las imágenes 3D se considera la inclinación y curvatura de la muestra para determinar su superficie. La inclinación se calcula vía la regresión lineal múltiple de una muestra al centro de la imagen. La medición de los cladodios permite evaluar el rendimiento de un cultivo, decidir el momento para la cosecha o censar y caracterizar especímenes silvestres. Para evaluar la estrategia se obtuvo el área de 12 cladodios con el método propuesto y otras cinco estrategias contra las que se comparó. El algoritmo presentó una exactitud del 95%, al nivel de las mejores estrategias destructivas, pero sin dañar la planta y presenta el mejor rendimiento en términos del tiempo necesario para obtener un resultado. La base de datos con las imágenes 3D generadas, así como el código fuente pueden descargarse gratuitamente desde el sitio <http://www.serconmur.com/area-foliar-3d.html>.

Palabras clave: *Opuntia*, área foliar, cladodio, integrador, tercera dimensión, regresión lineal múltiple.

ABSTRACT

The species of the genus *Opuntia* (prickly pear) are edible cacti, native to America; its leaves, transformed into spines, make its handling difficult. In this research, we measured the area of *Opuntia* cladodes using 3D photographs in order to avoid the handling of the spinous plant. The proposed *in situ* method is “non-destructive”, it generates immediate results, it is low cost, employs cutting edge technology, and solves the problems that occur with the leaf area measuring methods cited in the references when applied to this spinous plant. Unlike 2D images, 3D images consider the inclination and curvature of the sample to determine its area. By applying multiple linear regression, we can calculate the inclination from a sample to the center of the image. The measurement of cladodes allows us to evaluate the yield of a crop, decide the time for harvest, or survey and characterize wildlife specimens. To evaluate this strategy, we determined the area of 12 cladodes with the proposed method and five other strategies for comparison. The algorithm showed a 95% accuracy, as the best destructive strategies, but without damaging the plant; it also showed the best performance in terms of the time required for a result. The database with the generated 3D images, as well as the source code, can be downloaded for free from <http://www.serconmur.com/area-foliar-3d.html>.

Keywords: *Opuntia*, leaf area, cladode, integrator, three-dimensional, multiple linear regression.

INTRODUCTION

Plants of the *Opuntia* genus belong to the cacti family and are native to América. They are perennial plants, usually shrub-like and spinous with fleshy stems (succulents). Its stem can be defined or branched from the base with

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: noviembre, 2018. Aprobado: julio, 2019.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 54: 177-194. 2020.

INTRODUCCIÓN

Las plantas del género *Opuntia* pertenecen a la familia de las cactáceas y son nativas de América. Son plantas perennes, por lo general arbustiformes y espinosas con tallos carnosos (suculentos). Su tronco es definido o ramificado desde la base con ramas erguidas, extendidas o postradas formadas por artículos o pencas, llamados “cladodios”. Estos pueden ser globosos, cilíndricos o aplanados, muy carnosos o leñosos, de color verde, con funciones fotosintéticas. En ellos se observan hojas transformadas en espinas y flores de colores vivos y brillantes que dan origen a frutos conocidos como “tunas”, que son bayas ovoides cilíndricas. Los nopales poseen características morfológicas y fisiológicas que les permiten almacenar y conservar el agua en sus tejidos, con lo cual sobreviven a la escasez de agua y a las marcadas variaciones de temperatura características de las zonas áridas y semiáridas (Cervantes-Ramírez, 2008).

México es el principal productor de nopales frescos para consumo humano en el mundo, con más de 12 000 ha cultivadas y una cosecha cercana a 825 000 t anuales. China produce nopal a gran escala para el área cosmética. Brasil es el principal productor y exportador de la cactácea como forraje para ganado (La razón de México, 2016).

Los agricultores monitorean el tamaño de las plantas para evaluar su estado y detectar deficiencias en su manejo o predecir el momento ideal de la cosecha. El tamaño de las hojas (área foliar) está directamente relacionada con la capacidad de una planta para absorber la luz solar e intercambiar humedad y CO₂ con su ambiente. En las plantas puede medirse, por ejemplo, el largo, ancho y área de sus hojas, el peso de las hojas frescas, el peso de las hojas secas o el número de hojas por rama (Figura 1). En los nopales, las hojas se encuentran transformadas en espinas y son los cladodios los que pueden medirse.

Las técnicas de medición se dividen en destructivas y no destructivas. En los métodos destructivos la hoja se corta para medirla en un laboratorio, en los no destructivos la hoja se mide *in situ*, sin separarla de la planta. Los métodos destructivos ofrecen mayor exactitud, pero a costa de dañar la planta.

Para medir el área foliar a través de la toma de fotografías 2D la muestra se aplanar entre una hoja de acrílico transparente y otra con un patrón que permita determinar la escala en la imagen. Los píxeles se

erect, extended, or prostrated branches formed by paddles, called “cladodes.” Cladodes can be globose, cylindrical, or flattened, very fleshy or woody, green-colored, with photosynthetic function. Cladodes have leaves transformed into spines and bright-colored flowers that give rise to fruits known as “prickly pear fruits”, which are cylindrical ovoid berries. Prickly pears possess morphological and physiological characteristics that allow them to store and preserve water in its tissues, thereby surviving water scarcity and the marked temperature variations characteristic of arid and semiarid areas (Cervantes-Ramírez, 2008).

Mexico is the leading producer of fresh prickly pear cactus for human consumption in the world, with more than 12 000 ha cultivated and an annual production of 825 000 t. China produces prickly pear cacti at large scale for cosmetic uses. Brazil is the largest producer and exporter of this cactus as fodder for cattle (La razón de México, 2016).

Farmers monitor the size of the plants to evaluate their status and detect deficiencies in their handling or predict the ideal time of harvest. The size of the leaves (leaf area) correlates with the plant capacity to absorb sunlight and exchange moisture and CO₂ with their environment. From plants, for example, we can measure the length, width, and area of their leaves, the weight of fresh leaves, the weight of dry leaves or the number of leaves per branch (Figure 1). Prickly pears have leaves transformed into spines, so we measure the cladodes.

The measuring techniques can be destructive or non-destructive. For the destructive methods, it is required to cut the leaves in order to measure them in the laboratory; in non-destructive methods, we can measure leaves *in situ*, without separating them from the plant. Destructive methods are more accurate but damage the plant.

Measuring of the leaf area employing 2D photography requires the sample to be flattened between two transparent acrylic sheets, one with a pattern that allows determining the scale in the image. Pixels are counted with software and converted to square units. This technique requires that the sample is parallel to the camera when taking a photograph (Figure 2).

Moreover, there are scanners, called integrators, specialized in measuring leaves with different shapes and sizes, but they are all designed to measure thin

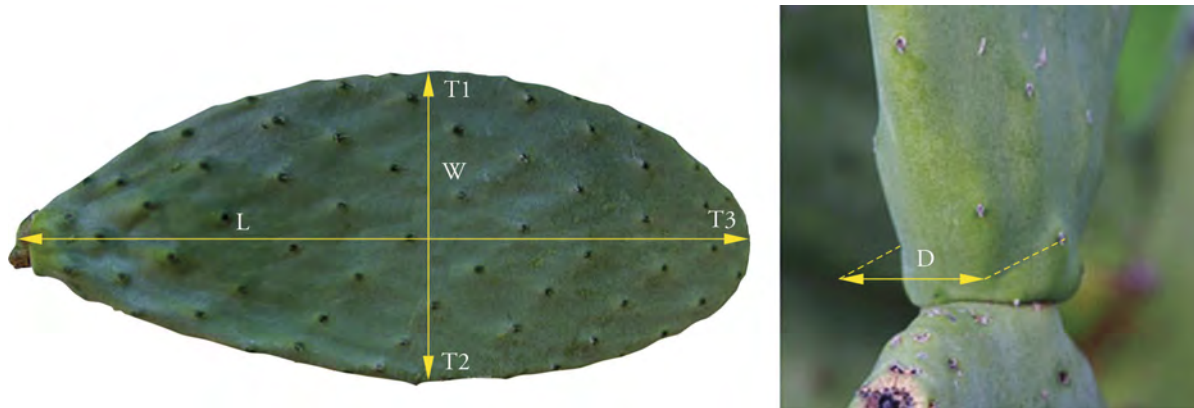


Figura 1. Parámetros biométricos medidos en los cladodios de *Opuntia ficus-indica*. L: Largo; W: Ancho; T: Espesor medio (obtenido de la media aritmética de los puntos T1, T2 y T3); D: Diámetro del cuello (Gaspar *et al.*, 2018).
Figure 1. Biometric parameters measured in the *O. Ficus-Indica* cladodes. L: Length; W: Width; T: Mean thickness (obtained from the arithmetic mean of points T1, T2, and T3); D: Diameter of the neck (Gaspar *et al.*, 2018).

cuentan con un software y se convierten a unidades cuadradas. Esta técnica requiere que la muestra esté paralela a la cámara al momento de tomar la fotografía (Figura 2).

Además, hay escáneres especializados en medir hojas llamados integradores, en diversas formas y tamaños, pero todos ellos diseñados para medir muestras delgadas. El precio de estos equipos ronda los 10 000 USD (Kosmos Scientific de México, 2018) (Figura 3).

El área foliar también se puede estimar mediante modelos matemáticos. En ellos, el área se estima a partir de la multiplicación del largo y/o ancho y/o perímetro por un coeficiente de proporcionalidad (Astegiano *et al.*, 2001). También puede estimarse a

samples. This equipment costs around 10 000 USD (Kosmos Scientific de México, 2018) (Figure 3).

Mathematical models can also estimate the leaf area. These models determine the area by multiplying the length/width/perimeter by a proportionality coefficient (Astegiano *et al.*, 2001). The weight and volume of a sample or a portion of it can also help determine the leaf area, as in the leaf disc method (Mendes *et al.*, 2015). However, the mathematical model only works for a particular species and does not consider the presence of deformations and mutilations in the leaves.

Planimetry is another measuring method and it consists of drawing the silhouette of the sample on a



Figura 2. Determinación del área foliar en hojas de *Manihot esculenta* (Cock *et al.*, 2014).
Figure 2. Determination of the leaf area in *Manihot esculenta* leaves (Cock *et al.*, 2014).



Figure 3. Cid Bio-Science[®] CI-202 portable integrator (CID Bio-Science Inc., 2018).

Figura 3. Integrador portátil Cid Bio-Science[®] CI-202 (CID Bio-Science Inc., 2018).

partir del peso y/o volumen de la pieza o de una sección de ella, como en la técnica de corte de discos de hoja (*Leaf disc*) (Mendes *et al.*, 2015). Sin embargo, el modelo matemático solo sirve para una especie en particular y la operación no considera la presencia de deformaciones o mutilaciones en las hojas.

La planimetría es otro método de medición. Para ello, la silueta de la muestra se marca en un papel para poder medirla sin tener que cortar el espécimen.

En los cladodios también puede medirse su inclinación. Sortibrán *et al.* (2005) estudiaron la relación entre la inclinación inusual de los cladodios de *Opuntia puberula Pfeiffer* (que crecen horizontalmente) y su efecto en la captación de luz.

Finalmente, la cantidad de radiación solar que es interceptada por la planta y no llega al suelo puede medirse mediante equipo especializado (Mendes, 2015).

El uso de cámaras 3D en la agricultura se debe a la dificultad de segmentar un espécimen que está rodeado de otros del mismo color, forma, textura y tamaño. Los sistemas de visión artificial se usan en la agricultura para resolver problemas de trabajo estacional de alto volumen. Así, se utilizan para detectar y localizar los frutos en las ramas, determinar la madurez de los frutos, determinar la geometría del árbol y localizar el árbol en la huerta (Zujevs *et al.*, 2015).

Las tecnologías de visión artificial incluyen la proyección de luz estructurada, la visión estereoscópica y el mapeo del tiempo de vuelo. En la proyección de luz estructurada, la manera en la que varios patrones de

sheet of paper in order to measure it without cutting the specimen.

Researchers can also measure the inclination of cladodes. Sortibrán *et al.* (2005) studied the relation between the *Opuntia puberula Pfeiffer* cladodes unusual inclination (horizontal position) and their effect in the light interception.

Finally, using specialized equipment, it is possible to measure the amount of solar radiation intercepted by the plant, that does not reach the ground (Mendes, 2015).

In agricultural practices, artificial vision systems solve high-volume seasonal work problems. Thus, they detect and locate fruits in the tree branches, determine the ripeness of the fruit, the geometry of the tree, and locate the tree in the orchard (Zujevs *et al.*, 2015).

Artificial vision technologies include structured-light projection, stereoscopic vision, and time of flight mapping. In the structured-light projection, the patterns of light and shadow, when projected onto an object, allow to determine its shape; this strategy is designed for indoor use and requires that the object remains still because it needs to take several photographs. The time of flight mapping strategy (Time of Flight, ToF) creates a distance map for each of the voxels in the scene by measuring the time it takes for an infrared light beam to bounce off the objects and return to the camera. The stereoscopic vision merges two or more 2D photographs taken from different perspectives to create a 3D image.

luzes y sombras se curvan al ser proyectados sobre un objeto permite determinar su forma. Esta estrategia está diseñada para usar en interiores y necesita que el objetivo permanezca inmóvil porque requiere tomar varias fotografías. En la estrategia de tiempo de vuelo (Time of Flight, ToF) se crea un mapa de distancias a cada uno de los vóxeles de la escena mediante la medición del tiempo que le toma a un haz de luz infrarroja rebotar en los objetos y regresar a la cámara. En la visión estereoscópica dos o más fotografías 2D tomadas desde diferente perspectiva se fusionan para crear una imagen 3D. Esta visión tiene mayor complejidad computacional que la ToF, pero las imágenes tienen mayor resolución porque se utilizan cámaras normales de cualquier capacidad (Cuadro 1).

La luz solar interfiere con el funcionamiento de las cámaras 3D que funcionan con luz infrarroja (Sarbolandi *et al.* 2015). La necesidad de una conexión eléctrica, equipo de cómputo y evitar la luz solar directa, dificultan su uso en el campo (Figura 4).

En esta investigación se presenta la medición del área de cladodios de *Opuntia* a partir de la toma de fotografías 3D, de tal manera que no sea necesario manipular la planta espinosa. Para tal fin se usa la cámara Intel[®] RealSense R200, un equipo de última generación que utiliza visión estereoscópica infrarroja para calcular la profundidad. Está diseñada para utilizarse en exteriores conectada al puerto USB 3.0 de un dispositivo móvil.

En los sistemas de visión artificial se necesita determinar a priori el modelo descriptor de la estructura a reconocer, es decir, la ecuación que más se parezca a los objetos. En este caso, la forma plana de los segmentos espinosos es descrita por la ecuación del plano que puede obtenerse de la regresión lineal múltiple de los vóxeles que conforman el cladodio.

Al utilizar la cámara, se encontró que debe evitarse la luz solar directa, pese a que está diseñada para

The latter has greater computational complexity than ToF, but the images have a higher resolution because regular cameras of any capacity can be used (Table 1).

Sunlight interferes with the operation of 3D cameras that work with infrared light (Sarbolandi *et al.* 2015). The need for an electrical connection, computer equipment, and avoiding direct sunlight, hinder its use in the field (Figure 4).

In this research, we present the measurement of the area of *Opuntia* cladodes using 3D photographs, so that it is not necessary to manipulate the spinous plant. We used an Intel[®] RealSense R200 camera, state-of-the-art equipment with an infrared stereoscopic vision to calculate depth. It is designed for outdoor use connected to the USB 3.0 port of a mobile device.

Artificial vision systems require the prior determination of the descriptive model of the structure to be analyzed, *i.e.*, the equation that most closely resembles the objects. In this case, the equation, obtained from the multiple linear regression of the cladode voxels, describes the flat shape of the spinous segments.

Although the camera is designed to filter direct sunlight, we found it better to avoid it; at this time, this is the only camera we have for outdoor use connected to a mobile device.

The spines and width of the segments of *Opuntia* specimens make it impossible to employ other techniques and equipment commonly used to measure the leaf area.

Mendes (2015) observed that there were no studies about the measurement of the leaf area of cladodes by indirect methods and attempted to apply four classic strategies: mathematical modeling, planimetry, leaf discs, and solar radiation interception. He did not recommend the last three methods due to their low

Cuadro 1. Comparación de tecnologías 3D que pueden utilizarse en campo.

Table 1. Comparison of 3D technologies used in the field.

Técnica	Equipo	Resolución	Complejidad computacional
Visión binocular	2 cámaras	Mayor. La resolución puede ser tan alta como la cámara que se utilice, pero la exactitud depende del software	Mayor
Tiempo de vuelo	Proyector laser y cámara infrarroja especializados	Menor. Es difícil miniaturizar los sistemas laser, pero las mediciones son más precisas	Menor



Figura 4. Escaneo 3D usando un sensor Kinect de Microsoft[®] (Azzari *et al.* 2013).

Figure 4. 3D scanning using a Microsoft[®] Kinect sensor (Azzari *et al.* 2013).

filtrarla; sin embargo, es la única hasta el momento para utilizarse en exteriores conectada a un dispositivo portátil.

La presencia de espinas y la anchura de los segmentos en los especímenes de *Opuntia* imposibilitan el uso de otras técnicas y aparatos normalmente utilizados para medir el área foliar.

Mendes (2015) reportó que no había antecedentes en la literatura de la medición del área de cladodios por métodos indirectos e intentó aplicar cuatro estrategias clásicas: estimación matemática, planimetría, medición de discos foliares e intercepción de radiación solar. Encontró que “*los métodos de intercepción de la luz y sus derivaciones, medición de discos foliares y planimetría no son recomendables, debido a su baja precisión y exactitud*” y que si bien “*el método de modelado matemático presentó coeficientes de precisión y exactitud por encima de 0.90, su aplicabilidad depende del uso de parámetros estimados y ecuaciones de valores ajustados*”.

La posibilidad de medir los segmentos de la planta de manera no destructiva y sin manipular la planta espinosa, permitiría monitorear el desarrollo de un cladodio en particular durante un período de tiempo. En las cactáceas, por ejemplo, el agua disponible

precision and accuracy, and even though the precision and accuracy coefficients of the mathematical modeling were above 0.90, its applicability depends on the use of the estimated parameters and equations of adjusted values (Mendes, 2015).

Measuring the plant segments in a non-destructive way and without the manipulation of the spinous plant allows monitoring the development of a particular cladode during a specific period. In cacti, for example, the water availability during development generates marked differences in thickness and size (Scalisi *et al.*, 2016).

The measurement of the leaf area would help to diagnose the health status of the plants, determine the crop maturity in order to decide the harvest date, personalize the fertilizer and insecticide doses, describe and survey wild type specimens, and evaluate the reaction to different configurations of soil, water, and temperature.

The use of specialized equipment reduces the errors made by manual measurements and generates immediate results, without interfering with the plant development.

The proposed method employs, for the first time, state-of-the-art technology to measure spinous

durante su desarrollo genera diferencias marcadas de grosor y tamaño (Scalisi *et al.*, 2016).

La medición de los segmentos ayudaría a diagnosticar la salud de las plantas, determinar la madurez de un cultivo para decidir su fecha de cosecha, personalizar las dosis de fertilizantes e insecticidas, describir e inventariar especímenes silvestres o calificar la reacción de las plantas a diferentes configuraciones de suelo, agua y temperatura o ambos.

El uso de equipo especializado reduce los errores cometidos en una medición manual, mientras que el resultado se visualiza inmediatamente sin interferir con el desarrollo de las plantas.

El método propuesto utiliza tecnología de última generación que por primera vez se utiliza para medir cladodios espinosos *in situ*. El resultado de la medición se muestra de inmediato, el método es “no destructivo”, de bajo costo y el tiempo de implementación es mucho menor que el de otras técnicas reportadas en la literatura.

MATERIALES Y MÉTODOS

La segmentación de las partes de una planta en imágenes 2D se complica cuando está rodeada de otras plantas del mismo color y textura, y cuando la iluminación no es uniforme. Para evitar esos problemas, las cámaras 3D de última generación emiten su propia iluminación y solo captan frecuencias de luz determinadas que cambian al azar a lo largo del tiempo para filtrar la luz solar. La cámara RealSense R200 de la compañía Intel® (EUA) toma fotos en tercera dimensión de escenas entre los 0.5 y 3.5 m de distancia. Captura imágenes de 480×360 píxeles a 60 cuadros por segundo. Tiene un campo de visión de 59° horizontales y 46° verticales. (Intel corporation, 2015) (Figura 5).

El dispositivo proyecta un haz de luz infrarroja en el rango de los 850 nm que es luego captado por dos cámaras infrarrojas para formar una imagen estereoscópica. En el mapa de profundidades se expresa la distancia de cada pixel a la cámara (Figura 6).

La cámara de profundidad funciona mejor en entornos que tienen detalles y textura. Los datos de profundidad serán menos

cladodes *in situ*. The measurement results are immediate, the method is “non-destructive” and low cost, and the implementation time is much shorter than that of other techniques reported in the literature.

MATERIALS AND METHODS

The segmentation of the parts of a plant in 2D images gets complicated when surrounded by other plants of the same color and texture, and when the lighting is not uniform. State-of-the-art 3D cameras emit their lighting and only capture specific frequencies of light that change overtime randomly to filter sunlight. The RealSense R200 camera from Intel® (USA) takes three-dimensional photographs of scenes between 0.5 and 3.5 m of distance, it captures images of 480×360 pixels at 60 frames per second, with a field vision of 59° horizontal and 46° vertical (Intel corporation, 2015) (Figure 5).

The device projects a beam of infrared light in the 850 nm range that is then captured by two infrared cameras to form a stereoscopic image. The depth map expresses the distance of each pixel to the camera (Figure 6).

The depth camera operates better in environments that show details and texture. Thus, the depth data for black or highly reflective surfaces lacks precision (Intel corporation, 2015). Based on the performed exercises, specifically for prickly pears, the camera operates better when the plant receives less than 500 lux, *i.e.*, it can be used at sunrise, sunset, or in greenhouses. Under different circumstances, the photographer must control the lighting conditions.

The camera has a processor that converts the depth map into a vertex map. In the vertex map, each voxel contains the spatial coordinates x, y, z concerning a cartesian plane, in which the central coordinate (0,0,0) is at the center of the image (Figure 7).

Seed-based region growing

In addition to having different depths, segments also have different inclinations that are helpful during the segmentation. A multiple linear regression establishes the cladode inclination, and



Figure 5. 3D Intel® RealSense R200 camera.
Figura 5. Cámara 3D Intel® RealSense R200.



Figura 6. Mapa de profundidades de una planta de nopal en escala de grises obtenida con la cámara Intel® RealSense R200.

Figure 6. Depth map of a prickly pear in grayscale captured with the RealSense R200 Intel® camera.

precisos para superficies negras o altamente reflectantes (Intel corporation, 2015). Con base en los ejercicios realizados se encontró que, específicamente para los nopales, la cámara funciona mejor cuando la planta recibe menos de 500 lux, es decir, que puede usarse al amanecer, al atardecer o dentro de invernaderos. En otras circunstancias el fotógrafo debe controlar las condiciones de iluminación.

La cámara tiene un procesador que convierte el mapa de profundidades en un mapa de vértices. En el mapa de vértices, cada vóxel contiene la coordenada espacial x, y, z con respecto a un plano cartesiano en el que la coordenada central (0,0,0) está en el centro de la imagen (Figura 7).

Crecimiento de región con semilla

Además de tener diferentes profundidades, los segmentos tienen diversas inclinaciones que ayudarían a segmentarlos. Para segmentar un cladodio, su inclinación se establece por

with this information, we applied the seed-based region growing method.

The seed-based region growing method “is a recursive method that groups pixels or subregions in bigger regions. It starts with a group of seed points and allows the regions to grow by adding neighboring pixels with similar characteristics; for example, intensity, texture, or color. Two serious problems in this technique are the selection of the initial seeds that adequately represent the regions of interest, and the selection of suitable characteristics to assign the points to the different regions during the growth process. There is also a third problem: the criterion to stop the algorithm. In general, we will prevent a region from growing when there are no more pixels that meet the inclusion criteria in that region. The use of this descriptor implies that there is previous knowledge of at least one spatial model of the expected results” (Pajares et al., 2008).

Under the assumption that cladodes are flat, the pixels added to the growing region are those located on the plane described by the regression.



Figura 7. Mapa de vértices de una planta de nopal obtenida con la cámara Intel® RealSense R200.

Figure 7. Vertex map of a prickly pear captured with the Intel® RealSense R200 camera.

medio de una operación de regresión lineal múltiple, y con esta información se aplica la técnica de crecimiento de región con semilla.

El crecimiento de región “es un método recursivo que agrupa píxeles o subregiones en regiones más grandes. Comienza con un conjunto de puntos semilla y permite que las regiones crezcan al agregar los píxeles vecinos que tienen propiedades similares; por ejemplo: intensidad, textura o color. Dos problemas serios en esta técnica son: la selección de las semillas iniciales que representan adecuadamente las regiones de interés, y la selección de propiedades adecuadas para asignar los puntos a las diversas regiones durante el proceso de crecimiento. Se puede mencionar un tercer problema: el criterio para detener el algoritmo. En general, impediremos que una región crezca cuando no haya más píxeles que satisfagan los criterios de inclusión en esa región. El uso de este descriptor implica que hay un conocimiento a priori de al menos un modelo espacial de los resultados esperados” (Pajares *et al.*, 2008).

Bajo la suposición de que los cladodios son planos, los píxeles agregados a la región que crece son los que se ubican sobre el plano descrito por la operación de regresión.

Regresión lineal múltiple

Antes de aplicar el algoritmo de “crecimiento de región” se determina el plano que caracteriza la inclinación del segmento respecto a la cámara mediante una operación de regresión lineal múltiple aplicada a los vóxeles. La regresión es el método mediante el cual se descubren las relaciones entre una o más variables de respuesta (variables dependientes) y los predictores (variables independientes). La regresión lineal múltiple tiene el siguiente modelo general:

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \dots + \beta_px_p + \varepsilon \quad (1)$$

donde: Y es la variable independiente; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ son los coeficientes de regresión; x_0, x_1, \dots, x_p son las variables independientes del modelo (Hernández *et al.*, 2004).

Un modelo de regresión lineal múltiple se usó porque los cladodios de *Opuntia* son idealmente planos. Si bien en la práctica los cladodios pudieran tener curvaturas, un modelo de regresión no lineal sería computacionalmente más costoso y su definición sería específica a una especie, lo que disminuiría su usabilidad. Además, las curvas de la pieza son tratadas en la etapa de triangulación. La operación de regresión lineal múltiple se aplica a un conjunto semilla de 12×12 vóxeles al centro del cladodio a segmentar. Como resultado se obtiene la ecuación de un plano (Figura 8).

Multiple linear regression

Before applying the “growing region” algorithm, we determine the plane that characterizes the inclination of the segment in respect to the camera using a multiple linear regression operation applied to the voxels. Regression is the method that establishes the relations between one or more response variables (dependent variables) and predictors (independent variables). Multiple linear regression has the following general model:

$$Y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \dots + \beta_px_p + \varepsilon \quad (1)$$

where: Y is the independent variable; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ are the regression coefficients; x_0, x_1, \dots, x_p are the independent variables of the model (Hernández *et al.*, 2004).

We used a multiple linear regression model because the *Opuntia* cladodes are ideally flat. While in practice cladodes may have curvatures, a non-linear regression model would be computationally more expensive, and its definition would be specific to a species, which would diminish its usability. We considered the curvatures of the samples during triangulation. We applied the multiple linear regression operation to a seed group of 12×12 voxels at the center of the cladode to be segmented. As a result, we obtained the equation of a plane (Figure 8).

To the seed-based region, we added the neighboring voxels on the calculated plane. Depending on the thickness and curvature of the plant, and the distance to the camera, we considered a tolerance between 1.5 and 4 cm (Figure 9).

To refine the plane equation, at the end of the algorithm, we must repeat the calculation using the voxels at the edge of the figure obtained instead of the voxels of the selected seed.

Filling

The holes in the segmented sample were filled with artificial points before continuing with subsequent stages. There may be voxels without information in the spines or imperfections. The filling occurs thorough a dilation operation, but in this case, vortexes without depth information lack the X and Y coordinates. To fill any point without information that does not belong to the background, we used the X and Y values of the neighboring voxels. To determine the value of z, we evaluated the artificial point in the plane equation (Figure 10).

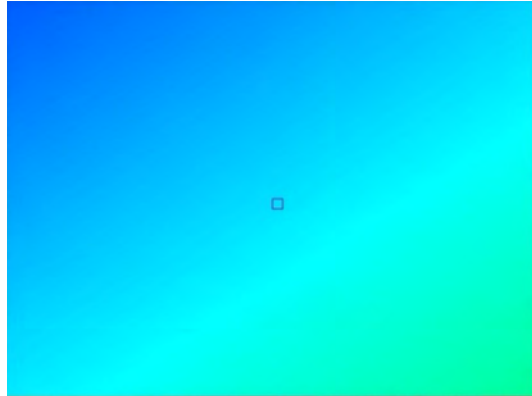


Figure 8. Representation of the plane obtained by multiple linear regression.

Figura 8. Representación del plano obtenido con la regresión lineal múltiple.

A la región semilla se le agregan los voxeles vecinos que se encuentran sobre el plano calculado. Dependiendo del espesor y curvatura de la planta y de la distancia a la cámara se considera una tolerancia de entre 1.5 y 4 cm (Figura 9).

La ecuación del plano puede refinarse si al terminar el algoritmo vuelve a calcularse, pero ya no a partir de los vóxeles de la semilla seleccionada sino a partir de los vóxeles del borde de la figura encontrada.

Rellenado

Los orificios en la pieza segmentada deberán rellenarse con puntos artificiales antes de continuar con las otras etapas. Puede haber vóxeles sin información en las espinas o en las imperfecciones. El rellenado se realiza mediante una operación de dilatación, pero en este caso los vértices sin información de profundidad no tienen las coordenadas X ni Y. Para rellenar cualquier punto sin información que no pertenezca al fondo se utilizan los valores de X e Y de los vóxeles vecinos. El punto artificial se evalúa en la ecuación del plano para encontrar el valor de z (Figura 10).



Figure 9. Segmented region.

Figura 9. Región segmentada.

Erosion

Generally, part of the trunk that supports the cladodes or its shoots may be included in the segmentation because they could have the same inclination. The size of the joints between cladodes depends on the species and age of the segment (Nobel and Meyer, 1991). To separate them, we used an erosion operation with a circular structural element.

The erosion operation belongs to the mathematical morphology area, in which it is possible to evaluate a pattern in each voxel of the original image, maintained if the pattern is completely contained. This operation reduces the size of the figures (Figure 11).

The erosion of the X with the B is defined as the group of all the x points, such that the X includes Bx (Faúndez, 2000):

$$\varepsilon_B(X) = \{x : B_x \subset X\} \quad (2)$$

When we apply the erosion operation with a circular structural element (diameter: 5 to 10 cm, corresponding to the



Figura 10. Región rellena con valores generados de la ecuación del plano.
Figure 10. Region filled with the values from the plane equation.

Erosión

Por lo general, parte del tronco que sostiene al cladodio o sus vástagos se incluirán en la segmentación porque podrían tener la misma inclinación. El tamaño de las uniones entre cladodios depende de la especie y de la edad del segmento (Nobel y Meyer, 1991). Para separarlos se realiza una operación de erosión con un elemento estructurante circular.

La erosión es una operación que pertenece al área de la morfología matemática en la que se evalúa un patrón en cada uno de los vóxeles de la imagen original, que se mantienen si el patrón está completamente contenido. Esta operación reduce el tamaño de las figuras (Figura 11).

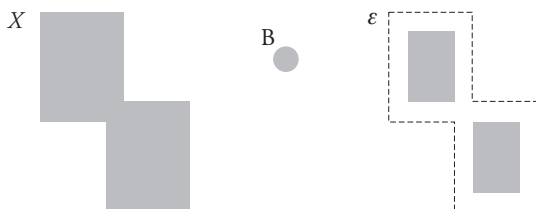
La erosión de X realizada con B se define como el conjunto de todos los puntos x tales que B_x está incluido en X (Faúndez, 2000):

$$\varepsilon_B(X) = \{x : B_x \subset X\} \tag{2}$$

Cuando se aplica la operación de erosión con un elemento estructurante circular (diámetro 5 a 10 cm, correspondientes al ancho de la unión a romper), la región se separa en varias (Figura 12).

Dilatación

Para recuperar las dimensiones de la región de interés se realiza una operación de dilatación con un elemento estructurante similar



width of the joint to separate), the region separates into several smaller regions (Figure 12).

Dilation

To recover the dimensions of the region of interest, we employ a dilation operation with a structural element similar to the one used during the erosion operation. In this case, voxels with depth information of the original image, located within the radius of the structural element, were added to the region.

The dilation of the X with the B is defined as the group of all the x points, such that B_x intersects with X in at least one point (Faúndez, 2000):

$$\delta_B(X) = \{x : B_x \cap X \neq \emptyset\} \tag{3}$$

The erosion and dilation processes separate a specific cladode from other branches to which it may be attached, and it is safe for the pieces that have already been correctly segmented (Figure 13).

Triangulation

Finally, to obtain the area of the segment, we must represent the voxels as a surface formed by three-dimensional

Figura 11. Erosión; X : señal original, B : elemento estructurante circular y ε : resultado.
Figure 11. Erosion; X : original signal, B : circular structural element, and ε : result.

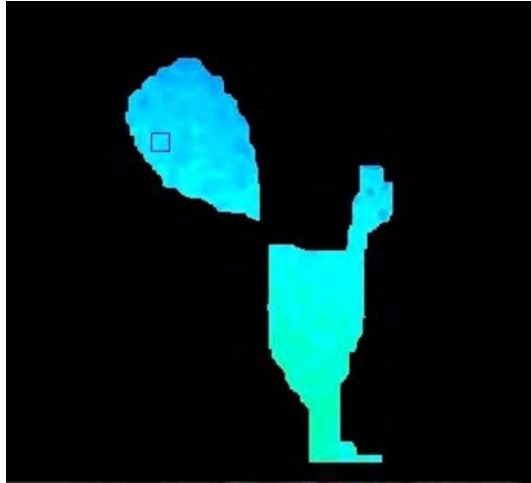


Figura 12. Región erosionada; la erosión separa un cladodio de los demás.

Figure 12. Eroded region, erosion separates the cladode from the rest.

al utilizado en la erosión. En este caso, los vóxeles con información de profundidad de la imagen original que se encuentran dentro del radio del elemento estructurante se agregan a la región.

La dilatación de X realizada con B se define como el conjunto de todos los puntos x tales que B_x intersecciona con X por lo menos en un punto (Faúndez, 2000):

$$\delta_B(X) = \{x : B_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (3)$$

El proceso de erosión y dilatación separa un cladodio en particular de otras ramas a las que pudiera estar unido y es inocuo para las piezas que ya se hubieran segmentado correctamente (Figura 13).

Triangulación

Al final, para obtener el área de la pieza, se debe representar los vóxeles como una superficie formada por triángulos en tercera

triangles and then add their areas. The area of a triangle given three vertices, P_1, P_2, P_3 , is equal to half the scalar product of u and v vectors (Kolman, 2006):

$$A_T = \frac{1}{2} \|u \times v\| \quad (4)$$

where: u is the vector from P_1 to P_2 (triangle base); v is the vector from P_1 to P_3 .

The vector map generated by the camera has a texture of ridges and valleys due to the presence of spines and the filling process. The triangulation result of a surface like this is higher than the expected value for an ideally smooth surface. If the area to be measured is considered to be that of a two-dimensional figure, then we can obtain the values of the distance “Z” by evaluating “X” and “Y” in the plane equation from the regression.

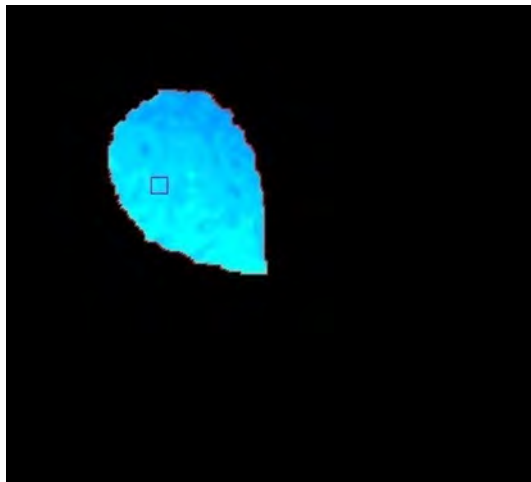


Figura 13. Dilatación del cladodio segmentado para recobrar su dimensión original.

Figure 13. Dilation of the segmented cladode to recover its original dimensions.

dimensión y luego sumar sus áreas. El área de un triángulo dados 3 vértices P_1, P_2, P_3 es igual a la mitad del producto escalar de los vectores u y v (Kolman, 2006):

$$A_T = \frac{1}{2} \|u \times v\| \quad (4)$$

donde: u es el vector que va de P_1 a P_2 (base del triángulo); v es el vector que va de P_1 a P_3 .

El mapa de vectores generado por la cámara posee una textura de crestas y valles debido a la presencia de espinas y al proceso de rellenado. El resultado de la triangulación de una superficie así es mayor al valor esperado para una figura idealmente lisa. Si se considera que el área que se quiere medir es la de una figura plana, entonces los valores de la distancia “Z” pueden generarse a partir de la evaluación de “X” e “Y” en la ecuación del plano obtenida en la regresión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rendimiento del algoritmo se comparó contra otras cinco estrategias clásicas. El área de 13 cladodios de nopal se calculó por el método propuesto, por planimetría, volumetría, escaneo 2D y 2 estrategias de estimación matemática. La medición se consideró mediante el escaneo 2D y uso de software especializado como la medida de referencia contra la cual se evaluaron los otros métodos.

Primero se fotografiaron las plantas con la cámara 3D, el usuario selecciona los mejores parámetros de tolerancia, y radios de erosión-dilatación. La tolerancia (distancia permitida de los vóxeles al plano) aumenta cuando el cladodio es muy grueso y disminuye cuando la pieza está pegada a otra. El radio de erosión-dilatación depende del ancho de las uniones entre los cladodios.

Después se cortaron los cladodios y se digitalizaron con un escáner con el objetivo de obtener su área mediante el uso de un software especializado^[2] (Contreras *et al.*, 2015). También se marcó su silueta en papel milimétrico para estimar su área mediante planimetría.

Se calculó cuál sería el área del cladodio si se considerara que tienen forma de elipse, para lo cual se midió el largo y ancho con cinta métrica y se sustituyeron los valores en la fórmula del área de la elipse. Del mismo modo se calculó cual sería el área si se

RESULTS AND DISCUSSION

The performance of the algorithm was compared against five other classic strategies. We calculated the area of 13 prickly pear cladodes using the proposed method, planimetry, volumetry, 2D scanning, and two mathematical estimation strategies. The measurement was considered through 2D scanning and using specialized software as a reference, against which we evaluated the other methods.

First, we photographed the plants with the 3D camera; the user selects the best tolerance parameters and erosion-dilation ratio. Tolerance (allowed distance from the voxels to the plane) increases with cladode thickness and decreases when the piece is attached to another. The erosion-dilation ratio depends on the width of the joints between the cladodes.

Subsequently, we cut the cladodes and digitalize them with a scanner to determine their area employing a specialized software^[2] (Contreras *et al.*, 2015) and draw their silhouette in millimeter paper to estimate their area by planimetry.

We calculated the area of the cladodes considering their elliptical shape; thus, we measured the length and width with a measuring tape and substituted the values in the equation of the area of an ellipse. In the same way, we calculated the area of the cladodes considering a semicircle shape attached to a triangle.

Finally, we calculated the volume of a cylinder that represents the piece (and the area of its base). It was then necessary to measure the width of a sample at the center of the cladode using a Vernier, its volume immersing it in water, and its weight (Table 2).

Of the evaluated strategies, volumetry and 3D photography had the best performance (Table 3), but volumetry was the most difficult strategy to implement and required several hours. The 2D scanning required the cladodes to be cut in 2 to 4 parts in order to be able to put them in the device. Taking 3D photographs is at least 20 times faster than the other techniques.

The results obtained with the 3D method were usually above the expected result; thus, we calculated a conversion factor that, by multiplying it by the results, compensated for the error. We employed

² Disponible gratuitamente en ❖ Available for free in <http://www.serconmur.com/area-foliar-escaner.html>

considerara que los cladodios tienen la forma de un semicírculo unido a un triángulo.

Al final se calculó el volumen de un cilindro que representara la pieza (y el área de su base). Fue necesario entonces medir el ancho de una muestra del centro del cladodio con un vernier, su volumen sumergiéndola en agua y su peso (Cuadro 2).

De las estrategias evaluadas, la volumetría y la toma de fotografías 3D tuvieron el mejor rendimiento (Cuadro 3), con la salvedad de que la volumetría fue la estrategia más difícil de implementar y requirió varias horas para aplicarse. Para el escaneo 2D fue necesario cortar los cladodios en partes para poder meterlos en el dispositivo. Puede considerarse que la toma de fotografías 3D es al menos 20 veces más rápida para implementarse que las otras técnicas.

Los resultados de la medición 3D se detectó que suelen estar por encima del resultado esperado, así

the bootstrap resampling method with 100 000 repetitions, two tails, and confidence of 95% to determine the relationship between the obtained and expected areas. We obtained an average conversion factor of 0.90918, a maximum factor of 0.93981, and a minimum factor of 0.87708, with a maximum and minimum variance of 0.00594 and 0.00141, respectively (Figure 14).

Initial results were multiplied by the average conversion factor, and we recalculated the average error. From these new data we conclude that by multiplying the result of the 3D measurement by the conversion factor (0.90918), the results improve to the point of being at the level of the best destructive strategies (Table 4).

Through a non-parametric test of medians, we determined that 3D photographs and volumetry are statistically similar, both show a 95% accuracy. Based

Cuadro 2. Áreas en cm² obtenidas mediante Escaneo 2D (medición de referencia), el método propuesto y otras cuatro metodologías.

Table 2. Areas in cm² obtained by 2D scanning (reference), the proposed method, and the other four methods.

Muestra	Escaneo 2D	Cámara 3D	Volumetría	Planimetría	Aproximación elipse	Aproximación triángulo semicírculo
1	172.7	172	154.92	180.24	187.86	107.99
2	50.7	50.8	52.31	58.37	64.08	36.93
3	259.7	267.7	271.28	304.3	306.42	169.95
4	271.6	295.6	272.89	313.77	318.55	172.15
5	491.84	530.1	426.66	629.48	546.16	291.92
6	77.37	86.7	81.37	92.69	96.89	55.96
7	97	113.8	110.01	113.24	108.85	57.47
8	239.41	253.4	234.44	278.23	274.88	153.96
9	296.57	319.6	287.51	348.32	345.57	192.53
10	279.12	311.6	261.56	331.58	338.66	190.15
11	259.26	325.2	273.73	301.58	311.01	168.78
12	278.3	340.6	288.32	311.27	313.64	171.16
13	712.3	767.7	679.00	785.2	790.89	428.14

Cuadro 3. Margen de error de las áreas obtenidas en cm² de las cinco técnicas de medición respecto del escaneo 2D en términos de la distancia Euclidiana.

Table 3. Error margin of the areas obtained in cm² from five measuring methods compared to 2D scanning in terms of the Euclidean distance.

Método	Promedio de error	Mediana de error	Error máximo	Error mínimo	Varianza	Desviación estándar
Volumetría	556.60	134.25	4247.58	1.68	1412787.01	1188.60
Cámara 3D	1196.4	530.38	4348.08	0.01	2398380.42	1548.67
Triángulo Semicírculo	14673.29	8053.81	80742.39	189.41	494375375.4	22234.55
Elipse	1967.83	2183.04	6177.32	140.56	2922166.40	1709.43
Planimetría	2958.14	1778.30	18944.76	56.85	25170478.55	5017.01

que se calculó un factor de conversión que al multiplicarlo por los resultados compensara el error. La estrategia usada fue bootstrap de 100 000 re-muestrados con 2 colas y 95% de confianza, donde se determina la relación existente entre el área obtenida y el área esperada. Así se obtuvo un factor de conversión promedio de 0.90918, un factor máximo de 0.93981 y mínimo de 0.87708, con la varianza máxima 0.00594 y la mínima 0.00141 (Figura 14).

Los resultados iniciales se multiplicaron por el factor de conversión promedio y se recalculó el error promedio. De los nuevos datos se desprende que la multiplicación del resultado de la medición 3D por su razón de conversión (0.90918) mejora los resultados al punto de estar al nivel de las mejores estrategias destructivas (Cuadro 4).

A través de una prueba no paramétrica de medianas se determinó que la toma de fotografías 3D y la volumetría son estadísticamente similares pues ambas muestran una exactitud del 95%. Con base en ello se puede decir que el procedimiento propuesto en este estudio es tan bueno como la mejor técnica destructiva, con las ventajas ya señaladas.

En una cámara 2D conforme aumenta la inclinación la figura es mostrada como más delgada. Al

on the latter, we conclude that the proposed method is as good as the best destructive technique, with the advantages already indicated.

In a 2D camera, as the inclination increases the figure looks thinner. In a 3D camera, there is also less information available when the inclination increases, but the plane determined by multiple linear regression decreased the standard deviation of the results.

The algorithm coded in Java language^[3] takes less than 2 s to run on a computer with an Intel core I7 processor with 8 GB of RAM at 2.5 GHz. We obtained the best results when the samples are as parallel as possible to the camera. The flat and oval shape of the *Opuntia* segments make the measurement easier.

The erosion and dilation diameters depend on the width of the joints to be separated. That is, they depend on the *Opuntia* species and their arrangement in the plant (joints are wider in the lower segments). Also, it is inversely proportional to its distance to the camera, since a voxel represents a larger area the farther it is from the camera.

The tolerance of the region growing algorithm depends on the width and curvature of the cladodes

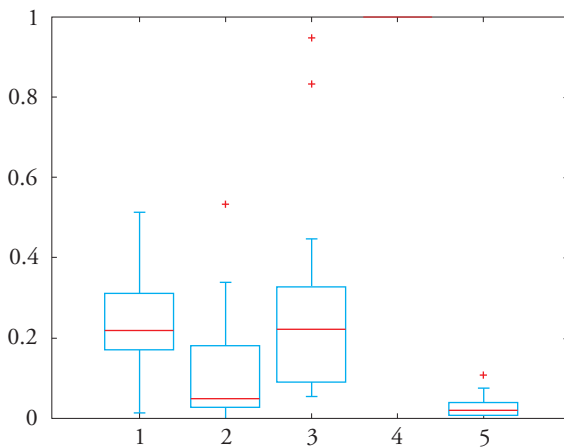


Figura 14. Gráfica de cajas y bigotes de las mediciones realizadas mediante: 1) planimetría, 2) cámara 3D, 3) estimación matemática de elipse, 4) estimación matemática de triángulo y semicírculo, 5) volumetría.

Figure 14. Boxplot of the measurements made by 1) planimetry, 2) 3D camera, 3) mathematical estimation of the ellipse, 4) mathematical estimation of the triangle and semicircle, 5) volumetry.

Cuadro 4. Margen de error de las áreas obtenidas en cm^2 por toma de fotografías 3D respecto del escaneo 2D en términos de la distancia Euclidiana.

Table 4. Error margin of the areas obtained in cm^2 by 3D photographs compared to 2D scanning in terms of the Euclidean distance.

Método	Promedio de error	Mediana de error	Error máximo	Error mínimo	Varianza	Desviación estándar
Cámara 3D	589.28	70.8	3407.37	0.3341	1 052 472.87	1025.90

utilizar una cámara 3D también hay menos información disponible cuando la inclinación aumenta, pero el uso del plano determinado por la regresión lineal múltiple disminuyó la desviación estándar de los resultados.

El algoritmo codificado en el lenguaje Java^[3], tarda menos de 2 s en ejecutarse en un equipo con procesador Intel core I7 con 8 GB de RAM a 2.5 GHz. Los mejores resultados se obtienen cuando las muestras están lo más paralelas posible a la cámara. La forma plana y ovalada de los segmentos de *Opuntia* favorecen su medición.

El diámetro de la erosión y de la dilatación dependen del ancho de las uniones a separar. Es decir, que dependen de la especie de *Opuntia* y de su disposición en la planta (las uniones son más anchas en los segmentos más bajos). Además, es inversamente proporcional de su distancia a la cámara ya que un vóxel representa un área más grande cuanto más lejos esté de la cámara.

La tolerancia del algoritmo de crecimiento de región depende del ancho y la curvatura de los cladodios, de la densidad del cultivo y es inversamente proporcional de su distancia a la cámara.

Finalmente, se menciona la posibilidad de configurar valores del hardware. El tiempo de exposición y la ganancia (apertura del diafragma) de la cámara tienen efectos significativos sobre la calidad de las imágenes ante variaciones de luz.

El método propuesto soluciona algunos de los inconvenientes que presentan las metodologías clásicas al aplicarse a los cladodios espinosos, y sin dañar la planta genera un resultado confiable que es presentado inmediatamente (Cuadro 5).

CONCLUSIONES

La medición de los cladodios de *Opuntia* spp. a partir de la toma de fotografías 3D es un método no destructivo que resuelve los inconvenientes que presentan las estrategias clásicas de medición del área foliar al momento de aplicarse a la planta espinosa. Su precisión está al nivel de los mejores métodos destructivos, pero sin la necesidad de dañar la planta. Además, presenta el mejor rendimiento en términos del tiempo necesario para obtener un resultado.

and the density of the crop, and it is inversely proportional to its distance to the camera.

Finally, it is possible to configure hardware values. The exposure time and the gain (diaphragm aperture) of the camera significantly affect the quality of the images in light variations.

The proposed method solves some of the inconveniences of the traditional methodologies, being able to measure spinous cladodes without damaging the plant generates an immediate and reliable result (Table 5).

CONCLUSIONS

The measurement of the *Opuntia* spp. cladodes using 3D photographs is a non-destructive method that solves the inconveniences of the traditional leaf area measurement strategies that exist with spinous plants. It is as precise as the best destructive methods, without damaging the plant. This method showed the best performance in terms of the time needed to obtain a result.

This proposed method considers the inclination and curvature of the samples when determining their area, and facilitates the segmentation of pieces; for example, in a crop, surrounded by others of the same color and texture. The incorporation of multiple linear regression in the algorithm generates homogeneous results even when the photographs are taken from different positions.

The camera used in this study is designed for outdoor use, but it works best at low solar radiation. The image bank evaluated, and the source code are available to the reader.

—End of the English version—



El método presentado considera la inclinación y curvatura de las muestras al momento de determinar su área y facilita la segmentación de piezas que, por ejemplo en un cultivo, se encuentren rodeadas de otras del mismo color y textura. La

³ El código fuente puede descargarse gratuitamente desde www.serconmur.com/area-foliar-3d.html ❖ The source code can be downloaded for free from www.serconmur.com/area-foliar-3d.html

Cuadro 5. Comparación entre el método propuesto y otras técnicas de medición del área foliar al aplicarse a cladodios espinosos de *Opuntia* spp.

Table 5. Comparison between the proposed method and other leaf area measuring techniques in spinous cladodes of *Opuntia* spp.

Método	Problema	Fotografía 3D
Métodos destructivos	Cortar la muestra daña la planta y no permite medir el desarrollo de una misma pieza a lo largo del tiempo	Este algoritmo no requiere dañar la planta
Métodos destructivos, Integrador portátil, Estimación matemática, Fotografía 2D	Manipular plantas espinosas puede causarle heridas al usuario	No requiere manipular la planta
Integrador portátil, Escaneo 2D	El cladodio de nopal es demasiado grande y grueso para entrar en el dispositivo	Puede medir piezas de gran tamaño y no importa el grosor
Integrador	El dispositivo tiene un costo elevado	Este dispositivo tiene bajo costo, La cámara se conecta al dispositivo móvil del usuario
Medición con cámara 3D tradicional (Kinect)	Requiere conexión eléctrica, por lo que disminuye su usabilidad en campo	Primera cámara 3D diseñada para usarse en campo
Medición con cámara 3D tradicional (Kinect)	El sol afecta su funcionamiento, No puede usarse en exteriores	Primera cámara 3D infrarroja diseñada para usarse en exteriores y filtrar el ruido de la luz solar pero solo en horarios de baja radiación solar
Fotografía 2D	Necesita un fondo con un patrón para convertir de píxeles a centímetros cuadrados	No necesita un fondo con un patrón determinado.
Fotografía 2D	Necesita tomar la fotografía a una distancia conocida para convertir de píxeles a centímetros cuadrados	La distancia la proporciona la cámara.
Fotografía 2D	La inclinación de la muestra respecto de la cámara afecta la medición	La regresión lineal múltiple compensa la inclinación de la muestra respecto de la cámara
Fotografía 2D	La curvatura de la muestra afecta la medición	La triangulación puede tomar en cuenta la curvatura de la muestra
Estimación matemática	La fórmula que determina el área de los cladodios solo funciona para una especie en particular.	Los parámetros de operación se ajustan de acuerdo a la especie y variables ambientales.
Estimación matemática	No considera las imperfecciones de los especímenes.	Las imágenes 3D pueden detectar los agujeros en la muestra producto de una enfermedad o lesión.

incorporación de la regresión lineal múltiple en el algoritmo genera resultados homogéneos aun cuando las fotografías se tomen desde diferentes posiciones.

La cámara utilizada está diseñada para utilizarse en exteriores, pero funciona mejor en horarios de baja radiación solar. Está a disposición del lector el banco de imágenes evaluado y el código fuente.

LITERATURA CITADA

- Astegiano, E., J. Favaro, y C. Bouzo. 2001. Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando medidas foliares lineales. Inves. Agrar. Prod. Protecc. Veg. 16: 2.
- Azzari, G., M. L. Goulden, y R. B. Rosu. 2013. Rapid characterization of vegetation structure with a Microsoft Kinect Sensor Sensors 13: 2384-2398.

- Cervantes R, M. C. 2002. Plantas de Importancia Económica en las Zonas Áridas y Semiáridas de México. Instituto de Geografía UNAM. México. pp: 103-104.
- CID Bio-Science Inc. 2018. CI-202 Portable laser leaf area meter. <https://cid-inc.com/plant-science-tools/leaf-area-measurement/ci-202-portable-laser-leaf-area-meter/> (Consulta: julio 2018).
- Cock, J., P. Moreno C., M. A. Toro, y J. Arango. 2014. Sistema de Monitoreo No Destructivo en Yuca. Centro Int. Agric. Trop. pp: 9-10.
- Contreras M, S., O. Lugo E., y J. Ayala. V. 2015. Aplicación para obtener el área foliar desde imágenes obtenidas de un escáner. Ciencias Químicas y Matemáticas-[©]ECORFAN. Universidad Autónoma Chapingo. Handbook T-I: 37-46.
- Faúndez Zanuy, Marcos. 2000. Tratamiento Digital de Voz e Imagen y Aplicación a la Multimedia. Marcombo. España. pp: 172.
- Gaspar R, C. M., L. C. Gazarini, T. F. Fonseca, and M. M. Ribeiro. 2018. Above-ground biomass estimation of *Opuntia Ficus-indica* (L.) Mill. for forage crop in a mediterranean environment by using non-destructive methods. Experimental Agriculture, Cambridge University Press. April 2018: 1-16.
- Hernández O., J., M. J. Ramírez Q., y C. Ferri R. 2004. Introducción a la Minería de Datos. Pearson Educación. 680 p.
- Intel corporation. 2015. SDK Design Guidelines, Intel realSense camera R200, versión 1.1.
- Kosmos Scientific de México. 2018. Medidor portátil de área foliar ci-203. <https://www.kosmos.com.mx/tienda/catalog/medidor-portatil-area-foliar-p-2607.html> (Consulta: julio 2018).
- Kolman, B., y D. R. Hill. 2006. Aplicaciones de vectores en R2 y R3. In: Álgebra Lineal. 8va ed. Pearson Educación. pp: 261.
- La razón de México. 2016. China y Brasil compiten con México en producción de nopal. <https://www.razon.com.mx/negocios/china-y-brasil-compiten-con-mexico-en-produccion-de-nopal/> (Consulta: julio 2018).
- Mendes P, K., T. G. Freire S., W. J. da Silva D., H. F. de Sousa C., y M. S. Beserra M. 2015. Indirect methods for determining the area index of forage cactus cladodes. Pesq. Agropec. Trop. 45: 63-171.
- Nobel, P., y R. W. Meyer. 1991. Biomechanics of cladodes and cladode-cladode junctions for *Opuntia ficus-indica* (Cactaceae). Am. J. Bot. - AMER J BOT. 78. 10.2307/2444929.
- Pajares M, G., y J. de la Cruz G. 2008. Visión por Computador: Imágenes Digitales y Aplicaciones. 1ra ed. Alfaomega Grupo Editor, México. 764 p.
- Sarbolandi H., D. Lefloch, y A. Kolb. 2015. Kinect range sensing: Structures-light versus time-of-flight kinect. Comp. Vision and Image Understand. 139: 1-20.
- Scalisi, A., B. Morandi, P. Inglese, and R. Lo-Bianco. 2016. Cladode growth dynamics in *Opuntia Ficus-indica* under drought. Environ. Exp. Bot. 122: 158-167.
- Sortibrán, L., C. Tinoco-Ojanguren, T. Terrazas, and A. Valiente-Banuet. 2005. Does cladode inclination restrict microhabitat distribution for *Opuntia Puberula* (cactaceae)? Am. J. Bot. 92: 700-708.
- Zujevs A., V. Osadcuck, and P. Ahrendt. 2015. Trends in robotic sensor technologies for fruit harvesting: 2010-2015. Procedia Comp. Sci. Elsevier. 77: 227-233.