

Comparación de técnicas experimentales para la medición del crecimiento vegetal

A comparison of experimental techniques for measuring natural plant growth

Nidia Quintero Peña* Carlos Rodrigo Correa Cely**

Recibido: 23 de octubre del 2010 Aprobado: 26 de noviembre del 2010

Resumen

Introducción: en este artículo de revisión se presenta un análisis detallado de las principales técnicas experimentales de medición de crecimiento de un sistema vegetal. **Metodología:** se realizó la búsqueda y el estudio de los métodos más comúnmente empleados en biología, ecología y agroindustria internacional y nacionalmente, y se clasificaron las técnicas de acuerdo con la estrategia de censado empleada para medir las variaciones dimensionales que implican crecimiento. **Resultados:** las técnicas estudiadas son: el método manual, fluorescencia inducida por láser, análisis digital de imágenes, la interferometría, la espectroscopia de infrarrojo cercano, acústica inductancia eléctrica y capacitancia eléctrica. **Conclusiones:** luego de realizar el análisis y la comparación de las diferentes técnicas empleadas para medir el crecimiento de un sistema vegetal, se evidencia la necesidad de proponer el desarrollo de un método alternativo que no presente las desventajas de los actualmente existentes.

Palabras clave: análisis de crecimiento, crecimiento vegetal, medición de crecimiento, técnica de medición.

Abstract

Introduction: this paper presents a detailed review of the main experimental techniques for measuring natural plant growth. **Methodology:** we performed the search and study of the most common methods used in Biology, Ecology, and national and international agribusiness, and techniques were classified according to the census strategy used to measure dimensional changes involving growth. **Results:** techniques analyzed: manual method, laser-induced fluorescence, imaging digital analysis, interferometry, near-infrared spectroscopy, acoustics, electrical inductance, and electrical capacitance. **Conclusion:** after analysis and comparison of different techniques used to measure the growth of a natural plant system, it is evident a need to propose an alternative technique development that has not drawbacks of the current ones.

Keywords: growth analysis, growth measurement, measuring technique, natural plant growth.

Cómo citar este artículo: Quintero Peña, N. y Correa Cely, C. R. (2011), "Comparación de técnicas experimentales para la medición del crecimiento vegetal", en *Revista Memorias*, vol. 9, núm. 15, pp. 81-94.

* Miembro del grupo de investigación Control, Electrónica, Modelado y Simulación (CEMOS). Ingeniera Electrónica. Candidata a Magíster en Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander. Correo electrónico: nidiaqp6@gmail.com.

** Profesor titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander. Miembro del grupo de investigación Control, Electrónica, Modelado y Simulación (CEMOS). Magíster en Ingeniería Química y Doctor en Ciencias en Polímeros e Ingeniería de la misma Universidad. Correo electrónico: crcorrea@uis.edu.co

Introducción

En la agroindustria, la ecología, la fisiología de los cultivos y el fitomejoramiento, el análisis y la medición del crecimiento vegetal es de suma importancia (Poorter y Garnier, 1996). Disponer de esta información permite tanto concluir si el entorno en el que se encuentra la plántula es el más adecuado, como identificar la necesidad de mejorar o cambiar los nutrientes suministrados (Taiz y Zeiger, 2002).

Existen diferentes técnicas utilizadas en la medición del crecimiento de un sistema vegetal con las cuales se puede obtener información de la variación específica del tamaño de tallo, raíz, hoja(s), fruto(s) y la plántula completa. Sin embargo, no se tiene a la fecha un método único o preferente y se considera aún como un problema de investigación abierto. Por esta razón, se realiza el análisis y la comparación de las diferentes técnicas existentes, buscando proponer una nueva que sea competitiva y económica.

La búsqueda de la información se realizó en bases de datos como la IEEE, Compendex y SpringerLink, gracias a que la Universidad Industrial de Santander cuenta con acceso a ellas y las patentes analizadas fueron obtenidas en FreePatentsOnline. De igual forma, la revista más investigada fue *Journal of Experimental Botany* y otras relacionadas con el tema de crecimiento vegetal. Se seleccionaron los artículos que presentaron la mayor trascendencia tecnológica para el estudio.

Para realizar la comparación de las técnicas experimentales de medición fue necesaria una exploración en el tema de crecimiento vegetal y los métodos utilizados para medirlo. Estos se clasificaron teniendo en cuenta la estrategia empleada (tratamiento de imágenes, interferometría, entre otros) y se contrastaron usando cuatro criterios comparativos, con el fin de identificar las ventajas y desventajas de cada uno.

Por lo tanto, el artículo se ha organizado de tal forma que en la sección dos se encuentran algunos conceptos relacionados con el crecimiento vegetal; en la tres se explica el método manual y los principales parámetros utilizados en laboratorio; la cuatro muestra cómo se utiliza la fluorescencia inducida por láser; la cinco presenta algunos trabajos que utilizan la técnica de análisis digital de imágenes; en la seis se explica la técnica de interferometría y sus características; en la siete aparece la técnica de espectroscopia de infrarrojo cercano; la ocho explica el método acústico; en la nueve la técnica de inductancia eléctrica y en la diez la de capacitancia eléctrica; luego se realiza en la sección once la comparación de algunos parámetros de las diferentes técnicas de medición estudiadas y una nueva propuesta, para, finalmente, presentar en la sección doce las conclusiones.

Crecimiento vegetal

Según Taiz y Zeiger (2002), el desarrollo de una planta inicia con la embriogénesis, el cual es un proceso continuo en el que se establece la forma básica de la planta y se forman los meristemas, que generan los órganos de la planta adulta. Estos pueden ser considerados como fábricas de células en las cuales el proceso continuo de división celular, expansión y diferenciación genera la forma de la planta, al igual que determina su tamaño y estructura.

El crecimiento total puede ser definido como la suma de patrones locales de expansión celular o por medio del acercamiento cinemático, forma por la que se describe matemáticamente dicho fenómeno.

El número de células es un parámetro conveniente para medir crecimiento de organismos unicelulares, pero no de plantas multicelulares, debido a que el incremento en células puede no aumentar el volumen. Sin embargo, si la

división celular está asociada a una expansión que produzca desplazamiento de pequeñas distancias desde el ápice, se verá un crecimiento por desplazamiento y se puede aplicar el principio de cinemática (medición de movimiento). El desarrollo meristemático es similar al movimiento de los fluidos y, por tanto, se puede usar un método similar de medición (Taiz y Zeiger, 2002).

El crecimiento vegetal se caracteriza por no ser uniforme y estar relacionado con el cambio de volumen o peso en la semilla, raíz, tallo y hoja de la planta. Entre las principales medidas que se utilizan para cuantificarlo se encuentran la elongación, el peso fresco y el peso seco.

A continuación se describen y comparan diferentes técnicas utilizadas para medir el crecimiento vegetal, identificando ventajas y desventajas.

Método manual

Es el más conocido y utilizado en las prácticas de laboratorio para determinar el crecimiento de vegetales; es directo y en la mayoría de los casos destructivo, debido a que el sistema vegetal estudiado es dañado. El personal encargado del experimento debe tomar los datos y registrarlos, lo que da lugar a errores y retrasos en el análisis. Los parámetros más comúnmente utilizados son:

Elongación

Se selecciona un segmento en crecimiento (tallo, raíz u hoja), se determina la variación de su longitud y se grafica este valor con respecto al tiempo (en días o semanas), obteniendo una curva sigmoidea de crecimiento.

Cuando se selecciona la hoja, se identifica en cada una de las plantas en estudio, marcando su pecíolo (parte que une a la hoja con el tallo). Su longitud se mide utilizando la vena central como referencia, proceso que se hace en diferentes

momentos del experimento (Fernández y Johnston, 1986, pp. 235-248).

En el centro interdisciplinario de ciencias marinas de México se utilizó este método para determinar la tasa de crecimiento de frondas de *Macrocystis Pyrifera*. Para la medición de la elongación utilizaron una cinta métrica de plástico desde la base de la fronda hasta la parte apical y se realizó en dos periodos, uno corto de 15 días y otro largo de 100 días. Para calcular la tasa de crecimiento se realizó la diferencia entre la longitud final y la inicial dividida por el número de días comprendido entre las observaciones (Hernández, 1996).

Peso fresco

Se extrae el sistema vegetal del medio en el que se esté desarrollando y se pesa en una báscula de precisión. Esta medida no es destructiva y se realiza en diferentes momentos del experimento (tiempo en días o semanas). De esta manera se puede determinar por medio de la variación del peso del sistema vegetal la velocidad de crecimiento (Fernández y Johnston, 1986).

El peso fresco de las plantas que crecen en tierra fluctúa, dependiendo de los cambios en el estado del agua, por lo tanto este criterio es un indicador pobre de crecimiento (Taiz y Zeiger, 2002).

Peso seco

Se expone el sistema vegetal a temperaturas entre 60° C a 80° C durante aproximadamente 72 horas y luego se pesa. Esta medida es destructiva y se debe seleccionar otra muestra para continuar con el experimento. En este caso el valor de crecimiento se determina según las variaciones del peso de las plantas escogidas (Fernández y Johnston, 1986).

Utilizando cualquiera de los parámetros descritos anteriormente se obtiene una curva sigmoidea de crecimiento que consta de tres fases: exponencial, en la que se evidencia la primera

etapa del crecimiento; lineal, en la que el crecimiento es constante con respecto al tiempo, y senescencia, que es la última etapa, en la cual cesa el crecimiento de la planta. La figura 1 muestra la curva obtenida en un estudio realizado al crecimiento de la hoja de pasto mulato utilizando como parámetro de medida la elongación de la hoja.

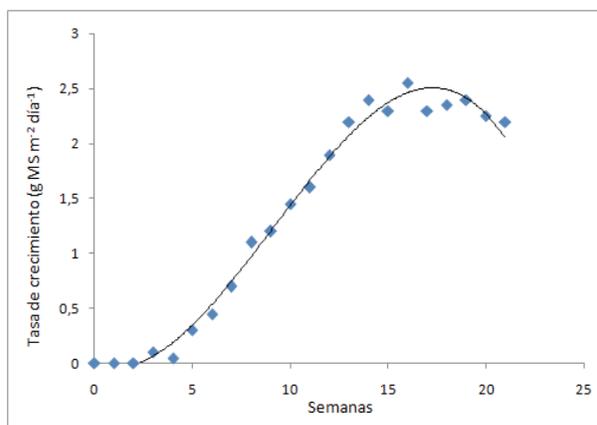


Figura 1. Curva sigmoide adaptada de los datos de crecimiento de pasto mulato

Fuente: Pérez et ál, 2004

De igual forma, utilizando el parámetro de peso seco, se obtiene una tendencia sigmoide de crecimiento para diferentes partes de la planta de calabacita, excepto para el crecimiento del tallo, como se muestra en la figura 2.

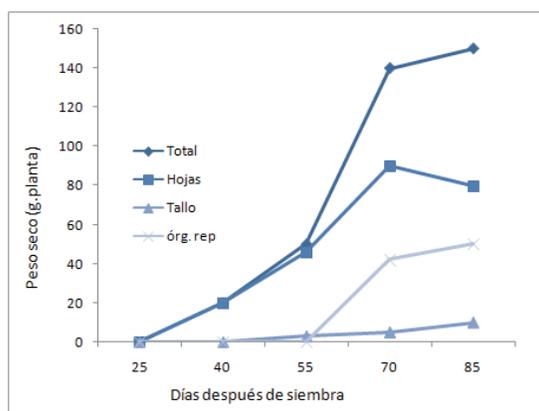


Figura 2. Dinámica de crecimiento de la planta de calabacita

Fuente: Sedano et ál, 2005

El peso fresco y el peso seco pueden ser usados durante un mismo experimento, de esta forma se tiene mayor información sobre el comportamiento de la planta en estudio. En el 2009 la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia (Criollo y García, 2009) utilizó el método manual para estudiar el efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus L.*) en invernadero. Los datos de peso fresco de la raíz fueron obtenidos utilizando una balanza analítica y el peso seco de la raíz y hojas se obtuvo después del secado de muestras en un horno a 70° C durante 72 horas.

Método de Fluorescencia Inducida por Láser (LIF)

Esta técnica se aplicó en una investigación realizada en el Colegio Nacional de Tecnología Kisarazu de Japón, en asociación con la Facultad de Ingeniería de la Universidad Chiba de Japón (Takahashi et ál. 1988); se estudió la relación entre la intensidad de la fluorescencia de una planta de arroz y la cantidad de fertilizante para estimar su crecimiento por medio de la detección del color de las hojas.

El equipo diseñado está conformado por una fuente de luz y un detector de fluorescencia; se analizaron las hojas cortadas desde el tallo de una planta y se midió el espectro de fluorescencia de su parte central en un tiempo de diez minutos, excitando con luz ultravioleta de 337,1 nm de longitud de onda. Este experimento se realizó en un campo de arroz. El color de las hojas se determinó utilizando una escala de colores estándar. De esta investigación se concluyó que la intensidad de la fluorescencia de la clorofila está relacionada con el crecimiento de las plantas.

En el 2002 se patentó esta técnica bajo el nombre "Diagnosing Method for Plant Growth" (Japan Science & Technology CORP, 2002). En ésta

se utiliza una cámara CCD (dispositivo de carga acoplada) para detectar la fluorescencia de un láser de 355 nm de longitud de onda y enviar la información a un computador a través de una fibra óptica y un espectrómetro, de manera que la detección de crecimiento se realiza remotamente (figura 3). Utilizando este equipo no es necesario destruir la planta en estudio.

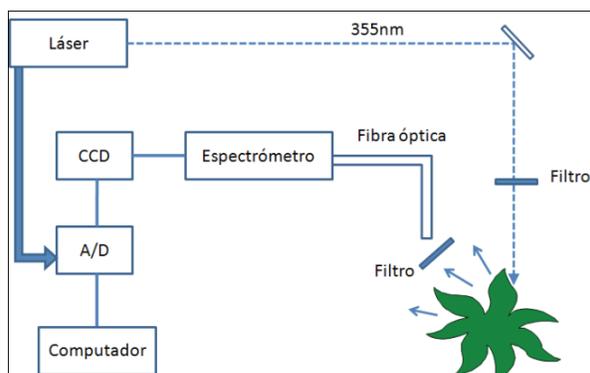


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema LIF
Fuente: Japan Science & Technology CORP, 2002

Saito et ál. (2005) aplicaron tres técnicas diferentes utilizando este método para estudiar el comportamiento de plantas vivas. El sistema básico está compuesto por un láser, un dispositivo espectroscópico, un detector y un computador. La primera técnica consiste en utilizar un LIF móvil analizando el crecimiento de hojas de tomate. La segunda utiliza imágenes LIF para obtener la forma de las hojas de café. La tercera utiliza imágenes LIF *lidar* (*light detection and ranging*) en hojas de árboles para estimar de manera remota la concentración de clorofila.

Análisis digital de imágenes

Esta técnica consiste en utilizar imágenes de un sistema vegetal para determinar la variación de su crecimiento; en algunos casos se toman desde diferentes puntos espaciales para disminuir posibles errores.

Barron y Liptay (1994) utilizaron una secuencia de 100 imágenes aplicando cálculos de flujo óptico o velocidad de imagen para medir pequeñas variaciones del crecimiento en plántulas de maíz, técnica que extendieron en 1997 para medirlas en forma tridimensional, utilizando una secuencia de 506 imágenes desde dos puntos de vista de la plántula, una de frente y otra ortogonal. El experimento se desarrolló en condiciones de temperatura e iluminación controladas, para disminuir las interferencias en las imágenes debido a las variaciones de estas variables. Los autores consideran que este método es confiable para la medición de crecimiento y, además, es económico porque sólo se necesita una cámara monocromática y un computador para realizar el análisis de las imágenes.

Loomis et ál. (1997, pp. 475-478) visualizaron el crecimiento de la raíz y el tallo de una planta aplicando esta técnica. En su investigación capturaron las imágenes de la raíz de una plántula de maíz con una cámara CCD (dispositivo de carga acoplada) ubicada en la parte frontal de ésta y para las del tallo utilizaron dos ubicadas ortogonalmente. Con dicha información obtienen un modelo virtual de la planta que se puede ver desde cualquier punto, reconstruyendo las imágenes en un computador y obteniendo así parámetros de interés.

Más tarde, Aboelela, Barron y Liptay (2005) utilizaron una cámara y una fuente de luz de infrarrojo cercano (NIR), capturando imágenes cada dos minutos y obteniendo entre 50 a 150 para medir la relación de crecimiento tallo/hojas en plántulas de maíz, para diferentes condiciones de temperatura e iluminación aplicando cálculos de flujo óptico.

Sun et ál. (2007), en la Universidad Agrícola de China, investigaron la forma de medir el crecimiento de una plántula de tomate de manera no destructiva utilizando esta técnica;

se analizó el área de las hojas tomando tres fotografías (de la misma planta) desde diferentes ángulos (cada 120°); las imágenes se convertían a escala de grises y se llevaban a forma binaria con el algoritmo Otsu. Algunos inconvenientes encontrados por los autores fueron la influencia de la sombra en las imágenes y la inclinación de las plántulas debido al fototropismo.

En Alemania, Mühlich et ál. (2008) utilizaron esta técnica para medir el crecimiento de la raíz de una planta. El experimento consistió en colocar plántulas en un plato de Petri transparente de manera que se pudiera observar las raíces de cada una de ellas. En diferentes intervalos de tiempo, se tomaban imágenes de éstas para procesarlas y determinar el crecimiento utilizando un algoritmo desarrollado por los autores, el cual permite analizar tanto imágenes individuales como una secuencia. Se obtiene un modelo de la raíz que fue contrastado con el método manual, observando que con esta técnica se disminuye la cantidad de datos necesaria para encontrar dicho modelo.

Es posible medir el crecimiento de la raíz dentro de la tierra utilizando radiografía de neutrones, lo que permite observar la distribución espacial y determinar la masa de la raíz por medio de análisis de imágenes de dicha radiografía, como lo describen Robinson et ál. (2008).

También Zeng et ál. (2008), en China, investigaron una forma para optimizar la medición del diámetro de las uvas aplicando esta técnica. Se utilizó una cámara CMOS (semiconductor complementario de óxido de metal) de alta resolución, lentes telecéntricos y un computador para capturar imágenes de una uva. Las imágenes se enviaban al computador por medio de la comunicación USB 2.0 y se procesaban utilizando el algoritmo OSTU. Los autores encontraron que el uso de lentes telecéntricos disminuye la influencia de la variación de la distancia del objeto y afirman que se puede aplicar en la medición de otros

frutos de diferentes tamaños y variedades. Con este estudio, además, se pudieron detectar con precisión trastornos fisiológicos de la uva.

Esta técnica para medir el crecimiento de un sistema vegetal es indirecto y no destructivo, requiere de un software y un algoritmo especializado para disminuir los errores por la superposición de las hojas y las condiciones de iluminación.

Algunos de los equipos patentados que utilizan esta técnica para determinar el crecimiento de las plantas son: "Plant Propagation System and Apparatus" (Fraze, 1987), "System and Method Each for Analyzing Plant Growth" (Hitachi Ltd., 2005), "Plant Growth Analyzer" (Hitachi Ltd., 2006), "Plant Growth Device" (Aruze Corp., 2007) y "Plant Growth Information-Processing System" (National Agriculture & Food Research Organization, 2007).

Método interferométrico

Okamoto, Baba y Yanagi (2000), de la Universidad de Kagawa-Japón publicaron la aplicación de este método, utilizando un panel de *led's* (*light emissor diodo*) rojos y blancos (RGB). En el modo de crecimiento todos los *led's* se encuentran encendidos, en el de sensado del crecimiento de la planta sólo se prenden los blancos. Los *led's* rojos funcionan como fotodiodos detectando la luz verde reflejada por las hojas (figura 4).

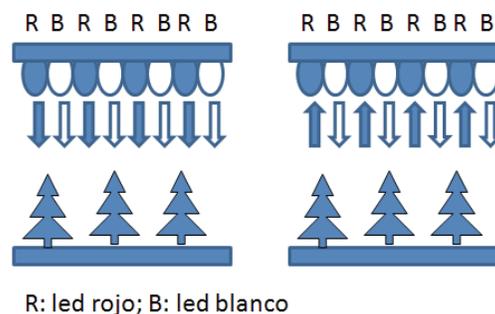


Figura 4. Censado de crecimiento de plantas utilizando led's rojos y blancos

Fuente: Okamoto, Baba y Yanagi, 2000

El método interferométrico es empleado en la patente “Growth-Degree Measuring Device for Being Installed on Mobile Body” (National Agriculture & Food Research Organization, 2006). El equipo utiliza fotoreceptores para detectar la luz solar reflejada por las plantas y se realiza un tratamiento espectroscópico de ésta, determinando la intensidad fotoreceptora de dos tipos de longitud de onda, observando así el crecimiento de un cultivo. Este método es indirecto y no destructivo.

De la Casa et ál. (2007) midieron el índice de área foliar (IAF), que es un indicador de la frondosidad de la planta, en un cultivo de papa utilizando las técnicas de análisis de imágenes e interferometría. Comparando los dos métodos obtuvieron una correlación aceptable ($R^2 = 0,8$; $P < 0,01$), es decir que se obtienen resultados similares.

Del 2007 al 2009 Kadono, Shimizu, Toyooka y Kobayashi utilizaron esta técnica para determinar el crecimiento de una planta (elongación de las hojas) en diferentes condiciones de luz y polución. En el experimento se utilizó un láser con longitud de onda de 532 nm, un divisor de haz de polarización (PBS) para dividir la luz láser en dos haces, dos espejos para reflejar cada haz y una cámara CCD para observar el patrón de interferencia de dos puntos patrones (figura 5). Los autores utilizaron el algoritmo de interferometría estadística para determinar la medida de crecimiento de la planta.

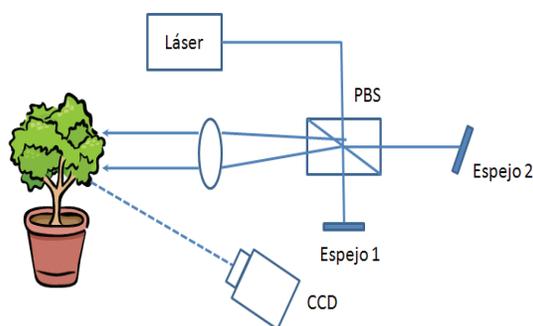


Figura 5. Sistema para medir crecimiento en plantas utilizando el método interferométrico

Fuente: Kadono y Kobayashi, 2009

Técnica de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS)

Esta técnica, rápida, eficiente y no destructiva, consiste en analizar las variaciones en el espectro de luz infrarroja aplicado a un sistema vegetal en estudio. En el 2000 se patentó el “Method for Monitoring Plant Growth in Field Crops” (Moncheny, 2000), que utiliza esta técnica durante el proceso de posgerminación para monitorear el crecimiento de un cultivo de cereales. Los datos obtenidos permiten determinar las condiciones de nitrógeno o azufre de los nutrientes del cultivo y sus condiciones de humedad; con esta información se adoptan las medidas necesarias para mejorar su desarrollo.

León, Garrido-Varo y Downey (2005) utilizaron esta técnica para discriminar entre plántulas de olivo jóvenes y adultas (sensor usado para detectar dos estados), e identificar cuál ofrece un mayor contenido de aceite, basados en el estudio realizado por Brunner y Eller (1977), en el que se comprobó que la NIRS permite determinar la madurez de hojas de *Piper betle*.

En el 2006 Kancheva y Borisova utilizaron esta técnica para estudiar diferentes especies agrícolas como el trigo, la cebada y la arveja en diversas condiciones de nutrientes, aplicando longitudes de onda en el rango de 400 a 820 nm, y analizando características del espectro de la planta como reflexión, absorción, transmisión y fluorescencia. Con estos datos determinaron índices de crecimiento como el área de las hojas, la biomasa y el contenido de clorofila.

Guo, Guo, Wang y Li (2009) aplicaron esta técnica para obtener un modelo de discriminación de hojas que fue evaluado con datos experimentales, y en 2010 Guo, et ál. usaron *wavelets* y redes neuronales para clasificar hojas de alcanfor y *Aceraceaedie* por medio de sus curvas espectrales.

Método de emisión acústica

Okushima, Sase, Ohtani, Shinojo y Higo (1996) propusieron este método no destructivo como una posibilidad de medir el crecimiento de la raíz de una planta dentro de la tierra; en 1998 realizaron pruebas con una planta de calabaza y un sensor de emisión acústica con una frecuencia principal de al menos 15 kHz, logrando demostrar su aplicabilidad. Además, obtuvieron datos de la cantidad de agua en la planta y el movimiento de la arena correspondiente a la germinación de la semilla.

Shimotashiro et ál. (1998) midieron la elongación de una raíz de maíz plantada en tierra de manera vertical y espacial, usando doce sensores de emisión acústica (figura 6).

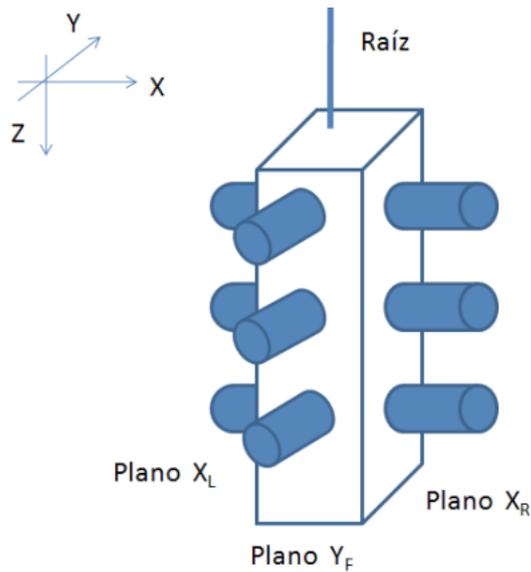


Figura 6. Diagrama de la caja experimental y posición de los sensores de emisión acústica

Fuente: Shimotashiro et ál., 1998

Este método puede ser utilizado en tiempo real para determinar el movimiento de la raíz, la velocidad y la dirección de la elongación en tres dimensiones.

Método de inductancia eléctrica

En este método, no destructivo, se utilizan sensores LVDT (Transformadores Diferencial de Voltaje Lineal) para determinar cambios de dimensión en el sistema vegetal. Cramer, Epstein, y Lau (1988) propusieron un dispositivo que utiliza uno de estos sensores para medir la elongación de la raíz de una planta que se encuentra sumergida en líquido. A medida que ésta crece se transmite este movimiento por un sistema de poleas al terminal móvil del sensor (figura 7). Un procedimiento similar fue utilizado por Bengough y MacKenzie (1994) para medir la elongación de la raíz de una arveja en germinación.

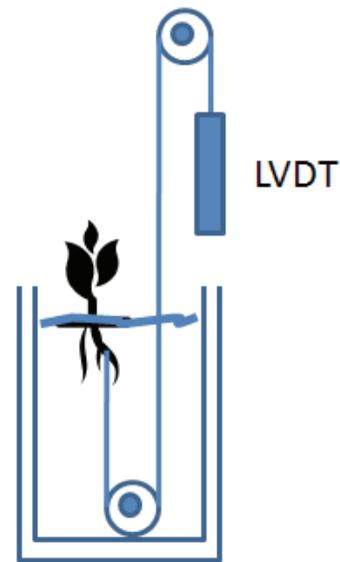


Figura 7. Sistema diseñado para medir la elongación de la raíz de una planta sumergida en líquido

Fuente: Cramer, Epstein y Lau, 1988

En 1997, Degli Agosti, Jouve y Greppin utilizaron LVDT para medir la elongación del tallo de una planta, el cual se encuentra acoplado al sensor de manera que cualquier variación de tamaño se refleja como cambio del sensor inductivo (figura 8).

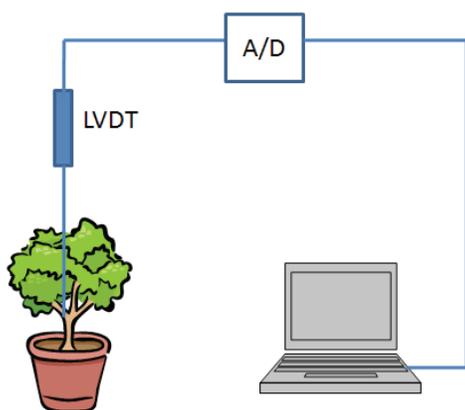


Figura 8. Medidor de crecimiento utilizando un sensor LVDT
Fuente: Degli Agosti, Jouve y Greppin, 1997

Estos sensores también son utilizados para medir variaciones del diámetro del tallo de una planta, colocando la parte móvil del LVDT acoplada a éste. En el 2001 Améglio, Cochard y Ewers aplicaron esta técnica para medir la variación del diámetro del tallo en árboles de nuez y evaluar el efecto que tienen las heladas en su desarrollo. Para ello, utilizaron diez segmentos de tallo de 5 cm de longitud y 1 cm de diámetro, cada uno con un sensor LVDT introducidos en una cámara de temperatura controlada, evaluando los cambios que se presentan para diferentes temperaturas.

Daudet et ál. (2005) analizaron el efecto del agua y el carbón en el desarrollo de una planta, aplicando la medición de variación del diámetro del tallo al igual que Schepper y Steppe (2010), quienes verificaron el modelo propuesto de transporte de agua y azúcar. Los datos obtenidos con esta técnica fueron contrastados con los resultados de la simulación en condiciones controladas y en campo abierto.

La elongación de las hojas también se puede medir aplicando este método, atando la parte móvil del LVDT a la punta de una hoja. Esta técnica la aplicaron Cramer y Bowman (1991), Dodd y Davies (1994), Munns et ál. (2000) y Green et ál. (2009) en estudios relacionados con

crecimiento de plantas. Utilizando LVDT no es necesario destruir la hoja, de forma que se puede realizar la medición en diferentes tiempos del experimento sobre la misma muestra sin alterar las condiciones de crecimiento.

Método de capacitancia eléctrica

El método consiste en medir la capacitancia eléctrica de la raíz de una planta por medio de un capacitómetro, para lo cual se utiliza una varilla de metal (cobre o acero) de longitud conocida, que funciona como un electrodo, insertada en el suelo a una distancia conocida de la planta, formándose un capacitor entre la varilla y la raíz. El terminal negativo del capacitómetro se conecta en la parte inferior del tallo de la planta y el terminal positivo a la varilla. De esta forma el valor obtenido en el equipo permite estimar la masa radical de la muestra y determinar su velocidad de crecimiento.

Dalton (1995) propone aplicar esta técnica y la compara con la medición de peso seco de la raíz, encontrando una correlación de 0,77. En 1998, Beem, Smithen y Zobel estimaron la masa fresca de la raíz de maíz con este método.

En 2004, Polanía, Rodríguez y Mejía aplicaron este método en la caña de azúcar. En el experimento se utilizaron cuatro niveles diferentes de humedad y trece repeticiones. El valor de capacitancia fue contrastado con los de masa fresca y seca. Preston, McBride, Bryan y Candido (2004) estimaron la masa de la raíz de un árbol de álamo híbrido.

En el año siguiente, Rajkai, Végh y Nacsá (2005) implementaron esta técnica para medir la dependencia de la frecuencia en la capacitancia de la raíz y la relación con sus índices de crecimiento. McBride, Candido, y Ferguson (2008) realizaron la estimación de la masa de la raíz del maíz y analizaron el efecto de la cantidad de

plantas en un cultivo sobre la capacitancia de la raíz de una planta. Dostal, Streda y Chloupek (2009) emplearon esta técnica para evaluar el comportamiento de diferentes tipos de cebada con y sin fungicida.

Esta técnica no es destructiva pero requiere un capacitómetro de precisión y gran habilidad del experimentador para obtener medidas confiables.

Comparación de técnicas

Luego de realizar una breve descripción de cada uno de los métodos que se utilizan para medir el crecimiento de un sistema vegetal, se identificaron criterios de comparación como se muestra en la tabla 1.

La destrucción de la muestra implica cortar una sección de la planta o eliminarla por completo, de tal manera que para la siguiente prueba se debe eliminar otra sección o toda la planta.

El término invasivo se refiere a que la técnica modifica el sistema vegetal debido a que se encuentra en contacto con éste. Se considera automático el método que toma la medida de crecimiento sin intervención del experimentador.

La implementación se ha considerado en tres niveles, fácil, medio y difícil, según los componentes tecnológicos y su distribución, el control necesario en el ambiente en el que se realiza la medición y el requerimiento de algoritmos de cómputo para el análisis de datos.

Tabla 1. Comparación de las técnicas de medición de crecimiento vegetal más común

Técnica	Destruye la muestra	Invasiva	Automática	Implementación
Manual: - Elongación - Peso fresco - Peso seco	No No Sí	Sí	No	Fácil
Fluorescencia inducida por láser (LIF)	Sí*	No	Sí	Difícil
Análisis digital de imágenes	No	No	Sí	Difícil
Interferométrico	No	No	Sí	Difícil
Espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS)	No	No	Sí	Difícil
Emisión acústica	No	No	Sí	Media
Inductancia eléctrica	No	Sí	Sí	Media
Capacitancia eléctrica	No	Sí	No	Media

* Algunas excepciones se pueden encontrar en Saito et ál., 2005

Fuente: los autores

Se logró con este estudio conocer las características, ventajas y desventajas de las técnicas existentes, de manera que se pueda proponer un nuevo método para la medición de la velocidad de crecimiento de un sistema vegetal de fácil implementación, no destructivo, no invasivo

y automatizado (Quintero, 2010) que pueda competir con los mencionados en este artículo.

Conclusiones

Al realizar el análisis de las principales técnicas existentes para medir el crecimiento

de un sistema vegetal se concluye que el método manual es destructivo en algunos parámetros de medida y da lugar a errores debido a la intervención directa del experimentador, pese a que es el más ampliamente difundido.

Por otro lado, el método de análisis de imágenes es comúnmente utilizado dado que no destruye la muestra estudiada, pero los resultados obtenidos pueden presentar errores debido a las características de la cámara utilizada, las condiciones de luz en las que se esté realizando el experimento y al algoritmo seleccionado para el correspondiente análisis. El principal inconveniente de esta técnica radica en el costo de implementación y el equipo de cómputo de alto desempeño requerido.

Aunque los métodos de láser, interferometría y espectroscopia de infrarrojo cercano no son destructivos, utilizan el análisis de ondas de luz y los errores más comunes se presentan en las mediciones debido a las deficientes condiciones de iluminación, fototropismo y el algoritmo seleccionado para estudiar las ondas.

Otra técnica que no necesita tener contacto con la muestra es la emisión acústica, que permite obtener la medición tridimensional del sistema vegetal, pero presenta inconvenientes en la lectura de crecimiento debido al efecto que tiene la cantidad de agua interna de la planta sobre el sensor.

Un método comúnmente usado para detectar el crecimiento de tallos es el que utiliza la técnica de inductancia eléctrica, el cual no es destructivo y automático pero requiere una adecuada instalación para no alterar la forma de crecimiento de la planta.

También el método de capacitancia eléctrica es no destructivo y sencillo de utilizar, aunque los estudios analizados aconsejan validar los resultados debido a que se tiene algunas variaciones en la lectura de los datos.

Luego de realizar el análisis y comparación de las técnicas más utilizadas para la medición de crecimiento vegetal, se observa que este tema es aún estudiado y se están investigando nuevos métodos y variaciones de los ya existentes para mejorar las características de censado y análisis de datos sin destruir la planta o alterar su desarrollo.

Referencias

- Aboelela, A.; Liptay, A. y Barron, J. (2005), "Using optical flow in near-infrared imagery to measure plant growth", en *International Journal of Robotics and Automation (IJRA2005)*, Acta Press, vol. 20, núm. 1, pp. 43-49.
- Améglio, T.; Cochard, H. y Ewers, F. (2001), "Stem diameter variations and cold hardiness in walnut trees", en *Journal of Experimental Botany*, vol. 52, núm. 364, pp. 2135-2142.
- Aruze Corp. (2007), *Plant growth device*, JP Patent 2007104932.
- Barron, J. y Liptay, A. (1994), "Optic flow to measure minute increments in plant growth", en *Bioimaging*, vol. 2, núm. 1, pp. 57-61.
- Barron, J. y Liptay, A. (1997), "Measurement 3D plant growth using optical flow", en *Bioimaging*, vol. 5, pp. 82-86.
- Beem, J. van; Smithen, M. E. y Zobel, R. W. (1998), "Estimating root mass in maize using a portable capacitance meter", en *Agronomy Journal*, vol. 90, pp. 566-570.
- Bengough, A. G. y MacKenzie, C. J. (1994), "Simultaneous measurement of root force and elongation for seedling pea roots", en *Journal of Experimental Botany*, vol. 45 núm. 270, pp. 95-102.
- Brunner, U. y Eller, M. (1977), "Spectral properties of juvenile and adult leaves of piper betle and their ecological significance", en *Physiologia Plantarum*, vol. 41, pp. 22-24.
- Cramer, G. y Bowman, D. (1991), "Kinetics of maize leaf elongation", en *Journal of Experimental Botany*, vol. 42, núm. 244, pp. 1417-1426.

- Cramer, G.; Epstein, E. y Lau, A. (1988), "Kinetics of root elongation of maize in response to short-term exposure to NaCl and elevated calcium concentration", en *Journal of Experimental Botany*, vol. 39, núm. 208, pp. 1513-1522.
- Criollo, H. y García, J. (2009), "Efecto de la densidad de siembra sobre el crecimiento de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) bajo invernadero", en *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 3, núm. 2, pp. 210-222.
- Dalton, F. N. (1995), "In situ root extent measurements by electrical", en *Plant and Soil*, vol. 173, pp. 157-165.
- Daudet, A. et ál. (2005), "Experimental analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations", *Journal of Experimental Botany*, vol. 56, núm. 409, pp. 135-144.
- De la Casa, A. et ál. (2007), "Uso del índice de área foliar y del porcentaje de cobertura del suelo para estimar la radiación interceptada en papa", en *Agricultura Técnica*, vol. 67, núm. 1, pp. 78-85.
- Degli Agosti, R.; Jouve, L. y Greppin, H. (1997), "Computer-assisted measurements of plant growth with linear variable differential transformer (LVDT) sensors", en *Archives de Science de Geneve*, vol. 50, pp. 233-244.
- Dodd, I. y Davies, W. (1994), "Leaf growth responses to ABA are temperature dependent", en *Journal of Experimental Botany*, vol. 45, núm. 276, pp. 903-907.
- Dostal, V.; Streda, T. y Chloupek, O. (2009), "Electric capacity as a measure of the intact root system size in the soil", *International Symposium "Root Research and Applications" RootRAP*, Boku-Vienna, Austria.
- Fernández, G. y Johnston, M. (1986), *Fisiología vegetal experimental*, San José, Costa Rica, Servicio editorial IICA.
- Fraze, R. E. (1987), *Plant propagation system and apparatus*, EP Patent 0142989A2. 1985, U.S. Patent 4669217.
- Green, J. et ál. (2009), "Response of 98140 corn with gat4621 and *hra* Transgenes to Glyphosate and ALS-Inhibiting Herbicides", en *Weed Science*, vol. 57, pp. 142-148.
- Guo, T. et ál. (2009), "Application of NIR spectroscopy in classification of plant species", en *First International Workshop on Education Technology and Computer Science*, núm. 3, 879-883.
- Guo, T. et ál. (2010), "Classification of plant leaves by Near-infrared spectroscopy using ANN and wavelet", en *Second International Workshop on Education Technology and Computer Science*, 20-23.
- Hernández, G. (1996), "Tasas de elongación de frondos de *Macrocystis Pyrifera* (L.) AG. en baja california sur México", *Ciencias Marinas*, vol. 22, núm. 1, pp. 57-72.
- Hitachi Ltd. (2005), *System and method each for analyzing plant growth*, JP Patent 2005229818.
- Hitachi Ltd. (2006), *Plant growth analyzer*, JP Patent 3885046.
- Japan Science & Technology CORP (2002), *Diagnosing method for plant growth*, JP Patent 2002214141.
- Kadono, H.; Shimizu, N. y Toyooka, S. (2007), *Application of statistical interferometry to monitor biological activity of plant under environmental stress* [CD-ROM], Proc. ATEM07, OS2-2-7.
- Kadono, H. y Kobayashi, K. (2009), *Improvement of dynamic range of statistical interferometry and its application to monitor ultra-short term growth behavior of plant*, IEEE 2009, 260-265.
- Kancheva, R. y Borisova, D. (2006), *Plant spectral signatures as growth stress indicators*, Bulgaria, Remote Sensing Dept, Solar-Terrestrial Influences Laboratory - BAS, IEEE 2006, 355-360.
- León, L.; Garrido-Varo, A. y Downey, G. (2005), "Near Infrared Spectroscopy (NIRS) as a promising selection tool in olive breeding programs", en *FRUTIC 05, Information and technology for sustainable fruit and vegetable production*, Montpellier, Francia.

- Loomis, J. J. *et ál.* (1997), *Visualization of plant growth*, 8th IEEE Visualization '97, Los Alamitos, IEEE Computer Society Press.
- Mcbride, R.; Candido, M. y Ferguson, J. (2008), "Estimating root mass in maize genotypes using the electrical capacitance method", en *Archives of Agronomy and Soil Science*, vol. 54, núm. 2, pp. 215-226.
- Moncheny, M. (2000), *Method for monitoring plant growth in field crops*, EP Patent 1141701A1.
- Mühlich, M. *et ál.* (2008), "Measuring plant root growth", en *30th Annual Symposium of the German Association for Pattern Recognition*, Munich, Germany.
- Munns, R. *et ál.* (2000), "Water relations and leaf expansion: importance of time scale", en *Journal of Experimental Botany*, vol. 51, núm. 350, pp. 1495-1504.
- National Agriculture & Food Research Organization (2006), *Growth-degree measuring device for being installed on mobile body*, JP Patent 2006314215.
- National Agriculture & Food Research Organization (2007), *Plant growth information-processing system*, JP Patent 2007124932.
- Okamoto, K.; Baba, T. y Yanagi, T. (2000), "Plant growth and sensing using highbrightness white and red light-emitting diodes. Lasers and Electro-Optics, (CLEO 2000)", en *Conference on San Francisco*, San Francisco, 450-451.
- Okushima, L. *et ál.* (1996), "Possibility of root growth measurement underground by acoustic emission sensor. Progress in acoustic emission VIII", *The Japanese society for NDI*, pp. 339-343.
- Okushima, L., *et ál.* (1998), "Plant measurement by acoustic emission sensor", en *Acta Horticulture 42, II International Symposium on Sensors in Horticulture, I, Greve, Denmark, ISHS*.
- Pérez, J. A. *et ál.* (2004), "Análisis de crecimiento, área foliar específica y concentración de nitrógeno en hojas de pasto 'Mulato'", en *Téc. Pecu. México*, vol. 42, núm. 3, pp. 447-458.
- Polanía, J. A.; Rodríguez, L. A. y Mejía de T., M. S. (2004), "Métodos indirectos para estimar masa radical en caña de azúcar, variedad CC8592", en *Acta Agronómica ACAG*, vol. 53, núm. 3, pp. 51-54.
- Poorter, H. y Garnier, E. (1996), "Plant growth analysis: an evaluation of experimental design and computational methods", en *Journal of Experimental Botany*, vol. 47, núm. 302, pp. 1343-1351.
- Preston, G. *et ál.* (2004), "Estimating root mass in young hybrid poplar trees using the electrical capacitance method", en *Agroforestry Systems*, vol. 60, pp. 305-309.
- Quintero, N. (2010), "Detección de la Velocidad de Crecimiento Vegetal Mediante el uso de un Campo Eléctrico de Baja Frecuencia y Baja Intensidad", Propuesta de Investigación en Ingeniería No. 254024, ediciones UIS.
- Rajkai, K.; Végh, K. R. y Nacsá, T. (2005), "Electrical capacitance of roots in relation to plant electrodes, measuring frequency and root media", en *Acta Agronómica Hungarica*, vol. 53, núm. 2, pp. 197-210.
- Robinson, B. *et ál.* (2008), "Neutron radiography for the analysis of plant-soil interactions", en *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, en Meyers R. A. (Ed.), Wiley-Blackwell, pp. 1789-1795.
- Saito, Y. *et ál.* (2005), "Laser-induced fluorescence spectroscopy for in-vivo monitoring of plant activities", en *FRUTIC 05, Information and technology for sustainable fruit and vegetable production*, Montpellier, Francia.
- Schepper, V. de y Steppe, K. (2010), "Development and verification of a water and sugar transport model using measured stem diameter variations", en *Journal of Experimental Botany*, vol. 61, núm. 8, pp. 2083-2099.
- Sedano, G. *et ál.* (2005), "Dinámica del crecimiento y eficiencia fisiológica de la planta de calabacita", en *Revista Chapingo, Serie Horticultura, México*, vol. 11, núm. 2, pp. 291-297.

- Shimotashiro, T. *et ál.* (1998), "Non-destructive method for root elongation measurement in soil using acoustic emission sensors", en *Plant Production Science*, vol. 1, núm. 4, pp. 248-253.
- Sun, M. *et ál.* (2007), *Nondestructive measurement of tomato seedlings during their growth based on machine vision*, IEEE Computer Society Conference, Beijing, pp. 255-258.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2002), "Chapter 16", en *Plant physiology*, 3ª ed., M.A.: Sinauer Associates Inc., pp. 339-374
- Takahashi, K. *et ál.* (1988), "Laser-induced fluorescence on in-vivo chlorophyll of a rice plant: A technique for the remote detection of plant growth", en *4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Aussois, Francia, pp. 255-258.
- Zeng, Q. *et ál.* (2008), "A machine vision system for continuous field measurement of grape fruit diameter", en *IEEE Computer Society Conference*, Shanghai, pp. 1064-1068.