

Caracterización morfológica de plantas mediante procesamiento digital de imágenes

David Haimovich, Damián Rychter, Juan Acosta¹ y César Martínez^{2,3*}

¹Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral

²Centro de Investigación en Señales, Sistemas e Inteligencia Computacional (SINC(i))

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral

Ciudad Universitaria, Paraje "El Pozo", S3000, Santa Fe, Argentina.

³Laboratorio de Cibernética, Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Entre Ríos.

Resumen En el área de la morfología vegetal, en los últimos años se han desarrollado técnicas para caracterizar el crecimiento de plantas mediante el relevamiento sus medidas y puntos estructuralmente importantes. Sin embargo, todos son métodos manuales que resultan muy laboriosos para el operador. Este trabajo presenta la propuesta e implementación de un sistema para el análisis y recolección de datos característicos de plantas mediante procesamiento digital de imágenes. Primeramente se define un protocolo de captura de imágenes, que simplifique el procesamiento computacional posterior. Luego se presenta el bloque central del trabajo: el preproceso y detección de características sobre las plantas, especializándose el sistema en parametrizar el crecimiento de una maleza de la soja. Finalmente, se genera una planilla de cálculo con el relevamiento obtenido (similar al estudio manual), sirviendo esta información de apoyo a los especialistas agrónomos. Se logra, así, incorporar tecnologías informáticas que inicien el camino de la automatización de la detección y medición de características morfológicas en plantas.

1. Introducción

Actualmente, la soja es el mayor cultivo de Argentina y el uso de cultivares de soja transgénicos resistentes a glifosato se ha incrementado notablemente durante la última década [8]. En 2010 el área sembrada con soja en Argentina superó las 18.000.000 ha, y de esta superficie una alta proporción (> 95 %) fue bajo sistemas de siembra directa con variedades resistentes a glifosato [8]. La alta tasa de adopción de esta tecnología está basada en que los cultivares de soja transgénica resistentes a glifosato ofrecen una opción de control de muchas malezas con la simplicidad provista por el uso de este único herbicida de alta eficacia [4].

Las malezas compiten con los cultivos por recursos limitados (agua, luz, nutrientes), por lo cual exigen que se invierta en tecnología, elevando los costos de producción, con el fin de lograr su control y reducir las pérdidas de cosecha [2].

* Autor correspondiente: cmartinez@fich.unl.edu.ar.

Si bien es cierto que el empleo extensivo de glifosato ha significado el uso de una práctica cuyas ventajas agronómicas están fuera de discusión, también lo es el hecho que el problema de las malezas no ha desaparecido y en numerosos casos particulares se ha agravado [9].

En los últimos años a partir de relevamientos de malezas realizados en la zona centro y sur de la provincia de Santa Fe, se han registrado cambios en la flora de malezas asociadas al cultivo de soja RG. [3]. Dentro de este gran grupo de especies se encuentra citada *Iresine difusa* Humb. & Bonpl. ex Willd (Amaranthaceae). Esta especie ha sido caracterizada como tolerante al herbicida usado para combatirla (glifosato) [6]. La falta de eficacia del herbicida para controlar una maleza esta relacionada con características morfológicas y fisiológicas de la misma, ya que la planta puede modificar su estructura, en respuesta al daño producido por el herbicida [5].

Una visión integradora de la estructura y de la dinámica del desarrollo de los vegetales es la concepción básica del *análisis arquitectural*. El análisis arquitectural es una herramienta que permite esclarecer las distintas adaptaciones que presentan las plantas en lo que concierne a la ocupación del espacio, competencia y resistencia a perturbaciones [1]. A partir del conocimiento de la secuencia de diferenciación de la especie en condiciones no limitantes, es posible reconocer las reacciones que las plantas desarrollan a las restricciones impuestas por factores externos y deducir aspectos morfológicos relacionados con la expresión del genotipo [7].

En este trabajo se expone un método automático para detección de características morfológicas en plantas, específicamente sobre la especie de maleza mencionada, basada en procesamiento digital de imágenes. Hasta nuestro conocimiento, esta aproximación es la primera presentada sobre esta tarea. El sistema consta de una serie de bloques que detectan el inicio de la planta (nodo origen), luego los nodos donde nacen las ramas, a continuación las ramas y hojas de cada una, finalmente realiza las mediciones de largo y ancho de hojas. Como resultado para el experto humano, el sistema genera una planilla de cálculo (Microsoft Excel) que reúne todas las mediciones obtenidas; tarea que actualmente se realiza en forma totalmente manual y es muy laboriosa.

La organización de este documento se describe a continuación. La sección 2 expone el protocolo generado para la toma de las imágenes. La sección 3 detalla las partes del sistema y sus características. La sección 4 muestra los resultados obtenidos, junto a la tecnología utilizada en la implementación. Finalmente, la sección 5 resume las contribuciones principales y presenta los trabajos futuros.

2. Adquisición de imágenes

2.1. Protocolo para la captura de imágenes

La utilización de un adecuado protocolo para captura de imágenes, reduce el tiempo de procesamiento como así también la complejidad de las técnicas de procesamiento y análisis posteriores. Es importante destacar que una imagen

que no cumpla con los requisitos del protocolo puede provocar una baja tasa de aciertos en la etapa de procesamiento. El protocolo se diseña en base a las características deseables de detectar, a las herramientas tecnológicas y al espacio físico donde se encuentran las plantas.

Definición del protocolo:

- Iluminación del ambiente: la captura de imágenes será realizada en un ambiente cerrado, utilizando luz fluorescente artificial, la cual es producida por dos tipos de tubos fluorescentes con longitud de onda diferente. Estas lámparas producen un campo de iluminación homogéneo, sin calor excesivo.
- Ubicación de la planta: estará ubicada en una maceta de color negro, plantada en tierra con una superficie de arena y una hoja blanca detrás del tallo. Esto permite obtener un mayor contraste entre la planta y el resto. La maceta se identifica con un número y presenta una marca que permite conocer los dos planos para la toma de imágenes. Se coloca una escala de referencia con dos cuadrados de 5mm pintados de color rojo, la cual estará en el mismo plano que el tallo de la planta y perpendicular a la cámara. Finalmente, la planta se posiciona delante de una pared de color blanco perteneciente a la habitación.
- Posicionamiento de la cámara fotográfica: se coloca a una distancia de 1m desde el objetivo al tallo y la visión de la misma deberá ser perpendicular a dicho plano. Se utiliza un trípode para evitar movimiento en la toma de la foto.
- Captura de la imagen: se toman dos fotos de la planta, una correspondiente al plano 6, el cual se obtiene ubicando la marca de la maceta frente a la cámara y otra correspondiente al plano 3, el cual se obtiene rotando la maceta 90° en sentido antihorario. Al momento de la captura, se selecciona el máximo nivel de acercamiento sin perder detalle de la planta y se desactiva la opción de flash, debido a que dicha luz provoca una iluminación no deseada. Es necesario destacar que el origen de la planta debe estar visible y no debe estar solapado por alguna de las hojas. La Figura 1 muestra un ejemplo de las imágenes capturadas.

2.2. Los datos

Siguiendo el protocolo expuesto, se recolectaron las imágenes utilizadas en las pruebas en la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA) de la Universidad Nacional del Litoral en la ciudad de Esperanza, Santa Fé.

Las capturas fueron realizadas en un invernadero artificial por personal de la FCA, el cual presenta una temperatura de entre 25°C y 28°C durante todo el año, con un techo de luces fluorescentes que emulan la luz del día. Cada 15 días se tomaron 2 imágenes de cada planta en estudio. Cada fotografía muestra la imagen de la planta en las posiciones 3 y 6 definidas por el protocolo. Para esta investigación se utilizaron 10 plantas de la misma especie. Las resoluciones de las imágenes fueron de 3648×2736 píxeles. Se obtuvieron un total de 250 imágenes, las cuales muestran las diferentes etapas de crecimiento.

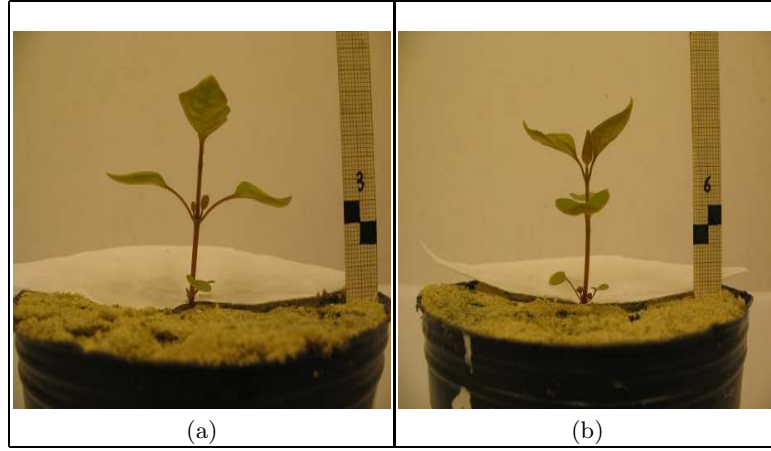


Figura 1. Imágenes capturadas mediante protocolo: (a) Planta posicionada en plano 3; (b) Planta posicionada en plano 6.

3. Método de caracterización de la planta

El método consta de una primera etapa que se encarga de realizar el preproceso: cambio de modelo de color al HSI y ecualización del histograma color, con el fin de aprovechar la información cromática y lograr una mejor segmentación entre el objeto de estudio y el fondo [10]. La Figura 2 muestra un ejemplo de los planos de color obtenidos mediante la siguiente conversión:

$$I = \frac{R + G + B}{3} \quad (1a)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} \min(R, G, B) \quad (1b)$$

$$W = \cos^{-1} \left(\frac{R - \frac{1}{2}(G + B)}{\sqrt{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]}} \right) \quad (1c)$$

$$H = \begin{cases} W & ; \text{ si } G \geq B \\ 2\pi - W & ; \text{ si } G < B \end{cases} \quad (1d)$$

La etapa principal implementa el método de detección de características morfológicas de las plantas propiamente dicho. Esta etapa consta de 5 pasos, cuyos resultados son dependientes entre sí. El primer paso consiste en la detección de la base del tallo (origen), punto a partir del cual comienza el análisis de la planta. En el segundo paso se segmenta el tallo, obteniendo el ancho y el punto más alto del mismo. El tercer paso prosigue con la fase de detección de los nodos y ajuste de la posición encontrada. A continuación, el cuarto paso encuentra el largo de las hojas, respectivas a cada nodo detectado. Este proceso es repetido para las dos imágenes que representan la planta. Al concluir ambas iteraciones, el quinto

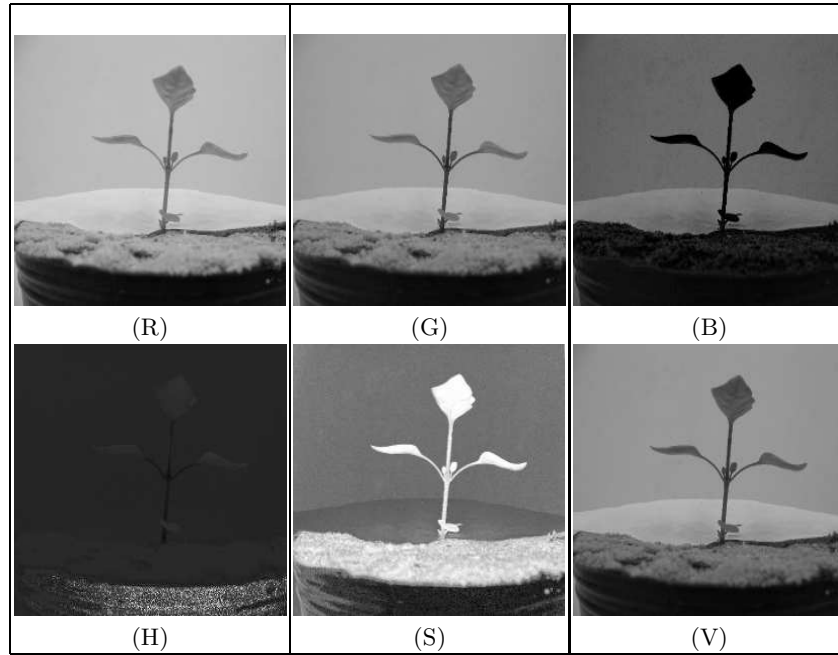


Figura 2. Imágenes de la planta en espacio RGB y transformadas al espacio HSI.

paso procede a la detección del ancho de las hojas. Esta ultima etapa utiliza la información obtenida en ambas imágenes, con el fin de ubicar los nodos no visibles en cada una de ellas.

3.1. Detección del origen

Una de las características principales de la región donde se encuentra el origen de la planta es la particularidad de valores que toma la misma en los planos matiz (H) y saturación (S). Este patrón detectado, luego de pruebas empíricas sobre en diferentes imágenes, permite establecer un punto de partida para la implementación del método de detección. Se puede establecer que el origen del tallo se encuentra en $0 \leq H \leq 7$ y $0,8 \leq S \leq 1$. Conocer estos rangos permite segmentar la imagen para separar la región donde se encuentra el origen del resto, obteniendo una imagen binaria mediante el siguiente mapeo:

$$s_j = \begin{cases} 1 & ; \text{ si } \left[|r_j^k - a_j^k| < \frac{W^k}{2} \right] \\ 0 & ; \text{ en otro caso} \end{cases}, \quad (2)$$

donde j denota los pixeles de la imagen; k a los planos de color H y S ; r_j^k los valores de cada plano por pixel; a es el centro de la región de interés y W el ancho del rango de interés.

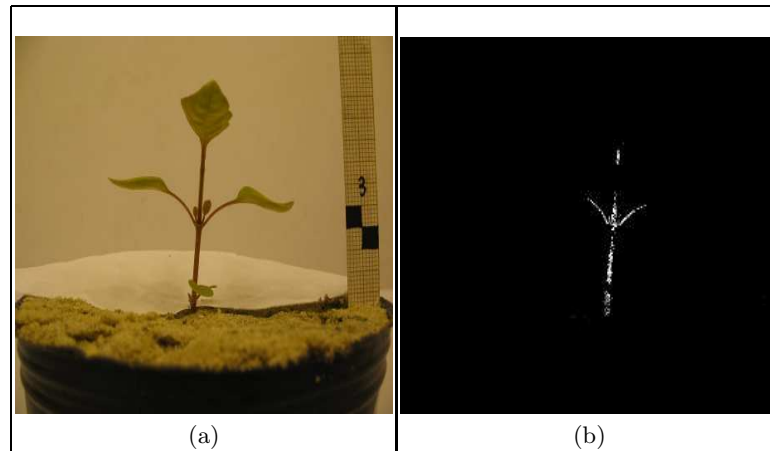


Figura 3. (a)Imagen de la planta; (b)Imagen de la planta segmentada en HSI, con posterior erosión.

A continuación se aplica la operación morfológica de erosión con un elemento estructurante circular de diámetro 3, con el objetivo de limpiar la imagen. Luego se procede a subdividir la imagen en pequeñas ventanas solapadas, con el fin de ubicar la zona de mayor concentración de energía que representa el lugar aproximado donde se encuentra el tallo de la planta. Localizada esta ventana, se recorre la misma desde abajo pixel por pixel buscando el punto blanco inferior, el cual se trata aquí como la aproximación al origen de la planta. La Figura 3 muestra un ejemplo de una planta y su imagen segmentada y erosionada.

3.2. Detección del tallo

A partir del punto origen de la planta, y en sentido vertical, se procede a la búsqueda del tallo por medio de correlación con máscaras de segmentos rectilíneos de diferentes tamaños y orientaciones (omitidas aquí por brevedad). La plantilla que mejor se ajuste a la imagen segmentada será la que permite identificar tanto la posición como el ancho aproximado del tallo. Finalmente, el ápice se aproxima buscando el punto blanco superior en la imagen que posee el tallo segmentado. La Figura 4 muestra un ejemplo de una planta y su tallo detectado mediante este proceso; aquí el ápice es el punto más alto, que se corresponde con el inicio de la hoja superior.

3.3. Detección de nodos

Los nodos son los puntos del tallo donde nacen las ramas, siendo su detección un hito crítico y muy importante en el análisis estructural. Esta etapa se divide en los siguientes bloques: preprocesamiento, correlación de la imagen con diversas

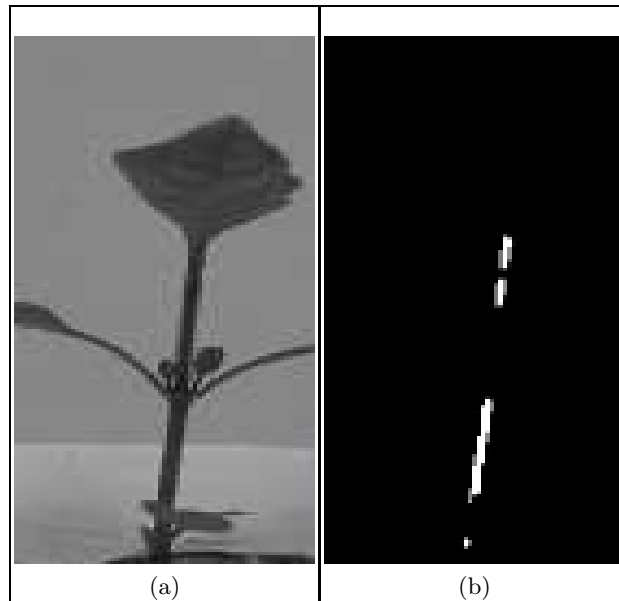


Figura 4. (a)Imagen de la planta; (b)Imagen del tallo segmentado mediante correlación.

plantillas, aplicación del algoritmo de Hough y detección de intersecciones de rectas.

Preprocesamiento. Binarización de la capa de Intensidad mediante un límite obtenido de manera iterativa a partir de su histograma. El análisis posterior recorre el tallo desde su origen hacia arriba.

Correlación con plantillas de ramas. Para la detección de los nodos es preciso conocer las ramas que nacen en cada uno de los nodos. Debido a que las ramas no poseen ningún patrón característico relacionado al color, pero sí a la forma, se procede a comparar ventanas con diversas máscaras que poseen formas similares a la unión de ramas con tallo (bifurcaciones del tallo). Estas máscaras fueron generadas a partir del muestreo sobre un conjunto de imágenes de prueba, resultando un conjunto de 35 plantillas. Cada una es correlacionada con diversas ventanas de la imagen, obteniendo un coeficiente de correlación que será tomado en cuenta sólo si es mayor a 85 %. En la imagen resultado se guardará el valor de correlación sólo en aquellas porciones donde la plantilla se parezca a la región procesada. Luego de realizado este proceso para todas las plantillas, se suman las imágenes resultantes y se normaliza, logrando una imagen binaria que contiene sólo a las ramas y nodos.

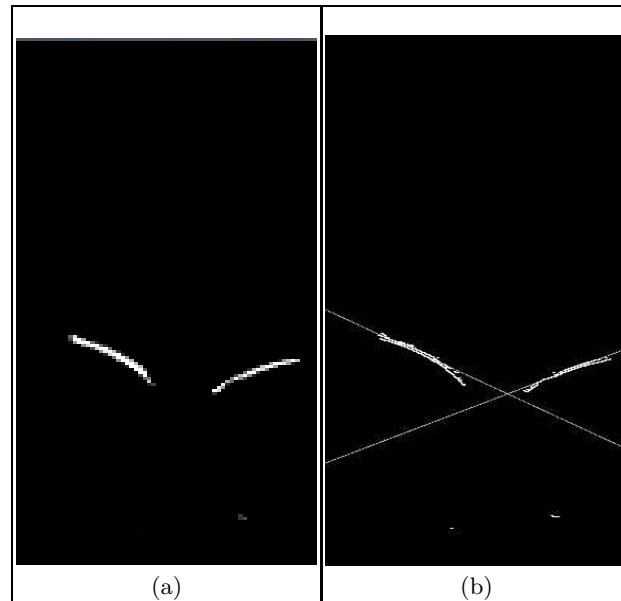


Figura 5. (a)Imagen con ramas segmentadas; (b)Imagen con sobreimpresión de las líneas detectadas por la transformada de Hough.

Aplicación de transformada de Hough (TH). La TH es un algoritmo que permite detectar formas en una imagen, siendo una técnica robusta frente al ruido y a la existencia de huecos en la frontera del objeto. El objetivo de la formulación de la TH usada aquí es encontrar puntos de la imagen que estén alineados, es decir, puntos que satisfagan la ecuación de la recta. En forma polar, $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$, donde ρ es la longitud de una normal desde el origen hasta la línea y θ es el ángulo de ρ con respecto al eje de abscisas.

Una vez realizada la transformación, se filtra la imagen transformada tomando en cuenta los valores que se encuentran en el rango $\theta \in \{15-75\} \cup \{105-165\}$, esto se debe a que no se han encontrado ramas que tiendan a ubicarse de manera horizontal ni vertical. Además, se desechan aquellos acumuladores con valor menor a un umbral previamente definido (longitud mínima supuesta para la rama). Esta operación da como resultado una nube de puntos por cada rama posible, eligiéndose el punto con acumulador más alto dentro de cada nube. La Figura 5 muestra a la izquierda la imagen de ramas analizada, y a la derecha la imagen con las rectas soporte de las ramas detectadas.

Detección de intersecciones de rectas. Corresponde a la búsqueda en el plano imagen anteriormente resultante de la intersección de las rectas soporte, dado por punto (x, y) común a ambas rectas. Además, de ser necesario, se corrige la localización del punto según su distancia respecto al tallo.

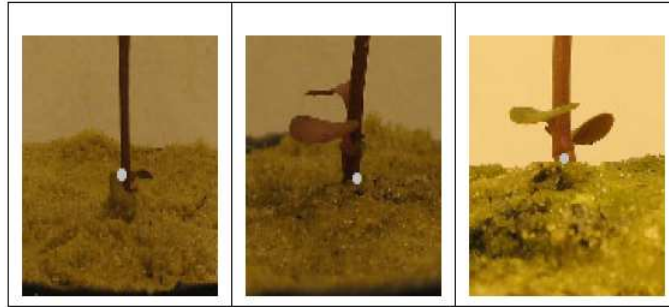


Figura 6. Ejemplos de nodos detectados satisfactoriamente.

3.4. Detección de largo y ancho de hoja

La detección del largo de las hojas se logra, hacia izquierda y derecha, buscando iterativamente los puntos de imagen segmentada con valor 1 (correspondiente a objeto), desde los nodos hacia los extremos. Para calcular el ancho de cada hoja, es preciso conocer la posición del nodo en la imagen de plano 3 ó 6 y mapearla a la posición del mismo en el otro plano, ya que los nodos quedan ocultos para una de las dos vistas. Una vez obtenida la posición se extrae un área de interés centrada en dicho punto y que contenga la hoja en su totalidad. Sobre esta imagen se calcula el centro de masa y se mide la distancia entre extremos perpendiculares a la rama. Este cálculo será una aproximación al ancho de la hoja.

4. Experimentos y resultados

4.1. Resultados obtenidos

Mediante la utilización del método de detección de nodos sobre las imágenes de prueba se observa, que en un 90 % de los casos la detección del punto origen del tallo es exitosa. Un ejemplo de las salidas obtenidas se muestra en la Figura 6. Los casos en que el origen no fue detectado de manera adecuada se debe a diversos factores, entre los cuales se puede mencionar un ángulo pronunciado de inclinación del tallo con respecto al eje vertical, la existencia de otros elementos de color rojizo en las cercanías del tallo (por ej. hojas grandes que cuelgan cerca del origen) y la complejidad creciente de la planta con la edad.

La detección de tallo se realizó mediante la correlación con 3 plantillas de diferente ancho, siendo exitoso en todos los casos. La detección de ramas, como se explicó, se realizó mediante la correlación con 35 plantillas, lo que llevó consumió un tiempo aproximado a los 15 minutos por imagen.

Las pruebas se realizaron con imágenes que poseen ramas con diferentes ángulos y tamaños. Los mejores resultados se obtienen en plantas pequeñas y que no



Figura 7. Ejemplo de nodo y hojas detectadas. Las líneas unen los extremos de las estructuras mencionadas.

poseen muchas ramificaciones (edad temprana). El algoritmo de Hough para obtención de ramas logra resultados dentro de rango de error de aproximadamente 1 mm de diferencia con respecto a los datos medidos manualmente. La Figura 7 muestra ejemplos de la detección de nodos y hojas respectivas. Algunos problemas surgieron al detectar como rama, pequeñas regiones de hojas que se asemejan a la forma de las mismas. Sin embargo, este inconveniente puede ser fácilmente corregido en la fase de ajuste.

En el cálculo de largo de hoja, existen diferencias con respecto a los datos obtenidos manualmente dado que el cálculo automático se realiza mediante una aproximación rectilínea, mientras que en la toma manual se utiliza la longitud de arco natural de la hoja. Sin embargo, los cambios en la medida a lo largo del tiempo son efectivos en la estimación de la evolución de la hoja. Se observan buenos resultados para la mayoría de los casos, con una diferencia promedio de 2 mm con los datos medidos manualmente. La Figura 8 muestra un ejemplo de hoja detectada a partir de la región de interés analizada. La escala introducida en las imágenes originales permite obtener la medida real de la hoja. Las fallas aquí encontradas se debieron a superposiciones de hojas o la no-correspondencia esperable entre las hojas izquierda y derecha respecto al tallo (por ej: hojas totalmente ubicadas a uno de los lados).

4.2. Tecnologías utilizadas

Hibernate: motor de persistencia relacional de código abierto, utiliza la licencia LGPL v2.1 y está basado en las especificaciones JSR220 y JSR317 para Java. Permite diseñar objetos persistentes que podrán incluir polimorfismo, relaciones, colecciones, y un gran número de tipos de datos. De una manera muy rápida y optimizada se podrán generar bases de datos en cualquiera de los entornos soportados: Oracle, DB2, MySQL y otros [11].

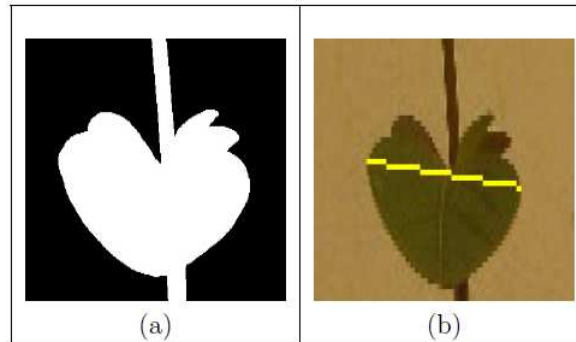


Figura 8. (a) Región de interés centrada en contranodo (plano contrario al del nodo detectado). (b) Segmento amarillo marcando el ancho de hoja detectado.

JExcel: Java Excel API es una librería de código abierto que permite leer, escribir y modificar hojas de datos Excel de manera dinámica. Cualquier sistema operativo que pueda correr una máquina virtual Java puede procesar y generar hojas de datos Excel.

JAI: librería Java Advanced Image, provee un conjunto de interfaces orientadas a objetos que soporta un modelo de programación de alto nivel, el cual permite manipular fácilmente imágenes en aplicaciones Java.

Base Datos MySQL: motor de base de datos relacional, está escrito en C y C++, es multiplataforma y multihilo, permitiendo el acceso de múltiples usuarios.

JDK: (Java Development Kit) v1.6, es un grupo de herramientas para el desarrollo de software provisto por Sun Microsystems, Inc. Incluye las herramientas necesarias para escribir, testear, y depurar aplicaciones y applets desarrollados en Java,

5. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se ha presentado una primera aproximación a la automatización de la tarea de detección de características morfológicas de plantas mediante procesamiento digital de imágenes. Dada la novedad de la aplicación, se pudo conformar un conjunto de etapas para la tarea. El origen del tallo ha sido detectado en la mayoría de las imágenes utilizando técnicas de segmentación por color. La correlación espacial resultó efectiva para la búsqueda de tallo y nodos, mientras que la utilización de la transformada de Hough resultó muy efectiva en la caracterización de las ramas.

Los resultados obtenidos han sido, en general, satisfactorios; sobre todo en plantas pequeñas, en las cuales las ramas se pueden identificar sin mayores ajustes. Por otro lado, la variación en forma y color de las características en una planta a lo largo del tiempo, como así también de planta en planta, dificulta la obtención de los patrones. Además, los algoritmos planteados son dependientes entre sí, lo que implica que una mala salida de uno de ellos puede traer aparejado una mala detección en el resto.

Teniendo en cuenta estos resultados, algunas mejoras podrían estar dadas por la detección de la estructura de ramificación en estados evolutivos avanzados, abordaje que se podría realizar mediante técnicas de recursividad. Un estudio complementario que sería de utilidad al especialista estaría dado por la implementación de un módulo de simulación, a fin de estimar y graficar el crecimiento en 3 dimensiones basado en los datos obtenidos.

Referencias

1. Barthélémy, D. and Caraglio, Y. 2007. Plant Architecture: A Dynamic, Multilevel and Comprehensive Approach to Plant Form, Structure and Ontogeny. *Annals of Botany* 99: 375-407.
2. Cousens, R. and Mortimer, M. 1995. Dynamics of weed populations Cambridge: Cambridge University Press. 332 p.
3. Dellaferrera, I., Acosta, J., Capellino, P. and Amsler, A. 2009. Relevamiento de malezas en cultivos de soja en sistema de siembra directa con glifosato del departamento Las Colonias (Provincia de Santa Fe). *Revista FAVE - Ciencias Agrarias* 8: 7-12.
4. Duke, S. O. and Powles, S. B. 2008. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science* 64: 319-325.
5. Panigo, E. S., Dellaferrera, I. M., Acosta, J. M., Bender, A. G., Garetto, J. I. and Perreta, M. G. 2012. Glyphosate-induced structural variations in *Commelina erecta* L. (Commelinaceae). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 76:135-142.
6. Papa, J. C. and Felizia, J. C. 2001. Iresine diffusa, malezas tolerantes a herbicidas. *SOJA. Serie Para mejorar la producción* 18: 111-113.
7. Pastorino, M. J., Ghirardi, S., Grosfeld, J., Gallo, L. A. and Puntieri, J. G. 2010. Genetic variation in architectural seedling traits of Patagonian cypress natural populations from the extremes of a precipitation range. *Annals of Forest Science* 67.
8. SIIA [Sistema Integrado de Información Agropecuaria]. 2011. Estimaciones Agrícolas: Soja. MAGyP, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación Argentina. Available at <http://www.sii.gov.ar/index.php/series-portal/agricultura>. Acceso: 06 feb, 2011.
9. Vitta, J. I., Tiesca, D. and Puricelli, E. 2004. Widespread use of glyphosate tolerant soybean and weed community richness in Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103: 621-624.
10. Gonzalez, Rafael C. and Woods, Richard E., 2006. Digital Image Processing (3rd Edition). Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA.
11. Hibernate: Relational persistence for JAVA and .NET Sitio web: www.hibernate.org