

Desarrollo de una base de datos para caracterización de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en un sistema de visión artificial

Database development for alfalfa (*Medicago sativa* L.) characterization in an artificial vision system

Martínez-Corral¹ L, E Martínez-Rubín², F Flores-García¹, GC Castellanos², AR Juárez², MJD López³

Resumen. El aumento en la demanda de producción de cultivo de alfalfa en la Comarca Lagunera ha propiciado la búsqueda de nuevas alternativas a los métodos convencionales de evaluación nutricional e hídrica de un alfalfar, en las que se optimicen costos y tiempo. La utilización de un sistema de visión para el reconocimiento visual computarizado del estrés hídrico y/o nutricional de un cultivo implica el análisis y procesamiento de determinadas características de color, forma y dimensiones de un objeto a partir de una imagen digital. Debido a que los parámetros de identificación se encuentran estrechamente relacionados es necesario recopilar la información de especialistas, análisis foliar, morfología matemática y fotografías de deficiencias. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un sistema de información que sirva como herramienta de un sistema de visión para la caracterización de las deficiencias nutricionales (nitrógeno, fósforo y potasio) y el estrés hídrico del cultivo de la alfalfa, integrando todos los parámetros antes mencionados. La base de datos utiliza imágenes capturadas mediante una cámara CCD, y los resultados de las técnicas de extracción y reconocimiento de patrones configurados, en un sistema de visión previamente desarrollado. Se presenta la integración de los módulos de resultados de visión artificial y de conocimientos del experto humano en una sola base de información programada con lenguaje Visual Basic.

Palabras clave: inteligencia artificial, sistemas de visión, nutrición vegetal.

Abstract. The increasing demand of alfalfa crop production in the Lagunera Region has caused the search of new alternatives to the conventional methods of nutritional and hydric evaluation of alfalfa, where costs and time are optimized. The use of a machine vision system for computerized visual recognition of the crop hydric and/or nutritional stress implies the analysis and processing of certain characteristics, such as color, shape and object dimensions from a digital image. Due to the fact that identification parameters are closely related, it is necessary to compile information from specialists, foliar analysis, mathematical morphology and alfalfa crop deficiency photographs. The goal of this work was to develop an information system that works as a database tool for nutritional (nitrogen, phosphorous, potassium) deficiency and water stress characterizations of alfalfa crops, integrating all parameters mentioned before. The database utilizes images captured by a CCD camera, and results of extraction techniques and recognition of configured patterns in a machine vision system previously developed. Integration of the artificial vision module and human expert knowledge module are presented in a single information base, programmed in Visual Basic language.

Key words: artificial intelligence, vision systems, plant nutrition.

¹ Instituto Tecnológico de la Laguna, Dirección: Blvd. Revolución y Clzda. Cuauhtémoc s/n Torreón, Coahuila, México.

² Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón – San Pedro Km. 7.5, Ejido Anna. Torreón, Coah. México.

³ FAZ-UJED, Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango. Carretera Gómez Palacio-Tlahualilo, Km. 35 Ej. Venecia, México.
Address Correspondence to: L. Martínez-Corral, e-mail: luime_mc18@yahoo.com.mx; Teléfono: 52(871)7250949.

Recibido/Received 9.II.2009. Aceptado/Accepted 5.V.2009.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la Región Lagunera es una de las principales cuencas lecheras del país, con 500.000 cabezas de ganado bovino y una producción de casi seis millones de litros de leche diarios actuando sobre la producción por animal y el número de animales por hectárea (Salazar et al., 2007). Esta situación demanda elevados volúmenes de forraje, siendo la alfalfa el cultivo forrajero más importante. Éste ocupa una superficie de más de 386.406 hectáreas sembradas a nivel nacional y 39.714 hectáreas en la Comarca Lagunera.

Debido a la importancia económica y agronómica de la alfalfa en la región, es necesario propiciar el aumento tanto de la producción como del valor nutritivo del cultivo, así como de su rentabilidad. Las pruebas en suelo y en tejido vegetal son las técnicas más confiables en la evaluación del estado nutricional de un alfalfar para la determinación de las necesidades de fertilización. Desafortunadamente, los métodos convencionales de diagnóstico nutricional resultan costosos e implican tiempo (Volke et al., 1998; Lee et al., 1999; Pilatti et al., 2001; Chen et al., 2008).

No obstante, con los avances en el procesamiento de imágenes, los sistemas de visión y los sistemas expertos, se abre una nueva tendencia de prácticas de agricultura conocida como agricultura de precisión. En ésta se involucra la utilización de tecnología para el incremento de la producción, calidad y rendimiento del cultivo.

Lee et al. (1999) desarrollaron un sistema de visión para la aplicación selectiva de herbicida a través de un robot; este sistema de visión permite al robot identificar la localización de plantas de tomate o la existencia de hierba en el cultivo, utilizando técnicas de procesamiento de imágenes al tiempo en que el robot se desplaza a una velocidad constante. Chen et al. (2008) encontraron la viabilidad de clasificar cinco variedades de hojas de té basado en un sistema de visión por computadora. Las diversas variedades de té presentan diferentes cualidades internas y características en su apariencia dependiendo de su origen y el proceso al que fueron sometidas. El sistema de visión clasifica esta diversidad basado en la extracción de color y el análisis de la textura.

Aunque el potencial de aplicaciones de los sistemas de visión es excepcionalmente amplio, es el software quien determina su carácter de "experto" puesto que está diseñado para resolver un problema en un ámbito específico. El programa que controla al sistema de visión se alimenta de una base de conocimientos sobre un tema determinado y programas computacionales, de modo que su integración permita inferir una solución de un modo semejante o aproximado a como lo haría un humano experto en el mismo tema (Corona et al., 2000).

Si bien hasta la fecha se han realizado diferentes trabajos para determinar el estado nutricional de un alfalfar (Pilatti et al., 2001), ninguno ha planteado el llevarlo a cabo a través de un sistema de reconocimiento visual computarizado. Es

decir una aplicación que, dirigida por computadora, permita identificar automáticamente el estado nutricional o el estrés hídrico del cultivo de la alfalfa, mediante la comparación de determinadas características de color y forma a partir de una imagen digital.

Por lo tanto, la visión por computadora para el procesamiento y análisis de las imágenes capturadas de un cultivo, interpretadas por un control inteligente que simule el reconocimiento humano de las deficiencias de nutrientes y agua en la planta, permitiría una técnica alternativa para diagnosticar el estado hídrico y nutricional del cultivo.

Con el objetivo de buscar ciertas características que clasifiquen cada uno de los rasgos distintivos de un alfalfar, se propone realizar el análisis morfológico de una imagen del cultivo en el cual, las deficiencias nutricionales o hídricas puedan ser distinguidas por la coloración de su follaje, pigmentación, forma o dimensiones.

Debido a la existencia de muchas variables y de parámetros estrechamente relacionados, es necesario el diseño y la construcción de una base de datos para la adquisición de conocimiento a través de la interfase con una persona experta. Esta información posteriormente será comparada con los resultados obtenidos en el sistema de visión para efectuar un diagnóstico del alfalfar, partiendo únicamente de una imagen digital.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistema de visión. El sistema de visión consistió de una computadora Pentium con procesador de 1.60 GHz y 1.93 GB en RAM funcionando bajo Microsoft Windows XP. Se utilizó una cámara de 8 Megapixel tipo CCD con supermacro (Modelo PowerShot S5 IS Canon, Inc.) para capturar imágenes de color. La iluminación se proporcionó con luz fluorescente (127 VAC, 14 W) mediante dos lámparas situadas a 30°, encontradas con respecto al eje óptico de la cámara.

Algoritmo de procesamiento de imágenes. El programa fue diseñado bajo la plataforma Visual Basic 6 (Microsoft Corp., Redmond, WA) para Windows 98, XP, NT o superiores. Las imágenes fueron tomadas a una altura de 2 cm de la región de interés de la planta (hoja o tallo), colocadas todas en la misma disposición. El campo de vista de la cámara fue de 4,3 cm x 3,5 cm. El tamaño de la imagen fue digitalizado a 229 x 172 píxeles y almacenada en formato de 24 bit de color.

El trabajo se desarrolló en el campo experimental y laboratorio de visión por computador del Departamento de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI) del Instituto Tecnológico de Torreón. Se utilizaron plantas de alfalfa (*Medicago sativa* L.) que se habían establecido previamente durante los meses de septiembre 2007 a marzo 2008 en (1) dos condiciones diferentes de estrés, y cultivos en suelos con problemas de (2) compactación y (3) salinidad. Los

tratamientos se dispusieron en bloques completos al azar, con unidades experimentales de 1m². Para la extracción de información y de las características morfológicas de la hoja o tallo, las imágenes utilizadas para este estudio fueron capturadas de plantas ubicadas dentro de los 10 cm² del centro de cada unidad; de cada muestra se tomaron tres plantas representativas, las cuales se segmentaron en tres secciones (superior, media e inferior). Cada sección se separó a su vez en hojas y tallos.

Una vez obtenida la imagen, los objetos fueron segmentados en dos clases, denominadas objeto y fondo. Para la clase objeto se incluían todas aquellas regiones pertenecientes a la planta, el resto era clasificado como fondo. El primer paso para esta segmentación fue una conversión de la imagen a tonos de grises (8 bits, 256 tonos diferentes) y una binarización (2 bits) empleando un umbral definido por el usuario. Después de la segmentación, la imagen fue mejorada a través de una serie de funciones de procesamiento entre las que se incluyen erosión, dilatación, apertura y cierre, las cuales permiten eliminar el ruido y obtener un objeto uniforme para el reconocimiento de hojas o tallos (Lee et al., 1999). En la Fig. 1 se muestra una imagen que ha sido sometida a segmentación y mejoramiento de imagen; se puede observar como se han eliminado los objetos que no pertenecen a la región de interés.

Fig. 1. Imágenes de una hoja de alfalfa. (a) imagen original, (b) imagen sometida a un proceso de segmentación y mejoramiento.

Fig. 1. Images of an alfalfa leaf. (a) original image, (b) image exposed to a segmentation and improvement process.



Extracción de características. Una vez segmentada y procesada la imagen a nivel binario, es necesario extraer la información de la característica de color. La imagen capturada se encuentra originalmente en formato RGB (red, green, blue), el cual reparte la intensidad entre tres canales, lo que provoca un grave problema de constancia de color (variaciones de color debido a los cambios de iluminación). Con el estudio de las imágenes capturadas, se encontró que el modelo HSI (hue, saturation, intensity) permite aislar la componente de cromaticidad y la intensidad total del brillo de un píxel. Por lo tanto para este estudio se utilizaron los sistemas de color RGB y HSI para extraer las características de color de la imagen. La transformación de la imagen

del sistema RGB al HSI se llevó a cabo de acuerdo a las siguientes ecuaciones (González y Woods, 1996; Chen et al., 2008):

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

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min (R, G, B)] \quad (2)$$

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

Un método importante para la descripción de región consiste en cuantificar su contenido de textura. La extracción de las características de textura se llevó a cabo mediante técnicas estadísticas basada en la medida de los momentos de acuerdo a la ecuación 4 (Lee et al., 1999; Chen et al., 2008), en donde para una imagen binaria de resolución $M \times N$, el momento m de orden $p+q$ está definido por:

$$m_{pq} = \iint x^p y^q f(x,y) dx dy \quad \text{para } p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

$$\text{Elongación} = (\text{Eje mayor} - \text{Eje menor}) / (\text{Eje mayor} + \text{Eje menor}) \quad (5)$$

$$\text{Compactación} = 16 \text{ Área} / \text{Perímetro}^2 \quad (6)$$

$$\text{LPT} = \text{Eje mayor} / \text{Perímetro} \quad (7)$$

$$\text{LHW} = \log_{10} (\text{Altura} / \text{Ancho}) \quad (8)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La base de datos está conformada por dos módulos, un módulo en base a los conocimientos del experto humano y otro módulo basado en los resultados obtenidos de las funciones de procesamiento de imágenes. En la Fig. 2 se muestra la pantalla de captura de información en donde se integran los diferentes módulos.

De lado izquierdo superior de la pantalla se presenta la imagen que se está analizando. Esta imagen tiene las dimensiones originales de la imagen capturada. Sin embargo, se incluyó un comando de <expandir imagen> para observar la imagen a una resolución mayor, lo que permite apreciar mejor las características del objeto.

Bajo la imagen principal (Fig. 2) se encuentran los datos generales de la muestra que se está analizando: ruta de la ima-

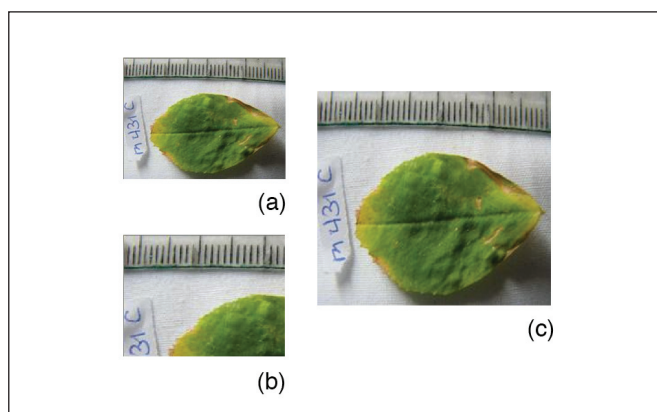
gen (dirección de memoria donde está almacenada la imagen), tratamiento, repetición, ubicación (localización en la planta del órgano en estudio), humedad del suelo, peso seco y peso húmedo. Siguiendo a estos campos se localiza la caracterización de la imagen; este espacio está reservado para que el usuario haga un breve diagnóstico de la sintomatología visual de deficiencias nutricionales y datos generales básicos del problema que presenta el objeto de interés. Como referencia, del lado derecho de la pantalla se ubica una sección con los conceptos generales (gráfica y textualmente) de la existencia de una deficiencia de nitrógeno, fósforo o potasio. El usuario puede navegar entre las tres deficiencias paralelamente a la descripción que narra en el campo de caracterización de la imagen.

Fig. 2. Pantalla de la base de datos.

Fig. 2. Database screen.

Fig. 3. Resolución de una imagen. (a) 229 x 172 píxeles; (b) 229 x 172 píxeles; (c) 651 x 59 píxeles.

Fig. 3. Image resolution. (a) 229 x 172 pixels; (b) 229 x 172 pixels; (c) 651 x 59 pixels.



En la parte central superior de la pantalla se encuentran los resultados químicos de la hoja o tallo en cuestión. Estos valores son los obtenidos en laboratorio para validar el estado del cultivo y son también, introducidos por el usuario. Un poco más abajo se ubican tres cuadros de selección de forma, borde y venas para el caso de que el objeto de estudio sea una hoja. El cuadro de forma de la hoja cuenta con dieciocho diferentes tipos de forma considerando la disposición del pecíolo y la punta de la hoja; el selector de borde ofrece doce alternativas y contempla la no uniformidad del margen de la hoja. Finalmente, el cuadro de selección de venas contiene nueve opciones de distribución de las venas primarias, secundarias y acomodo del nervio central. Para todos estos cuadros se presenta una imagen de referencia con una ayuda textual que va cambiando según la opción se va modificando.

En la parte inferior de la pantalla se encuentran los datos

obtenidos del procesamiento computarizado de la imagen. Esta información se obtiene por medio de la aplicación de diferentes funciones de procesamiento de imágenes. Los resultados de las funciones necesarios para la base de datos son: área de la región de interés, media, perímetro, desviación estándar, umbral de binarización, longitud del eje mayor y del eje menor, enlongación, compactación, rectangularidad, excentricidad, la razón de longitud a perímetro (LPT), razón alto/ancho (LHW), momentos simples (orden cero), momentos centrales (centroide) y los momentos invariantes.

En la Fig.3 se muestra una imagen en la que se modifica su resolución para una mejor apreciación de la región de interés; la imagen superior izquierda (a) es la imagen original a resolución de 229 x 172 píxeles, la imagen inferior izquierda (b) presenta la misma resolución sólo que aplicándole un zoom para expandir una región; la imagen de la derecha (c) presenta un zoom para expandir y un aumento en la resolución a 651 x 579 píxeles.

CONCLUSIONES

Para la elaboración de un sistema de visión experto en el diagnóstico de deficiencias hídricas y/o nutricionales en el cultivo de la alfalfa, se diseñó y construyó una base de datos que recopiló las características visuales de la sintomatología de un cultivo de alfalfa estresado por condiciones de compactación y salinidad del suelo.

La información de esta base debe ser representada en forma de datos manejables por la computadora, para que ésta en conjunto con las funciones de procesamiento de imágenes de un sistema de visión pueda inferir un diagnóstico. Por ello, la base de datos presenta cuadros de opción múltiple y campos de descripción general. Gracias a la modularidad con que fue programada se logra un cierto grado de flexibilidad, pues la base de datos funciona bajo el esquema de un sistema experto especializado al tiempo en que puede trabajar de manera independiente, sin contar las ventajas que ofrece al consolidar varios conocimientos y no sufrir pérdida de información con el paso del tiempo, además de la duplicidad y fiabilidad al estandarizar los resultados. La presente base de datos se encuentra sujeta a un proceso de actualización ya que se buscan patrones indicativos de anomalías con fines de diagnóstico que permitan distinguir cuales son las cuestiones relevantes de una región y separarlas de cuestiones secundarias. Sin embargo, este trabajo pretende ser un primer paso en un estudio más amplio que abarque la integración de los elementos de un sistema de visión así como los programas de cómputo requeridos para la inferencia de un diagnóstico en un solo paquete computacional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo de FOMIX Coahuila clave COAH-2006-C05-61261 y del Instituto Tecnológico de Torreón.

REFERENCIAS

- Chen, Q., J. Zhao y J. Cai (2008). Identification of tea varieties using computer vision. *Transactions of the ASABE* 51: 623-628.
- Corona, S. T., G. Almaguer y R. Maldonado (2000). Sistema computarizado experto en diagnóstico nutrimental en naranjo. *TERRA Latinoamericana* 18: 173-178.
- González, R. C. y R. E. Woods (1996). Tratamiento digital de imágenes. Addison-Wesley / Díaz de Santos (eds), pp 175-274. Mejora de la imagen. Modelos de color. Wilmington, Delaware, E.U.A. 773 p.
- Lee, W. S., D. C. Slaughter y D. K. Giles (1999). Robotic weed control system for tomatoes. *Precision Agriculture* 1: 95-113.
- Pilatti, M. A., M. Moresco y C. Cuadrado (2001). Deficiencias de nutrimentos en alfalfa (*Medicago sativa*). Ensayo en macetas sobre Argiudoles del centro de Santa Fe (Argentina). *Revista FAVE* 15: 45-51.
- Salazar, S. E., H. I. Trejo, V. C. Vázquez y J. D. López-Martínez (2007). Producción de maíz bajo riego por cintilla con aplicación de estiércol bovino. *PHYTON Revista Internacional de Botánica Experimental* 76: 169-185.
- Volke, H.V., B. Etchevers, R. Sanjuán y P. Silva (1998). Modelo de balance nutrimental para la generación de recomendaciones de fertilización para cultivos. *TERRA Latinoamericana* 16: 79-91.