

VINCULACIÓN CIENTÍFICO-TECNOLÓGICA CON EL SECTOR PRODUCTIVO-INDUSTRIAL PARA EL ANÁLISIS DE IMÁGENES MULTIESPEC- TRALES DE CAÑA DE AZÚCAR

Alejandro Hadad¹, Agustín Solano¹, Alejandra Kemerer², Gerardo Schneider¹

RESUMEN

En el presente trabajo, se describe la experiencia de interacción entre la Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER), el INTA-EEA y productores de la Industria azucarera. Se presenta una descripción de los hechos que dieron lugar a la interacción y los resultados obtenidos en lo que refiere al procesamiento y gestión de imágenes multiespectrales de cuadros productivos de caña de azúcar y a la conformación del equipo de investigación interdisciplinario. A partir del análisis de imágenes aéreas multiespectrales de campos cultivados con caña de azúcar, se estudió la respuesta espectral del cultivo en distintas bandas del espectro electromagnético y se segmentaron regiones homogéneas de uso práctico para que el productor tome decisiones sobre la utilización de insumos y recursos según la variabilidad de su sistema. Teniendo en cuenta las características de las imágenes disponibles y analizando la bibliografía de referencia, se propuso abordar el problema utilizando características de textura y la implementación de modelos de

aprendizaje automático. Se estudiaron Árboles de Decisión (AD) y Random Forests (RF) entrenados con distintos conjuntos de descriptores para clasificar entre las clases Caña Caída y Caña en Pie. Los descriptores se extrajeron de los canales Infrarrojo, Rojo, Verde y NDVI (Índice de Diferencia Normalizada) de las imágenes estandarizadas.

Con el modelo de mejor desempeño se realizó la segmentación de las imágenes aéreas de los cuadros productivos de caña de azúcar. Luego se aplicó sobre la segmentación un algoritmo de crecimiento de regiones para homogeneizar las regiones identificadas. Los resultados indicaron, para distintas imágenes, una degradación de la segmentación entre 5% y 16%, al homogeneizar las regiones. Teniendo en cuenta las pérdidas de materia prima e incluyendo los costos de la adquisición de las imágenes aéreas y el costo del desarrollo del software propuesto, se consideró viable la implementación del sistema de identificación de regiones para superficies mayores a 1000ha.

¹ Lab. de Sistemas de Información, Fac. De Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta 11, Km 10,5, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina {ajhadad, asolano, gschneider}@bioingenieria.edu.ar

² INTA-EEA - Grupo de Recursos Naturales y Factores Abióticos, Ruta 11, Km 12, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina kemerer.alejandra@inta.gob.ar

1 INTRODUCCIÓN

Los procesos de vinculación entre actores del sector productivo-industrial y el científico-tecnológico para dar solución a problemáticas particulares redundan en un claro beneficio para todas las partes involucradas. Sin embargo, en muchos casos, los canales para el intercambio de información son escasos o no se han explorado, al menos en el sector de la agroindustria. En los últimos años se ha comenzado a generar un cambio y en esta perspectiva se inscribe la experiencia aquí descrita. En la misma lo particularmente interesante es el modo en que se ha dado la interacción y cómo ha evolucionado en el tiempo, dado que el aporte concreto a la industria no fue el origen del acercamiento sino que este derivó del análisis conjunto de otras condiciones productivas conocidas por la empresa pero no manejadas y menos aún cuantificadas. Es un claro ejemplo donde una situación problemática no es adecuadamente diagnosticada y por lo tanto carece de una estrategia de manejo.

La inquietud original de la empresa pasaba por el sector productivo, buscaba incorporar tecnologías para identificar ambientes de productividad diferente, a partir de imágenes satelitales o fotografías aéreas, en los cuales aplicar fertilización variable en el cultivo de caña de azúcar, utilizando conceptos desarrollados para otros cultivos (maíz, trigo). Por tal motivo, se iniciaron contactos con investigadores del proyecto Agricultura de Precisión, del grupo de Recursos Naturales y Factores Abióticos de la Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA, que tenían experiencia en este tema.

Se coordinaron acciones conjuntas con la empresa a fin de obtener las fotografías aéreas para su posterior procesamiento.

Una vez obtenido el producto final se pudo constatar que a diferencia de otros cultivos, la caña de azúcar cuando alcanza su máximo crecimiento es susceptible a volcarse y el uso de índices convencionales obtenidos a partir de las fotografías no permitía discriminar áreas de productividad diferente. En las reuniones de intercambio mantenidas con la empresa se pudo constatar que la presencia de caña caída genera una serie de complicaciones operativas porque dificulta y retrasa la cosecha y esto incide de manera directa en el proceso industrial. En el ingenio azucarero se requiere un aporte constante de material y un retraso en la cosecha afecta la logística y disminuye el volumen que ingresa, afectando la eficiencia del proceso. Asimismo, la cosecha de caña caída empleando métodos convencionales aporta mayor proporción de material extraño al ingenio y con esto aumenta el tiempo de lavado y procesamiento, con el consecuente incremento en el consumo de agua y costos asociados, se produce un mayor desgaste de los equipos y una disminución en el rendimiento fabril. Otro factor que se ve afectado es el transporte, ya que en cosecha convencional la cantidad de caña que puede transportarse cuando hay presencia de caña caída es considerablemente inferior. Es sabido que existen alternativas para disminuir los efectos negativos de la presencia de caña caída en la industria, que tienen que ver con realizar una cosecha diferencial, a menor velocidad, con un tamaño menor de troceado para disminuir el aporte de material extraño y optimizar el transporte. Para poder aplicar una cosecha diferencial resulta necesario conocer la proporción de caña caída presente en cada lote y esta es la información que la empresa no podía obtener de manera sencilla y confiable.

La identificación de la caña caída re-

quiere aplicar procedimientos complejos que excedían las capacidades de la empresa y el INTA por lo cual se estableció una vinculación con los investigadores del Laboratorio de Sistemas de Información (ex-Grupo de Inteligencia Artificial Aplicada) de la Facultad de Ingeniería (FI) de la UNER. Este grupo de investigadores tiene una amplia trayectoria en desarrollos para aplicaciones biomédicas en lo que refiere al procesamiento de señales e imágenes y sistemas de información. De esta manera se logró conformar un grupo interdisciplinario que permitió considerar la solución al problema desde diferentes perspectivas.

El objetivo planteado en la vinculación entre la UNER-INTA-Industria azucarera fue desarrollar una metodología para cuantificar el área de caña de azúcar caída y en pie a fin de optimizar la logística de cosecha, transporte e incrementar la eficiencia en la industria. Los objetivos específicos planteados fueron: caracterizar la componente espectral de la caña caída y la caña en pie, desarrollar y evaluar metodologías para la cuantificación del área

de caña caída y criterios para la clasificación del tipo de cosecha a utilizar, generar un repositorio Web de imágenes para caracterizar la caña caída y mensurar el impacto de dicha cuantificación en los procesos productivos antes mencionados

2 METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Se acordaron los lineamientos de trabajo y las actividades a realizar por cada parte. La empresa brindó las imágenes multispectrales de los cuadros productivos de caña de azúcar y las bases de datos de producción con información sobre fecha de plantación, de cosecha, variedad, rendimiento bruto, contenido de materia extraña en industria, rendimiento fabril, entre otros. Entre los investigadores de INTA y FI-UNER se mantuvieron reuniones periódicas donde se fueron discutiendo y evaluando aproximaciones y metodologías a aplicar en función de las características de la caña caída y en pie. El flujo de trabajo integrado describe en el diagrama indicado en la Figura 1.

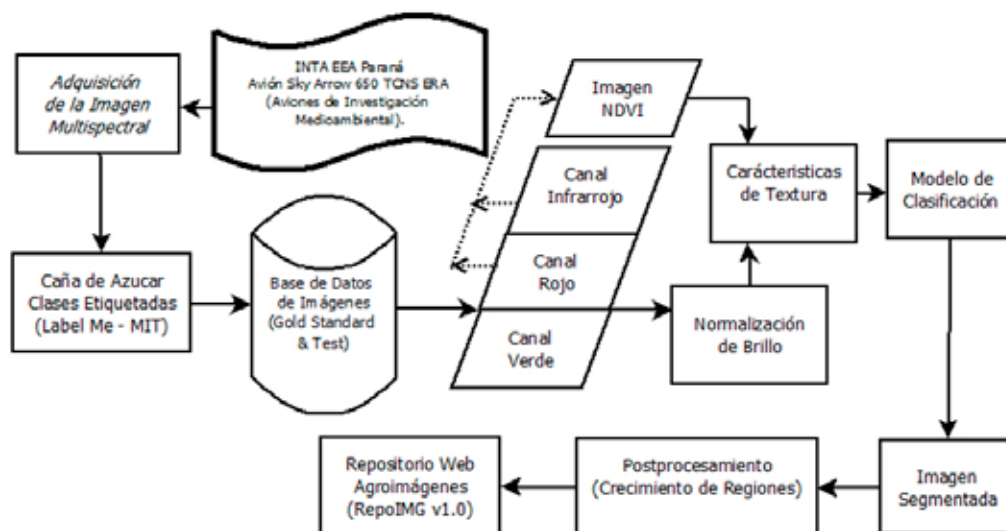


Figura 1 – Flujo de Trabajo para el procesamiento de las imágenes

Para la caracterización de las áreas con caña de azúcar en pie y caída en las imágenes, se procedió a etiquetarlas a través de la herramienta Label Me [1] la cual dio parte del soporte gráfico para el marcado de las zonas, automatizando el registro para un procesamiento posterior [2,3]. En dicho procesamiento se utilizaron las etiquetas para la construcción y validación de los modelos de identificación de regiones a través de técnicas de reconocimiento de patrones e inteligencia computacional. Finalmente con los modelos ya validados se realizó un análisis del impacto de la cuantificación obtenida en el proceso productivo [3,4]. Adicionalmente se está construyendo una herramienta web para la carga de imágenes y aplicación de los modelos de manera colaborativa [5].

Teniendo en cuenta las características de las imágenes disponibles y analizando la bibliografía de referencia, se propuso abordar el problema utilizando descriptores de textura y la implementación de modelos de machine learning. Se estudiaron los modelos Árboles de Decisión (AD) y Random Forests (RF).

En los ensayos con AD, los descriptores que permitieron un menor error de validación cruzada (14%) fueron Media, Desvío Estándar y Entropía. Los canales con mayor aporte de información fueron el Rojo y el Infrarrojo, y el descriptor con mayor aporte de información fue la entropía. Por otro lado, los modelos RF mostraron menores errores de validación cruzada respecto a los AD entrenados con los mismos descriptores.

Con el RF entrenado con los descriptores Media, Desvío Estándar y Entropía se obtuvo el menor error de validación cruzada (7,3%), y los mayores valores de sensibilidad y especificidad (92% y 94 %, respectivamente).

Este último modelo se utilizó para realizar la segmentación de las imágenes de los cuadros productivos de caña de azúcar. En la Figura 2.a se puede observar una imagen multispectral de un cuadro productivo de caña de azúcar y en la Figura 1.b se observa la misma imagen pero segmentada, donde se resaltan en color verde las regiones de caña en pie y en color azul las regiones de caña caída.

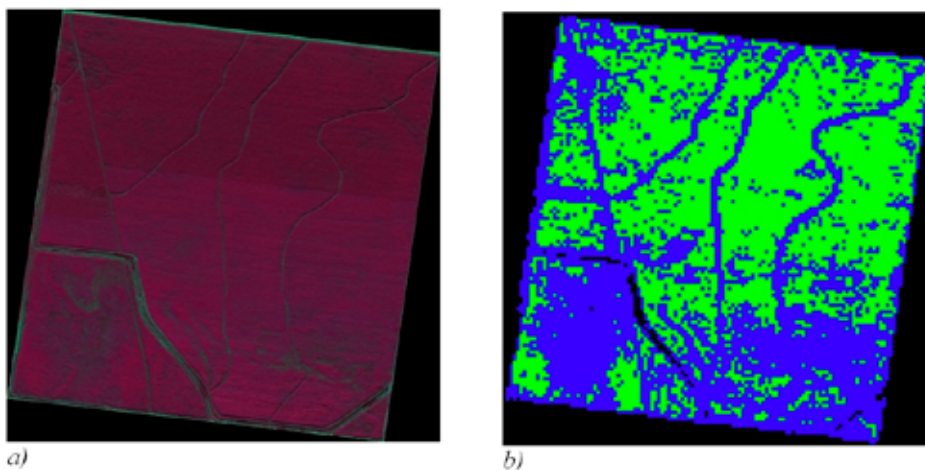


Figura 2. a) Imagen multispectral de un cuadro productivo de caña de azúcar. b) Imagen segmentada en las que se distinguen regiones de caña caída (en color azul) y regiones de caña en pie (en color verde).

A partir de las imágenes etiquetadas se determinó un desempeño global de 89% de píxeles correctamente segmentados; 86% de los píxeles correspondientes a regiones de caña caída fueron correctamente identificados por el modelo, así como el 92% de los píxeles correspondientes a regiones de caña en pie.

Luego del proceso de homogeneización de las regiones identificadas, los re-

sultados indicaron, para distintas imágenes, una degradación de la segmentación entre 5% y 16 %, al homogeneizar las regiones. Esta degradación de los resultados de la segmentación está justificada por el hecho de conseguir imágenes con áreas que puedan ser de uso práctico para la cosecha por parte de los productores.

Los resultados del proceso de homogeneización se presentan en la Figura 3:

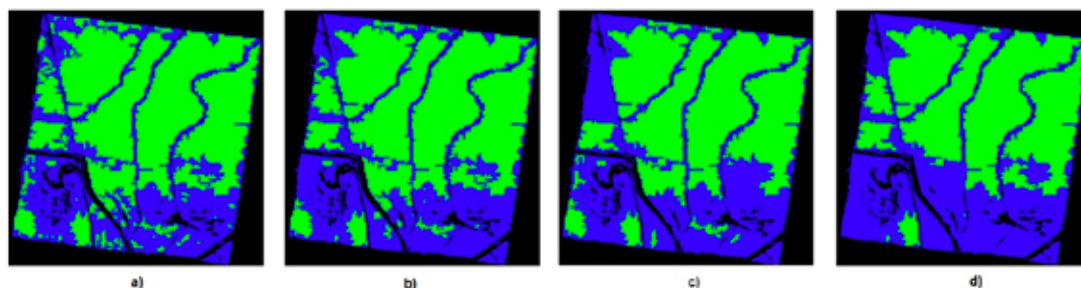


Figura 3. Imágenes segmentadas con regiones homogeneizadas para distintas distancias de la grilla de puntos semilla: a) 25m, b) 50m, c) 75m, d) 100m.

Además fue posible calcular, para las distintas imágenes, la superficie de caña caída y la superficie de caña en pie para proveer mayor información para la toma de decisiones.

3 IMPACTO ECONÓMICO

En lo que refiere al impacto económico, como se mencionó anteriormente, la identificación de regiones más eficiente de caña caída y en pie incide en la gestión de recursos asociados al procesamiento de la misma tales como, transporte de la materia prima, lavado de la caña y la aplicación de maduradores químicos entre otros. Por otro lado con el fin de considerar la transferencia a la industria del desarrollo realizado, se analizó el impacto económico de la misma. En este caso, se consideró además el costo de contratar el servicio de adquisición de las imágenes áreas multiespectrales. Con las

imágenes y el programa ofrecido es posible realizar el análisis del estado del cultivo. Para analizar el costo del desarrollo y el precio que se debería pagar por adquirirlo, se tuvo en cuenta el tiempo de desarrollo, el estipendio del desarrollador, gastos en equipamiento e insumos. Luego de un relevamiento de los costos antes descriptos se confeccionó la Tabla 1 en la cual se listan los costos aproximados (sin impuestos) por hectárea que agrega este tipo de desarrollos para distintas extensiones de cultivo. Se puede observar que a partir de las 1000 hectáreas el costo de incorporación crece a una tasa mayor. Esto no significa que sólo los productores que tengan un establecimiento de dicho tamaño son los únicos usuarios posibles, sino también que las cooperativas que agrupen varios productores podrían adquirir el software de análisis.

Tabla 1. Estimaciones de costos

Cantidad de hectáreas	Costo de Imágenes	Costo de Análisis	Total
5000	30,25 \$/ha	15,80 \$/ha	46,10 \$/ha
2500	36,30 \$/ha	31,60 \$/ha	67,90 \$/ha
1000	48,40 \$/ha	79,10 \$/ha	127,50 \$/ha
500	60,50 \$/ha	158,20 \$/ha	218,70 \$/ha
100	72,60 \$/ha	791,20 \$/ha	863,80 \$/ha

The screenshot displays the 'Repositorio de Imágenes RepoIMG v1.0' interface. It features a sidebar with navigation options: INICIO, NUEVO, ABERTOS (10), FINALIZADOS (102), TODOS, ACCIONES, and IMÁGENES. The main content area is titled 'Imágenes (5)' and includes a table with the following data:

ID	Creador	Fecha Carga	Espectro	Varietal	Propietario
6.008	Alexis R	Mar 29, 2014 12:29:50 PM	Soja	NS 7209 IPRO	GRAFF JOSE EMILIO
6.003	Alexis R	Mar 29, 2014 12:28:35 PM	Soja	NS 7209 IPRO	RIVAS Elisabel
6.000	Jennifer S	Mar 29, 2014 10:42:54 AM	Caña de Azúcar	Caña amarilla gal	AGUIAR Leonardo Daniel
5.999	Jennifer S	Mar 29, 2014 10:41:11 AM	Caña de Azúcar	Georgia roja	FRANZ Herminia Catalina
6.001	Gerardo S	Mar 29, 2014 12:29:50 PM	Caña de Azúcar	Georgia Roja	AGUIAR Leonardo Daniel

Below the table, four image thumbnails are shown, each with a timestamp: 'FRI APR 18 19:55:17 ART 2014', 'FRI APR 18 19:55:30 ART 2014', 'FRI APR 18 19:55:38 ART 2014', and 'FRI APR 18 19:55:42 ART 2014'. The images represent the original, filtered, and segmented versions of the cane sugar crop.

Figura 4 - Repositorio Web Agroimágenes (Imagen Original/Filtrada/Etiquetas/Segmentada)

La figura 4 ilustra el Repositorio Web *Agroimágenes* (RepoIMG v1.0), actualmente en desarrollo, el cual le permite al equipo de trabajo almacenar, compartir y organizar el flujo de procesamiento de imágenes. Es un sistema multiusuario basado en tecnologías web, desarrollado en lenguaje Java. El mismo trabaja sobre un servidor Tomcat y la interfaz de usuario está desarrollada sobre el framework Vaadin, mientras que para la lógica de negocio se utiliza Java Persistence API.

4 CONCLUSIONES

En cuanto a la problemática particular los resultados del proceso de segmentación fueron satisfactorios para la identificación de regiones homogéneas en las imágenes aéreas multiespectrales de los cuadros productivos de caña de azúcar. Se consideran adecuados tanto los resultados del proceso de segmentación como los del proceso de postprocesamiento de las regiones identificadas. El descriptor con mayor aporte fue la entropía y al obtenerse mejores resulta-

dos agregando otros estadísticos de primer orden, se refuerza la idea de que la entropía no era suficiente para lograr una adecuada identificación de caña caída y caña en pie, al igual de que no era suficiente la sola utilización de índices fotométricos, como fuera reportado en otros trabajos.

A partir de la vinculación establecida ha sido posible la conformación de un grupo multidisciplinario funcional potenciando capacidades del sector científico e industrial sin relación previa. Se desarrollaron prototipos funcionales (algoritmos de segmen-

tación y repositorio web) que permiten la aplicación de las metodologías desarrolladas sobre nuevas imágenes multiespectrales de caña de azúcar, como así también una estimación del impacto económico. Además el trabajo en conjunto permitió generar un proyecto de investigación novel financiado por la universidad denominado *Análisis de imágenes multiespectrales de cuadros productivos de caña de azúcar*. A partir del mismo se han derivado dos tesinas de grado y las publicaciones en revistas y congresos indicadas en las referencias de este trabajo.

Referencias

1. B. Russell, A. Torralba, K. Murphy, W. T. Freeman. LabelMe: a database and web-based tool for image annotation. *International Journal of Computer Vision*, 2007. Disponible en: <http://people.csail.mit.edu/brussell/research/AIM-2005-025-new.pdf>
2. Solano A.; Schneider G.; Kemerer A.; Hadad A.. Characterization of multispectral aerial images of sugarcane. *Journal of Physics: Conference Series*.: IOP Publishing. 2013 vol.477 n°1. p -. issn 1742-6588. eissn 1742-6596 (2013)
3. Schneider G.; Hadad A.; Kemerer A.. Implementación de un software para el análisis de imágenes aéreas multiespectrales de caña de azúcar. V. *Informática*. Manizales: Facultad de Ciencias e Ingeniería, Univ. de Manizales. vol.28 n°. p10 - 24. eissn 0123-9678 (2013)
4. Solano A.; Schneider G.; Kemerer A.; Hadad A.. Texture Analysis for the Segmentation of Sugar Cane Multispectral Images. *Argentina*. Buenos Aires. Jornadas Argentinas de Informática. SADIO & Univ. de Palermo (2014)
5. Schneider G., Solano A., Kemerer A., Hadad A., Gestión y procesa-