

Aplicación de fotografías aéreas de alta resolución en la planificación de cosecha de caña de azúcar

Alejandra Cecilia Kemerer^{1,2}
Ricardo José Miguel Melchiori¹
Arturo Emiliano Melchiori³

¹ Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA
Ruta 11 Km 12,5 - 3100 – Oro Verde – Entre Ríos - Argentina
akemerer@parana.inta.gov.ar
rmelchiori@parana.inta.gov.ar

² Facultad de Ciencias Agropecuarias
Universidad Nacional de Entre Ríos
Ruta 11 Km 10 – Oro Verde - Entre Ríos - Argentina

³ Investigador independiente
emelchiori@gmail.com

Abstract. The tolerable losses in the mechanical harvest of sugar cane are proposed around 2.5%. It increased from an initial value of 20% fallen sugar cane, depending on the harvester experience. The objective of the present work, was to evaluate the use of high resolution airborne multispectral imaging to estimate the area of fallen sugar cane in productive fields, as an index to planning harvest process. Several flights were accomplished with a Sky Arrow 650 TCNS ERA aircraft over advanced sugar cane crop fields in Salta and Tucuman in Argentina. Multispectral images were acquired (G-R-NIR). Mosaics were made and the management units were extracted. Entropy images were generated evaluating different types and sizes of filtering moving windows. Threshold values were used to discriminate between stand and fallen cane. These procedures were adapted in response to the presence of internal irrigation. The total area of both stand and fallen sugar cane was determined generating a ranking of the management units as a decision tool for the harvest process. The obtained results were satisfactory demonstrating the feasibility of use entropy analysis with high spatial resolution airborne imaging for a rapid and effective mapping of the distribution of fallen sugar cane in production fields.

Keywords: fallen-sugar cane, entropy, texture analysis.

1. Introducción

Los sistemas productivos cañeros presentan diferentes niveles tecnológicos, con sistemas de cosecha desde manuales a totalmente mecanizados, si bien, en la actualidad más del 70% del volumen total se cosecha de manera mecanizada. Las pérdidas tolerables durante el proceso de cosecha son de alrededor del 2,5%. Rodriguez et al. (2010) en evaluaciones realizadas durante la zafra 2010 observaron que los principales factores determinantes de las pérdidas son la presencia de caña caída, la experiencia del personal de cosecha y la edad de la maquinaria empleada. Incidencia de vuelco superior al 20% determina incrementos en las pérdidas desde 3,9 a 6,4%. Asimismo, operarios de cosecha con escasa experiencia de cosecha normalmente ocasionan pérdidas superiores a los máximos tolerables. Una estrategia para disminuir el impacto económico desfavorable consistiría en asignar el personal de cosecha de mayor experiencia a los cuadros con mayor incidencia de caña caída. Sin embargo, hasta la fecha no existe una metodología objetiva y precisa para estimar el área afectada con caña caída.

La disponibilidad de fotografías aéreas de alta resolución aplicadas al relevamiento de fincas cañeras permitiría determinar el área afectada por caña caída y su distribución espacial. El análisis digital de imágenes se ha utilizado comúnmente para calcular índices de vegetación y caracterizar la productividad a distintas escalas (Rao et al. 2002; Abdel-Rahman

y Ahmed, 2008). Sin embargo, ha sido menos frecuente la utilización de técnicas de análisis de textura en aplicaciones agronómicas. Este tipo de técnicas ampliamente utilizadas en la industria (Siew et al. 1988; Livens et al. 1996) permitiría determinar la presencia de caña caída, dado que ésta genera irregularidades en la altura del canopeo, que se expresan en variaciones texturales en la imagen.

Por lo expresado anteriormente, el objetivo del presente trabajo es evaluar la utilización de imágenes multiespectrales de alta resolución espacial para mejorar la logística del proceso de cosecha a partir de la clasificación de cuadros productivos según el porcentaje de caña caída para la asignación del personal de cosecha.

2. Metodología del trabajo

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a las Fincas “Cedro Solo” del Ingenio San Martín de Tabacal, ubicado próximo a la ciudad de San Ramón de la Nueva Orán, en la provincia de Salta (23,3° S; 63,3° O) y “La Providencia” de la empresa ARCOR S.A. cercana a la ciudad de Concepción en la provincia de Tucumán (27,3° S; 65,5° O) (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de las fincas evaluadas en el área de estudio.

2.2. Sistema de sensores aerotransportados

Los fotogramas fueron adquiridos con un sistema de fotografía multiespectral digital instalado en un avión Sky Arrow 650 TCNS ERA de INTA. El equipo se compone de un sistema de posicionamiento, una cámara multiespectral Geospatial MS4100 y un sistema de control y almacenamiento de datos. La cámara permite la adquisición de fotogramas en 3 bandas: verde (530-580 nm), roja (650-685 nm) e infrarroja cercana (770-830 nm), con una resolución de 1920 x 1075 píxeles por cada banda y una profundidad de color de 8 bits. El sistema de posicionamiento registra la posición y altura de vuelo, en sincronismo con los fotogramas.

2.3. Diseño del plan de vuelo

En la finca Cedro Solo el vuelo se realizó el 5 de Mayo de 2008 y en la finca La Providencia el 15 de Abril de 2010. Ambos vuelos se realizaron en momentos previos a la

cosecha cuando la presencia de caída de la caña es visualmente evidente. Los vuelos se efectuaron durante el medio día solar a fin de contar con una iluminación homogénea en la superficie relevada. El plan de vuelo se diseñó para una altura de 1200 m sobre el nivel del terreno, con superposiciones laterales y longitudinales de 30% y 60%, respectivamente, lo que permitió obtener fotogramas con un tamaño de píxel de 0,70 m.

2.4. Procesamiento de la información

Se elaboró el mosaico de imágenes, se georreferenció y se recortaron individualmente los cuadros productivos seleccionados (12 para la Finca Cedro Solo y 7 para La Providencia).

Para evaluar el área con caña caída se utilizaron herramientas de “Procesamiento de Imágenes” del programa Matlab versión 2006a. Se ajustó un procedimiento basado en el análisis de texturas, empleando el cálculo de entropía en las tres bandas disponibles, las que se combinaron de manera lineal. Se evaluaron diferentes tamaños de ventanas de inspección para el cálculo de la entropía, ventanas de 5x5, 7x7 y 9x9 píxeles. Para la Finca Cedro Solo se utilizó adicionalmente una máscara para aislar las áreas de canales de irrigación y caminos internos. Dicha máscara se generó mediante el cálculo del NDVI, y fijando un valor umbral de $NDVI = 0,25$, valores inferiores se consideraron áreas sin cultivo.

Se establecieron valores umbrales de entropía en cada cuadro para separar la caña en pie de la caña caída (dos valores umbrales en Finca Cedro Solo y uno en Finca La Providencia). La selección del valor umbral y el tamaño de ventana de inspección más adecuado se realizó de manera visual.

Se determinó el porcentaje de la superficie con caña caída en cada cuadro y éstos se clasificaron según la superficie afectada.

2.5. Optimización de la logística de cosecha

A partir de la estimación del porcentaje de la superficie cubierta con caña caída los cuadros se clasificaron y se establecieron tres categorías: cuadros con menos del 20% de caña caída, cuadros con 20 – 50% de caña caída, cuadros con más del 50% de caña caída. A partir de esta información se propone la siguiente clasificación del personal de cosecha:

Grupo 1 (G1): personal con elevada experiencia, destinado a cosechar cuadros con más del 50% de caña caída.

Grupo 2 (G2): personal con experiencia intermedia, destinado a cosechar cuadros con 20 - 50% de caña caída.

Grupo 3 (G3): personal con escasa experiencia, destinado a cosechar cuadros con menos del 20% de caña caída.

3. Resultados

En los relevamientos realizados, tanto en la zona cañera de Tucumán como en Salta, se observó la presencia de caña caída. El análisis de dos zonas con características productivas diferentes, una de secano, ubicada a mayores latitudes (Tucumán), y la otra bajo riego, ubicada en el Trópico (Salta), permitió estudiar los comportamientos en cultivos con menor altura y productividad en el primer caso y con alto porte y alta productividad en el segundo.

En la Finca Cedro Solo valores medios de entropía total superiores a 9 correspondieron a cuadros con más del 20% de la superficie afectada por caña caída (Tabla 1). En este caso puede observarse que cuando el nivel de entropía fue inferior a 9 el porcentaje de caña caída estuvo por debajo de 10 %, cuando el valor de entropía estuvo entre 9 y 10, el porcentaje de afectación osciló aproximadamente entre 10 y 50%, y cuando superó el valor de 10, el porcentaje de afectación fue consistentemente superior al 50%. La variación observada entre los valores máximo y mínimo de entropía media fue de 140%. Mientras que el porcentaje de caña caída en el cuadro de máxima afectación fue 18 veces más alto que en el de menor

afectación. La relación entre el índice de entropía y el porcentaje de caña caída fue muy estrecha ($r = 0,97$).

Tabla 1. Entropía media, porcentaje de afectación con caña caída y asignación a grupo de cosecha en Finca Cedro Solo, Salta. Zafra 2008.

Cuadro	Tamaño y umbrales de entropía	Promedio entropía	% caña caída	Grupo de cosecha
44	D5; 10,5 y 13	7,52	4	G3
51	D5; 10,5 y 13	8,04	5	G3
53	D5; 10,5 y 13	8,59	10	G3
24	D9; 9,5 y 13	9,09	33	G2
22	D9; 9 y 13	9,18	42	G2
56	D9; 9 y 13	9,24	44	G2
55	D9; 9 y 13	9,91	57	G1
26	D9; 9,5 y 13	10,63	67	G1
93	D9; 9 y 13	10,22	70	G1
91	D9; 9 y 13	10,49	71	G1
14	D9; 9 y 13	10,3	72	G1
65	D9; 9 y 13	10,39	73	G1

D: ventana de inspección con forma de diamante; 9-5: tamaño de la ventana de inspección en número de píxeles; 9-10,5: valores umbrales de entropía utilizados. G: Grupo de cosecha.

En el caso del análisis en cuadros de la finca La Providencia (Tucumán), de manera general, se observó que los valores de entropía fueron más elevados que los de la Finca Cedro Solo (Tabla 2). Los cambios en el índice de entropía se relacionaron de manera menos estrecha con el porcentaje de caña caída ($r = 0,57$). Los mayores valores de entropía observados en este caso se relacionaron a mayores desuniformidades en la altura del cultivo asociadas, por un lado, a que el ambiente es menos favorable para el crecimiento comparado con el ubicado más al norte y, por otro lado, a que el sistema de cultivo es en secano, lo que induciría mayor variabilidad en la disponibilidad hídrica para el cultivo.

Tabla 2. Entropía media, porcentaje de afectación con caña caída y asignación a grupo de cosecha en Finca La Providencia, Tucumán. Zafra 2010.

Cuadro	Tamaño y umbrales de entropía	Promedio entropía	% caña caída	Grupo de cosecha
4	D9; 13	10,64	8	G3
7	D9; 12	10,24	17	G3
2	D9; 12,5	11,88	32	G2
5	D9; 12	11,59	38	G2
1	D9; 11	10,24	45	G2
6	D9; 10,5-13	11,2	66	G1
3	D9; 11 – 15	12,42	73	G1

D: ventana de inspección con forma de diamante; 9-5: tamaño de la ventana de inspección en número de píxeles; 9-10,5: valores umbrales de entropía utilizados. G: Grupo de cosecha

Debe considerarse, sin embargo, que el valor medio de entropía no refleja la localización ni la magnitud del daño. Por ejemplo, el cuadro N° 4 presenta un valor alto de entropía media y un bajo porcentaje de caña caída (Tabla 2). Esto se explica por la presencia de una zona

localizada con muy alta heterogeneidad y un área mayoritaria del cuadro con bajos niveles de heterogeneidad (Figura 2).

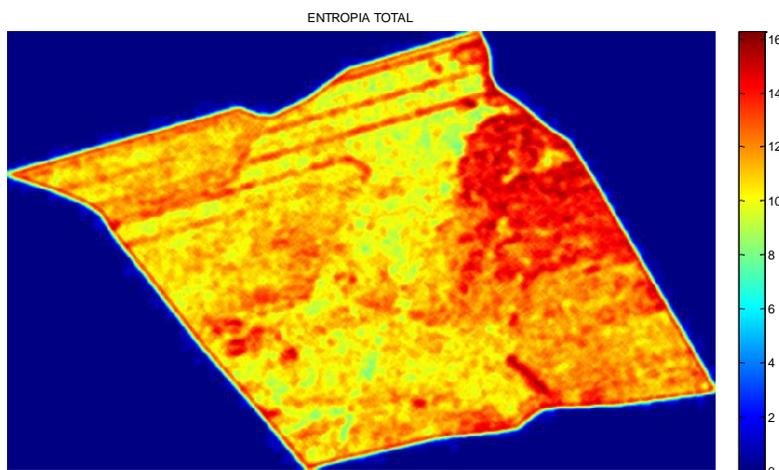


Figura 2. Imagen de entropía total del correspondiente al cuadro N° 4. Finca La Providencia.

La determinación del porcentaje de caña caída en los 19 cuadros evaluados permitió categorizarlos de acuerdo a lo planteado. Los cuadros con elevado porcentaje de caña caída (cuadros 55, 26, 93, 91, 14 y 65 en Finca Cedro Solo; y 6 y 3 en Finca La Providencia) representaron el 42% del total de los cuadros evaluados, los que fueron asignados al personal de cosecha con mayor experiencia. Los cuadros con porcentaje intermedio de caña caída representaron el 32 % del total (cuadros 24, 22 y 56 en Finca Cedro Solo; y 2, 5 y 1 en Finca La Providencia), los que fueron asignados al personal con experiencia intermedia. Finalmente, los cuadros con una baja superficie de caña caída, el 26% del total (cuadros 44, 51 y 53 en Finca Cedro Solo; y 4 y 7 en Finca La Providencia) fueron asignados al personal con menos experiencia (Tablas 1 y 2).

La presencia de caña caída es un proceso que ocurre de manera natural en áreas donde el cultivo alcanza alta productividad, en un proceso que es favorecido eventualmente por tormentas con vientos fuertes. La presencia de caña caída afecta la eficiencia de la cosecha y la calidad del producto cosechado (Tonatto et al. 2005). De los resultados obtenidos, se puede observar que el 74% de los cuadros evaluados supera el porcentaje de caña caída a partir del cual las pérdidas se incrementan por encima del máximo tolerable, por lo tanto, es esperable que el efecto sobre las pérdidas totales pueda ser disminuido de manera considerable sólo a partir de la asignación criteriosa del personal de cosecha. Asimismo la posibilidad de ubicar espacialmente el área afectada y cuantificarla permitiría mejorar la logística estableciendo áreas con diferente prioridad de cosecha, según el tiempo requerido en cada caso, manteniendo constante el volumen de material entregado al ingenio, con lo cual se mejoraría la eficiencia en la industria. La posibilidad de asignar personal más calificado a la cosecha de caña caída permitiría además reducir el volumen de material extraño (tierra, restos secos, entre otros) que es enviado al ingenio, mejorando también la eficiencia industrial.

La utilización del cálculo de entropía como técnica de análisis de texturas de fotografías aéreas de alta resolución obtenidas en canopeos de caña de azúcar permitió identificar, localizar y cuantificar el porcentaje de afectación por caña caída. El análisis de textura ha sido utilizado también con éxito con otros fines biológicos para discriminar diferentes tipos de especies arbóreas y clases etáreas (Coburn y Roberts, 2004).

4. Conclusiones

El análisis de textura utilizando el concepto de entropía asociado al procesamiento digital de imágenes permitió discriminar las heterogeneidades evidentes en el canopeo debidas a la presencia de caña caída. La clasificación de los cuadros según al porcentaje de caña caída y la asignación del personal para la cosecha de los cuadros acorde con éstas permitiría mejorar la performance de cosecha.

5. Referencias bibliográficas

Abdel-Rahman, E.M.; Ahmed, F.B. The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp.* hybrid) production: a review of the literature. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 13, p. 3753-3767, 2008.

Coburn, C.A.; Roberts, A.C.B. A multiscale texture analysis procedure for improved forest stand classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 20, p. 4287–4308, 2004.

Livens, S.; Scheunders, P.; Van de Wouwer, G.; Van Dyck, D.; Smets, H.; Winkelmanns, J.; Bogaerts, W. A texture analysis approach to corrosion image classification. **Microscopy, Microanalysis, Microstructures**, v. 7, n. 2, p. 1-10, 1996.

Rao, P.; Rao, V.; Venkataratnam, L. Remote sensing: A technology for assessment of sugarcane crop acreage and yield. **Sugar Tech**, v. 4, n. 3, p. 97-101, 2002.

Rodriguez, R.A.; Sopena, R.A.; Saleme, P.M.; Vicini, L.E. **Pérdidas durante la Cosecha del Cultivo de Caña de Azúcar**. Informes Técnicos del Precop, INTA EEA Famaillá, N°1, ISSN ° 1852 – 9399, 2010, 16 p.

Siew, L.H.; Hodgson, S.R.; Hodgson, E.J.. Texture Measures for Carpet Wear Assessment. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 10, n.1, p. 92-105, 1988.

Tonatto, J.; Romero, E.R.; Leggio Neme, M.F.; Scandaliaris, J.; Alonso, J.; Digonzelli, P.; Alonso, L.; Casen, S. **Importancia de la calidad de la materia prima en la productividad de la agroindustria azucarera**. Gacetilla Agroindustrial de la EEAOC N° 67, p. 1 – 13, 2005.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a las empresas Tabacal SA y ARCOR SA por la información facilitada. Agradecen también a los Ing. Agr. Ricardo Rodríguez y Luis Vicini de la EEA Famaillá y la Ing. Agr. Gabriela Valdéz de la EEA Cerrillos, por su colaboración en las tareas de campo y las gestiones con las empresas.