

## Análisis de textura en piloncillo a través de procesamiento de imágenes utilizando la matriz de co-ocurrencia

### Texture analysis in piloncillo through image processing using the co-occurrence matrix

LÁRRAGA-ALTAMIRANO, Hugo\*†, PIEDAD-RUBIO, Ana, HERNÁNDEZ-LÓPEZ, Dalia, GÓMEZ-RODRÍGUEZ, Ismael

*Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, Carretera al Ingenio Plan de Ayala Km. 2, Colonia Vista Hermosa, C.P. 79010, Ciudad Valles, S.L.P.*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Hugo, Lárraga-Altamirano* / **ORC ID:** 0000-0001-8258-9418, **Researcher ID Thomson:** T-2296-2018, **arXiv Author ID:** Hugo\_Larraga, **CVU CONACYT ID:** 626539

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Ana, Piedad-Rubio* / **ORC ID:** 0000-0003-1258-0383, **Researcher ID Thomson:** T-2477-2018, **arXiv Author ID:** ampiedad, **CVU CONACYT ID:** 732279

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Dalia, Hernández-López* / **ORC ID:** 0000-0002-2751-5886, **Researcher ID Thomson:** T-2470-2018, **arXiv Author ID:** DaliaHernandez, **CVU CONACYT ID:** 536472

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Ismael, Gómez-Rodríguez* / **ORC ID:** 0000-0003-3667-9986, **Researcher ID Thomson:** T-2459-2018, **arXiv Author ID:** DaliaHernandez, **CVU CONACYT ID:** 947957

Recibido Junio 20, 2018; Aceptado Septiembre 30, 2018

#### Resumen

La industria azucarera en México opera sus procesos con gran impacto negativo hacia el medio ambiente y la salud, por lo que la diversificación es un tema prioritario. Una alternativa, es darle mayor valor a los productos derivados convencionales de la caña de azúcar, como el piloncillo, el cual para ser exportado requiere cumplir condiciones de calidad como el color y la textura. El objeto de estudio del presente trabajo es el análisis de la textura del piloncillo para caracterizar el aspecto uniformidad a través de técnicas de procesamiento de imágenes. Se propone implementar la matriz de co-ocurrencia y el cálculo de cuatro descriptores texturales: correlación, contraste, homogeneidad y energía para determinar defectos en la superficie del producto y así fortalecer la comercialización para la exportación. El trabajo de investigación se llevó a cabo en la Huasteca Potosina, México, zona cañera por excelencia con alrededor de 4500 productores de piloncillo.

**Piloncillo, Calidad, Textura, Matriz Co-ocurrencia, Huasteca Potosina**

#### Abstract

The sugar industry in Mexico operates its processes with great negative impact on the environment and health, so diversification is a priority issue. An alternative is to give greater value to the conventional derivative products of sugarcane, such as the piloncillo, which to be exported requires quality conditions such as color and texture. The objective of the present work is the analysis of the texture of the piloncillo to characterize the aspect uniformity through techniques of image processing. It is proposed to implement the co-occurrence matrix and the calculation of four textural descriptors: correlation, contrast, homogeneity and energy to determine defects in the surface of the product and thus strengthen export marketing. The research work was carried out in the Huasteca Potosina, Mexico, a sugarcane area par excellence with around 4500 producers of piloncillo.

**Piloncillo, Quality, Texture, Matrix Co-occurrence, Huasteca Potosina**

**Citación:** LÁRRAGA-ALTAMIRANO, Hugo, PIEDAD-RUBIO, Ana, HERNÁNDEZ-LÓPEZ, Dalia, GÓMEZ-RODRÍGUEZ, Ismael. Análisis de textura en piloncillo a través de procesamiento de imágenes utilizando la matriz de co-ocurrencia. *Revista de Sistemas Experimentales*. 2018, 5-16: 26-32

\*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: hugo.larraga@tecvalles.mx)

†Investigador contribuyendo como primer Autor.

## Introducción

En México, la industria azucarera representa un importante sector económico, esto se debe en gran medida a que posee grandes extensiones de territorio aptas para el cultivo de la caña de azúcar materia prima del edulcorante. Son varios los estados que participan en esta agroindustria constituida por ingenios azucareros que llevan a cabo el proceso de transformación; altamente costoso para el medio ambiente y la salud, es por eso que, la diversificación de esta industria es un tema global que ocupa a expertos de diferentes ámbitos.

Una alternativa de diversificación planteada es darle mayor valor a los productos derivados convencionales de la caña de azúcar, como el piloncillo, cuyo método de fabricación tiene un impacto ambiental negativo menor que el de la industria azucarera tradicional y por ende, se le han atribuido beneficios para la salud humana (Gómez-Merino, y otros, 2017).

La producción de piloncillo no es una actividad reciente, por el contrario, data de los inicios de la misma industria azucarera y sus métodos de producción en algunos casos siguen inalterables. México ocupa el sexto lugar en cultivo de caña de azúcar, el séptimo como productor mundial de azúcar y el décimo en producción de piloncillo, muy por debajo de países como la India y Colombia (Galicia-Romero, y otros, 2017).

Tan solo en la Huasteca Potosina se registraron en el año 2014 alrededor de 4500 productores de piloncillo, organizados desde sociedades cooperativas hasta sociedades anónimas de capital variable, las cuales ya han tenido experiencia en exportar a Europa y EUA. Actualmente el mercado de exportación es una nueva oportunidad para este producto, sin embargo, los factores de inocuidad y calidad deben de ser atendidos para favorecer su comercialización nacional y global (SAGARPA, 2014).

Aun cuando no existe una regulación internacional que determine las condiciones sensoriales y físico-químicas del piloncillo, es posible determinar el grado de calidad a través de características de aspecto como color y textura (la inocuidad no es abordada en este estudio).

De esta manera y de acuerdo a la norma mexicana NMX-F-596-SCFI-2016 que tiene por objetivo establecer las especificaciones del Piloncillo 100% de jugo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) ya sea en bloque o granulado, este puede describirse sensorialmente como lo indica la Tabla 1 (Dirección General de Normas, 2016).

Característica	Descripción
Aspecto	Uniforme
Sabor	Dulce, característico al jugo de caña de azúcar
Tonalidad	Café claro al oscuro
Olor	Característico al jugo de caña

**Tabla 1** Especificaciones sensoriales del piloncillo, NMX-F-596-SCFI-2016

Por lo anterior el objeto de estudio del presente trabajo es el análisis de la textura del piloncillo para caracterizar el aspecto uniformidad a través de técnicas de procesamiento de imágenes y con esto, evaluar un rasgo de calidad de los productos de exportación.

La hipótesis plantea que es posible determinar el aspecto uniforme del piloncillo mediante el uso de la matriz de co-ocurrencia y el cálculo de cuatro descriptores texturales: correlación, contraste, homogeneidad y energía. La tecnificación de la industria piloncillera apoya la diversificación del sector azucarero y en consecuencia el desarrollo regional. El producto de esta investigación forma parte de un sistema de visión artificial que favorece la comercialización del piloncillo, haciendo hincapié en la exportación. Las secciones siguientes están dedicadas a explicar el análisis de textura que se realizó en una muestra de piloncillos elaborados en la Huasteca Potosina, el lector podrá encontrar la base teórica de la investigación, el método utilizado para el desarrollo del problema, los resultados obtenidos del diseño de experimentos y la conclusión de la hipótesis planteada.

## Marco Teórico

La definición de textura de la superficie de una imagen, es la repetición de un patrón espacial cuya estructura puede ser periódica o aleatoria, considerando la distribución de los niveles de gris en el espacio, Figura 1. El análisis de textura permite evaluar propiedades tales como: fineza, suavidad, rugosidad, granulación entre otros.



**Figura 1** Ejemplo de texturas (periódica-aleatoria)

Fuente: <http://www.arqhys.com/contenidos/textura-metalica.html>,  
<http://mauriciocaminos.blogspot.com/2012/10/fotografia-creativa-texturas.html>

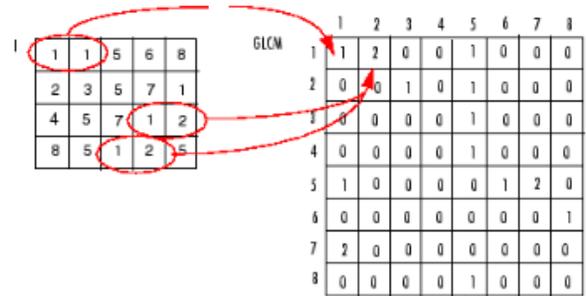
La extracción de la textura como característica visual se realiza de dos maneras: Global aplicada a la imagen entera y Local, aplica a un grupo pequeño de píxeles (subimágenes). La primera extracción es útil cuando se trata de texturas con patrones regulares (periódicos), la segunda extracción, es utilizada en los casos de imágenes con texturas aleatorias.

Son varias las técnicas para el análisis de textura, de manera que solo se mencionan las que más destacan: a) Métodos estructurales o sintácticos; consideran texturas compuestas de elementos primitivos (geométricos), cabe mencionar que no se profundizará en este método pues no es parte del experimento. b) Métodos estadísticos: de primer orden para interpretar la textura a través del cálculo del histograma de niveles de gris, media, varianza, entre otros; de segundo orden trabajan con propiedades de pares de píxeles distribuidos espacialmente, por ejemplo, la matriz de co-ocurrencia. Es precisamente esta última la técnica propuesta en la presente investigación, misma que permitirá realizar la caracterización de la textura del piloncillo (Palomino, Contreras, & Ruiz, 2010).

La matriz de co-ocurrencia es una matriz de frecuencias relativas en la que dos píxeles a determinada distancia ocurren en el espacio de la imagen, cada elemento de ésta indica cuantas veces se repite  $x$  y en una relación espacial con cuatro posibles direcciones:  $0^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ . Una matriz de co-ocurrencia asimétrica para una imagen en escala de grises está definida por la ecuación 1 (Betancur, Viera, & Mora, 2010):

$$C_d(i,j) = \left| \left\{ (r, c) \mid \begin{matrix} I(r,c)=i \text{ y} \\ I(r+dr,c+dc)=j \end{matrix} \right\} \right| \quad (1)$$

Para ejemplificar la construcción de una matriz de co-ocurrencia con un desplazamiento  $[0,1]$ , esto es, dirección  $0^\circ$  (desplazamiento de un píxel hacia la derecha del píxel eje) se puede observar la Figura 2.



**Figura 2** Matriz de co-ocurrencia  $[0,1]$

Fuente: <https://la.mathworks.com/help/images/ref/graycomatrix.html#bu5tkok-5>

Una vez construida la matriz de co-ocurrencia es posible calcular varias medidas de textura o descriptores texturales, para este caso, solo se trabajará con cuatro de ellas:

- **Homogeneidad:** Cuando la imagen es localmente homogénea al tamaño de la ventana presenta valores altos, la base del cálculo se expresa en la ecuación (2).

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} / 1 + (i - j)^2 \quad (2)$$

- **Contraste:** Caso contrario a la homogeneidad, presenta valores altos cuando existe variaciones locales en la imagen, la ecuación que la representa es la (3).

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - j)^2 \quad (3)$$

- **Correlación:** Mide la relación entre las intensidades de la matriz, se usa la ecuación (4) para su cálculo.

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \left[ \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sqrt{(\sigma_i^2)(\sigma_j^2)}} \right] \quad (4)$$

- **Energía:** Da información de la uniformidad de la imagen, se calcula con la ecuación (5) (Presutti, 2004).

$$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}^2 \quad (5)$$

### Metodología

**Materiales:** Se trabajó con una muestra de 10 piloncillos de diferentes proveedores clasificados en dos clases: cinco piloncillos modelo y cinco con defectos. La primera clase supone productos con aspecto aceptable por el mercado consumidor y la segunda, posee defectos como porosidad, fracturas, ralladuras. La digitalización se logra con una caja de iluminación, una cámara digital y un equipo de cómputo de 32 Gb RAM con microprocesdor i7 Intel Core. Para el procesamiento de imágenes se optó por un lenguaje de programación con librerías orientadas para tal fin como Matlab R2015®.

**Iluminación:** Es una parte importante en los sistemas de visión artificial, una técnica adecuada de iluminación permite tener confiabilidad en los datos de entrada. De acuerdo a la norma ISO 3664:2009 se deben considerar cinco factores para un sistema de iluminado:

- Calidad del color. La luz del día teóricamente perfecta oscila en 5500 Kelvin.
- Intensidad de la luz. La iluminación recomendada es de 2000lx con un índice de reproducción de color mayor que 80.
- Uniformidad. Todos los puntos sobre la superficie del objeto deben ser iluminados con al menos el 60% de la intensidad de la fuente.
- Entorno. Procurar un fondo gris Munsell N8 para evitar altos índices de reflectancia.
- Geometría. La posición de la fuente de luz respecto al objeto debe evitar la reflexión especular (brillo) (International Organization for Standardization, 2009).

**Preprocesamiento:** El tratamiento de la imagen antes de realizar el análisis de textura es necesario para discriminar aquellos pixeles que no son de utilidad para el proceso.

La extracción del área de interés del resto de la imagen se conoce como segmentación y para este caso, se implementa una combinación de técnicas de umbralización y detección de bordes para mayor efectividad en el recorte. El flujo de operaciones para realizar la segmentación inicia con la transformación de la imagen de RGB a escala de grises, ya que los operadores Otsu y Sobel que representan la umbralización y la detección de bordes respectivamente, actúan en este espacio de color.

Los resultados de estas dos técnicas se fusionan limpiando cualquier excedente de pixeles con la ayuda de operaciones morfológicas de dilatación y erosión para finalmente, obtener la máscara que multiplicará a la imagen original a segmentar (Romero Acero, Marín Cano, & Jiménez Builes, 2015).

**Matriz de co-ocurrencia:** Antes de configurar la matriz, la imagen de entrada se divide en cuatro subimágenes proporcionales en tamaño con la intención de realizar un análisis con mayor detalle de la textura.

Cada ventana creada genera una matriz con la información de la textura, contemplando una relación espacial de [0,1] y omitiendo los pixeles de los bordes, ya que no contienen información relevante de la textura, por lo tanto es simétrica. Los descriptores texturales obtenidos a partir de la matriz describen información particular de la textura del producto.

El contraste es un indicador de la variación de color entre los pixeles, a menor valor la imagen es más constante en sus niveles de intensidad. Por su parte la correlación brinda otro tipo de datos, especifica la relación de un pixel con su vecino en términos de intensidad, los valores 1 o -1 demuestran una correlación perfecta.

Otra medida textural usada es la energía, conocida también como uniformidad o segundo momento angular, expresa suavidad en la textura. Por último la homogeneidad, indica regularidad en la textura, entre más cercanos estén los elementos de la matriz a la diagonal el valor será más alto (Botero Valencia & Restrepo Martínez, 2010).

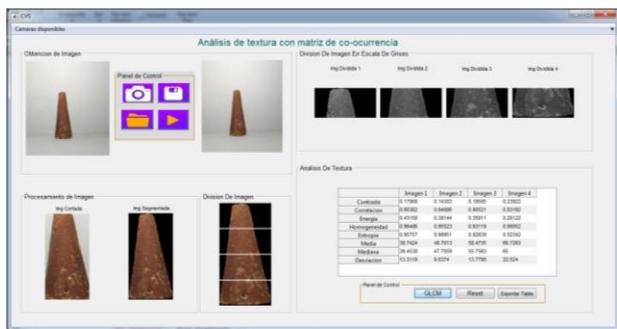
## Resultados

La iluminación requerida para la captura de la imagen se controló por medio de una cabina de luz construida con material de madera y de forma rectangular (120cm x 70cm x 65 cm), el espacio permite ajustar la distancia entre la fuente de luz y el piloncillo, además integra una lámpara led de 4500K con una potencia de 980 lúmenes, como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3** Caja de iluminación, fuente original

Para el procesamiento de imágenes se desarrolló un software que integra una interfaz de usuario para poder realizar operaciones de adquisición, preprocesamiento y el cálculo de la matriz de co-ocurrencia con varias medidas texturales, una vista general de esta herramienta de apoyo se puede observar en la Figura 4.



**Figura 4** Software para análisis de textura, fuente original

El proceso de segmentación se realizó exitosamente con la fusión de los algoritmos Otsu y Sobel, así como también la división de la imagen original en cuatro ventanas, cuyos resultados se pueden apreciar en la Figura 5.



**Figura 5** Segmentación y división de la imagen, fuente original

Por cada porción de la imagen se obtuvo una matriz de co-ocurrencia y se calcularon ocho medidas de textura, de las cuales solo se analizaron cuatro: el contraste, la homogeneidad, la correlación y la energía. Los datos generados para un piloncillo se muestran en la Tabla 2, se ha omitido parte de las fracciones por razones de espacio y presentación de la tabla.

	Img1	Img2	Img3	Img4	P
<b>Contraste</b>	0.0354	0.0266	0.0423	0.0398	0.03606
<b>Correlación</b>	0.7897	0.5402	0.6679	0.7553	0.68829
<b>Energía</b>	0.8086	0.91828	0.8384	0.8043	0.84242
<b>Homogeneidad</b>	0.98271	0.9868	0.9799	0.9805	0.98250

**Tabla 2** Medidas texturales por producto, fuente original

Como se observa en la tabla anterior, se realiza un promedio de los datos procesados por cada subimagen los cuales representan la medición de la textura del piloncillo. Este procedimiento se repitió para todos los sujetos de prueba, clasificados en dos, los productos susceptibles a venta y los que presentan defectos en apariencia. La Tabla 3 y 4 contienen los valores promediados de los sujetos de prueba inspeccionados para cada clase respectiva.

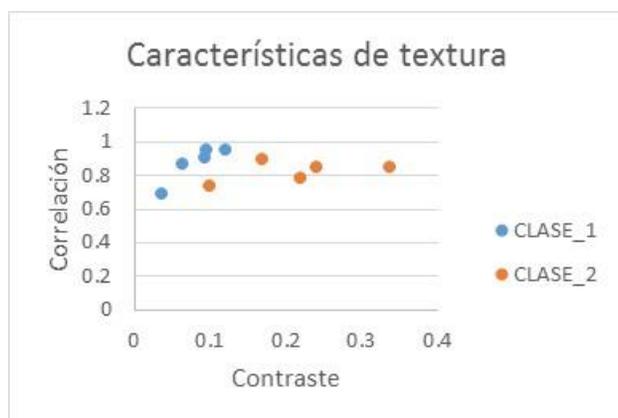
	P1	P2	P3	P4	P5
<b>Contraste</b>	0.0360	0.0958	0.06340	0.0926	0.12022
<b>Correlación</b>	0.6883	0.9526	0.86296	0.9061	0.95061
<b>Energía</b>	0.8424	0.4622	0.55144	0.43699	0.39984
<b>Homogeneidad</b>	0.9825	0.9748	0.98032	0.9600	0.96731

**Tabla 3** Valores texturas clase 1, fuente original

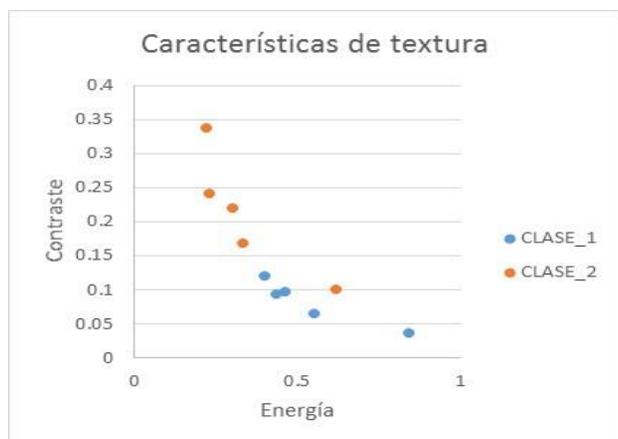
	P1	P2	P3	P4	P5
<b>Contraste</b>	0.099	0.2403	0.2196	0.16839	0.33733
<b>Correlación</b>	0.7383	0.8471	0.7847	0.8988	0.84877
<b>Energía</b>	0.619	0.2322	0.30385	0.33438	0.22378
<b>Homogeneidad</b>	0.9543	0.8985	0.8996	0.94113	0.87705

**Tabla 4** Valores texturales clase 2, fuente original

La discusión de estos resultados se presenta gráficamente para una mejor comprensión de la influencia de estas características en cada clase de piloncillos. En la Figura 6 se observa que la clase 1 mantiene un contraste no tan disperso con valores bajos a diferencia de la clase 2, esto indica que los piloncillos destinados para venta no presentan cambios radicales en su color. Llama la atención el sujeto de prueba de clase 2 que se encuentra a poca distancia del grupo clase 1, se podría inferir que en los productos de color oscuro no basta con la medición del contraste para determinar defectos. Otro punto digno de comentar es que todas las muestras mantienen una correlación delimitada en un rango de valores altos, lo que podría sugerir que todos los productos refieren cierta relación en sus niveles de gris.



**Figura 6** Características correlación-contraste, fuente original



**Figura 7** Características contraste-energía, fuente original

El espacio de características en dos dimensiones formado por el contraste y la energía demuestra una relación casi lineal entre ambas, es decir, existe dependencia entre estos dos descriptores texturales como se visualiza en la Figura 7.

La energía para la clase 1 tiene valores altos con los contrastes más bajos de las muestras, indica que las texturas son más uniformes o suaves con poca variación en el color. El sujeto de clase 1 que se aparta con gran distancia de los grupos, es el producto con el aspecto uniforme mejor calificado y en efecto lo es. Caso opuesto del sujeto clase 2 con el valor de energía menor y de más alto contraste, Figura 8.



**Figura 8** Piloncillo mejor y peor calificado, fuente original

## Conclusiones

Con las técnicas de procesamiento de imágenes como la implementación de la matriz de co-ocurrencia, es posible realizar el análisis de textura del piloncillo. Los descriptores texturales asociados a la identificación de defectos en la superficie del producto como poros, grietas o deformaciones son el contraste y la energía. Los productos con defecto presentan contrastes altos con baja energía. Cabe hacer mención que los piloncillos de color oscuro son apreciados de menor calidad que los de color claro, a pesar de que puedan tener texturas uniformes.

A partir de este estudio se abre la posibilidad de desarrollar un sistema de visión artificial que sea capaz de evaluar el color y la textura en líneas de producción para mejorar la comercialización del edulcorante a mercados de exportación.

Por último, el sistema tiene muchas oportunidades de mejora como:

- Mejorar el set de iluminación y sensor, de acuerdo a la norma europea D50
- Realizar pruebas con una mayor muestra de sujetos.
- Mejorar la técnica de segmentación utilizando otro espacio de color como el HSV.
- Entre otras.

## Referencias

- Betancur, J., Viera, J., & Mora, J. (2010). Detección de bordes utilizando la matriz de co-ocurrencia: aplicación a la segmentación de imágenes de frutos de café. *Dyna*, 77(164).
- Botero Valencia, S., & Restrepo Martínez, A. (2010). Análisis de textura en panes usando la matriz de coocurrencia. *Revista politécnica*, 74-80.
- Dirección General de Normas. (2016). NMX-F-596-SCFI-2016. Ciudad de México: Secretaría de Economía.
- Galicia-Romero, M., Hernández-Cázares, A., Omaña-Silvestre, J., Velasco-Velasco, J., Debernardi de la Vequia, H., & Hidalgo-Contreras, J. (2017). Ventaja comparativa y competitiva de la producción de panela en la región de Huatusco, Veracruz, México. *Agro productividad*, 29-34.
- Gómez-Merino, F., Trejo-Téllez, L., Salazar-Ortiz, J., Pérez-Sato, J., Senties-Herrera, H., Bello-Bello, J., & Aguilar-Rivera, N. (2017). La diversificación de la industria azucarera como estrategia para México. *Agro productividad*, 7-12.
- International Organization for Standardization. (2009). ISO 3664:2009(E) Graphic technology and photography - Viewing conditions. Switzerland: ISO.
- Palomino, N. L., Contreras, W., & Ruiz, M. E. (2010). Procesamiento digital de textura: Técnicas utilizadas en aplicaciones actuales CBIR. *Revista de investigación de sistemas e informática*, 57-64.
- Presutti, M. (2004). La matriz de co-ocurrencia en la clasificación multispectral: tutorial para la enseñanza de medidas texturales en cursos de grado universitario. 4ª Jornada de Educação em Sensoriamento Remoto no Âmbito do Mercosul.
- Romero Acero, A., Marín Cano, A., & Jiménez Builes, J. A. (2015). Sistema de clasificación por visión artificial de mangos tipo Tommy. *Revista UIS Ingenierías*, 14(1), 21-31.
- SAGARPA. (2014). Caracterización de productores de caña de azúcar de la Huasteca Potosina, dedicados a la producción de piloncillo. San Luis Potosí: Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos.