



MONITOREO DEL TOSTADO DE CAFÉ USANDO LA TRANSFORMADA DE FOURIER 2D DE IMÁGENES

COFFEE ROASTING MONITORING USING 2D FOURIER TRANSFORM

A. Hernandez-Aguirre¹, B.C. Casillas-Rodriguez², Y. Cocotle-Ronzon², H. Puebla¹, E. Hernandez-Martinez^{2*}

¹Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México

²Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana-Región Xalapa, México

Recibido: 9 de Noviembre de 2017; Aceptado: 9 de Julio de 2018

Resumen

En la etapa de tostado del procesamiento de café se definen las propiedades sensoriales típicas. Sin embargo, en la actualidad no se cuenta con sistemas de seguimiento que permitan su estandarización. En este trabajo se propone el análisis de imágenes de la superficie del café como una herramienta de monitoreo indirecto del grado de tostado. El análisis consiste en la adquisición de imágenes a partir de dos tipos de tostadores y su procesamiento con la transformada de Fourier 2D. Los resultados permiten identificar una correlación directa entre el grado de tostado y exponentes de escalamiento resultantes del análisis de imágenes

Palabras clave: tostado de café, análisis de imágenes, transformada de Fourier 2D, monitoreo indirecto.

Abstract

The roasting stage during coffee processing is a critical determinant of coffee sensorial features. However, direct monitoring methods are currently not available, which difficult its standardization. In this work, image analysis of the surface of coffee grains is proposed as an indirect monitoring tool of the coffee roasting. Images of coffee grains were obtained from two types of roasting units and processed using 2D Fourier Transform. The results allowed to the identification of a direct correlation between the degree of roasting coffee with scaling exponents obtained from the image analysis.

Keywords: coffee roasting, image analysis, 2D Fourier transform, indirect monitoring.

1 Introducción

El café es una de las bebidas de mayor consumo a nivel mundial, debido a sus propiedades sensoriales que lo caracterizan, tal como el efecto estimulante en el sistema nervioso central y diversos beneficios en la salud (Higdon y Frei, 2006; Hall y col., 2015; Peña-Maravilla y col., 2017). Actualmente, México se encuentra entre los primeros 10 productores a nivel mundial con una producción de grano verde de alrededor de los 200 millones de kilogramos al año (ICO, 2017). La comercialización del café requiere de diferentes etapas que van desde el cultivo hasta la molienda, entre las cuales el tostado se considera como la etapa más importante, debido a que en ella se obtienen las propiedades sensoriales típicas del café (Sunarharum y col., 2014).

En el tostado, el grano reduce drásticamente el contenido de agua, generando cambios físicos en la superficie del grano como incremento en la rugosidad por fracturas y el incremento del diámetro de los poros, que a su vez está ligado con la pérdida de compuestos aromáticos y el transporte de oxígeno que afectan los cambios de sabor durante el almacenamiento (Holscher y Steinhart 1992, Gutierrez y col., 1993). Así mismo, el aroma se atribuye a la liberación de numerosos compuestos volátiles, producto de reacciones bioquímicas, tales como la reacción de Maillard, la degradación de Strecker, la descomposición de aminoácidos, la degradación de trigonelina, entre otros (Buffo y Cardelli-Freire, 2004).

A pesar de la importancia de esta etapa, en la actualidad el tostado lo realiza el operador del tostador, quien controla el proceso mediante criterios

*Autor para la correspondencia. E-mail: elisehernandez@uv.mx

doi: <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n1/HernandezA>

issn-e: 2395-8472

empíricos basados en los cambios físicos que sufre el grano y los gases formados. Es decir, que la calidad del tostado de café depende de la percepción del operador, lo cual puede conducir a variaciones entre los lotes de tostado (Hall, 1958; Land y Shepherd, 1984; Feria-Morales, 2002). En la literatura, se han realizado diversos estudios sobre monitoreo y control de la torrefacción, buscando estandarizar el grado de tostado. Entre los estudios reportados se encuentra el monitoreo en línea de los componentes formados en las reacciones que ocurren durante el tostado, los cuales pueden correlacionarse directamente con el grado de tostado (Dutra y col., 2001; Rousi y col., 2012). Otras propuestas se basan en la caracterización de la textura del grano a través del análisis de imágenes usando técnicas de microscopía avanzada (Schenker y col., 2000; Frusillo y col., 2012). A pesar de que estas metodologías proveen información para el monitoreo del grado de tostado, son costosas y poco prácticas para aplicaciones industriales.

Considerando el uso de equipo de bajo costo, en recientes años se han reportado diferentes enfoques para la clasificación y evaluación de la textura de alimentos usando el análisis de imágenes (Brosnan y Sun, 2004; Limón-Valenzuela y col., 2017; Mollazade y Arefi, 2017; Xie y col., 2018; Reyes y col., 2018). Quevedo y col., (2002) proponen la descripción de la estructura superficial de alimentos a partir de la dimensión fractal, que puede aplicarse para cuantificar los cambios morfológicos en las imágenes obtenidas durante el procesamiento in situ o el almacenamiento de materiales alimenticios. Samanta y col., (2012) realizan el procesamiento de imágenes para la detección de defectos superficiales y enfermedades en papas. También, Zhang y col., (2014) presentan un análisis sobre el uso de la visión computacional para la evaluación y cuantificación del color y textura de frutas y verduras. Así mismo, Hashim y col., (2018) realizan el análisis de textura de imágenes basado en transformada Wavelet para la predicción de la calidad del plátano.

Entre los métodos de análisis de imágenes, la transformada de Fourier (TF) ha sido ampliamente utilizada para el análisis y caracterización de textura de imágenes (Valous y col., 2009; Barret y col., 1992; Quevedo y col., 2002) proponiendo a la FT como una herramienta poderosa en el análisis de imágenes. Así mismo, proponiéndola para su aplicación en el monitoreo de la calidad de productos alimenticios (Briones y Aguilera, 2005; Quevedo y col., 2008).

Además, la transformada de Fourier ha permitido encontrar correlaciones entre la dimensión fractal de imágenes y variables físicas del proceso, e.g., Rubnov y Saguy (1997) determinaron las dimensiones fractales de imágenes SEM de productos de papa reestructurados, encontrando que la dimensión fractal se correlacionaba con la absorción de aceite durante la fritura. En este mismo sentido, Velazquez-Camilo y col., (2010) proponen el uso de la dimensión fractal de TF obtenida del análisis de imágenes, como índice para el monitoreo de la cristalización de azúcar de caña. Los autores realizaron el análisis de las imágenes recopiladas durante la cristalización y determinaron, por un lado, que los índices fractales son medidas indirectas de la regularidad y homogeneidad de los cristales de azúcar de caña. Por el otro, que la dimensión fractal puede utilizarse como índices de seguimiento para detectar cambios en el proceso de crecimiento de cristales.

Para el tostado de café Gabriel-Guzman y col., (2017) proponen el análisis de rango reescalado (R/S) de imágenes de la superficie del grano de café durante el tostado en un lecho fluidizado, encontrando que la estructura de la imagen está conformada por dos patrones a distintas escalas y que son propios de la estructura del grano de café. Sus resultados muestran que las imágenes de los granos de café presentan cambios estructurales que pueden ser cuantificados mediante índices fractales.

La propuesta de este trabajo es investigar el potencial de la transformada de Fourier como herramienta para describir la evolución del tostado, con el fin de obtener una métrica que permita caracterizar cuantitativamente la textura del grano de café. Para ello, se consideran dos procesos de tostado, tostado en lecho fluidizado y tostado en tambor rotatorio. El análisis multiescala por transformada de Fourier permite identificar dos fenómenos que componen la textura del grano y permite identificar la evolución temporal de los cambios del grano en el tostado, lo cual puede ser usado para el monitoreo del proceso.

Este trabajo está organizado como sigue: En la Sección 2 se describen los arreglos experimentales de las dos unidades de tostado de café. Se describen además, los detalles de la técnica de análisis de imágenes usando la transformada de Fourier 2D. En la Sección 3 se presentan y discuten los resultados de las dos unidades de tostado. Primero se presentan los resultados multiescala y posteriormente la dinámica

del exponente de Hurst. Finalmente, en la Sección ?? se presentan las conclusiones de este trabajo.

2 Materiales y métodos

2.1 Tostado en tambor rotatorio

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un tostador de tambor rotatorio con capacidad máxima de 1 kg. El tambor tiene dimensiones de 0.2 m de diámetro. Cada lote se cargó con 500 g de café de la cosecha 2013-2014. El café utilizado para el tostado en este trabajo proviene de la región de Coatepec y Teocelo, localizada a ocho kilómetros de la ciudad de Xalapa, Ver., México. Se propusieron dos experimentos, el experimento 1 a) consistió en un tostado con duración de 12 min a temperatura controlada hasta alcanzar un grado de tostado deseado. El experimento 2 b) consistió en un tostado con duración de 23 min a temperatura controlada, alcanzando el grado de tostado deseado. Ambos experimentos iniciaron con un precalentamiento del tambor a 100 °C, se cargó el café y se calentó hasta 270°C con un perfil de calentamiento lineal a 55 rpm.

Las muestras de café para el análisis se recolectaron cada 1.5 minutos (20 g por muestra). La captura de las imágenes se realizó en un microscopio ZEISS stemi 305 con zoom 5:1 con cámara Wifi integrada de 1.2 megapíxeles conectada a una PC (DELL Inspiron 15 con procesador intel core i7 inside de 8 GB de memoria RAM). Las imágenes RGB que se obtienen poseen un tamaño de 1920 × 2560 píxeles (24.82 Mbit) con una relación 11.18 μm/píxel.

2.2 Tostado en lecho fluidizado

El proceso de tostado se llevó a cabo en un tostador de lecho fluidizado con capacidad de 10 kg. Cada lote de tostado se cargó con café proveniente de la región de Coatepec-Teocelo de la cosecha 2012-2013 y 2013-2014. El tostado tuvo una duración aproximada de 6 minutos (tiempo en el que se alcanzaba un grado de tostado oscuro), alcanzando una temperatura final de 238 °C. Para este estudio se considera una velocidad mínima de fluidizado constante ($V_{mf} = 3$ m/s). No se consideró la variación de la V_{mf} debido a que no tiene un efecto considerable en el tostado (Sanchez-Ramirez y col., 2003; 2007). Las muestras de café para el análisis se recabaron cada minuto (20 g por muestra) mismas para las cuales se capturaron las imágenes

mediante un microscopio USB digital (zoom óptico de 500x) conectado a una PC (DELL Inspiron 15 con procesador intel core i7 inside de 8 GB de memoria RAM), las imágenes RGB tienen un tamaño de 640 × 480 píxeles (0.564 Mbit) con una relación 2.0961 μm/píxel. Para cada tiempo de muestreo, se obtuvieron 5 imágenes de la superficie del grano, repitiendo el experimento por triplicado.

2.3 Análisis de imágenes

Las imágenes RGB se transforman a escala de grises, generando matrices de luminiscencia $f(m,n)$ de dimensiones $N_f \times N_c$, donde N_f y N_c son el número de filas y columnas, respectivamente. La matriz de luminiscencia tiene valores entre 0 y 255 siendo el primero negro y el segundo blanco. Posteriormente, la matriz de luminiscencia se transforma a escala de blancos y negros. La complejidad de una superficie puede ser cuantificada mediante un exponente de escalamiento como el exponente Hurst. La transformada de Fourier se utiliza para el cálculo del exponente de Hurst de las imágenes mediante la transformada de Fourier discreta con el origen trasladado al centro (Russ, 1994), tal que La complejidad de una superficie puede ser cuantificada mediante un exponente de escalamiento como el exponente Hurst. La transformada de Fourier se utiliza para el cálculo del exponente de Hurst de las imágenes mediante la transformada de Fourier discreta con el origen trasladado al centro (Russ, 1994), tal que

$$\mathcal{F}(u - u_0, v - v_0) = \frac{1}{N_c N_f} \sum_{m=0}^{N_f-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} f(m,n) e^{i(mv/N_c + nu/N_f)} \quad (1)$$

donde u y v son las frecuencias horizontales y verticales, respectivamente. Los puntos $u_0 = m/2$ $v_0 = n/2$ son coordenadas de frecuencia en el origen. Debido a que el espectro es invariante a la traslación en el espacio este se puede calcular de la forma

$$S(u - u_0, v - v_0) = \Re(\mathcal{F}(u - u_0, v - v_0))^2 + \Im(\mathcal{F}(u - u_0, v - v_0))^2 \quad (2)$$

por conveniencia, se toma el logaritmo del espectro de potencia de la forma

$$P(u - u_0, v - v_0) = \log(1 + S(u - u_0, v - v_0)) \quad (3)$$

el espectro promedio satisface la siguiente ley de potencias

$$P(f) \propto f^{2-\beta} \quad (4)$$

donde $\beta = 2H + 2$ y H es el exponente de Hurst (Mandelbrot, 1983; Quevedo y col., 2002). La dirección a la cual se realiza el promedio del espectro tiene un efecto considerable en el cálculo del exponente. Por esto, se propone realizar un promedio anular, considerando la analogía de cambio de coordenada rectangular a polar (Quevedo y col., 2002; Sidick, 2009). El espectro de potencia promedio se calcula como sigue: sea $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ la dirección radial y $r_{\max} = \min(N_f, N_c)/2$ el radio máximo, tal que, es posible realizar un promedio en la región anular establecida por el radio r , como se muestra en la Fig. 1a. La distancia r se divide en N_r puntos en los cuales se realiza el promedio anular. El promedio se realiza contabilizando la masa del espectro en la región anular, de cada uno de los N_r puntos de r , dividida entre la frecuencia con la que se satisface la condición

$$\log(r) \leq \log(r_{\max}) \quad (5)$$

El exponente de Hurst se puede calcular a partir del gráfico log-log $P(f)$ vs f donde la pendiente es igual a $-2H$.

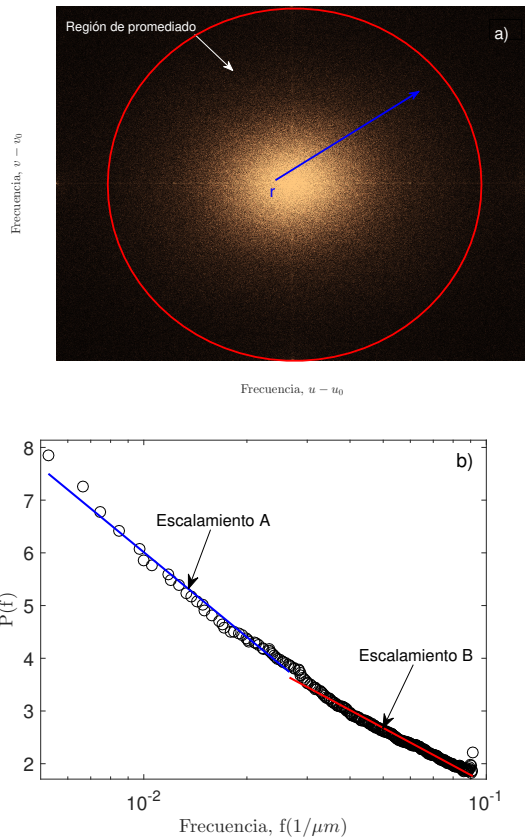


Fig. 1. Espectros de potencia a) Espectro de potencia $P(u - u_0, v - v_0)$ con la región de promediado denotada

por la circunferencia, b) Espectro promedio $P(f)$ vs frecuencia $f(\mu m^{-1})$.

Cabe mencionar que la dimensión fractal se relaciona con el exponente de Hurst como $D_f = 3 - H$ (Chan, 1995). La dimensión fractal (D_f) permite clasificar la textura de una imagen en función de su rugosidad, permitiendo describir patrones complejos de rugosidad (Mandelbrot, 1982; Quevedo y col., 2002). Si $D_f \rightarrow 3$ más rugosa la superficie, mientras que, si $D_f \rightarrow 2$ la superficie es lisa (Thanatuksorn y col., 2005; Quevedo y col., 2002). De esta manera, el exponente de Hurst permite describir, a partir de su relación con la D_f , la textura y complejidad de la superficie de los granos de café. El exponente de Hurst que se obtuvo para cada grupo de muestras de cada experimento se normaliza de la forma $HN = \frac{H(t) - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}}$. Note que valores pequeños del exponente de Hurst dan lugar a D_f grandes.

Las propiedades fractales son constantes a determinada escala de transformación, i.e., el escalamiento del fractal puede ser función de la escala (Mandelbrot, 1982). Entonces, para definir el escalamiento del fractal es necesario identificar los cambios en el exponente de Hurst en la escala. Para ello, basta con identificar la escala en la cual existe el cambio de pendiente y calcular, por medio de una regresión lineal, la pendiente del espectro de potencia que está asociado a las regiones de escalamiento (Fig. 1b).

3 Resultados y discusión

3.1 Análisis multiescala del espectro de potencia

En la Fig. 2 se presenta una secuencia de imágenes de la superficie del grano de café (tambor rotatorio), que se obtienen durante el tostado. La superficie de los granos de café muestran un aumento en la rugosidad con el tiempo de tostado. Dicha rugosidad presenta patrones complejos que sugieren que la estructura de la superficie es fractal. En la Fig. 3 se muestra el espectro de potencia frente a la frecuencia $f(\mu m^{-1})$ para dos tipos de tostado, lecho fluidizado y tambor rotatorio. Cada función del espectro no puede ser descrito con una única ley de potencia, de hecho se pueden observar dos leyes de potencia. Estas leyes

de potencia determinan el escalamiento del fractal que compone a la superficie del grano de café y se denominan Región A y Región B.

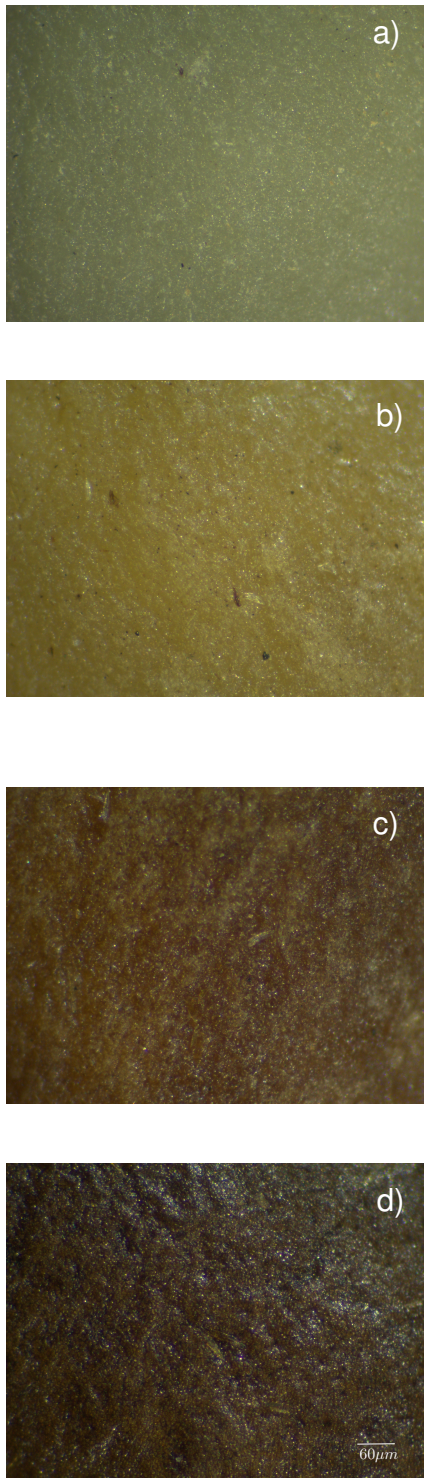


Fig. 2. Imágenes de los granos de café durante el

tostado por tambor rotatorio, a) grano verde, b) 4.5 min, c) 9 min y d) 12 min.

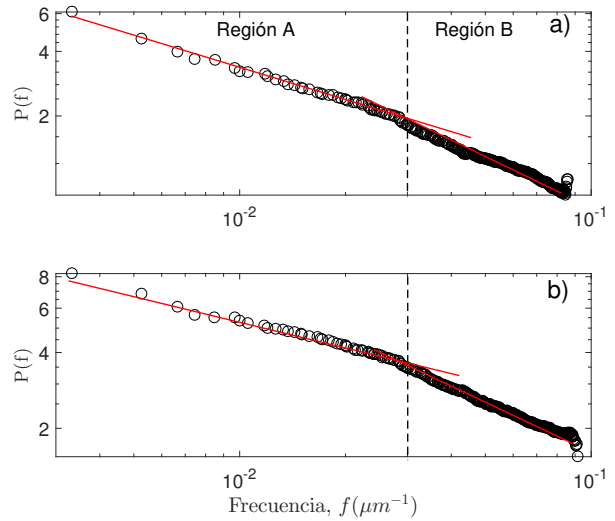


Fig. 3: Espectro de potencia para a) tostado en lecho fluidizado y b) tambor rotatorio.

Dichas regiones de escalamiento toman lugar a bajas y altas frecuencias, respectivamente. Esto sugiere que la estructura del grano de café está compuesta por dos escalas características, las cuales se pueden relacionar a la formación de poros y fracturas de dos tamaños diferentes, que en conjunto forman la estructura del grano de café (Wilson, 1987; Pittia y col., 2011).

En la Fig. 2 se presenta una secuencia de imágenes de la superficie del grano de café (tambor rotatorio), que se obtienen durante el tostado. La superficie de los granos de café muestran un aumento en la rugosidad con el tiempo de tostado. Dicha rugosidad presenta patrones complejos que sugieren que la estructura de la superficie es fractal. En la Fig. 3 se muestra el espectro de potencia frente a la frecuencia $f(\mu\text{m}^{-1})$ para dos tipos de tostado, lecho fluidizado y tambor rotatorio. Cada función del espectro no puede ser descrito con una única ley de potencia, de hecho se pueden observar dos leyes de potencia. Estas leyes de potencia determinan el escalamiento del fractal que compone a la superficie del grano de café y se denominan Región A y Región B. Dichas regiones de escalamiento toman lugar a bajas y altas frecuencias, respectivamente. Esto sugiere que la estructura del grano de café está compuesta por dos escalas características, las cuales se pueden relacionar

a la formación de poros y fracturas de dos tamaños diferentes, que en conjunto forman la estructura del grano de café (Wilson, 1987; Pittia y col., 2011).

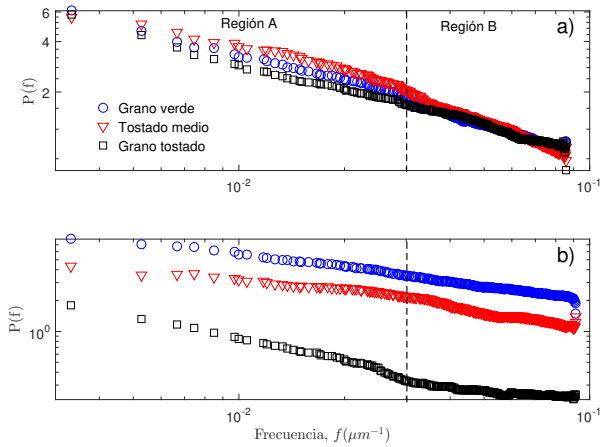


Fig. 4. Espectros de potencia durante el tostado a tres estados característicos, 1) grano verde, 2) grano tostado medio y 3) grano tostado en a) tostador de lecho fluidizado y b) tambor rotatorio.

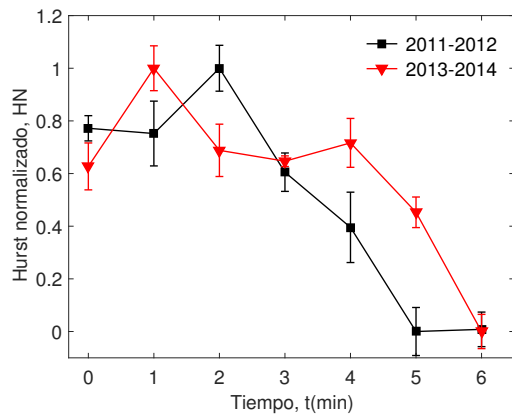


Fig. 5. Dinámica del exponente de Hurst global en el tostado por lecho fluidizado considerando las cosechas: 2011-2012 y 2013-2014.

En la Fig. 4 se muestra el espectro de potencia $P(f)$ para tres etapas de tostado, grano verde, etapa intermedia del tostado y grano tostado. Se puede observar que las regiones de escalamiento que surgen a bajas y altas frecuencias se conservan durante el tostado, sin importar el tostador. Esto sugiere que los fenómenos que toman lugar a estas frecuencias son propias del grano de café. También, se puede notar que para el tostador por lecho fluidizado (Fig. 4a) el $P(f)$ no muestra cambios significativos en la región B.

En contraste a lo obtenido con el tostador de tambor rotatorio (Fig. 4b) que muestra cambios considerables en esta región. Desde el punto de vista físico este comportamiento podría estar asociado al crecimiento y formación de poros en los granos de café debido al efecto del tiempo de duración y tipo de tostado. Se ha reportado que la duración del tostado y la temperatura tienen efectos importantes sobre la estructura porosa del grano de café (Wang, 2014). Tiempos prolongados y altas temperaturas favorecen al incremento del tamaño de poro así como la formación de poros de mayor tamaño debido a la fusión de 2 o más microporos (Pittia y col., 2011), lo que corresponde con la dinámica de la región B en el tostado por tambor rotatorio.

3.2 Análisis del exponente de Hurst

3.2.1 Lecho fluidizado

Considerando muestreos de cada minuto, con una secuencia de muestreo de cuatro imágenes por muestra, durante 5 min de tostado. En la Fig. 5 se muestra el exponente de Hurst promedio con sus desviaciones, normalizado en el tiempo (HN) para dos temporadas de cosecha, 2011-2012 y 2013-2014. El exponente de Hurst normalizado muestra una tendencia de incremento al inicio del tostado (alcanzando un máximo en: a) cosecha 2011-2012 en 2 min y b) cosecha 2013-2014 en 1 min), seguido de un decremento hasta un valor mínimo cuando se alcanza el grado de tostado deseado. Este comportamiento es similar al reportado por Gabriel-Guzman y col. (2017), donde se reporta que el incremento en la textura de la superficie del grano forma patrones de mayor complejidad con el transcurso del tiempo. Se infiere que el incremento en la complejidad de la textura del grano (descrita por el exponente de Hurst) está influenciada por los procesos de deshumidificación y reacción que toman lugar en el transcurso del tostado, contribuyendo a la formación de microfracturas y el incremento del número y tamaño de poro (Schenker y col., 2000). Ambas cosechas siguen una tendencia similar, lo que sugiere que el análisis de imágenes mediante transformada de Fourier podría ser una opción para el seguimiento al tostado de café en el lecho fluidizado.

3.2.2 Tambor rotatorio

El tostado en el tambor rotatorio consistió en 2 experimentos llevados a cabo en 2 tiempos distintos de tostado. En cada experimento se tomaron 2

imágenes por cada intervalo de tiempo de muestreo (1.5 min). En la Fig. 6 se muestra el exponente de Hurst normalizado para los experimentos 1 y 2.

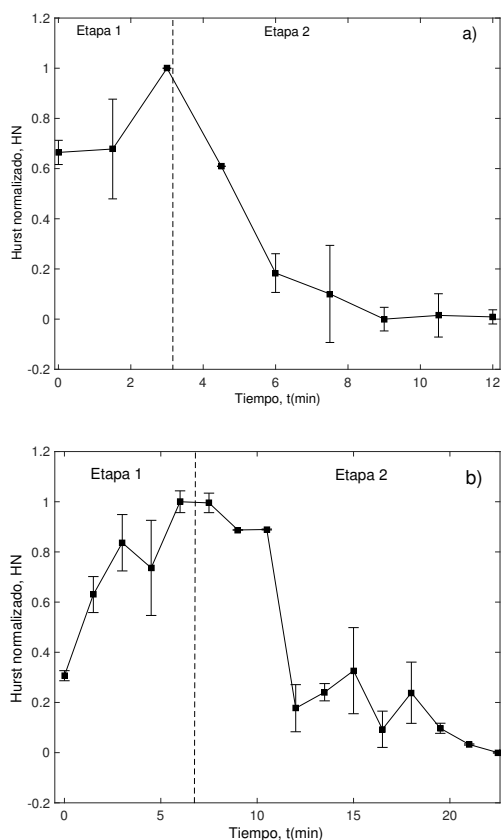


Fig. 6. Dinámica del exponente de Hurst en el tostado por tambor rotatorio, a) Experimento 1, b) Experimento 2

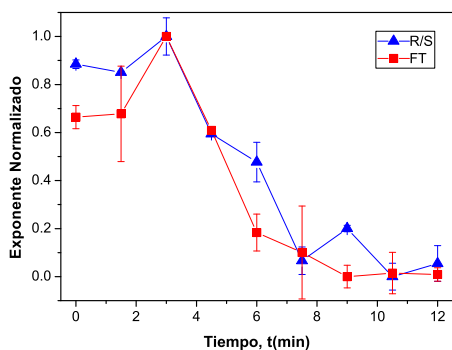


Fig. 7. Comparación del exponente de Hurst del experimento 1, calculado con el análisis de Fourier y R/S.

Ambos experimentos muestran al inicio una

tendencia de incremento del exponente de Hurst, alcanzando un punto máximo. Posteriormente, se observa un decremento del exponente de Hurst con el transcurso del tostado, hasta alcanzar un estado estacionario aparente. Esto sugiere que durante el tostado de café ocurren dos fenómenos que modifican la estructura del grano de café. Estos fenómenos se muestran en la Fig. 6 separadas por una línea punteada. Dichos fenómenos pueden estar asociados a los procesos de secado y de reacción. Se ha reportado que el secado de los granos de café se lleva a cabo durante los primeros minutos del tostado. La humedad se retira de los intersticios del grano provocando un reacomodo de los poros. La etapa de reacción es la responsable de los cambios de coloración y aroma (Fadai y col., 2017). Así mismo, los mayores cambios en la estructura del grano son atribuidos a la etapa de reacción (Pittia y col., 2001; Schenker y col., 2000). Cabe mencionar que este comportamiento se observa en ambos procesos de tostado. La etapa 1 muestra una tendencia de incremento del exponente de Hurst que indica la homogeneización de la estructura del grano. Mientras que la etapa 2 muestra una tendencia de decremento del exponente de Hurst indicando heterogeneidad de la estructura del grano al final del tostado.

Finalmente, la Fig. 7 muestra la comparación del exponente de Hurst calculado mediante el análisis de rango rescalado (R/S) (Alvarez-Ramirez et al., 2008), donde se observa que ambas metodologías se corresponden, solo mostrando ligeras diferencias. Ambas metodologías muestran una tendencia similar con el transcurso del tiempo. Cabe destacar que el tiempo de cómputo de procesamiento de la imagen usando el análisis de Fourier se reduce hasta el 72% (6.6 seg/imagen) comparado con el análisis R/S (23.77 seg/imagen), por lo que es factible considerar el análisis de imágenes para el seguimiento del tostado de café en tiempo real.

Conclusiones

En este trabajo, se propone la aplicación de la transformada de Fourier para la caracterización de las imágenes de granos de café obtenidas durante el proceso de tostado. Se consideran dos procesos de tostado con granos de café de cosechas 2013-2014 y 2014-2015, encontrando que la superficie de los granos de café exhiben propiedades fractales. El

exponente de Hurst exhibe cambios en el proceso de tostado que refleja el incremento en la complejidad de la superficie del grano de café, lo cual podría estar relacionado con la formación de fracturas y el aumento del volumen de poro. Dado que los métodos actuales para monitorear el grano de café tostado son costosos y/o poco prácticos de implementar, el análisis de imágenes mediante la transformada de Fourier podría usarse como una alternativa, económica y fácil de implementar, para el monitoreo del tostado del café.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por proyecto PRODEP 40905 DSA/103.5/15/7127/PTC-790 "Caracterización del grado de tostado de café mediante análisis de series de tiempo e imágenes".

Referencias

- Alvarez-Ramirez, J., Rodriguez, E., y Ibarra-Valdez, C. (2018). Long-range correlations and asymmetry in the Bitcoin market. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 492, 948-955.
- Barrett, A.M., Normand, M.D., Peleg, M., y Ross, E., 1992. Characterization of the jagged stress-strain relationships of puffed extrudates using the fast Fourier transform and fractal analysis. *Journal of Food Science* 57, 227-235.
- Briones, V. y Aguilera, J. M. (2005). Image analysis of changes in surface color of chocolate. *Food Research International* 38, 87-94.
- Brosnan, T., y Sun, D. W. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision - A review. *Journal of Food Engineering* 61, 3-16.
- Buffo, R. A., y Cardelli-Freire, C. (2004). Coffee flavour: An overview. *Flavour and Fragrance Journal* 19, 99-104.
- Caelli, T. y Julesz, B. (1978). On perceptual analysis underlying visual texture discrimination: Part I. *Biological Cybernetics* 28, 167-176.
- Calderon De Anda, J., Wang, X. Z., Lai, X. y Roberts, K. J. (2005). Classifying organic crystals via in-process image analysis and the use of monitoring charts to follow polymorphic and morphological changes. *Journal of Process Control* 15, 785-797.
- Chan, K. L. (1995). Quantitative characterization of electron micro- graph images using fractal features. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 42, 1033-1037.
- Dutra, E.R, Oliveira, L.S., Franca, A.S, Ferraz, V.P, Afonso, R.J.C.F. (2001). A preliminary study on the feasibility of using the composition of coffee roasting exhaust gas for the determination of the degree of roast. *Journal of Food Engineering* 47, 241-6 .
- Eggers, R., y Pietsch, A. (2001). Technology I: Roasting. In R. Clarke, & O. Vitzthum(Eds.), *Coffee Recent Developments* (pp. 90-107). Oxford: Blackwell Science.
- Esquivel, P., y Jiménez, V. M. (2012). Functional properties of coffee and coffee by- products. *Food Research International* 46, 488-495.
- Fadai, N. T., Melrose, J., Please, C. P., Schulman, A., y Van Gorder, R. A. (2017). A heat and mass transfer study of coffee bean roasting. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 104, 787-799.
- Feria-Morales, A. M. (2002). Examining the case of green coffee to illustrate the limitations of grading systems/expert tasters in sensory evaluation for quality control. *Food Quality and Preference* 13, 355-367.
- Frisullo, P., Laverse, J., Barnabà, M., Navarini, L., Del Nobile, M.A. (2012). Coffee beans microstructural changes induced by cultivation processing: an X-ray microtomographic investigation. *Journal of Food Engineering* 109,175-81.
- Gabriel-Guzman, M., Rivera, V. M., Cocotle-Ronzón, Y., García-Díaz, S., y Hernandez-Martinez, E. (2017). Fractality in coffee bean surface for roasting process. *Chaos, Solitons & Fractals* 99, 79-84.
- Gowen, A. A., O Donnell, C. P., Cullen, P. J., y Bell, S. E. J. (2008). Recent applications of Chemical Imaging to pharmaceutical process monitoring and quality control. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 69, 10-22.

- Gutierrez, C., Ortolà, M.D., Chiralt, A., Fito, P. (1993). Análisis por métodos de la porosidad del café tostado. *Proceedings of the 15th ASIC Colloquium*, ASIC, Paris. pp. 661-671. Herman
- Hall, R. L. (1958). Flavour study approaches at McCormick & Company, Inc. In A. D. Little (Ed.), *Flavour research and food acceptance* (pp. 224-249). New York: Reinhold.
- Hall, S., Desbrow, B., Anoopkumar-Dukie, S., Davey, A. K., Arora, D., McDermott, C., Grant, G. D. (2015). A review of the bioactivity of coffee, caffeine and key coffee constituents on inflammatory responses linked to depression. *Food Research International* 76, 626-636.
- Haralick, R. M., Shanmugam, K., y Dinstein, I. (1973). Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(6), 610-621.
- Hashim, N., Adebayo, S. E., Abdan, K., y Hanafi, M. (2018). Comparative study of transform-based image texture analysis for the evaluation of banana quality using an optical backscattering system. *Postharvest Biology and Technology* 135, 38-50.
- Higdon, J. V., y Frei, B. (2006). Coffee and health: A review of recent human research. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 46, 101-123.
- Hosseinpour, S., Rafiee, S., Aghbashlo, M. y Mohtasebi, S. S. (2014). A novel image processing approach for in-line monitoring of visual texture during shrimp drying. *Journal of Food Engineering*, 143, 154-166.
- Holscher, W., y Steinhart, H. (1992). Investigation of roasted coffee freshness with an improved headspace technique. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und-Forschung* 195, 33-38.
- ICO (2017). International Coffee Organization. Disponible en: <http://www.ico.org/>. Consultado: 09 noviembre 2017.
- Julesz, B. (1975). Experiments in the visual perception of texture. *Scientific American* 232, 34-43.
- Keller, J. M., Chen, S., y Crownover, R. M. (1989). Texture description and segmentation through fractal geometry. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 45, 150-166.
- Land, D. G., y Shepherd, R. (1984). Scaling and ranking methods. *Sensory Analysis of Foods*, 141-177.
- Limón-Valenzuela, V., Aguilar-palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. de J., y Martínez-Bustos, F. (2017). Propiedades microestructurales y de formación de pasta de pellets extruídos elaborados a partir de almidón de maíz enriquecidos con MCP y concentrado proteínico de leche. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 16, 193-205.
- Lindgren, F., Geladi, P., y Wold, S. (1994). Kernel-based PLS regression; Cross-validation and applications to spectral data. *Journal of Chemometrics* 8, 377-389.
- Mandelbrot, B. B. (1982.) *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, San Francisco, CA .
- Mollazade, K. y Arefi, A. (2017). Optical analysis using monochromatic imaging-based spatially-resolved technique capable of detecting mealiness in apple fruit. *Scientia Horticulturae* 225, 589-598.
- Purks, S.R. y Richards, W. (1977). Visual texture discrimination using random dot patterns. *Journal Optical Society of America* 67, 765-171.
- Peña-Maravilla, M., Calixto-Romo, M.A., Guillén-Navarro, K., Sánchez, J.E, Amaya-Delgado, L. (2014). Cellulases and xylanases production by *penicillium citrium* CGETCR using coffee pulp in solid state fermentation. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 16, 757-769.
- Pittia, P., Sacchetti, G., Mancini, L., Voltolini, M., Sodini, N., Tromba, G., y Zanini, F. (2011). Evaluation of microstructural properties of coffee beans by synchrotron x-ray microtomography: A methodological approach. *Journal of Food Science* 76, E222-E231.
- Quevedo, R., Carlos, L.G., Aguilera, J.M., Cadoche, L. (2002). Description of food surfaces and micro structural changes using fractal image texture analysis. *Journal of Food Engineering* 53, 361-371.

- Quevedo, R., Mendoza, F., Aguilera, J.M., Chanona, J., Gutierrez-Lopez, G. (2008). Determination of senescent spotting in banana (*Musa cavendish*) using fractal texture Fourier image. *Journal of Food Engineering* 84, 509-515.
- Rahimi, J., y Ngadi, M. O. (2016). Structure and irregularities of surface of fried batters studied by fractal dimension and lacunarity analysis. *Food Structure* 9, 13-21.
- Reyes, I., Hernandez-Jaimes, C., Meraz, M. y Rodríguez-Huezo, M. E. (2018). Physicochemical changes of corn starch during lactic acid fermentation with *Lactobacillus bulgaricus*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 17, 279-289.
- Ruosi, M.R., Cordero, C., Cagliero, C., Rubiolo, P., Bicchi, C., Sgorbini, B. (2012). A further tool to monitor the coffee roasting process: aroma composition and chemical indices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60, 83-91.
- Rubnov, M. y Saguy, I.S., (1997). Fractal analysis and crust water diffusivity of a restructured potato product during deep fat frying. *Journal of Food Science* 62, 135-137.
- Russ, J. C. (1994). *Fractal Surfaces*. Plenum Press, New York.
- Samanta, D., Paramita, P.C. y Ghosh, A. (2012). Scab diseases detection of potato using image processing. *International Journal of Computer Trends and Technology* 3, 109-113.
- Sanchez Ramirez, J., Anaya Soza, I., Vizcarra Mendoza, M. G., Gutierrez Lopez, G., y Santiago Pineda. (2003). Propiedades físicas e hidrodinámica de la fluidización del café verde y tostado (*Coffea arabica* L. var. *typica*). *Naturaleza y Desarrollo* 1, 41-49.
- Sanchez-Ramirez, J., Anaya-Sosa, I., Vizcarra-Mendoza, M. G., Gutiérrez-López, G., y Santiago-Pineda, T. (2007). Estudio de la hidrodinámica del café tostado (*Coffea arabica* L.) en lecho fluidizado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 6, 185-192.
- Schenker, S., Handschin, S., Frey, B., Perren, R., Escher, F. (2000). Pore structure of coffee beans affected by roasting conditions. *Journal of Food Science* 65,452-7.
- Sidick, E. (2009). Power spectral density specification and analysis of large optical surfaces. *SPIE Europe Optical Metrology* 7390, 73900L-73900L-12.
- Sunarharum, W. B., Williams, D.J., Smyth, H. E. (2014). Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. *Food Research International* 62, 315-325.
- Thanatukorn, P., Pradistsuwana, C., Jantawat, P., y Suzuki, T. (2005). Effect of surface roughness on post-frying oil absorption in wheat flour and water food model. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85, 2574-2580.
- Valous, N.A., Mendoza, F., Sun, D.-W., Allen, P. (2009). Texture appearance characterization of pre-sliced pork ham images using fractal metrics: Fourier analysis dimension and lacunarity. *Food Research International* 42, 353-362.
- Velazquez-Camilo, O., Bolaños-Reynoso, E., Rodriguez, E., y Alvarez-Ramirez, J. (2010). Characterization of cane sugar crystallization using image fractal analysis. *Journal of Food Engineering* 100, 77-84.
- Voss R.F. (1991) Random Fractals: characterization and measurement. In: Pynn R., Skjeltorp A. (Eds.) *Scaling Phenomena in Disordered Systems*. Springer, Boston, MA.
- Wang, X. (2014). Understanding the Formation of CO₂ and Its Degassing Behaviours in Coffee, Tesis PhD. University of Guelph, Ontario, Canada.
- Wilson A.J. 1997. Preliminary investigations of oil biosynthesis in the coffee cherry. *Proceedings of the 17th ASIC Colloquium, ASIC, Paris*. pp 92-9.
- Xie, C., Chu, B., y He, Y. (2018). Prediction of banana color and firmness using a novel wavelengths selection method of hyperspectral imaging. *Food Chemistry* 245, 132-140.
- Zhang, B., Huang, W., Li, J., Zhao, C., Fan, S., Wu, J., y Liu, C. (2014). Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review. *Food Research International* 62, 326-343.