

Espectroscopía de terahercios en el dominio del tiempo para la clasificación de queso madurado

Terahertz time-domain spectroscopy for the classification of mature cheese

Jimmy Oblitas-Cruz, M.Sc.¹, Alberto Claudio Miano, Ph.D.¹ and Gilmer Terrones, Ing.¹

¹Universidad Privada del Norte, Perú, jimy.oblitas@upn.edu.pe, alberto.miano@upn.edu.pe, gilmerterrones2000@gmail.com

Abstract– Terahertz time-domain spectroscopy is a useful technique to determine some physical characteristics of materials, which is based on the selective frequency absorption of a broad-spectrum electromagnetic pulse. In order to investigate the potential of this technology to classify maturity states of Gruyere-type cheese, terahertz spectra (0.5-10 THz) of 4 samples of cheese made in the livestock area of Cajamarca - Peru were examined during 60 days. The acquired data matrices were analyzed with the application of MATLAB 2019b where absorbance curves were obtained and maturity states were classified by testing 24 classifier models, achieving differences of around 90%, obtained by the Gaussian SVM Algorithm Model with a 0.35 Kernel Scale and a multiclass method one vs one. It was concluded that the combined processing and classification of images obtained from Terahertz time-domain spectroscopy and the use of machine learning algorithms can be used to classify the different maturity states of cheeses.

Keywords– Terahertz Spectroscopy, Principal Component Analysis, Gruyere Cheese, Cheese Ripening.

Resumen–La espectrometría THz en el dominio del tiempo es una técnica útil para determinar algunas características físicas de los materiales, la cual está basada en la absorción selectiva de frecuencias de un pulso electromagnético de amplio espectro. Con el fin de investigar el potencial de esta tecnología para clasificar los estados de madurez de queso tipo Gruyere, se examinaron los espectros de terahercios (0.5-10 THz) de 4 muestras de queso elaborados en la Zona ganadera de Cajamarca – Perú, durante 60 días. Las matrices de datos adquiridas se analizaron con la aplicación de MATLAB 2019b donde se obtuvo las curvas de absorbancia y se clasificó los estados de madurez probando 24 modelos de clasificadores, logrando diferenciaciones de alrededor de 90% obtenida por el modelo de algoritmo de SVM de gauss con una escala de kernel de 0.35 y un método multiclase uno contra uno. Se concluyó que el procesamiento combinado y la clasificación de imágenes obtenidas de la espectroscopia en el dominio del tiempo de Terahercios y el uso de algoritmos de aprendizaje automático se pueden utilizar para clasificar los diferentes estados de madurez de los quesos.

Keywords– Espectroscopia de terahercios, Análisis de componentes principales, queso tipo Gruyere, maduración de queso.

I. INTRODUCCIÓN

En el control de calidad, predecir la calidad del producto lo antes posible en el proceso de producción es de gran interés en

las industrias. Por ejemplo, los productos como el queso, que con un largo período de maduración antes de que el producto esté listo para la venta, es especialmente interesante poder predecir la calidad del producto en una etapa temprana [1].

Los quesos que se destinan a un proceso de maduración prolongada son normalmente los de mayor importancia económica para una empresa, pero la maduración del queso es un proceso costoso y no totalmente controlable o predecible[2], el sabor y la textura característicos de diferentes quesos de larga maduración se asocian con los productos finales de la lipólisis y proteólisis en el queso madurado[3]. Autores como Subramanian [4], revisaron la compleja tarea de analizar el queso para determinar la composición y el seguimiento de la maduración mediante enfoques químicos e instrumentales, mostrando que la espectroscopia podría ser una interesante alternativa a esta actividad al ser un análisis no destructivo en comparación con los métodos químicos

Las mediciones espectroscópicas y las imágenes tienen un gran potencial en la predicción rápida de la madurez del queso, reemplazando las técnicas de evaluación subjetiva existentes [5], algunos estudios referente a queso usan una espectroscopia del infrarrojo cercano [6] o imágenes hiperespectrales [7] mostrando que son técnicas que pueden generar un nivel de predicción adecuado, ya que los datos espectrales se pueden correlacionar con posibles cambios de composición del queso [8].

Otra técnica espectroscópica muy poco estudiada es la que se da en el rango de los terahercios [9], más conocida como espectroscopia THz o espectroscopia en el dominio del tiempo, ha demostrado que en combinación con técnicas quimiométricas es aplicable para la inspección de la calidad de los alimentos [10].

La obtención de imágenes y espectroscopia de terahercios (THz) es una técnica bien conocida para la detección e identificación de objetos metálicos ocultos y sustancias químicas debido a las propiedades únicas de las ondas de THz que penetran a través de la mayoría de los materiales opacos a la luz visible [11], por ello se viene probando su utilidad en diversos productos de origen biológico como son trigo[12], aceites [13], mieles [14] entre otros.

En comparación con otras partes del espectro electromagnético, la onda THz tiene una penetrabilidad mayor que la infrarroja en sustancias no polares como el caucho y los

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.59>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

plásticos, mejor resolución espacial que las microondas, y es más segura y más benigna que los rayos X [15].

A una frecuencia de THz específica, con el coeficiente de absorción y el índice de refracción se pueden determinar propiedades de muestras alimentarias [16]. Además, los parámetros físicos, como las constantes dieléctricas y los índices de refracción, pueden también determinarse directamente mediante la información de amplitud y fase dependiente de la frecuencia, utilizando espectroscopía THz. Por tales motivos se decidió usar indicadores del espectro THz en el proceso de maduración del queso, teniendo como objetivo principal determinar si se puede diferenciar Cambios en el tiempo de maduración del queso.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Muestras de queso

Las muestras fueron de queso tipo Gruyere, elaborados con leche de vaca no homogeneizada en el centro de producción de Chugur, empresa ubicada en Cajamarca, Perú.

El proceso de elaboración comienza con la observación de parámetros de leche (15 a 17 °D, con una grasa mínima de 4.20% y un pH de 6.5 a 6.6), luego pasa a un proceso de descremado, estandarización, pasteurización (75°C por 15 segundos). Posteriormente, se acondiciona con cloruro de calcio, lisozima y los cultivos específicos para este tipo de queso para finalmente agregar el cuajo. El proceso de lavado se realiza a 40°C, se prensa en dos tiempos a 30 psi y 60 psi respectivamente y se sumerge en salmuera por 90 h antes de pasar al proceso de maduración.

B. Espectroscopía de radiación THz

Se obtuvieron medidas en el dominio del tiempo de terahercios utilizando un espectrómetro Terapulse 4000 (Teraview Ltd., Cambridge, Reino Unido) tomando imágenes en el módulo de reflexión. Los esquemas de funcionamiento se muestran en la Figura 1. Para su funcionamiento se purgó con gas nitrógeno seco durante toda la medición y se redujo el ruido con un promedio de 10 mediciones. Cada forma de onda en el dominio del tiempo cubría un rango de 150 ps con una resolución de 0.1 ps.

Se tuvo en cuenta al vapor de agua, ya que esta tiene fuertes características de absorción en el rango THz, que puede interferir con las mediciones. Para minimizar esta absorción, la trayectoria del haz de THz estuvo encerrada y se purgó con nitrógeno.

Para lograr este espectro en Terahertz se emite un pulso en femtosegundos la cual después de ser emitida se divide con un divisor de haz (DH). Uno de estos pulsos va dirigido a la muestra y el otro pasa por un retardador variable y luego va al detector, esto permite analizar la transmisión de la energía que pasa por la muestra, coeficiente de absorción y el índice de refracción.

La recepción del pulso en Terahertz es calculado y almacenado como una matriz bidimensional donde en una columna se almacena el tiempo y en la otra columna se almacena las frecuencias lo que nos permitirá hacer su representación gráfica para luego pasarlo al dominio de la frecuencia haciéndole una transformada de Fourier.

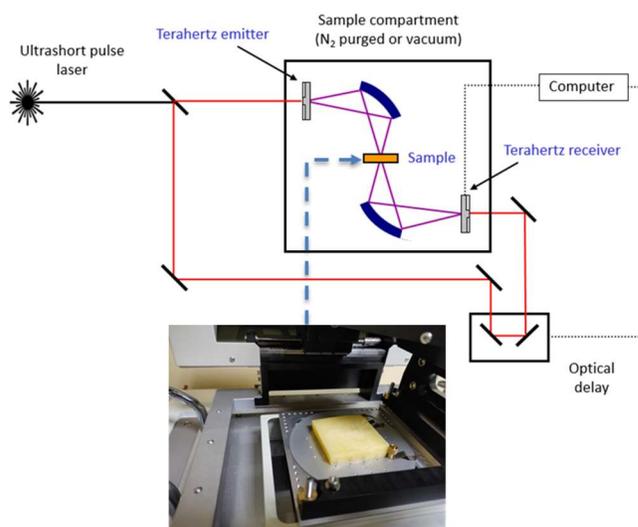


Fig. 1. Esquema de la operación de espectroscopía pulsada de terahercios

La adquisición de datos se realizó en formato TPRJ y las imágenes se analizaron utilizando códigos desarrollados internamente en Matlab v.2019b (Mathworks, Massachusetts, EE. UU.) [17]

C. Análisis del Espectro THz

La banda de los Terahercios o “THz Gap”, trabaja con frecuencias que son más difíciles de tratar no como las que le anteceden o las que le preceden, debido a que se localiza entre los micro ondas y la luz infrarroja. El espectro de los Terahertz se encuentra en el rango de frecuencia desde 300GHz a 10THz con una longitud de onda de 30µm a 1000µm, 10cm⁻¹ a 300cm⁻¹ y una energía de 6,6x10²²J ó 1.4meV a 1 THz. Esto hace que sea una energía no ionizante ya que para ionizar un átomo es 1000 veces más lo requerido [18].

Los parámetros ópticos de THz (índice de refracción y coeficiente de absorción) de una muestra se pueden extraer utilizando el modelo matemático propuesto por Dorney [19], asimismo para obtener la amplitud y la fase de onda que se encuentra en el dominio del tiempo se realiza una transformada de Fourier para pasarlo al dominio de la frecuencia de acuerdo a la ecuación (1)

$$E(t) \rightarrow FFT \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} E(t)e^{-i\omega t} dt = E(\omega) \quad (1)$$

Después de la transformación de Fourier, la señal espectral en el dominio del tiempo obtenida del experimento se utilizó para obtener la función espectral en el dominio de la frecuencia, es decir $E(\omega)$. $E_{ref}(\omega)$ y $E_s(\omega)$ son las señales en el dominio de la frecuencia de la referencia y la muestra, respectivamente, y $H(\omega)$ es la función de transmisión, que viene dada por la Ec (2). En las Ecs. (2), (3), $n_s(\omega)$ es el índice de refracción, $K_s(\omega)$ es el coeficiente de extinción, ω es la frecuencia, c es la velocidad de la luz, l es el espesor de la muestra y n_0 es el índice de refracción del nitrógeno. Las fórmulas de cálculo para el índice de refracción y el coeficiente de absorción de la muestra se muestran en las Ecs. (4), (5), respectivamente:

$$H(\omega) = \frac{E_s(\omega)}{E_{ref}(\omega)} = \frac{4n_0n_s(\omega)}{[n_s(\omega)+n_0]^2} \cdot \exp \left\{ -j[n_s(\omega) - n_0] \frac{l\omega}{c} \right\} \cdot \exp \left[-\frac{l\omega k_s(\omega)}{c} \right] \quad (2)$$

$$k_s(\omega) = \frac{c}{\omega l} \left\{ \ln \left[\frac{4n_0n_s(\omega)}{|H(\omega)|[n_s(\omega)+n_0]^2} \right] \right\} \quad (3)$$

$$n_s(\omega) = n_0 - \frac{\omega l}{c} \angle H(\omega) \quad (4)$$

$$\alpha_s(\omega) = \frac{2\omega k_s(\omega)}{c} = \frac{2}{l} \left\{ \ln \left[\frac{4n_0n_s(\omega)}{|H(\omega)|[n_s(\omega)+n_0]^2} \right] \right\} \quad (5)$$

Todos los materiales tienen una constante dieléctrica única, que también se denomina permitividad eléctrica (compleja). La parte real e imaginaria de la constante dieléctrica $\tilde{\epsilon}$. están representados por $\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2$, donde ϵ_1 y ϵ_2 se denominan comúnmente constante dieléctrica y factor de pérdida, respectivamente. La parte real de la constante dieléctrica (ϵ_1) describe la capacidad del material para almacenar energía cuando se expone a un campo eléctrico externo. La parte imaginaria (ϵ_2) influye tanto en la absorción de energía como en la atenuación de un campo eléctrico externo y describe la capacidad de disipar energía.

Además, la energía térmica en el material alimenticio se puede convertir en proporción a la parte imaginaria de la función dieléctrica.

La compleja función dieléctrica $\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ es igual al cuadrado del índice de refracción \tilde{n}^2 . Por lo tanto, si se conoce el índice de refracción complejo, las partes reales e imaginarias dependientes de la frecuencia de la función dieléctrica compleja se pueden extraer de las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_1(\omega) = n_1^2(\omega) - n_2^2(\omega) \quad (6)$$

$$\epsilon_2(\omega) = 2n_1n_2 \quad (7)$$

El índice de refracción también es un valor físico de los materiales y está representado por $\tilde{n} = n_1 + in_2$ donde n_1 y n_2 son las partes real e imaginaria, respectivamente. Cuando un pulso de THz viaja a través de una muestra, n_1 y n_2 están relacionados con el índice de refracción (n) y el coeficiente de absorción (a) de los materiales.

D. Análisis multivariado (análisis de componentes principales)

El método de Análisis de Componentes Principales (PCA) se utilizará como un método de reconocimiento común no supervisado. En primer lugar, se aplicó para la exploración inicial para visualizar el marco de datos e identificar observaciones confusas o valores atípicos. PCA se ha convertido en una de las herramientas más amplias para explorar similitudes y patrones ocultos entre muestras en las que la relación de datos y la agrupación son incluso poco claras [20]. En la investigación se utilizó para reducir las dimensiones de la matriz de datos de las muestras y se extrajo la información principal en los espectros de THz registrados para obtener una visión general mediante el uso de PCA. Con datos espectrales puros, PCA proporcionó información muy importante sobre la capacidad potencial para diferenciar muestras.

III. RESULTADOS

A. Características espectrales THz

En la figura 2 se muestra el espectro en forma de onda en el dominio del tiempo, en comparación con la señal de referencia, se observa las diferencias entre las muestras clasificadas por semanas de maduración del queso.

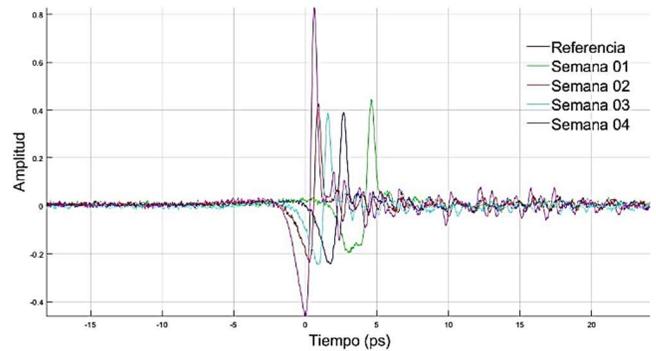


Fig. 2. Formas de onda transitorias de la radiación de THz en el dominio de tiempo

Estas diferencias en el pulso se deben a fenómenos que ocurren debido a la absorción, reflexión y dispersión del pulso de THz en la superficie de la muestra [21]. Además, debido a que la velocidad de transmisión de la señal de pulso THz y las señales de cada muestra fueron diferentes, el índice de refracción de cada muestra también será diferente, lo que indica que cada muestra exhibe un grado diferente de absorción y dispersión de la onda THz.

El espectro en el dominio de la frecuencia se obtuvo mediante la transformación de Fourier de la señal espectral en el dominio del tiempo de THz de diferentes tiempos de fermentación, como se muestra en la Figura 3

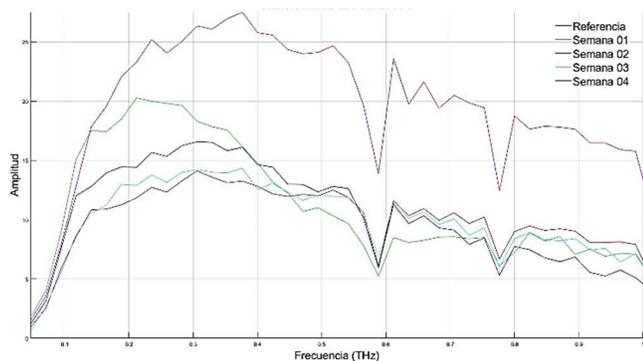


Fig. 3. Espectros de pulsos de THz correspondientes en el dominio de frecuencia

El ensayo se realizó de 0.1 a 10THz, pero a partir de 1 THz no muestra diferencias por ello se analiza el rango de 0.1 a 1 THz como se observa en la figura 3. También podemos observar que el proceso de maduración del queso es diferenciable en el rango de 0.1 a 0.4 THz y muestra un pico hacia abajo característico a 0.6 THz.

Estas diferencias en los espectros se pueden deber a que durante la maduración del queso su estructura se establece a medida que se producen interacciones dependientes del pH entre las caseínas hidratadas y los minerales, además de la proteólisis, y su influencia en la textura del queso [22]. Esto causa la aparición y desaparición de compuestos del queso que interactúan de manera diferente con la radiación THz.

El coeficiente de absorción y el índice de refracción de las muestras se usaron para calcular la absorbancia tal como se muestra en la figura 4. Estas se muestran diferentes debido a que provienen de diferentes curvas de espectro de frecuencia, coeficiente de absorción e índice de refracción, lo que indica que los diferentes estadios de la maduración del queso tienen diferentes propiedades físicas y pueden ser usadas para poder determinar este importante punto en el proceso de elaboración de quesos maduros.

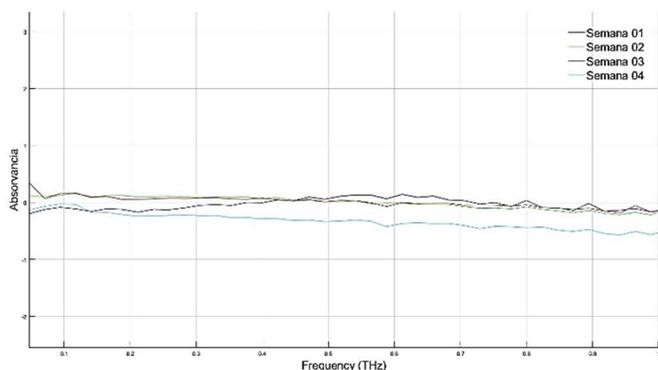


Fig. 4. La absorbancia de los espectros

Otro punto importante para el análisis de los espectros THz es la permitividad dieléctrica. Esta propiedad se ve afectada por los cambios en la composición como los que se dan en el proceso de maduración del queso, donde las propiedades

ópticas pueden describirse mediante una constante dieléctrica efectiva. Este tipo de relajación dieléctrica se describe mediante una parte real e imaginaria de la constante dieléctrica compleja, tal como se observa en la figura 6 y 7 que muestran ambas permitividades.

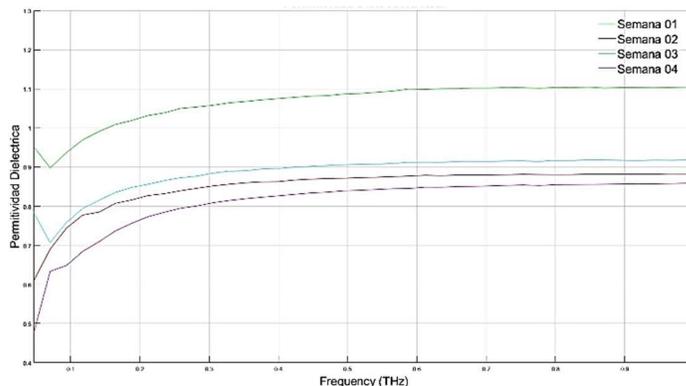


Fig. 5. Permitividad dieléctrica Real

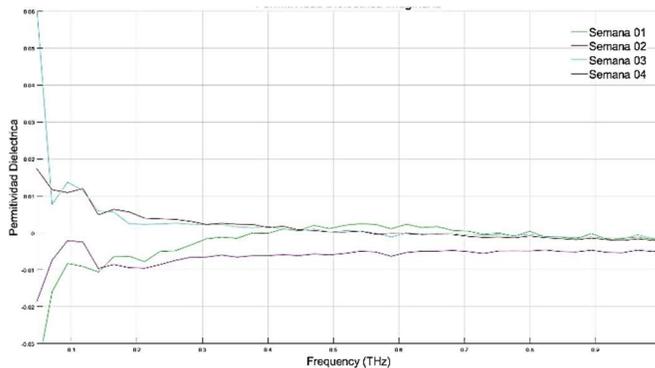


Fig. 6. Permitividad dieléctrica Imaginaria

La tendencia de variación de las permitividades contra la frecuencia de THz es casi invariable para las diferentes semanas de envejecimiento. Este parámetro es importante cuando ocurren cambios químicos en los componentes de los alimentos, la relajación dieléctrica también puede cambiar debido a alteraciones en los campos eléctricos dentro de los alimentos. En consecuencia, es posible predecir el estado de los materiales alimenticios y sus características únicas al examinar las propiedades dieléctricas, de acuerdo a reportes esto se puede deber a una relajación lenta y la unión estrecha entre los iones y las moléculas de agua [23].

B. Análisis Multivariado

Con el objetivo de determinar si se puede generar una clasificación adecuada en los diferentes estadios de maduración del queso se utilizaron modelos de clasificación lineales (LDA) y no lineales (SVM). Estos modelos se realizaron utilizando la aplicación Matlab Machine Learning, que nos permitió explorar

el conjunto de datos de forma interactiva, la selección de características y la especificación de esquemas de validación. La precisión del entrenamiento de los modelos utilizados se evaluó mediante el indicador de precisión (%). Todos los modelos utilizaron una validación cruzada (15 pliegues). Este análisis multivariado de PCA generó la prueba de 24 modelos, con la mejor Precisión entre los que se muestran en la Tabla I.

TABLA I. MODELOS CON MEJOR PRECISION

Modelo	Precisión (%)
Fine Gaussian SVM	90.3
Cubic SVM	89.4
Fine KNN	86.6

El mejor modelo de clasificación es el Support Vector Machine (SVM) con una precisión de 90% y el análisis de componentes principales (PCA) nos da un PC1 (79.9%) y PC2 (20.1%) teniendo una varianza explicada de 100% con 2 componentes principales. En investigaciones similares con espectrofotometría los modelos SVM y KNN son usados ampliamente obteniendo valores similares de precisión [24]

Esto confirma que los espectros de terahercios tienen suficiente información para clasificar los diferentes estados de madurez de los quesos, lo cual se corrobora en la matriz de confusión que se muestra en la Figura 6, demostrando que el análisis espectral en el rango THz es un poderoso método no destructivo que brinda la ventaja de explorar información espacializada simultánea en cada píxel de las imágenes.

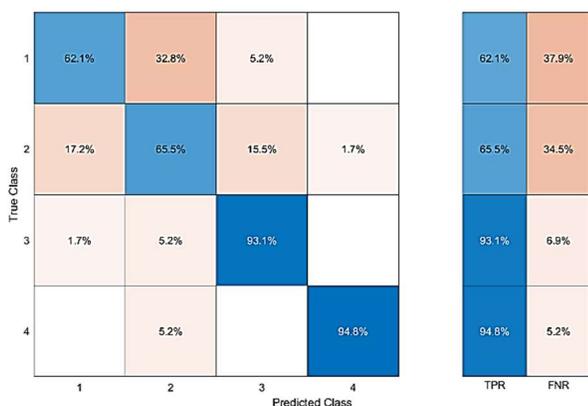


Fig. 6. Matriz de confusión

Al realizar la comparación de los datos reales (gráfico de caja y bigote azul) y el del modelo generado por la predicción (gráfico de caja y bigote amarillo) mostrado en la figura 7, observamos que ambos modelos están muy cercanos alcanzando un error cuadrático medio (RMSE) de 0.20209 utilizando el modelo SVM y optimizándola con una función bayesiana.

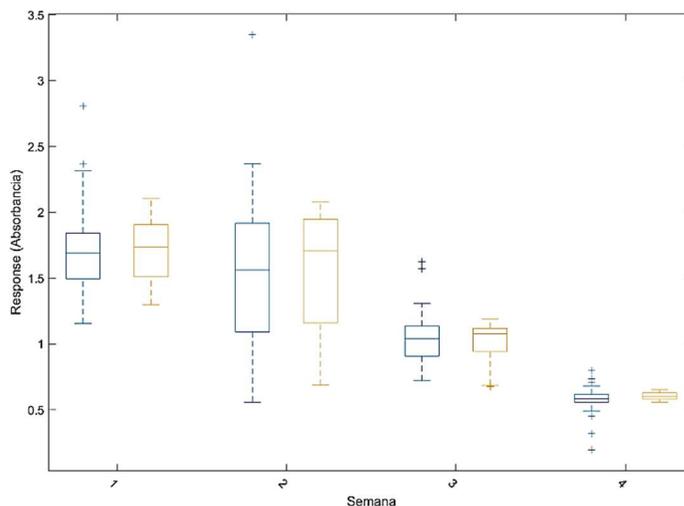


Fig. 7. Gráfico de caja y bigote para modelo de predicción SVM

IV. CONCLUSIONES

Los resultados generales muestran que la espectroscopía en el dominio del tiempo de Terahercios (THz-TDS) junto con el modelado de clasificación multivariante pueden identificar con éxito los estados de madurez de los quesos. En el proceso de clasificación y modelado, se observó que la región con mayor diferenciación debe estar claramente determinada con el objetivo de que el modelo se pueda construir con información adecuada para generar valores de Precisión más altos. Junto a esto, la capacidad de la espectroscopía THz junto con análisis multivariados puede relacionar y caracterizar la estructura molecular cambiante, tal como sucede en el proceso de maduración de quesos, esto la convierte en una atractiva herramienta de proceso analítico para un mejor seguimiento en el control de la calidad de los alimentos. Pero si bien esta espectroscopía en el dominio del tiempo de Terahercios está demostrando eficiencia en los métodos de clasificación, como en el queso, aún quedan muchos parámetros a tener en cuenta en el uso de este tipo de tecnología.

ACKNOWLEDGMENT

Los autores agradecen el apoyo financiero del Proyecto Concytec - Banco Mundial "Desarrollo de Modelos Predictivos de Calidad de Alimentos Basados en Tecnología de Imágenes THz", a través de su unidad ejecutora Fondecyt. [contrato número 006-2018-FONDECYT / BM-Mejoramiento de la infraestructura para la investigación (equipamiento)]

REFERENCES

- [1] H. Kraggerud, T. Næs, y R. K. Abrahamsen, «Prediction of sensory quality of cheese during ripening from chemical and spectroscopy measurements», *International Dairy Journal*, vol. 34, n.º 1, pp. 6-18, ene. 2014, doi: 10.1016/j.idairyj.2013.07.008.
- [2] U. Rehn, M. A. Petersen, K. H. Saedén, y Y. Ardö, «Ripening of extra-hard cheese made with mesophilic DL-starter», *International Dairy*

- Journal*, vol. 20, n.º 12, pp. 844-851, dic. 2010, doi: 10.1016/j.idairyj.2010.06.001.
- [3] Y. F. Collins, P. L. H. McSweeney, y M. G. Wilkinson, «Lipolysis and free fatty acid catabolism in cheese: a review of current knowledge», *International Dairy Journal*, vol. 13, n.º 11, pp. 841-866, ene. 2003, doi: 10.1016/S0958-6946(03)00109-2.
- [4] A. Subramanian y L. Rodriguez-Saona, «Chapter 5 - Chemical and Instrumental Approaches to Cheese Analysis», en *Advances in Food and Nutrition Research*, vol. 59, S. L. Taylor, Ed. Academic Press, 2010, pp. 167-213.
- [5] W. Castro, J. Oblitas, M. De-La-Torre, C. Cotrina, K. Bazan, y H. Avila-George, «Classification of Cape Gooseberry Fruit According to its Level of Ripeness Using Machine Learning Techniques and Different Color Spaces», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 27389-27400, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2898223.
- [6] H. Priyashantha *et al.*, «Use of near-infrared hyperspectral (NIR-HS) imaging to visualize and model the maturity of long-ripening hard cheeses», *Journal of Food Engineering*, vol. 264, p. 109687, ene. 2020, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109687.
- [7] N. Vásquez, C. Magán, J. Oblitas, T. Chuquizuta, H. Avila-George, y W. Castro, «Comparison between artificial neural network and partial least squares regression models for hardness modeling during the ripening process of Swiss-type cheese using spectral profiles», *Journal of Food Engineering*, vol. 219, pp. 8-15, feb. 2018, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.09.008.
- [8] K. Muthukumarappan y G. J. Swamy, «Chapter 10 - Rheology, Microstructure, and Functionality of Cheeses», en *Advances in Food Rheology and Its Applications*, J. Ahmed, P. Ptaszek, y S. Basu, Eds. Woodhead Publishing, 2017, pp. 245-276.
- [9] J.-F. Roux, F. Garet, y J.-L. Coutaz, «Principles and Applications of THz Time Domain Spectroscopy», en *Physics and Applications of Terahertz Radiation*, M. Perenzoni y D. J. Paul, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014, pp. 203-231.
- [10] J. O. Cruz, «Terahertz Time-domain Spectroscopy (THz-TDS) for classification of blueberries according to their maturity», presentado en Proceedings of the 2020 IEEE Engineering International Research Conference, EIRCON 2020, 2020, doi: 10.1109/EIRCON51178.2020.9254046.
- [11] M. Karaliūnas *et al.*, «Non-destructive inspection of food and technical oils by terahertz spectroscopy», *Scientific Reports*, vol. 8, n.º 1, Art. n.º 1, dic. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-36151-3.
- [12] H. S. Chua *et al.*, «Terahertz time-domain spectroscopy of crushed wheat grain», en *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005.*, jun. 2005, p. 4 pp.-, doi: 10.1109/MWSYM.2005.1517162.
- [13] A. Dinovitsier, D. G. Valchev, y D. Abbott, «Terahertz time-domain spectroscopy of edible oils», *Royal Society Open Science*, vol. 4, n.º 6, p. 170275, doi: 10.1098/rsos.170275.
- [14] W. Liu, Y. Zhang, M. Li, D. Han, y W. Liu, «Determination of invert syrup adulterated in acacia honey by terahertz spectroscopy with different spectral features», *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 100, n.º 5, pp. 1913-1921, 2020, doi: 10.1002/jsfa.10202.
- [15] T. Chang, X. Zhang, y H.-L. Cui, «Thermal aging analysis of carbon black and silica filled natural rubber based on terahertz dielectric spectroscopy», *Infrared Physics & Technology*, vol. 105, p. 103195, mar. 2020, doi: 10.1016/j.infrared.2020.103195.
- [16] H. J. Shin, S.-W. Choi, y G. Ok, «Qualitative identification of food materials by complex refractive index mapping in the terahertz range», *Food Chemistry*, vol. 245, pp. 282-288, abr. 2018, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.10.056.
- [17] «MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico». <https://la.mathworks.com/products/matlab.html> (accedido ene. 19, 2021).
- [18] N. Maamar, M. Lazoul, F. Y. Latreche, D. Trache, y J.-L. Coutaz, «Terahertz time-domain spectroscopy characterization of nitrocellulose in transmission and reflection configurations», *Optik*, vol. 224, p. 165711, dic. 2020, doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165711.
- [19] T. D. Dorney, R. G. Baraniuk, y D. M. Mittleman, «Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy», *J. Opt. Soc. Am. A, JOSAA*, vol. 18, n.º 7, pp. 1562-1571, jul. 2001, doi: 10.1364/JOSAA.18.001562.
- [20] J. Oblitas *et al.*, «The Use of Correlation, Association and Regression Techniques for Analyzing Processes and Food Products», *Mathematical and Statistical Applications in Food Engineering*, ene. 30, 2020. <https://www.taylorfrancis.com/> (accedido sep. 28, 2020).
- [21] «Física y aplicaciones de la radiación de Terahertz | SpringerLink». <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-94-007-3837-9> (accedido jul. 29, 2020).
- [22] C. J. Coker, R. A. Crawford, K. A. Johnston, H. Singh, y L. K. Creamer, «Towards the classification of cheese variety and maturity on the basis of statistical analysis of proteolysis data—a review», *International Dairy Journal*, vol. 15, n.º 6, pp. 631-643, jun. 2005, doi: 10.1016/j.idairyj.2004.10.011.
- [23] A. De Ninno, E. Nikollari, M. Missori, y F. Frezza, «Dielectric permittivity of aqueous solutions of electrolytes probed by THz time-domain and FTIR spectroscopy», *Physics Letters A*, vol. 384, n.º 34, p. 126865, dic. 2020, doi: 10.1016/j.physleta.2020.126865.
- [24] S. Loussaief y A. Abdelkrim, «Machine Learning framework for image classification», *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, vol. 3, n.º 1, pp. 1-10, 2018, doi: 10.25046/aj030101.