Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Agropecuaria ISSN: 2448-6620

COLORÍMETRO INTELIGENTE DE BAJO COSTO BASADO EN ANFIS PARA PREDECIR °BRIX EN *Citrus sinensis* L.

Marcos J. Villaseñor-Aguilar[1]; Alejandro De Lucio Rangel[2]; Hector M. Galván-López[2]; Alejandro I. Barranco-Gutiérrez [3] y Carlos G. Manríquez-Padilla[4]

[1]División de Ingeniería Mecatrónica, TecNM/ITS Irapuato, Irapuato 36821, México., marcos.va@irapuato.tecnm.mx. [2]División de Ingeniería en Sistemas Automotrices, TecNM/ITS Irapuato, Irapuato 36821, México., alejandro.dr@irapuato.tecnm.mx , manuel.gl@irapuato.tecnm.mx . [3]Depratamento de Ingeniería Electrónica, TecNM/ Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya 38010, México., israel.barranco@itcelaya.edu.mx [4]Faculta de Ingeniería, Campus San Juan del Río, Universidad Atuonoma de Queretaro, San Juan del Rio 76807, México., carlos.marinquez@uaq.mx

RESUMEN

Actualmente, una de las principales necesidades de los productores es la incorporación de tecnologías de bajo costo que permitan evaluar de manera eficiente la calidad de los productos agrícolas. México es uno de los principales productores de naranja, cuyo valor comercial está estrechamente relacionado con su contenido de azúcares. En este trabajo se propone una metodología para el diseño de un colorímetro inteligente orientado a la estimación del contenido de azúcares en la naranja. El sistema utiliza un microcontrolador ESP32 y un sensor de color TCS34725 para la adquisición de información cromática. A partir de estos datos, se implementó un modelo computacional basado en sistemas neuro-difusos adaptativos (ANFIS), el cual alcanzó un coeficiente de determinación (R^2) de 0.999 y un error medio cuadrático de 0.0071.

Palabras claves: *anfis, grados brix, naranja, sensor*

ABSTRACT

Currently, one of the main needs of producers is the incorporation of low-cost technologies that enable efficient evaluation of agricultural product quality. Mexico is one of the main producers of oranges, whose commercial value is closely related to its sugar content. This study proposes a methodology for the design of an intelligent colorimeter aimed at estimating the sugar content in oranges. The system uses an ESP32 microcontroller and a TCS34725 color sensor for chromatic data acquisition. Based on these data, a computational model based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) was implemented, achieving a coefficient of determination (R^2) of 0.999 and a mean squared error of 0.0071.

Keywords: ANFIS , Degrees Brix , Orange, Sensor

INTRODUCCIÓN

Dentro de la diversidad de los cítricos, la naranja (Citrus sinensis), perteneciente a la familia Rutaceae, destaca como uno de los frutos de mayor demanda a nivel mundial debido a sus características organolépticas, tales como su color que varía de amarillo a naranja intenso, su aroma característico, su sabor dulce con acidez moderada y una pulpa de textura jugosa. Asimismo, este fruto es reconocido por sus propiedades nutracéuticas, asociadas a su alto contenido de fibra, vitamina C y compuestos antioxidantes, además de sus potenciales efectos antiinflamatorios y anticancerígenos (Villares et al.,2004).

De acuerdo con datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en el año 2024 la producción mundial de naranja alcanzó aproximadamente 3.38 millones de hectáreas, con una producción estimada de 67 millones de toneladas (FAO,2026). En este contexto, México, según cifras de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), contribuyó con el 6.4 % de la producción mundial, al cosechar 341 217 hectáreas que generaron alrededor de 7.62 millones de toneladas, posicionándose como el tercer productor a nivel mundial, después de Brasil y China (SecretarÃa de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2025). Esta elevada producción responde a la diversidad de aplicaciones industriales del fruto, entre las que destacan la elaboración de jugos, mermeladas, aceites esenciales, concentrados y pastas.

La determinación de la calidad de la naranja por parte de los productores se basa, en muchos casos, en pruebas empíricas sustentadas en la experiencia, considerando atributos como color, forma, textura y sonido (Prasad et al., 2018). No obstante, existe una creciente necesidad de incorporar técnicas instrumentales avanzadas que permitan una evaluación objetiva y precisa de la calidad, tales como la Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC), la espectrofotometría, la refractometría y los ensayos de firmeza mediante penetrómetros. Aunque estos métodos ofrecen alta precisión y confiabilidad, presentan desventajas importantes, como su carácter destructivo, el elevado costo de los equipos y la necesidad de personal altamente especializado para su operación (Jaywant et al., 2022).

En este contexto, la determinación del punto óptimo de madurez del fruto representa un reto tecnológico, ya que puede manifestarse en distintas etapas del desarrollo y debe ajustarse a las exigencias del mercado. Por ello, diversos estudios se han enfocado en la determinación de los Sólidos Solubles Totales (SST), ya que esta variable fisicoquímica permite estimar la madurez, la dulzura y la acidez del fruto. El contenido de SST, expresado comúnmente en grados Brix (°Brix), es considerado un parámetro clave de calidad relacionado con las condiciones de cultivo y procesamiento(Villaseñor-Aguilar et al., 2020) .

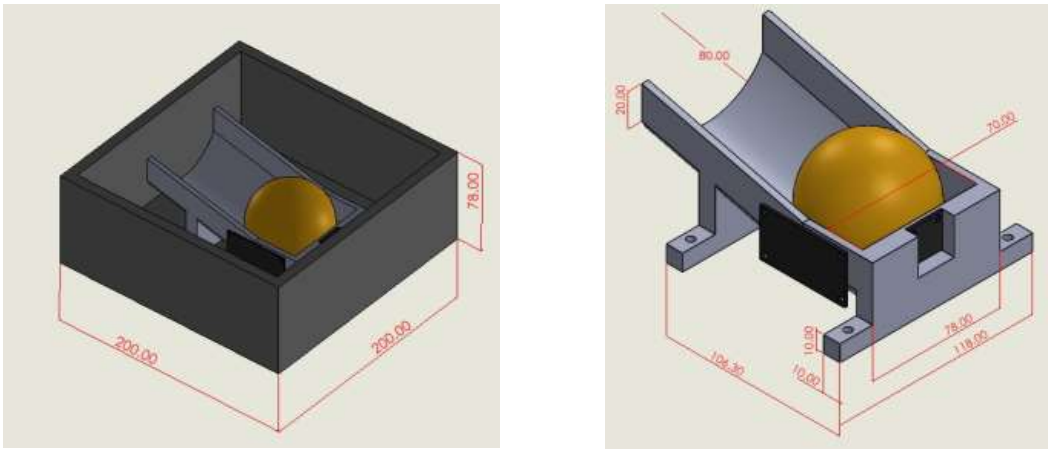
Sin embargo, muchos de los métodos empleados para la determinación de °Brix presentan limitaciones asociadas a su alto costo, complejidad operativa y carácter destructivo, lo que restringe su aplicación en evaluaciones rápidas o a gran escala. En contraste, investigaciones recientes han explorado técnicas no invasivas basadas en el análisis del color del fruto. Villarreal et al. (2024) reportaron una correlación significativa entre la coloración de la cáscara de naranja y el incremento del contenido de °Brix, utilizando un modelo basado en el espacio de color CIE-LAB. De manera similar, Nuño-Maganda et al. (2024) emplearon imágenes y video, logrando precisiones superiores al 93 % mediante modelos de visión artificial, y hasta un 99 % usando redes convolucionales SSD MobileNetV3. Asimismo, Villaseñor-Aguilar et al. (2024) propusieron modelos basados en redes neuronales artificiales y lógica difusa para predecir el contenido de azúcares en naranja, obteniendo coeficientes de correlación superiores a 0.70. Bajo este enfoque, se presenta una propuesta metodológica que emplea un sensor de bajo costo para predecir el contenido de grados Brix mediante mediciones RGB y Lógica difusa, aplicada a frutos de naranja (Citrus x sinensis).

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Figura 1 se muestra la metodología empleada para el desarrollo del colorímetro inteligente, el cual se caracteriza por estar conformado por tres sistemas: el mecánico **de aislamiento**, el **de medición** y el de control, además de una interfaz de operación.

Figura 1. Diagrama de general del sistema calorímetro inteligente para la de estimación grados Brix mediante mediciones RGB.

Desarrollo del sistema mecánico de aislamiento. En la Figura 2 se presenta el modelo 3D, elaborado mediante diseño asistido por computadora (CAD), correspondiente al sistema de aislamiento y al sistema de embalaje del fruto. En la Figura 2a se muestra la cámara de aislamiento, la cual consiste en una estructura cerrada con dimensiones de 200 mm × 200 mm × 78 mm, fabricada en color negro mate para evitar reflexiones externas y garantizar condiciones de iluminación controladas durante la medición. Por su parte, en la Figura 2b se observa el sistema de embalaje diseñado para facilitar la correcta manipulación y posicionamiento del fruto dentro del colorímetro.



(a) (b)

Figura 2. (a) Sistema de aislamiento de la iluminación, (b) Embalaje del fruto del calorímetro

Desarrollo del sistema de medición. En la Figura 3 se muestra el esquema electrónico del colorímetro inteligente su arquitectura interana se basa en la comunicación mediante el bus I²C, el cual permite conectar el sensor de color Adafruit TCS34725 al microcontrolador ESP32 utilizando únicamente dos líneas de datos además de la alimentación. La conexión del sensor digital para la implementación del bus I2C fue con los pines GPIO20 (SDA) y GPIO21 (SCL) del microcontrolador ESP32.

Cabe resaltar la configuración del sensor TCS34725 se utilizó una comunicación serial de 9600 baussrate. Posteriormente, se configura el sensor con una ganancia de 4 para incrementar la sensibilidad a las mediciones del color y un tiempo de integración de 50 ms que es tiempo de exposición de los fotodiodos que integran el sensor para generar una medición. Posteriormente se hace la lectura de la medición para ser empleada por el microcontrolador.

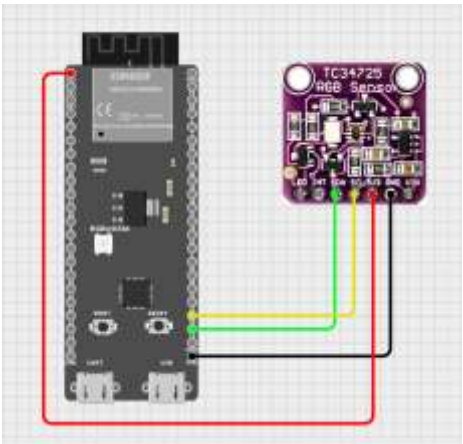


Figura 3. Diagrama electrónico de conexión del microcontrolador ESP32 y el sensor TCS34725.

Interface de operación del colorímetro inteligente. En la Figura 4 se muestra la interface de operación que fue implementado en Python este tiene como característica que muestra las lecturas de la mediciones te permite visualizar la gráifca de la predicción, mostrar las metríca de medición y dos botones de control para adquirir las mediciones de color. En su interior cuenta con un modelo matemático ANFIS que fue integrado con tres entradas correspondientes a la mediciones del sensor de color y la salida la variable de predicción de °Brix. Para el diseño del modelo de Inteligencia Artificial se utilizaron 17 muestras con diferentes grados de madurez y tamaño uniforme.

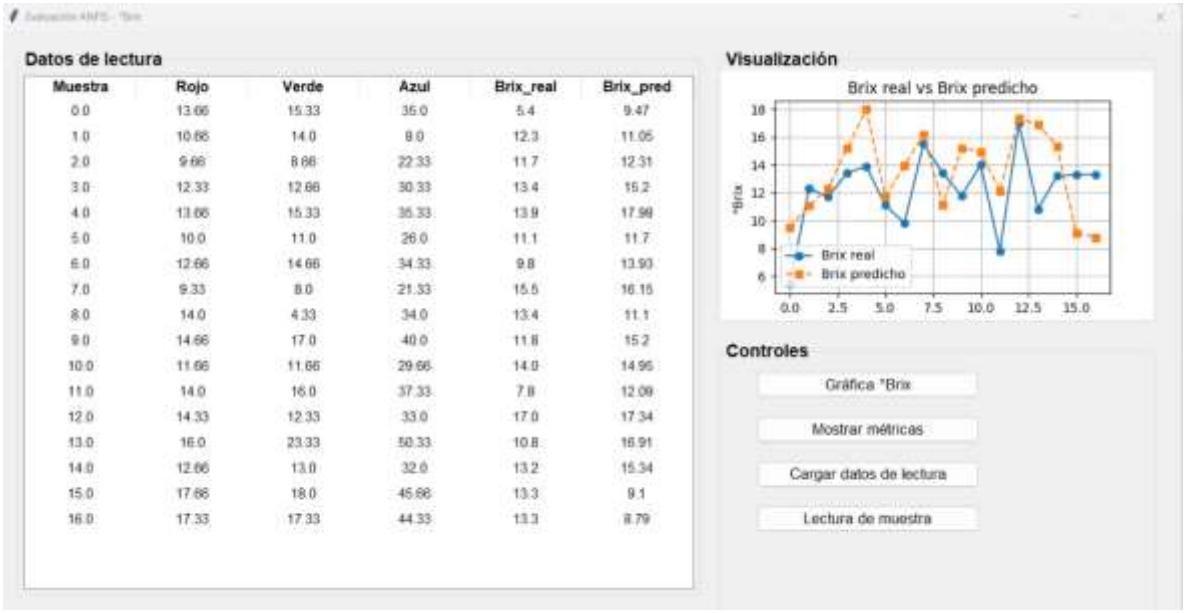


Figura 4. Interface de operación del colorímetro inteligente.

Generación del modelo Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (**ANFIS).** El modelo ANFIS (**Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) cuyo acrónimo en español es** sistema adaptativo de inferencia neurodifusa que ayuda a construir un modelo mediante datos de entra y salida. Su principal característica es emplea una una partición difusa del espacio de entrada. En cada subespacio difuso se forma una relación lineal de entrada-salida. La Figura 5 muestra arquitectura propuesta del modelo fue implementado mediante en Python se resume en la Tabla 1 se resumen las funciones de membresia empleadas del tipo Gaussianas.

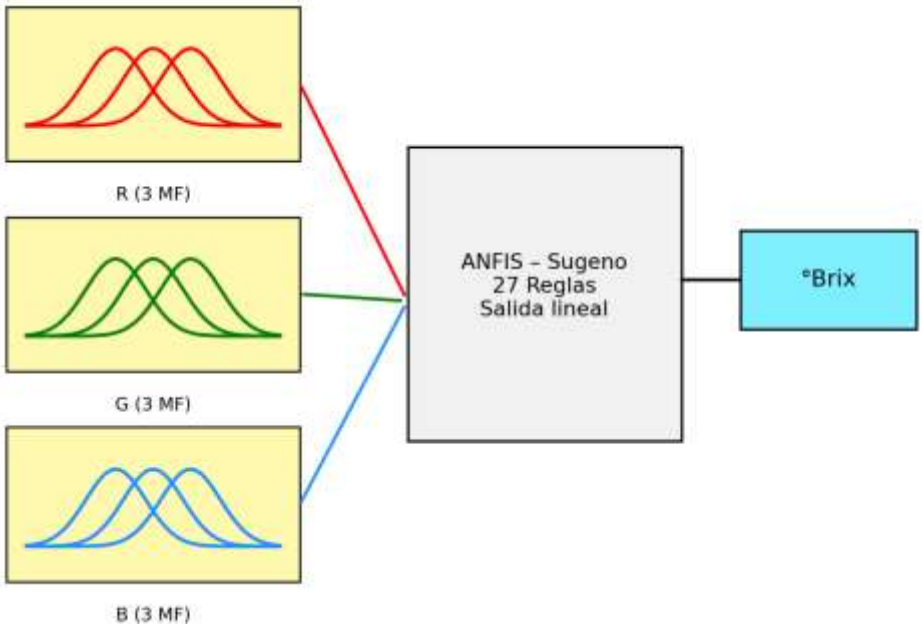


Figura 5. Arquitectura propuesta del modelo ANFIS de predicción de °Brix.

El modelo

Entrada	Funciones de membresía	Center(c)	Sigma(σ)
	MF1	9.33	3.332
	MF2	13.495	3.332
R	MF#	17.66	3.332
	MF4	4.33	7.6
	MF5	13.83	7.6
G	MF6	23.33	7.6
	MF7	8	16.932
	MF8	29.165	16.932
B	MF9	50.33	16.932

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo implementado se muestra en la Figura 6 este utilizó el registro de la mediciones de color RGB hechas por el sensor TCS34725 y la mediciones del contenido de °Brix que fue medido con un Refractómetro digital Deosdum (modelo t1cq6gki47) con un rango de medición de 0 a 55% empleando la metodología propuesta [Villaseñor-Aguilar et al. 2024]. En la Tabla 2 se muestran las mediciones de las muestras utilizadas en el diseño del dispositivo.

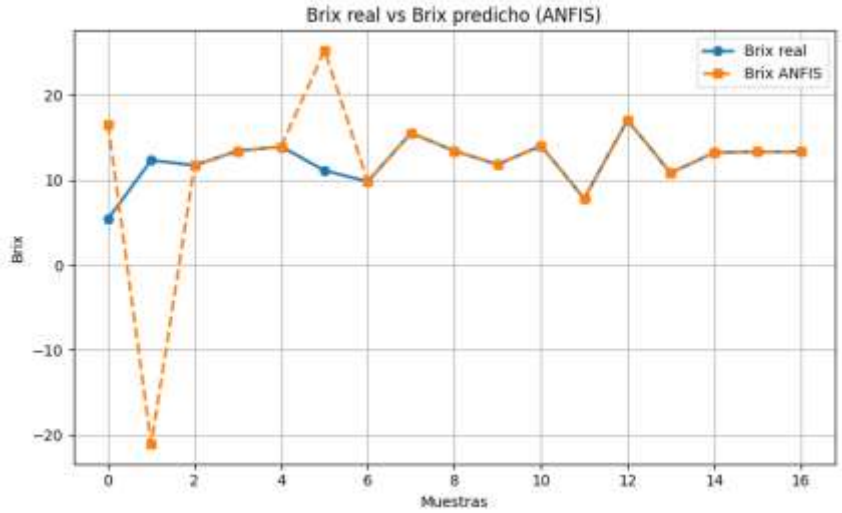


Figura 6: Comparativo de las predicciónes hechas con el colorímetro inteligente versus mediciones con el refratometro.

La Figura 7 presenta la gráfica de Bland-Altman entre los valores reales de °Brix y las predicciones generadas por el modelo ANFIS. La mayoría de las diferencias se concentran alrededor de la media del error y se encuentran dentro de los límites de concordancia (±1.96σ), lo cual indica un adecuado nivel de concordancia entre las mediciones experimentales y las estimaciones del modelo difuso. No se observa un sesgo sistemático apreciable, confirmando la capacidad de aproximación del sistema propuesto.

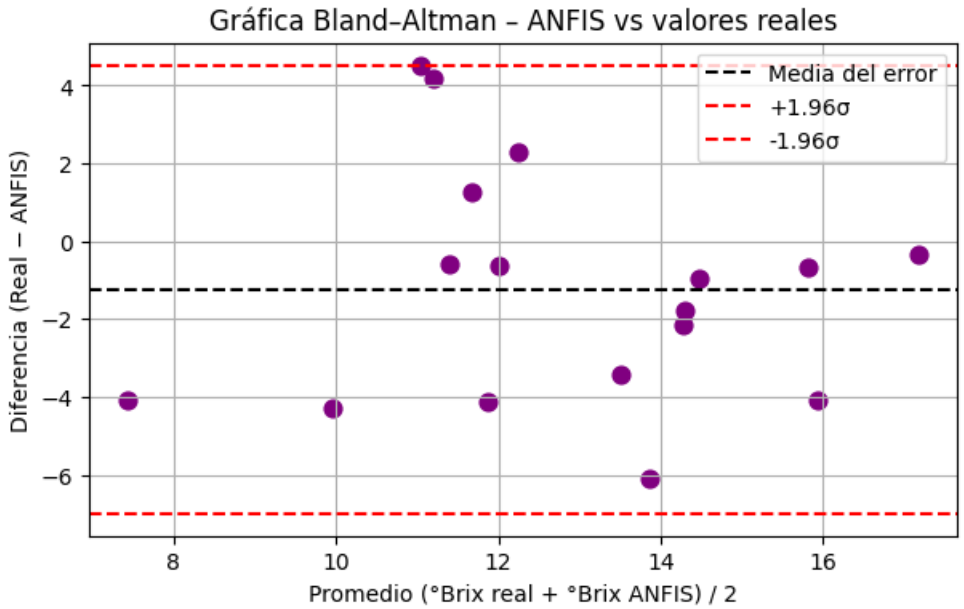


Figura 7: Análisis de Bland-Altman para valores reales y predicciones de °Brix obtenidas mediante ANFIS, mostrando adecuada concordancia y ausencia de sesgo sistemático.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propone el desarrollo de un sistema de medición no invasivo que facilita la estimación del contenido de azúcares en la naranja. La arquitectura del sistema presenta la ventaja de poder adaptarse para el monitoreo de otras variables fisicoquímicas relacionadas con la coloración del epicarpio del fruto, lo que permitiría asociar dichas variaciones con compuestos como luteína, clorofila y licopeno.

Asimismo, se demostró que los cambios en la coloración del epicarpio de la naranja pueden ser medidos de manera confiable mediante el uso de un sensor comercial de bajo costo, como el TCS34725, lo que refuerza la viabilidad del sistema propuesto para aplicaciones agroalimentarias.

AGRADECIMIENTOS

Al TECNM por el apoyo al proyecto M00-PR-03R01 Proyecto(25529), al ITESI, ITC, UAQ, PRODEP, SECIHTI y SNI .

REFERENCIAS BIBLOGRÁFICAS

Villares, J., Cobos, M., Vásquez, L., Sarmiento, R., Maita, F., Freire, C., Alexis, L., and Alvarado, J. (2024). Evaluación de parámetros de calidad de naranja (citrus x sinensis) en tres estados de madurez. Bionatura Journal: Ibero American Journal of Biotechnology and Life Sciences. URL http://dx.doi.org/10.21931/BJ/2024.01.01.10.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2026). *FAOSTAT: Base de datos estadísticos*. https://www.fao.org/faostat/

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2025). *Panorama agroalimentario 2025*. Gobierno de México. https://nube.agricultura.gob.mx/panorama_dgsiap/

Prasad, K., Jacob, S., and Siddiqui, M.W. (2018). Fruit maturity, harvesting, and quality standards. In Preharvest modulation of postharvest fruit and vegetable quality, 41–69. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809807-3.00002-0

Jaywant, S.A., Singh, H., and Arif, K.M. (2022). Sensors and instruments for brix measurement: A review. Sensors, 22(6), 2290. https://doi.org/10.3390/s22062290

Villaseñor-Aguilar, M. J., Bravo-Sánchez, M. G., Padilla-Medina, J. A., Vázquez-Vera, J. L., Guevara-González, R. G., García-Rodríguez, F. J., & Barranco-Gutiérrez, A. I. (2020). A maturity estimation of bell pepper (Capsicum annuum L.) by artificial vision system for quality control. *Applied Sciences*, *10*(15), 5097. https://doi.org/10.3390/app10155097

Nuño-Maganda, M. A., Dávila-Rodríguez, I. A., Hernández-Mier, Y., Barrón-Zambrano, J. H., Elizondo-Leal, J. C., Díaz-Manriquez, A., & Polanco-Martagón, S. (2023). Real-time embedded vision system for

online monitoring and sorting of citrus fruits. *Electronics*, *12*(18), 3891. https://doi.org/10.3390/electronics12183891

Villaseñor-Aguilar, M. J., Cano-Lara, M., Lopez, A. R., Rostro-Gonzalez, H., Padilla-Medina, J. A., & Barranco-Gutiérrez, A. I. (2024). fuzzy classification of the maturity of the orange (citrus× sinensis) using the citrus color index (CCI). *Applied Sciences*, *14*(13), 5953. https://doi.org/10.3390/app14135953