

Prototipo para la medición no destructiva de materia seca del fruto del Aguacate Hass

Moisés Rodríguez Morales¹, Ulises Bañuelos Amezcua², Juan José Venegas Moreno³, José de Jesús Hernández Martínez⁴, Luis Gabriel González Vázquez⁵, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez - Campus Tamazula, Departamento de Ingeniería Electromecánica^{1,2,3,4}, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, Departamento de Ingeniería Industrial⁵

RESUMEN

Este estudio desarrolla y valida un prototipo portátil de bajo costo para la medición no destructiva del porcentaje de materia seca (%MS) en el fruto del aguacate Hass mediante el uso de sensores de conductividad eléctrica (CE). Los métodos tradicionales de determinación de %MS son destructivos, lentos y energéticamente costosos, ya que se basan en la deshidratación por horno o microondas. El prototipo integra un sensor de conductividad y una celda de carga para clasificación automática de calibre en un sistema embebido y portátil.

Los resultados de validación se dividieron en dos etapas. En la etapa inicial con 40 frutos homogéneos de calibre #84, se obtuvo una correlación fuerte y estadísticamente significativa de $R^2 = 0.8564$ ($y = 0.025x + 12.42$), donde y es el %MS y x es la CE. Sin embargo, la segunda etapa con 220 muestras de diferentes calibres mostró una alta variabilidad, con coeficientes de determinación (R^2) que variaron drásticamente: desde $R^2 = 0.8887$ en el calibre #70 hasta $R^2 = 0.0014$ en el calibre #48. Se concluye que, si bien la relación entre conductividad eléctrica y materia seca existe, esta es altamente dependiente del calibre y de las condiciones fisiológicas del fruto. Por lo tanto, para una implementación confiable, el prototipo requiere la aplicación de modelos de calibración específicos para cada calibre.

Palabras clave: Prototipo, Materia seca, Conductividad eléctrica, Aguacate Hass y Método no destructiva.

ABSTRACT

This study develops and validates a low-cost, portable prototype for the non-destructive measurement of the percentage of dry matter (DM%) in Hass avocado fruit using electrical conductivity (EC) sensors. Traditional methods for DM% determination are destructive, slow, and energetically costly, as they rely on dehydration using an oven or microwave. The prototype integrates a conductivity sensor and a load cell for automatic size classification in a portable, embedded system.

The validation results were divided into two stages. In the initial stage with 40 homogeneous #84 caliber fruits, a strong and statistically significant correlation of $R^2 = 0.8564$

($y = 0.025x + 12.42$), was obtained, where y is the DM% and x is the EC. However, the second stage with 220 samples of different calibers showed high variability, with coefficients of determination (R^2) that varied drastically: from $R^2 = 0.8887$ in the #70 caliber to $R^2 = 0.0014$ in the #48 caliber. It is concluded that, while the relationship between electrical conductivity and dry matter exists, it is highly dependent on the caliber and the fruit's physiological conditions. Therefore, for reliable implementation, the prototype requires the application of specific calibration models for each caliber.

Keywords: Prototype, Dry matter, Electrical conductivity, Hass avocado, Non-destructive method.

I. INTRODUCCIÓN

La determinación precisa del punto óptimo de cosecha de aguacate Hass es fundamental para garantizar su calidad y vida postcosecha. El porcentaje de materia seca (%MS) se establece

¹ Moisés Rodríguez Morales, Docente del departamento de Electromecánica. Tecnológico Nacional de México / ITJMMPH-Tamazula. moises.rodriguez@tamazula.tecmm.edu.mx

² Ulises Bañuelos Amezcua, Docente del departamento de Electromecánica. Tecnológico Nacional de México / ITJMMPH-Tamazula. ulises.banuelos@tamazula.tecmm.edu.mx

³ Juan José Hernández Martínez, Docente del departamento de Electromecánica. Tecnológico Nacional de México / ITJMMPH-Tamazula. jose.venegas@tamazula.tecmm.edu.mx

⁴ José de Jesús Hernández Martínez, Docente del departamento de Electromecánica. Tecnológico Nacional de México / ITJMMPH-Tamazula. jose.hernandez@tamazula.tecmm.edu.mx

⁵ Luis Gabriel González Vázquez, Docente del departamento de Ciencias Básicas. Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Guzmán. luis.gv@cdguzman.tecnm.mx (autor de correspondencia).

como el indicador más confiable para esta determinación [3]. Los métodos tradicionales para su cuantificación se basan en técnicas destructivas que implica deshidratación en un horno a 70° C hasta un peso constante [1] o en horno de microondas, métodos que, aunque precisos, presentan limitaciones significativas en términos de tiempo, costo y destrucción de la muestra [2]. Esta problemática ha impulsado el desarrollo de tecnologías no destructivas como la espectroscopía NIR y la fluorescencia de clorofila, cuya efectividad puede verse comprometida por condiciones ambientales y variabilidad entre frutos. Ante esta situación, el presente trabajo propone una alternativa basada en la medición de conductividad eléctrica, desarrollando un prototipo portátil de bajo costo que busca correlacionar este parámetro físico con el %MS, validando su desempeño en condiciones reales de campo y diferente calibre de fruto Figura 1.



Fig. 1. Aguacate Hass [8].

II. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

2.1 Diseño del prototipo

El sistema implementa un enfoque de medición eléctrica, inspirándose en principios establecidos para el análisis de sólidos [4]. El prototipo consta de un sensor de conductividad eléctrica con electrodos de acero inoxidable que establecen contacto directo con el mesocarpio del fruto, aplicando un voltaje controlado y midiendo la corriente resultante. Simultáneamente, una celda de carga de alta precisión (± 0.1) determina el peso del fruto para su clasificación automática en calibres según los estándares de exportación [5] como se ilustra en la Figura 2.



Fig. 2. Diseño prototipo (elaboración propia).

El hardware se basa en un microcontrolador que procesa las señales de ambos sensores y ejecuta los algoritmos de correlación Figura 3.



Fig. 3. Sistema embebido Arduino UNO (elaboración propia).

El firmware fue desarrollado y simulado en Proteus antes de su implementación final Figura 4.

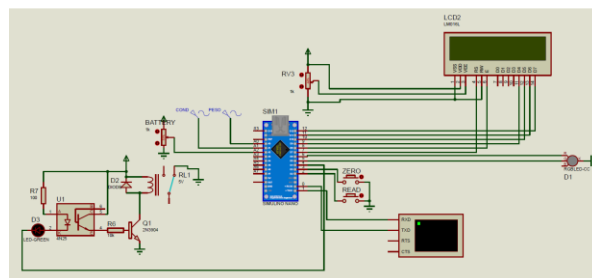


Fig. 4. Simulación en Proteus (elaboración propia).

La interfaz de usuario incluye una pantalla LCD que muestra el % MS calculado y el calibre identificado. La carcasa fue fabricada mediante impresión 3D con filamento PLA, optimizando su portabilidad y resistencia para uso en campo como se observa en la Figura 5.

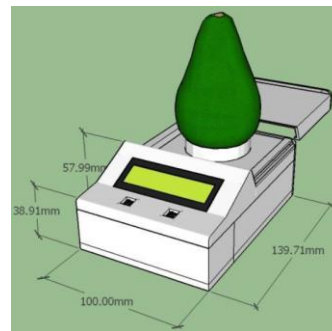


Fig. 5. Diseño 3D (elaboración propia).

2.2 Muestreo y recolección de datos.

El protocolo de muestreo siguió las directrices establecidas en el Manual para la Toma de Muestras de Frutos de Aguacate [6], asegurando su representatividad estadística.

El estudio comprendido de dos etapas principales:

La primera utilizó 40 frutos de calibre #84 (120-150 gr.) cosechados en Agua Zarca, Jalisco, demostró un desempeño prometedor del prototipo. Se estableció una correlación positiva y estadísticamente significativa entre la conductividad eléctrica (x en, $\mu S/cm$) y el porcentaje de materia seca. El modelo de regresión lineal obtenido fue $y = 0.025x + 12.42$, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.8564$. Este resultado sugiere que, para un calibre específico y bajo condiciones de muestreo consistentes, la CE es un buen predictor de %MS Figuras 6 y Tabla 1.



Fig. 6. Muestreo de diferentes calibres (elaboración propia).

#Muestra	Hoja (grs)	1er peso	2do peso	3er peso	4to peso	Peso final	% materia seca
1	1.1	4.5	4.3	4.3	4.3	4.3	32
2	1.1	4.7	4.5	4.5	4.5	4.5	34
3	1.1	4.9	4.5	4.4	4.4	4.4	33
4	1.1	4.9	4.5	4.3	4.3	4.3	32
5	1.1	5.1	4.8	4.5	4.4	4.4	33
6	1.1	4.7	4.3	4.3	4.3	4.3	32
7	1.1	6.4	4.6	4.4	4.3	4.3	32
8	1.1	5	4.5	4.5	4.5	4.5	34
9	1.1	5.2	4.4	4.2	4.2	4.2	31
10	1.1	5.7	4.9	4.8	4.8	4.8	37
11	1.1	5.5	4.5	4.3	4.3	4.3	32
12	1.1	5.1	4.4	4.3	4.3	4.3	32
13	1.1	4.8	4.6	4.5	4.5	4.5	34
14	1.1	5	4.6	4.5	4.5	4.5	34
15	1.1	5.9	4.7	4.4	4.3	4.3	32
16	1.1	6.1	4.8	4.2	4.2	4.2	31
17	1.1	6.5	5	4.8	4.6	4.6	35
18	1.1	4.7	4.5	4.5		4.5	34
19	1.1	5.4	4.8	4.7	4.5	4.5	34
20	1.1	6.3	5.1	4.7	4.7	4.7	36
21	1.1	5.9	5.5	4.7	4.5	4.5	34
22	1.1	6.2	4.7	4.4	4.4	4.4	33
23	1.1	6.4	4.9	4.6	4.6	4.6	35
24	1.1	5.2	5	5	5	5	39
25	1.1	4.5	4.2	4.1	4.1	4.1	30
26	1.1	4.9	4.6	4.6	4.6	4.6	35
27	1.1	4.6	4.4	4.4		4.4	33
28	1.1	4.6	4.5	4.4	4.4	4.4	33
29	1.1	5	4.7	4.7		4.7	36
30	1.1	5.4	4.8	4.8	4.8	4.8	37
31	1.1	5.3	4.6	4.4	4.4	4.4	33
32	1.1	4.7	4.1	4	4	4	29
33	1.1	4.5	4	3.9	3.9	3.9	28
34	1.1	5.5	5.1	5	5	5	39
35	1.1	5.3	4.7	4.6	4.6	4.6	35
36	1.1	4.7	4.4	4.3		4.3	32
37	1.1	5.1	4.8	4.7		4.7	36
38	1.1	4.5	4.2	4.1		4.1	30
39	1.1	4.5	4.4	4.3		4.3	32
40	1.1	5.4	5.2	5.1		5.1	40

Tab. 1. Tabla de valores obtenidos (elaboración propia).

La segunda etapa expandió el muestro a 220 frutos de múltiples calibres (#48, #60, #70, #84), reveló una alta dependencia del calibre en la correlación CE-%MS. Los resultados fueron los siguientes:

- Calibre #70: se mantuvo una correlación fuerte con $R^2 = 0.8887$.
- Calibre #60: se observó una correlación moderada con $R^2 = 0.5464$.
- Calibre #48: la correlación fue prácticamente inexistente con $R^2 = 0.0014$.

La discrepancia no es simplemente una varianza estadística, sino un indicador de que la relación es afectada por factores fisiológicos y estructurales que varían con el tamaño y la

madurez del fruto. La distribución no uniforme de aceites, la madurez variable, la temperatura del fruto y las condiciones del cultivo (refrigerado vs campo) influyen significativamente en las propiedades dieléctricas de la pulpa, lo que hace imposible la estandarización con un modelo de regresión único.

Cada fruto fue medido de forma no destructiva con el prototipo como se muestra en la Figura. 7, registrando peso y conductividad eléctrica.



Fig. 7. Medición no destructiva con prototipo (elaboración propia).

Posteriormente se sometió al método de referencia de secado por microondas para determinación destructiva del % MS iniciando con el corte del fruto como se muestra en la Figura 8.



Fig. 8. Corte de fruto de aguacate (elaboración propia).

Una vez quitado el corazón del fruto se utiliza un pelador se sacaron pequeñas hojuelas del fruto, delgadas y uniformes como se muestra en la Figura 9.



Fig. 9. Hojuelas del fruto (elaboración propia).

Se pesan las hojuelas, colocándolas en un pedazo de papel previamente pesado sin las mismas y después con las mismas, como se muestra en la Figura 10, a), b) y c).



a)



b)



c)

Fig. 10. Pesado de las hojuelas a), b) y c) (elaboración propia).

Una vez pesadas empieza el proceso de deshidratación con el horno de microondas colocándolas en el plato giratorio como se muestra en la Figura 11.



Fig. 11. Método por microondas (elaboración propia).

Protocolo de medición de materia seca por método de microondas:

1. Preparación de la muestra: se retiran los extremos del fruto y se extrae la pulpa en forma de láminas delgadas.
2. Secado en microondas se coloca aproximadamente 10 gramos de pulpa en papel y se introducen en un horno de microondas en intervalos de 1-2 minutos hasta obtener un peso constante.
3. Cálculo de materia seca: se utiliza la fórmula:

$$\% \text{ Materia Seca} = \left(\frac{\text{Peso final de secar}}{\text{Peso fresco}} \right) \times 100$$

La validación empleó el método de secado por microondas como referencia, procedimiento estandarizado previamente por la empresa participante. Para cada muestra se extrajeron aproximadamente 10 gr de pulpa en láminas delgadas que se secaron en los intervalos establecidos. La correlación entre conductividad eléctrica y %MS se analizó mediante regresión lineal para cada calibre por separado. El análisis se basó en datos operativos de la empresa, considerando reducción en fruta destruida (2 toneladas anuales), optimización de mano de obra y disminución de costos logístico.

III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos fueron divergentes entre las dos etapas de muestreo, lo que revela la complejidad de la relación CE- % MS. En la primera etapa, con frutos homogéneos de calibre #84, se estableció una correlación positiva y estadísticamente significativa ($y = 0.0256x + 12.42$) con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.8564$. Este resultado inicial es prometedor y sugiere que la CE puede ser un buen predictor del %MS para un calibre específico bajo condiciones controladas. Sin embargo, el análisis de la base de datos de la segunda etapa, que incluía 220 muestras de diferentes calibres, mostro una realidad más compleja.

Mientras que para el calibre #70 se mantuvo una correlación fuerte ($R^2 = 0.8887$) para el calibre #60 la correlación fue moderada ($R^2 = 0.5464$) y para el calibre #48 prácticamente inexistente ($R^2 = 0.0014$).

Esta discrepancia puede atribuirse a la fisiología variable del fruto. Un análisis más profundo mediante un sistema de adquisición de datos con LabVIEW reveló que el aguacate presenta un comportamiento eléctrico similar a un capacitor, con una curva característica de carga y descarga al aplicar un voltaje. La velocidad de descarga mostro cierta relación él % MS en algunos frutos, pero la alta variabilidad inter-fruto, incluso del mismo calibre, imposibilito la estandarización de un modelo único Figura 12.

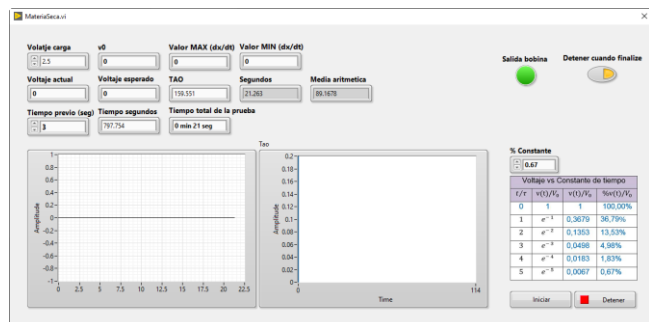


Fig. 12. Interfaz LabVIEW (elaboración propia).

Factores como la distribución heterogénea de aceites, la madurez no uniforme, la temperatura del fruto y las condiciones de cultivo (campo vs. refrigerado) influyen significativamente en las propiedades dieléctricas de la pulpa Figura 13 y 14.

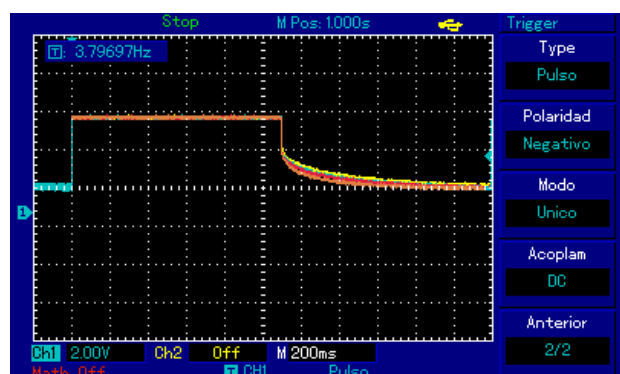


Fig. 13. Análisis de las muestras en conjunto para cada uno de los calibres muestreados osciloscopio (elaboración propia).

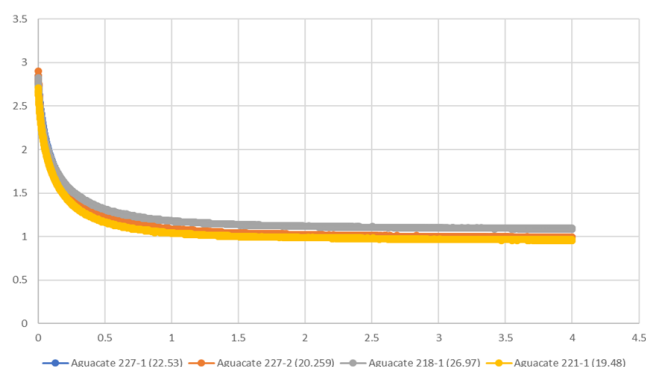


Fig. 14. Análisis de las muestras en conjunto para cada uno de los calibres muestreados LabVIEW (elaboración propia).

Estos hallazgos coinciden con las limitaciones reportadas para otras tecnologías no destructivas, donde la calibración específica por variedad y región es fundamental [1]. La portabilidad y bajo costo del prototipo son ventajas sustanciales, pero la dependencia del calibre es una limitación crítica que debe ser abordada.

IV. CONCLUSIONES

El prototipo desarrollado demuestra ser técnicamente viable y prometedor como una herramienta no destructiva de bajo costo para la estimación del porcentaje de materia seca en aguacate Hass. Los resultados son satisfactorios para calibres específicos

como el #70 y #84, donde se obtuvieron coeficientes de determinación R^2 cercanos a 0.88 y 0.85, respectivamente. No obstante, la alta variabilidad de los resultados entre los diferentes calibres.

Llegando hasta $R^2 = 0.0014$ en calibre #48 constituye una limitación crítica. Esto indica inequívocamente que la relación conductividad eléctrica - materia seca es afectada por factores fisiológicos y estructurales dependientes del tamaño y la variabilidad inter-fruto. Para que el prototipo logre una implementación confiable y estandarizada, se requiere el desarrollo de modelos de calibración específicos para cada calibre o la incorporación de sensores multivariantes adicionales que mitiguen el efecto de la heterogeneidad del fruto.

REFERENCIAS

- [1] AOAC Internacional. "AOAC: Official Methods of Analysis, 1980 : AOAC International : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive". Internet Archive. Accedido el 12 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible: <https://archive.org/details/gov.law.aoc.methods.1980>
- [2] K. U. Flores Rojas, "Determinación no destructiva de parámetros de calidad de frutas y hortalizas mediante espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano", Doctorado, Univ. Cordoba, Colombia, 2009.
- [3] J. Osuna García, P. Toivonen, S. Salazar García, R. Goenaga y J. A. Herrera González, "Modelo no destructivo para determinar madurez de cosecha en aguacate 'HASS'", *Mem. Del V Congr. Latinoam. Del Aguacate*, vol. 1, n.º 1, pp. 420–428, septiembre de 2017.
- [4] Gobierno de México, "Productos Alimenticios No Industrializados Para Uso Humano - Fruta Fresca - Aguacate Hass (Persea Americana Mill)", 7 de marzo de 2017, NMX-FF-016-SCFI-2016, México, https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5468709&fecha=06/01/2017#gsc.tab=0
- [5] Grupo Aguacatero Cerritos, "Anexo II, Procedimiento de Atención de Exportaciones de Aguacate Mexicano a Japón. Manual para la Toma de Muestras de Frutos de Aguacate para el Análisis de Residuos de Plaguicidas.", julio de 2016, Anexo II, Procedimiento de Atención de Exportaciones de Aguacate Mexicano a Japón., México.
- [6] Grupo Aguacatero Cerritos, "Manual procedimiento de muestreo de aguacate para determinación de materia seca", julio de 2016, Procedimiento de muestreo de aguacate para determinación de materia seca, México.
- [7] M. Pérez Cabezas, Web Editor LWE del Logo! de Siemens, 2024.

[8] La Finca de Hoy. Proceso de materia seca en el aguacate hass. (13 de junio de 2019). Accedido el 13 de noviembre de 2025. [Video en línea]. Disponible: https://www.youtube.com/watch?v=PYI_qbIHbts

Biografía Autores

Rodríguez Morales Moisés Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez – Unidad Académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: moises.rodriguez@tamazula.tecmm.edu.mx Maestría en Ingeniería en Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán. Docente del departamento de Ingeniería en Electromecánica.

Bañuelos Amezcua Ulises Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez – Unidad Académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: ulises.banuelos@tamazula.tecmm.edu.mx Maestría en Ingeniería en Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán. Docente del departamento de Ingeniería en Electromecánica.

Venegas Moreno Juan José Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez – Unidad Académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: jose.venegas@tamazula.tecmm.edu.mx Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica egresado del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN – Unidad Guadalajara. Docente del departamento de Ingeniería en Electromecánica.

Hernández Martínez José de Jesús Docente del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez – Unidad Académica Tamazula, Jalisco, C.P 49650 email: jose.hernandez@tamazula.tecmm.edu.mx Maestría en Ingeniería en Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán. Docente del departamento de Ingeniería Electromecánica.

González Vázquez Luis Gabriel Docente del Docente del Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Ciudad Guzmán, Jalisco, C.P 49100 email: luis.gv@cdguzman.tecnm.mx Maestría en Enseñanza de las Ciencias egresado del Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán. Docente del departamento de Ciencias básicas.