

Propiedades dieléctricas de maíz mexicano

Richard Torrealba Meléndez, María Elena Sosa Morales, José Luis Olvera Cervantes, Alonso Corona Chávez
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Santa María Tonanzintla, Puebla, México
r.torrealbam@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se determinaron y analizaron las propiedades dieléctricas de tres variedades de maíz mexicano (blanco, azul y amarillo) con diferente humedad en el rango de banda ultra ancha (Ultra- Wide Band, UWB), de 3 a 10.5 GHz, utilizando el método de transmisión en espacio libre. La permitividad y conductividad eléctrica del maíz fueron más altas para las muestras conteniendo mayor humedad. La constante dieléctrica permaneció sin cambio dentro del rango de frecuencia estudiada, mientras que el factor de pérdida de la misma disminuyó. Las propiedades dieléctricas incrementaron con el aumento de temperatura. Mediante un diagrama de Argand, se analizó el comportamiento de las propiedades dieléctricas del maíz con respecto a los incrementos de temperatura y el contenido de humedad. El método propuesto podría implementarse para determinar la humedad del maíz dentro de los límites establecidos por la Norma Mexicana.

PALABRAS CLAVE

Propiedades dieléctricas, maíz, conductividad eléctrica.

ABSTRACT

Dielectric properties of three varieties of Mexican corn (white, blue and yellow) with different moisture content were determined and analyzed through Ultra-wideband (UWB) frequencies (3-10.6 GHz), using a free-space transmission method. Permittivity and electrical conductivity of corn were shown higher for increased moisture content. The dielectric constant remained unchanged within the range of the studied frequency, while its loss factor decreased. Dielectric properties increased with the rise of temperature. By means of an Argand diagram, the behavior of the corn's dielectric properties was analyzed in relation to the rising of temperature and its moisture contents. The proposed method could be applied to determine moisture content of corn according to the limits established by Mexican Standards.

KEYWORDS

Dielectric properties, corn, electrical conductivity.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays L.*) es un producto milenario cuyo cultivo se remonta a la época prehispánica y sigue siendo el cultivo de mayor presencia en México. Desde diferentes puntos de vista; alimentario, ganadero, económico y social, es uno de los productos más importantes del país.¹

Adicionalmente, México es el país con más diversidad de maíces, concentrando especies nativas (criollas), mejoradas, silvestres (*teozintle*) y otro conjunto de gramíneas relacionadas que son especies del género *Tripsacum*, conocidos como *maicillos*.²

Diferentes variedades de maíz mexicano han sido caracterizadas en cuanto a su composición química y calorimetría³, y a su contenido de almidón,^{4,5} pero no han sido caracterizadas desde su punto de vista dieléctrico. Existen reportes de propiedades dieléctricas de maíces en el extranjero, donde han encontrado su relación con el contenido de humedad y densidad.^{6,7}

Las propiedades dieléctricas determinan el acoplamiento y la distribución de la energía electromagnética durante la exposición de un material a microondas u ondas de radiofrecuencia. Las propiedades dieléctricas se ven afectadas por el contenido de humedad, la temperatura y la frecuencia.⁸ La permitividad (ϵ) es un valor complejo que describe las propiedades dieléctricas: $\epsilon = \epsilon' - j \epsilon''$, donde ϵ' es la constante dieléctrica, que determina la capacidad del material de almacenar energía, y ϵ'' es el factor de pérdida, que indica la capacidad de disipar energía en forma de calor como respuesta al campo eléctrico aplicado.

La Norma Mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002 marca que el maíz blanco debe tener 14% de humedad para permitir el manejo, la conservación y el almacenamiento adecuado del grano, así como una densidad mínima de 74 kg/hl (equivalente a 0.74 g/cm³).⁹ La constante dieléctrica puede relacionarse a la humedad y conocer su valor de manera rápida en granos de maíz de acuerdo a su variedad o pigmentación.

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar y analizar las propiedades dieléctricas de tres variedades de maíz mexicano en el rango de banda ultra ancha (UWB) que comprende de 3 a 10.5 GHz¹⁰.

MATERIALES Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

Variedades de maíz

Se utilizó maíz mexicano (*Zea mays L.*), en sus variedades: chato blanco, criollo azul y criollo amarillo adquiridos en Tonanzintla, Puebla (figura 1). Una parte de la muestra fue rociada con agua purificada para incrementar su contenido de humedad, manteniéndola en frascos cerrados durante 18 horas a temperatura ambiente. Las muestras humedecidas artificialmente simulan condiciones de mal almacenamiento o malas condiciones de secado de la muestra, las cuales estarían fuera de norma.

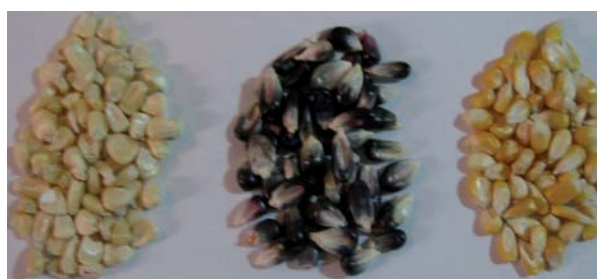


Fig. 1. Muestras de maíz mexicano estudiadas: maíz chato blanco (izquierda), maíz criollo azul (centro) y maíz criollo amarillo.

Determinación del contenido de humedad y de densidad del maíz

La humedad se determinó por duplicado en estufa a 100 °C durante 24 h.¹¹ La densidad del maíz (ρ) fue calculada por la relación $\rho = m/V$, donde m es la masa (g) y V el volumen ocupado por un lote de maíz (cm³), se considera la densidad aparente. Para ello, se colocaron granos de maíz en una probeta de 500 mL ($V=500 \text{ mL}=500 \text{ cm}^3$) y se tomó el peso de los granos contenidos (g),¹² la determinación se hizo por triplicado para cada maíz y para cada contenido de humedad.

Medición de las propiedades dieléctricas de maíz

La permitividad fue obtenida experimentalmente usando el método de transmisión en espacio libre. Este método consiste en obtener la función de transferencia de inserción mediante dos mediciones, las cuales se realizan en el dominio de la frecuencia en la banda ultra ancha (3.1 – 10.6 GHz) usando un analizador vectorial de redes (LeCroy, Estados

Unidos). Estas mediciones se efectuaron de la siguiente manera: primero se coloca un contenedor de baja permitividad (cartón), de 25 cm x 11 cm x 5 cm, en medio de dos antenas de apertura tipo Vivaldi¹³ que operan en el rango de banda ultra ancha; una antena funciona como transmisor y la otra como receptor; la distancia de separación entre las antenas es de 20 cm (figura 2). Posteriormente se mide el coeficiente de transmisión con el contenedor vacío y finalmente se mide el coeficiente de transmisión con el contenedor lleno de la muestra de maíz (entre 1.1 y 1.3 Kg).

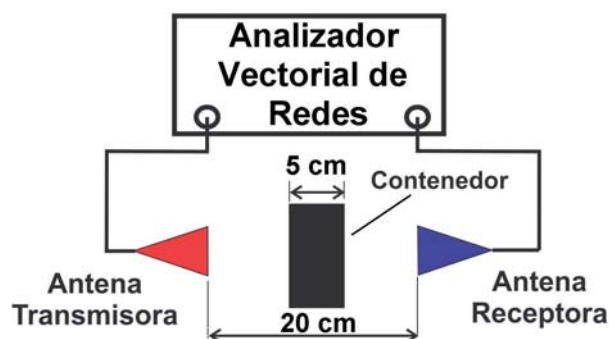


Fig. 2. Esquema experimental para el método de transmisión en espacio libre.

Las mediciones se llevaron a cabo en una cámara anecoica, la cual provee un ambiente de baja reflexión para una correcta medición. La función de transferencia de inserción se obtiene a través de la siguiente ecuación.¹⁴

$$H(f) = \frac{S_{21}(f)}{S_{21}^{cv}(f)} \quad (1)$$

donde S_{21} es el coeficiente de reflexión medido con el contenedor lleno de maíz, S_{21}^{cv} es el coeficiente de reflexión medido con el contenedor vacío, f es la frecuencia (Hz).

Una vez obtenida la función de transferencia de inserción, la permitividad (ϵ') y el factor de pérdida (ϵ'') son obtenidas para materiales de baja pérdida ($\epsilon'' \ll \epsilon'$) usando las siguientes ecuaciones.¹⁵

$$\epsilon' = \left[1 + \frac{\Delta\phi \lambda_0}{360d} \right]^2 \quad (2)$$

$$\epsilon'' \approx \left(\frac{|\Delta A| \lambda_0 \sqrt{\epsilon'}}{8.686\pi d} \right) \quad (3)$$

donde $\Delta\phi$ es la fase de la función de inserción de transferencia $H(f)$ (grados), ΔA es la atenuación en

transmisión debida a la presencia de la muestra (dB), λ_0 es la longitud de onda en el espacio libre (m) y d es el espesor de la muestra (m)

La constante dieléctrica (ϵ') y el factor de pérdida (ϵ''), de las tres variedades de maíz que se usaron en este trabajo, fueron obtenidas para un rango de frecuencia de 4.5 a 11 GHz, para las siguientes temperaturas: 24, 36 y 52 °C. Para realizar la medición a diferentes temperaturas, la caja con la muestra fue introducida en un horno de microondas (1650 W, LG, México) por algunos segundos, dependiendo de la temperatura objetivo. Después del calentamiento, la muestra fue homogeneizada y la temperatura verificada con un termopar. Se tomaron 5 réplicas para cada medición. La determinación de las propiedades dieléctricas a altas temperaturas es importante para conocer el comportamiento cuando se desee calentar las muestras con otros fines, como eliminación de plagas o mohos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de humedad y densidad de las muestras de maíz

Para cada tipo de maíz con su correspondiente contenido de humedad, se obtuvo el valor de la densidad. La densidad del maíz disminuyó con el contenido de humedad, según se muestra en la Tabla 1. La densidad aparente del maíz blanco fue mayor que la del maíz azul y el amarillo, debido a que el grano blanco es de menor tamaño. Los resultados de 0.679-0.795 g/cm³ para humedades entre 8 y 17% coinciden con lo reportado para maíz amarillo de Illinois, con valores de 0.72 a 0.79 g/cm³ con contenido de humedad entre 10.2 y 17.5%.⁶ Los granos de maíz sin humedecer cumplieron con la

Tabla 1. Contenido de humedad y densidad de las tres variedades de maíz estudiadas. Las muestras marcadas (*) fueron humedecidas.

Variedad	Humedad (%b.h.)	Densidad (g/cm ³)
Blanco	8.0 ± 0.07	0.795 ± 0.003
	14.5 ± 0.03 *	0.740 ± 0.001
Azul	9.3 ± 0.14	0.716 ± 0.004
	17.0 ± 0.05 *	0.679 ± 0.001
Amarillo	7.70 ± 0.15	0.764 ± 0.004
	15.5 ± 0.11 *	0.745 ± 0.003

Norma Mexicana,⁹ ya que tuvieron contenidos de humedad menores al 14% (blanco 8%, azul 9.3% y amarillo 7.7%). También cumplen con la humedad recomendada por el Codex Alimentarius, en donde se indica una humedad máxima del 15.5%.¹⁶

Efecto de la frecuencia, temperatura y porcentaje de humedad

La constante dieléctrica y el factor de pérdida, se obtuvieron mediante las ecuaciones (2) y (3) respectivamente. La figura 3 muestra el efecto de la frecuencia sobre ϵ' para las temperaturas de 24, 34 y 56 °C, con sus correspondientes contenidos de humedad para cada una de las variedades de maíz. La constante dieléctrica permaneció prácticamente sin cambio, para las tres variedades, en el rango de frecuencia estudiado (figura 3). Se puede observar que la permitividad para el maíz amarillo a la temperatura de 24 °C (figura 3c) es mayor que la determinada para las otras variedades (figuras 3a y b), lo que indica que el tipo de maíz sí tiene efecto sobre la permitividad. Por otro lado, ϵ'' (figura 4)

permanece casi constante en el rango de frecuencia de 5 a 9 GHz a la temperatura de 24 °C, pero decrece para todo el rango de frecuencia estudiado para las temperaturas de 34 y 56 °C. Por otro lado, ϵ'' (figura 4) permanece casi constante en el rango de frecuencia de 5 a 9 GHz a las temperaturas de 24 y 36 °C, pero decrece para todo el rango de frecuencia estudiado para la temperatura de 56 °C. Tanto los valores de ϵ' y ϵ'' se incrementan a mayores temperaturas, esto coincide con lo reportado para las propiedades dieléctricas del maíz amarillo.^{6,7}

El comportamiento de la constante dieléctrica permitiría establecer un criterio para determinar si una muestra de maíz bajo inspección se encuentra dentro de los niveles de porcentaje de humedad que establece la Norma Mexicana.

El efecto de la temperatura sobre ϵ' y ϵ'' es presentado en las figuras 5 y 6. Para el caso de la permitividad (figura 5) se observa un comportamiento creciente con respecto al incremento de la temperatura para los dos contenidos de humedad de las tres variedades de maíz. Mientras que para el factor de pérdida

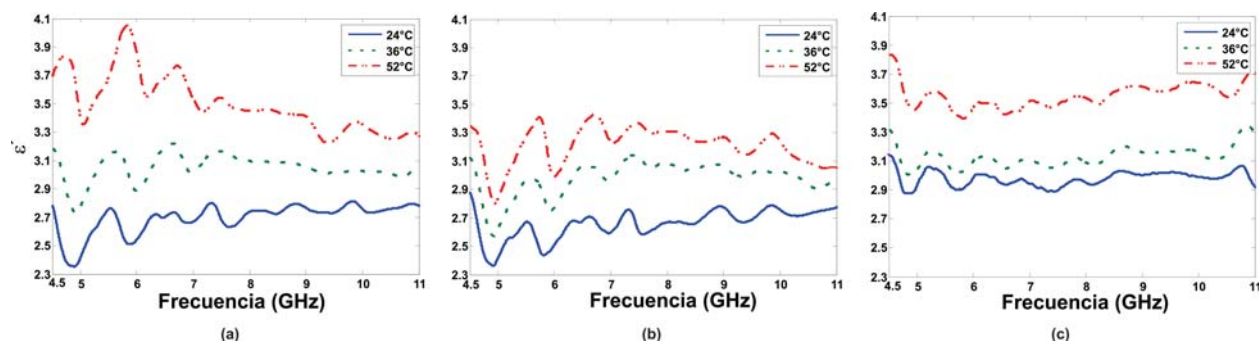


Figura 3. Constante dieléctrica (ϵ') de maíz (a) blanco con 8% de humedad, (b) azul con 9.3% de humedad y (c) amarillo con 7.7% de humedad, a diferentes temperaturas con respecto a la frecuencia.

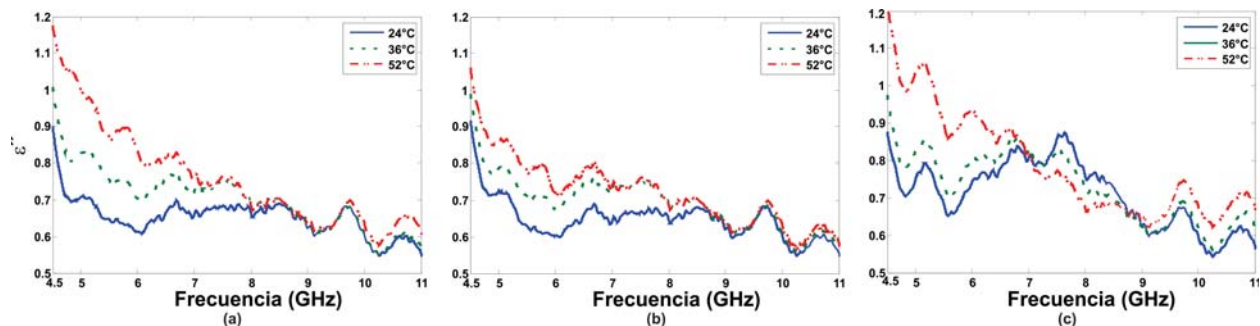


Figura 4. Factor de pérdida (ϵ'') de maíz (a) blanco con 8% de humedad, (b) azul con 9.3% de humedad y (c) amarillo con 7.7% de humedad, a diferentes temperaturas.

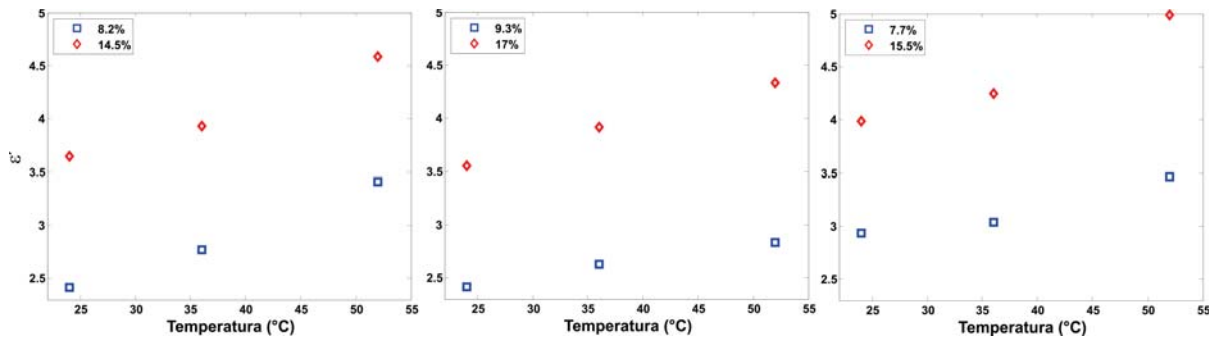


Fig. 5. Constante dieléctrica (ϵ') de maíz (a) blanco, (b) azul y (c) amarillo, a 5GHz con respecto al incremento de la temperatura.

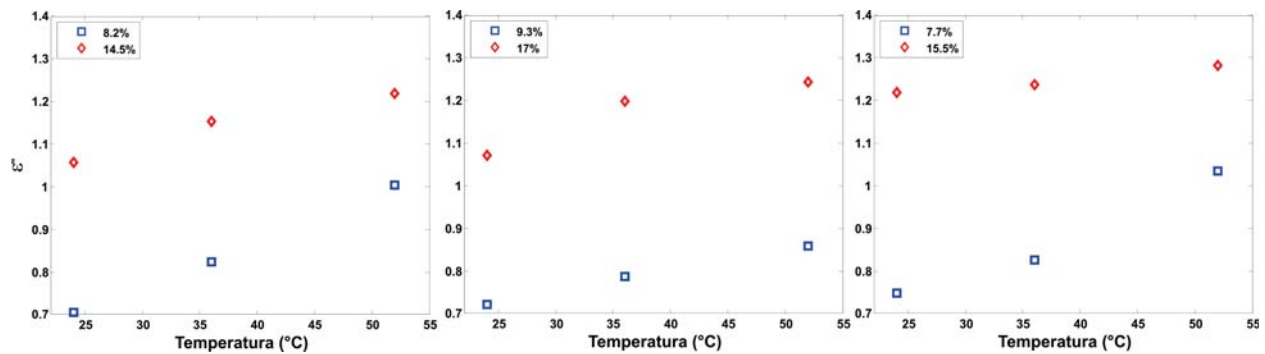


Figura. 6. Factor de pérdida (ϵ'') de maíz (a) blanco, (b) azul y (c) amarillo, a 5 GHz con respecto al incremento de la temperatura.

(figura 6) también se presenta un crecimiento con respecto a la temperatura, para contenidos de humedad altos ϵ'' permanece constante principalmente en las temperaturas de 36 y 52 °C. El incremento de ϵ' y ϵ'' está relacionado a la cantidad de agua asociada a los granos y en general a materiales sólidos.¹⁷ Al aumentar la temperatura, se asume que los dipolos de las moléculas de agua tienen mayor libertad para girar y por lo tanto tiende a alinearse con el campo eléctrico. En este caso, la agitación térmica incrementa la contribución de las moléculas de agua en la polarización total del material. Este efecto en las moléculas de agua asociada al material produce el incremento en la permitividad y el factor de pérdida.¹⁸

Las rectas presentan una pendiente positiva; para el caso de ϵ' , la pendiente de esta recta se incrementa para altos contenidos de humedad, mientras que para el factor de pérdida, la pendiente disminuye. La tabla II muestra los valores de conductividad eléctrica para los tipos de maíz estudiados. Los valores oscilan entre 0.20 y 0.34 para los maíces a temperatura ambiente a 5 GHz, la conductividad incrementó

con la frecuencia, estando en el rango de 0.33 a 0.45 para la frecuencia de 10 GHz. La conductividad también incrementó con el aumento de temperatura en la muestra y con el aumento en el contenido de humedad. La conductividad eléctrica del maíz es muy baja debido a su bajo contenido de humedad, y coincide con los valores reportados para otros granos y semillas, como chícharo, lenteja, soya¹⁹ y frijol de diferentes variedades.²⁰ Una forma muy útil de analizar los efectos producidos por el incremento en temperatura, porcentaje de humedad y densidad sobre propiedades dieléctricas del maíz, es usando la representación de la permitividad en un plano complejo. Esta representación es conocida también como diagrama Argand. En la figura 7 se puede observar el diagrama generado para el estudio de las propiedades dieléctricas del maíz, considerando las muestras de las tres variedades con diferentes temperaturas y porcentajes de humedad. Para este diagrama, tanto la constante dieléctrica como el factor de pérdida fueron divididos entre la densidad de las muestras, con el fin de integrar la contribución del aire en la muestra a granel. El diagrama fue

Tabla II. Conductividad eléctrica (S/m) de maíz blanco, azul y amarillo a diferentes temperaturas y humedades para algunas frecuencias. Las muestras marcadas (*) fueron humedecidas.

		Maíz Blanco		Maíz Azul		Maíz Amarillo	
	Temperatura	8%	14.50% *	9.30%	17% *	7.70%	15.50% *
5 GHz	24 °C	0.20	0.29	0.20	0.30	0.21	0.34
	36 °C	0.23	0.32	0.22	0.33	0.23	0.34
	52 °C	0.28	0.34	0.24	0.35	0.29	0.36
10 GHz	24 °C	0.34	0.45	0.34	0.39	0.33	0.42
	36 °C	0.34	0.48	0.34	0.47	0.34	0.44
	52 °C	0.35	0.50	0.35	0.42	0.38	0.45

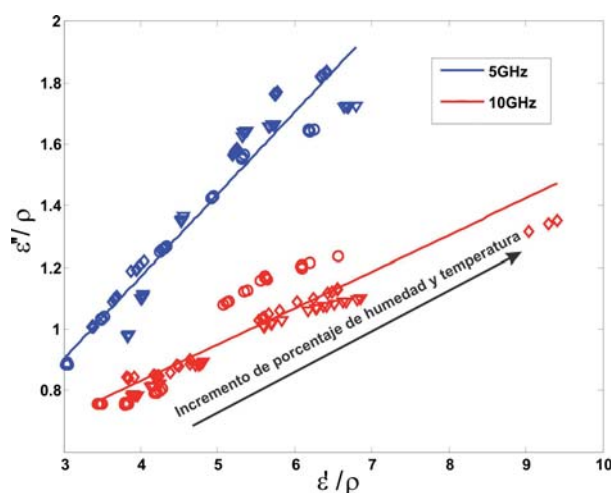


Fig. 7. Diagrama de Argand para las tres variedades de maíz a las frecuencias de 5 GHz y 10 GHz. (□-maíz blanco □- maíz negro y □- maíz amarillo)

generado para dos frecuencias: 5 GHz y 10 GHz. Para ambos casos, se observa un comportamiento lineal y creciente con el incremento de temperatura y del contenido de humedad. En este diagrama, se observa nuevamente que el parámetro más sensible a los cambios de temperatura y humedad es la constante dieléctrica para ambas frecuencias. Se observa también que la pendiente de la recta disminuyó cuando se incrementó la frecuencia, debido a que el factor de pérdida en frecuencias altas, no sufre cambios significativos con el incremento de la temperatura y el porcentaje de humedad. Este comportamiento coincide con lo reportado para las propiedades dieléctricas de harinas de garbanzo, chícharo, soya y lenteja a frecuencias de 918 a 1800 MHz.¹⁹

Con los resultados encontrados, se ha determinado que la constante dieléctrica es el parámetro más

sensible, por lo que se puede establecer que la constante dieléctrica sea el primer indicador sobre contenidos de humedad en las muestras de maíz. La constante dieléctrica en las tres variedades de maíz estudiadas debe ser menor a 3.0 a temperatura ambiente (24°C) para garantizar que el grano cumpla con el contenido de humedad establecido por la Norma Mexicana 034 (14% de humedad para maíz blanco), o menor de 3.5 para cumplir con lo indicado por el Codex Alimentarius (15.5% máximo para cualquier tipo de maíz).

CONCLUSIONES

El método de transmisión en el espacio libre es una excelente técnica para obtener las propiedades dieléctricas del maíz mexicano (blanco, azul y amarillo); el método es sensible a los incrementos de temperatura y porcentajes de humedad. Las propiedades dieléctricas del maíz también dependen de la frecuencia. Mediante el diagrama de Argand se concluye que para las tres variedades de maíz se tiene una tendencia similar en sus propiedades dieléctricas. Finalmente, en este trabajo se propone como aplicación potencial determinar si el maíz tiene la humedad establecida por la Norma Mexicana a través del valor de la constante dieléctrica en el rango de banda ultra ancha, con recomendación en el uso a 5 GHz y a 24 °C.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT por la beca para estudios de Doctorado de R. Torrealba Meléndez, así como el apoyo a través de los proyectos 168990 y 180061.

REFERENCIAS

1. SIAP. 2008. Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/>
2. Biodiversidad Mexicana. 2012. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Maíces. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/ usos/maices/maiz.html>
3. Méndez Montealvo G., Solorza Fera J., Velázquez del Valle M., Gómez Montiel N., Paredes López O. y Bello Pérez, L.A. 2005. Composición química y caracterización calorimétrica de híbridos y variedades de maíz cultivadas en México. *Agrociencia* 39(3): 267-274.
4. Agama-Acevedo E., Barba de la Rosa A. P., Méndez-Montalvo M. G. y Bello-Pérez L. A. 2008. Physicochemical and biochemical characterization of starch granules isolated of pigmented maize hybrids. *Starch-Stärke* 60: 433-441.
5. Agama-Acevedo E., Salinas-Moreno Y., Pacheco-Vargas G. y Bello-Pérez L. A. 2011. Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: morfología del almidón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(3): 317-329.
6. Trabelsi S., Kraszewski A. y Nelson S. O. 1997. Microwave dielectric properties of shelled yellow-dent field corn. *Journal of Microwave Power Electromagnetic Energy* 32(3): 188-194.
7. Trabelsi, S., Kraszewski A. y Nelson S. O. 1998. Nondestructive microwave characterization for determining the bulk density and moisture content of shelled corn. *Measurement Science and Technology* 9: 1548-1556.
8. Sosa-Morales M. E., Valerio-Junco L. López-Malo A. y García H. S.. 2010. Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications. *LWT-Food Science and Technology* 43: 1169-1179.
9. NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano – Cereales – Parte I: Maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado – Especificaciones y métodos de prueba. Secretaría de Economía, México. Disponible en: <http://200.77.231.100/work/normas/nmx/2002/nmx-ff-034-1-scfi-2002.pdf>
10. Kataria T. K., Murthy D. V. B, y Corona-Chavez A. 2009. Compact Ultra Wideband Antenna with Filtering structure using Metamaterial and Substrate Integrated Circuit Technologies. *IEEE International Workshop on Antenna Technology. "Small Antennas and Novel Metamaterials"* IWAT, Los Angeles, CA, 2-4 Mar, 2009.
11. AOAC. 2000. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Washington D.C.
12. Mohsenin, N.N. 1986. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach Science Publishers, Nueva York.
13. Colin-Beltran, E., Corona-Chavez, A., Itoh, T. y Mendoza-Torres E. 2013. Circular Aperture Slot Antenna with Common-Mode Rejection Filter Based on Defected Ground Structures for Broad Band, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.61, no.5, pp.2425,2431, Mayo 2013.
14. Muqaibel, A.H. y Safaai-Jazi, A. 2003. A new formulation for characterization of materials based on measured insertion transfer function, *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* , 51(8):1946-1951.
15. El Sabbagh M.A., O.M. Ramahi, S. Trabelsi, S.O. Nelson, L. Khan, 2003. Use of microstrip patch antennas in grain and pulverized materials permittivity measurement. *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003. IEEE* , 4: 22-27.
16. Codex Alimentarius. Norma del Codex para el maíz. Codex Stan 153-1985. Disponible en: www.codexalimentarius.org/input/download/standards/.../CXS_153s.pdf
17. Frohlich, H. *Theory of Dielectrics* 1958. Oxford University Press, New York, NY.
18. Kraszewski, A.W.; Trabelsi, S. y Nelson, S.O., "Grain permittivity measurements in free space,"

25th European Microwave Conference, 1995.,
vol.2, , pp.840-844, 4 Sept. 1995

19. Guo, W., S. Wang, G. Tiwari, J.A. Johnson, y J.
Tang. 2010. Temperature and moisture dependent
dielectric properties of legumes associated with
dielectric heating. LWT – Food Science and

Technology 43: 193-201.

20. Torrelba-Meléndez, R., Olvera-Cervantes, J.L.,
Corona-Chávez, A., Soto-Reyes, N. y Sosa-
Morales, M.E. 2014. Dielectric properties of
beans at Ultra-Wide Band frequencies. Proc. of
IMPI-48 Microwave Power Symposium.



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Coordinación de Ingeniería Mecánica
Pedro de Alba s/n, Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, NL
Laboratorios del edificio 5, primer piso

Teléfono: 83294020 ext. 5811 o 5818
div.ing.mecanica.fime@gmail.com

Fecha del evento: 4 de septiembre de 2014