

Evaluación de un método para la determinación de humedad en un medio poroso empleando ultrasonido*

Luis Leonardo Sáenz Cruz**
Édgar Gómez Acero***

Evaluation of a method to measure water content in porous media by employing ultrasound

RESUMEN

Se desarrolló un método que emplea ultrasonido con una frecuencia de 40 KHz para la toma de medidas de contenido de humedad en medios porosos, tales como granos biológicos y suelos agrícolas, en forma no destructiva y en tiempo real. El método se basa en el empleo de un sistema de transductores de ultrasonido de tipo piezoeléctrico, conformado por transductor emisor y transductor receptor enfrentados, ubicados en el interior del medio poroso con una separación de 10 cm. El método se evaluó en un medio inerte, arena gruesa, y un medio biológico, arroz paddy variedad Fedearroz 50, con el objetivo de estudiar la respuesta del sistema en dos medios con características distintas y diferentes capacidades de retención de humedad. Se hizo énfasis en los aspectos ingenieriles del método para la propagación acústica en medios porosos, en el desarrollo de circuitos electrónicos, de sistemas de adquisición de datos y de *software* en C++ OOP y Matlab, para la administración de información. Los resultados mostraron un incremento monótonico de la respuesta en milivoltios del sistema de transductores con la disminución del contenido de humedad (%), ajustándose modelos parabólicos, para arena, con $R^2 = 0,96$, y para arroz, con $R^2 = 0,98$. Por otro lado, gracias a la investigación se pudieron observar perturbaciones en la respuesta del sistema de transductores de ultrasonido producidas por el aire de secado.

PALABRAS CLAVES:

contenido de humedad, ultrasonido, medios porosos, transductores, tiempo real, forma no destructiva, emisor, receptor, piezoeléctrico, arroz, arena, modelo, Matlab, circuitos, adquisición de datos.

ABSTRACT

A method to measure water content in porous media, such as soils and grains, was developed as a real time nondestructive test. The method was based on piezoelectric ultrasonic transducers as a sensor system. Transmitters and receivers was developed to administrate the sensors system and ultrasonic signal. Transmitters and receivers are placed facing each other and located inside the porous media 10 cm apart. The method was evaluated in two porous media, namely a column 30 cm coarse sand and a paddy rice variety Fedearroz 50, in order to evaluate the sensors system performance in two different porous media with different water holder capacity. Tools were developed for data acquisition, capacity of 16 analog signal, 12 bits resolution. Electronic circuits, C++ OOP programming and Matlab were used. The results showed a monotonically increment of millivolts as a response of the transducer as the water content was decreasing. Graphical relation of water content vs transducers response in millivolts was obtained and a appropriate model (polynomial second degree, $R^2 = 0.96$ for sand and $R^2 = 0.98$ for rice) was fitted. On the other hand, the research allowed observations about perturbations of the sensor system response produced by drying air.

KEY WORDS:

Water content, ultrasonic, porous media, transducers, real time, nondestructive test, transmitter, receiver, piezoelectric, rice, sand, model, Matlab, circuits, data acquisition.

* Trabajo de grado realizado como requisito para obtener el título de ingeniero agrícola. Desarrollado en los laboratorios de Ingeniería Agrícola. Trabajo meritorio, presentado dentro de las actividades principales del Congreso CLIA 2002, La Habana, Cuba (15 de julio de 2002). Trabajo presentado a la comunidad de investigadores de Cenicafé en Chinchiná, Caldas (12 de julio de 2002).

** Ingeniero agrícola.

*** Ingeniero agrícola. Ingeniero electrónico M.sc. Profesor de la Universidad Nacional de Colombia.

INTRODUCCIÓN

La determinación del contenido de humedad es una operación indispensable para establecer el comportamiento de un medio poroso higroscópico cuando se somete a procesos de ganancia o pérdida de humedad. En el área de ingeniería de poscosecha, el contenido de humedad es una de las características más importantes que determinan la calidad de los granos biológicos en procesos de cosecha, secado y almacenamiento, y en suelos agrícolas, actualmente, es el parámetro fundamental para controlar y administrar los procesos de irrigación de cultivos. Por otro lado, es un factor fundamental para determinar el precio de venta de los granos y es la variable más importante que se debe medir dentro del control eficiente del proceso de secado.

Existen diferentes métodos para determinar el contenido de humedad en medios porosos, basados en principios físicos, químicos, eléctricos, entre otros, y su implementación se restringe a aplicaciones específicas. Los métodos estándar son gravimétricos, en los cuales las muestras de material de volumen determinado se someten a procesos de sobresecado con altas temperaturas y durante períodos de tiempo específicos¹. El largo tiempo que consumen estos métodos ha hecho indispensable el desarrollo de otros procedimientos de determinación más rápida. Métodos basados en las propiedades eléctricas de los materiales han sido desarrollados; Brigs (1908), citado por Lawrence (1998), reporta una relación logarítmica entre la resistencia eléctrica de muestras de trigo y su contenido de humedad². Posteriormente, se desarrollaron medidores de humedad basados en la correlación con propiedades dieléctricas de medios porosos para realizar la determinación rápida en muestras estáticas extraídas de la masa de material³. Tales instrumentos se han empleado en los últimos 50 años para establecer la humedad en procesos de secado, almacenamiento y transporte de granos, entre otros.

Aunque en el caso de los granos, los métodos anteriores son suficientes para establecer el contenido de humedad en muestras estáticas, éstos no son adecuados para realizar mediciones en aplicaciones en línea o en tiempo real para implementarlos en sistemas de control automático, debido a que fluctuaciones en la densidad del material causan grandes errores en las medidas⁴.

ANTECEDENTES

En esta dirección, la investigación orientada a la medición del contenido de humedad de medios porosos como los granos, en tiempo real, ha evolucionado al desarrollo de procedimientos de sensado independientes de la densidad para utilizarlos en aplicaciones en línea. Aquí, microondas con frecuencias entre 11 GHz y 20 GHz han sido una de las técnicas más recientemente empleadas, por medio de la correlación de propiedades dieléctricas de granos con el contenido de humedad (Nelson, Lawrence y Kraszewski, 1998).

En el campo de los ultrasonidos, Carbo (1989) midió propiedades acústicas, velocidad de propagación y atenuación de energía, en una muestra de arena con diferentes porcentajes de agua en los poros, pasando del medio completamente saturado, al medio completamente seco. Posteriormente Kasap 1994, evaluó la humedad de un disco cerámico con una porosidad del 66%, por medio de un método acústico, como una medida indirecta de la succión mátrica en suelos.

Sin embargo, a pesar de los anteriores trabajos, el empleo de ultrasonido para la determinación del contenido de humedad en granos o suelos, en tiempo real, no es una técnica de la cual se tenga mucha información.

En este artículo se reporta el desarrollo de un método que emplea ultrasonido con una frecuencia de 40 KHz, para realizar medidas de contenido de humedad volumétrico en dos medios porosos (arena gruesa y arroz paddy variedad Fedearroz 50) en forma no destructiva y en tiempo real, como un primer paso en la investigación con ultrasonido, que permita evolucionar al desarrollo de medidores de humedad para implementarlos en aplicaciones en línea.

1. Asae Standard, Moisture measurement-grain and seeds. Moisture content (ASTM D 22 16) in soils, 1996.
 2. A.W. Kraszewski, S.O. Nelson and S. Trabelsi, Advances in sensing grain moisture content by microwave measurements. *Transactions of the Asae*, Vol. 41(2), 1998, pp. 483-487.
 3. S.O. Nelson, Electrical properties of agricultural products a critical review. *Transactions of the Asae*, 16 (2), 1973, pp. 384-400.

4. K.C. Lawrence, W.R. Windham and S.O. Nelson, Sensing wheat moisture content independent of density. *Transactions of the Asae*, Vol. 41(3), 1998, p. 693.

En el desarrollo del método se hizo énfasis en aspectos físicos de la propagación acústica en medios porosos, para el adecuado diseño y desarrollo del sistema de sensado y para el acondicionamiento y administración de la débil señal ultrasónica. Por otro lado, la investigación requirió el desarrollo de un secador prototipo, para reducir la humedad de las muestras con aire caliente y de un sistema de monitoreo de la respuesta en voltaje del

sistema de sensado con respecto a la variación de humedad del medio poroso en tiempo real, utilizando el PC y programación en C++ OOP y Matlab. (figura 1).

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

La técnica empleada se basa en la propagación de ondas acústicas a través del medio poroso utilizando un sistema de transductores de ultrasonido. La señal acústica se propaga por medio de un transductor emisor,

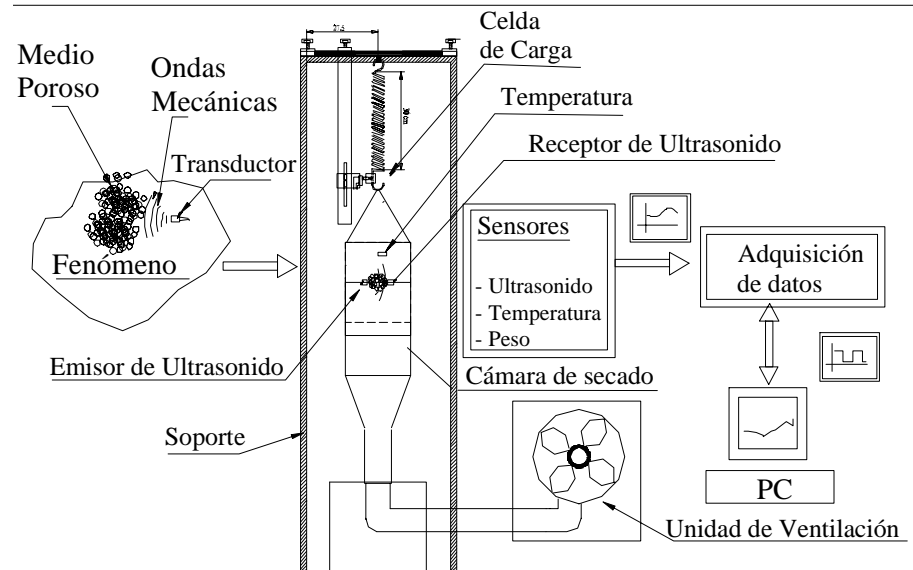


Figura 1. Esquema del dispositivo experimental empleado en la evaluación del método.

acoplado apropiadamente al material, con un voltaje de excitación de 20 V Rms; la magnitud de la señal transmitida excita el transductor receptor, entregando una respuesta en voltaje que se correlaciona con el contenido de humedad (figura 2).

El procedimiento se realizó en un prototipo de secador con una columna de material de 30 cm. El material se sometió a secado en forma continua, empleando aire caliente con un flujo de 4,25 m³/min, temperatura de 45 °C y humedad relativa del 10% (figura 1).

El sistema de transductores de ultrasonido se conforma por transductores piezoeléctricos, emisor y receptor independientes,

con frecuencia de resonancia de 40 kHz, ancho de banda de 4 kHz, máxima presión de sonido de 112 dB (con alimentación a 20 V Rms), sensibilidad de -45 dB y operación estable entre -20 y 60 °C, a presión ambiente. Los transductores dentro del sistema se ubican enfrentados en el interior del material, separados 10 cm, haciendo uso de la

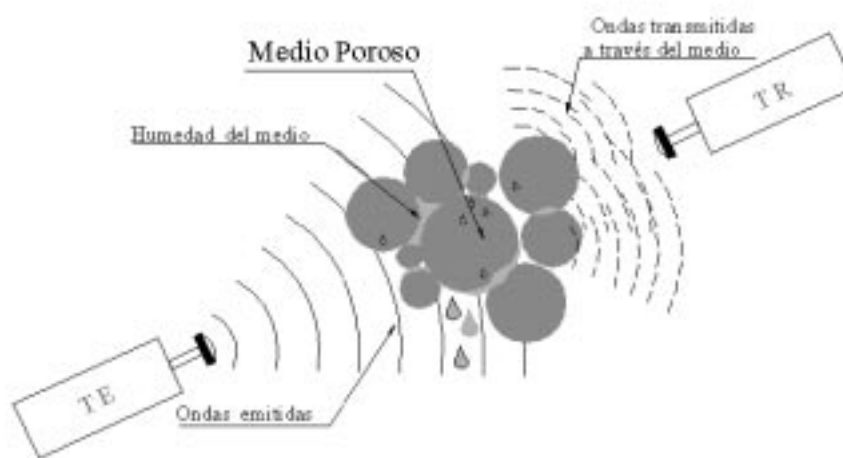


Figura 2. Esquema de la disposición de transductores enfrentados dentro del método. TE corresponde al transductor emisor y TR al transductor receptor.

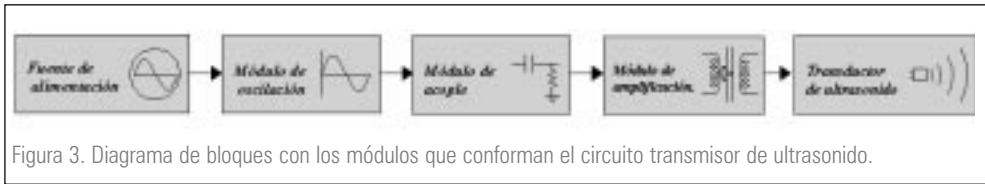


Figura 3. Diagrama de bloques con los módulos que conforman el circuito transmisor de ultrasonido.

Los medios porosos empleados en la evaluación del método fueron un medio inerte, arena

técnica de transmisión, lo cual permitió estudiar el cambio en el contenido de humedad del medio poroso como resultado del cambio en la atenuación acústica producida por el mismo⁵ (figuras 11 y 12).

La administración electrónica de los transductores de ultrasonido se realiza por medio de dos circuitos con funciones específicas de emisión y recepción, diseñados según los requerimientos y características de los transductores de ultrasonido y teniendo en cuenta la elevada atenuación producida por el medio de propagación, alta dispersión y múltiples reflexiones de la señal acústica.

El circuito emisor se conforma por:

- Fuente de alimentación.
- Módulo de oscilación.
- Módulo de acople y acondicionamiento de la señal.
- Módulo de amplificación de potencia.
- Transductor de ultrasonido (figura 3).

En la figura 3 se presenta el diagrama de bloques con los módulos que conforman el circuito emisor de ultrasonido.

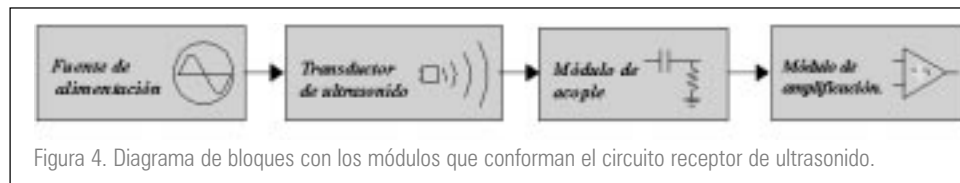


Figura 4. Diagrama de bloques con los módulos que conforman el circuito receptor de ultrasonido.

El circuito receptor se conforma por:

- Fuente de alimentación.
- Transductor receptor de ultrasonido.
- Etapa de acople y acondicionamiento de señal.
- Etapas de alta amplificación

En la figura 4 se presenta un diagrama de bloques con los módulos que conforman el circuito receptor de ultrasonido.

5. Estudio del cambio en el contenido de humedad del medio poroso, como resultado del cambio en los fenómenos acústicos de reflexión, transmisión, difracción, absorción, dispersión, entre otros, que en conjunto conforman la atenuación acústica producida por el medio.

gruesa (diámetros de partícula correspondientes a una distribución granulométrica por tamizado entre los tamices No. 4 y No. 5) y un medio biológico, arroz paddy variedad Fedearroz 50. Los contenidos de humedad en base húmeda presentes en los medios porosos a lo largo de las pruebas se encontraron entre 0 y 3% para arena y entre 5 y 30% para arroz paddy. Las muestras de material y el sistema de transductores se ubicaron en el prototipo experimental de secador, con área transversal de 0,25 × 0,25 m y una altura de columna de material de 0,30 m (figura 12).

Para correlacionar la respuesta del sistema de transductores de ultrasonido con el contenido de humedad del medio poroso en tiempo real, se diseñó un sistema de sensado que realiza la medición del contenido de humedad de la muestra en forma continua, gravimétricamente, conociendo el peso seco de la muestra, el cual se determina empleando el método de la estufa.

Las señales de ultrasonido, peso y temperatura monitoreadas en el experimento se administraron electrónicamente por medio de circuitos de acondicionamiento de señal, dentro de un sistema de adquisición de datos que se encargó de entregar la información al computador. El sistema de adquisición de datos administra hasta 16 señales análogas con una resolución de 12 bits, y consta de un módulo de recepción de señales, un módulo de conversión análogo-digital y un módulo de comunicaciones que opera en el protocolo serial RS 232, lo que permite administrarlo desde un computador o una calculadora.

La administración del sistema y el análisis de la información se realizó en un computador Pentium III con

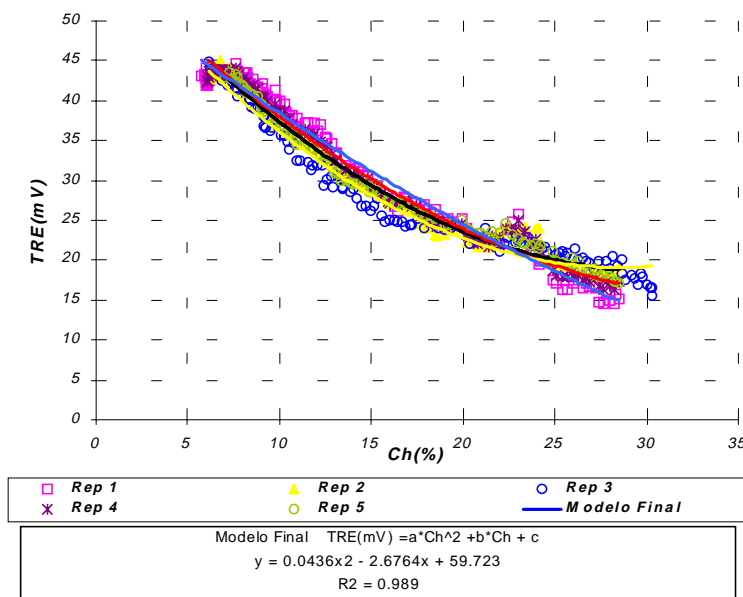


Figura 5. Respuesta del sistema de transductores TRE(mV) con respecto al contenido de humedad del medio poroso en cinco repeticiones del procedimiento de secado.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

La evaluación del método se realizó en dos medios porosos: arroz paddy variedad Fedearroz 50 y arena gruesa. Las pruebas experimentales consistieron en procesos de secado con duración de 6 horas para arena y 20 horas para arroz. Las variaciones de contenido de humedad en base húmeda se encontraron entre 3,2 y 0% para arena y entre 30 y 5% para arroz. El monitoreo del proceso en cada material se hizo en forma continua, con medidas repetidas en el tiempo a intervalos de cinco minutos. Los resultados obtenidos en la evaluación del método en cada uno de los medios porosos se pre-

sentan a continuación. Los resultados alcanzados en arroz paddy mostraron el aumento de la respuesta en milivoltios del sistema de transductores de ultrasonido, con la disminución del contenido de humedad del medio poroso en el intervalo entre 29 y 5% en base húmeda (figura 5).

un procesador de 500 MHz y por medio de programas realizados en C++ OOP y Matlab operando en tiempo real (figuras 10 y 13). Todas las herramientas electrónicas, de adquisición de datos y de software las desarrollaron los autores en la investigación. Se destaca que la amplitud de la señal ultrasónica y la frecuencia de oscilación implementadas en el método conforman una técnica de evaluación no destructiva, que emplea ondas de baja amplitud, por lo que su aplicación no genera cambios permanentes en el medio de propagación, característica importante en la evaluación de propiedades físicas de frutos biológicos como la firmeza, índices de madurez, entre otros, y en la aplicación médica⁶.

sentan a continuación.

Los resultados alcanzados en arroz paddy mostraron el aumento de la respuesta en milivoltios del sistema de transductores de ultrasonido, con la disminución del contenido de humedad del medio poroso en el intervalo entre 29 y 5% en base húmeda (figura 5).

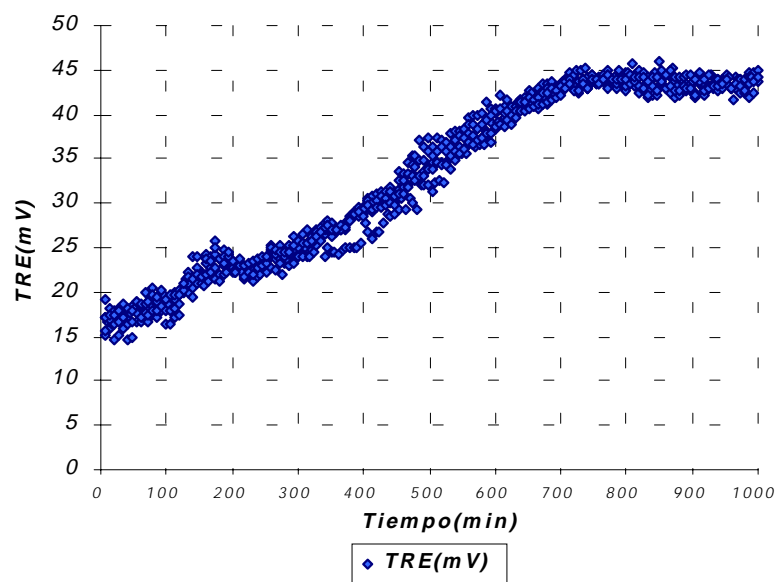


Figura 6. Respuesta del sistema de transductores TRE(mV), con respecto al tiempo de secado.

6. N. Galili, I. Shmulevich and N. Benochou, Acoustic testing of avocado for fruit ripeness evaluation, *Transactions of the Asae*, Vol 41(2), 1998, 399-407.

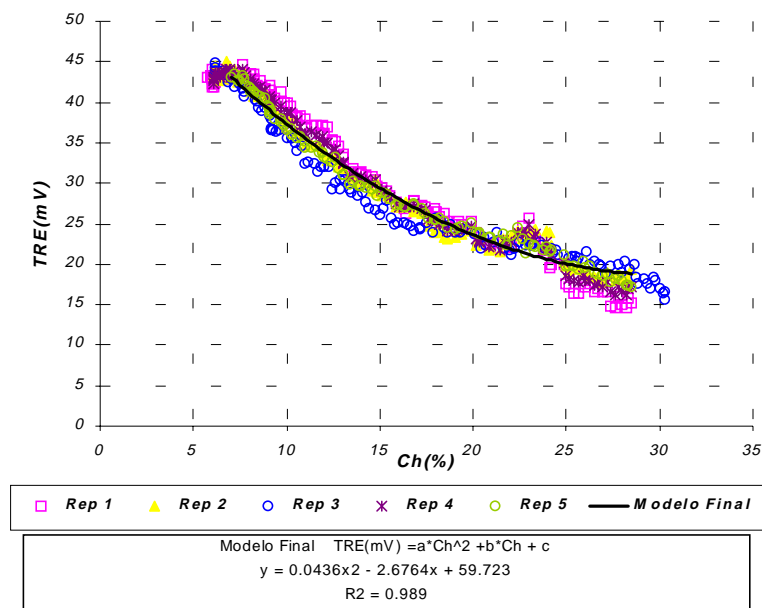


Figura 7. Modelo final que explica la respuesta del sistema de transductores de ultrasonido TRE(mV) con respecto al contenido de humedad de arroz paddy.

En la figura 5 se muestra la respuesta del sistema de transductores de ultrasonido en cinco repeticiones del procedimiento, con un modelo tipo ajustado a cada una. Se observa que las repeticiones presentan la misma tendencia, constituyendo una familia de curvas que siguen un comportamiento monótonico y presentan una alta repetitividad. El análisis gráfico permitió observar que las señales de cada repetición son comparables y el análisis de comparación de medias no mostró diferencias estadísticamente significativas entre éstas, por lo que se trata de la misma respuesta estadísticamente (Tukey, $P \leq 0,05$).

El sistema de transductores de ultrasonido presentó un nivel de voltaje al inicio de la prueba de $16 \pm 1,25$ mV, en un contenido de humedad correspondiente a 28,5% en base húmeda (figura 5), voltaje base generado por el circuito receptor de ultrasonido. El voltaje aumentó hasta un valor de $25 \pm 1,2$ mV, con la reducción del contenido de humedad hasta el 22,5% en base húmeda, constituyendo una diferencia de voltaje de aproximadamen-

te 8 mV, para una variación en el contenido de humedad de 5%. En este contenido de humedad y a los 200 minutos del proceso de secado se presentó una perturbación en la respuesta del sistema de transductores, que consistió en una reducción del nivel de voltaje promedio, perturbación que podría atribuirse al efecto del aire de secado, el cual reduce la presión acústica al reducir la compresibilidad $K_c(\text{Pa})$ del fluido presente en los poros (figuras 55 y 6). Camarasa (1989) señala que el aire al ingresar a los poros del medio reduce la compresibilidad del fluido presente, disminuyéndose la presión acústica y por tanto generando perturbaciones en la respuesta de los transductores de ultrasonido. Des-

pues, el voltaje promedio aumentó progresivamente con la reducción del contenido de humedad, siguiendo un comportamiento parabólico hasta alcanzar los $45 \pm 1,25$ mV, en un contenido de humedad de 6% en base húmeda y un tiempo de secado de 700 minutos, lo que muestra que el paulatino descenso en el contenido de

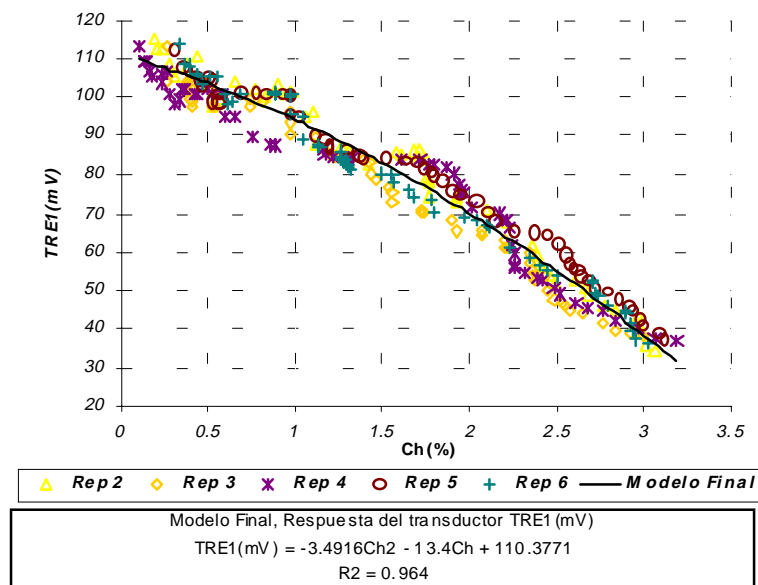


Figura 8. Modelo final que explica la respuesta del sistema de transductores de ultrasonido TRE(mV) con respecto al contenido de humedad de arena gruesa.

humedad fue monitoreado apropiadamente por la respuesta determinística en el sistema de sensado, a lo largo del intervalo de humedades.

El aumento de la respuesta en voltaje, con la reducción progresiva del contenido de humedad siguiendo una relación parabólica, es resultado de la disminución progresiva de la absorción α (dB/m) producida por el agua presente en el medio, favoreciendo la propagación del ultrasonido. Kasap (1994) encontró que la absorción acústica producida por un medio cerá-

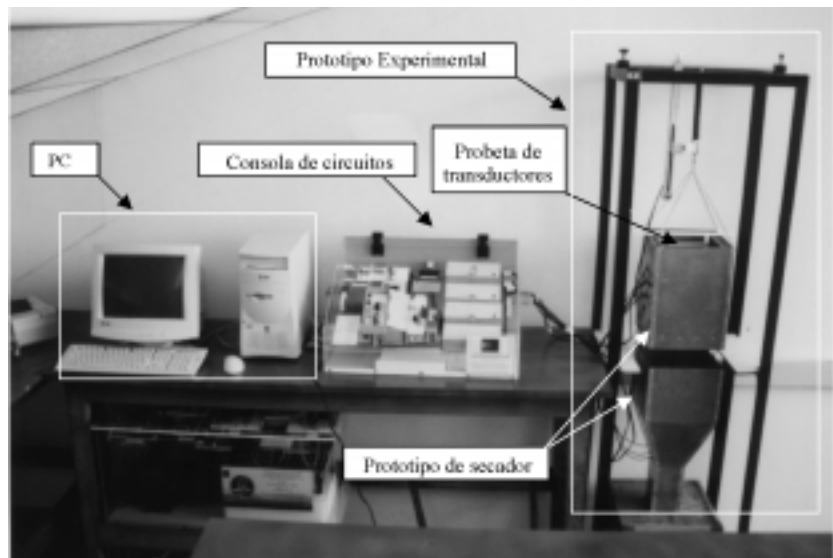


Figura 9. Elementos generales que conforman el sistema desarrollado para determinar el contenido de humedad en medios poroso empleando ultrasonido.

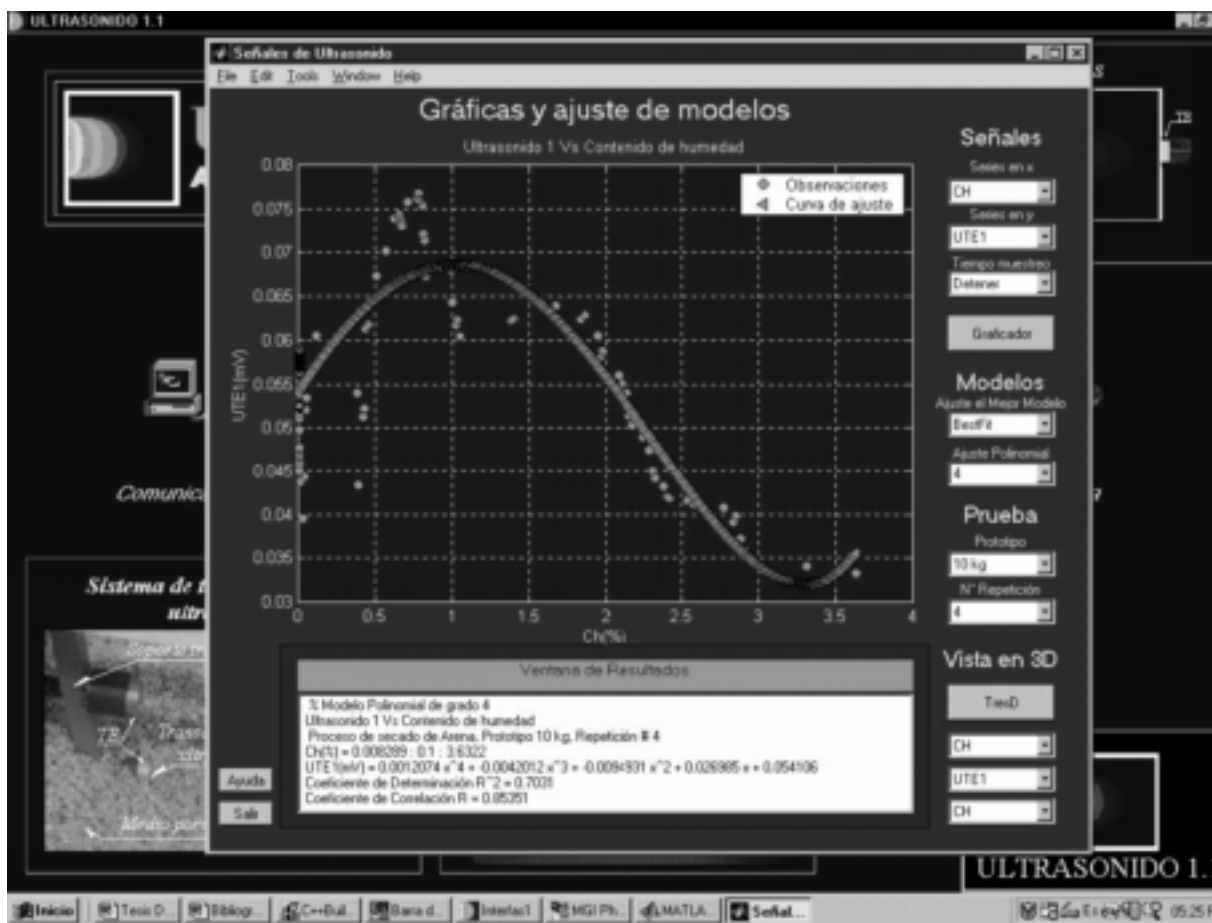


Figura 10. Aplicación desarrollada C++ OOP y Matlab, "Gráficas y ajuste de modelos", para la adquisición el análisis de la información.

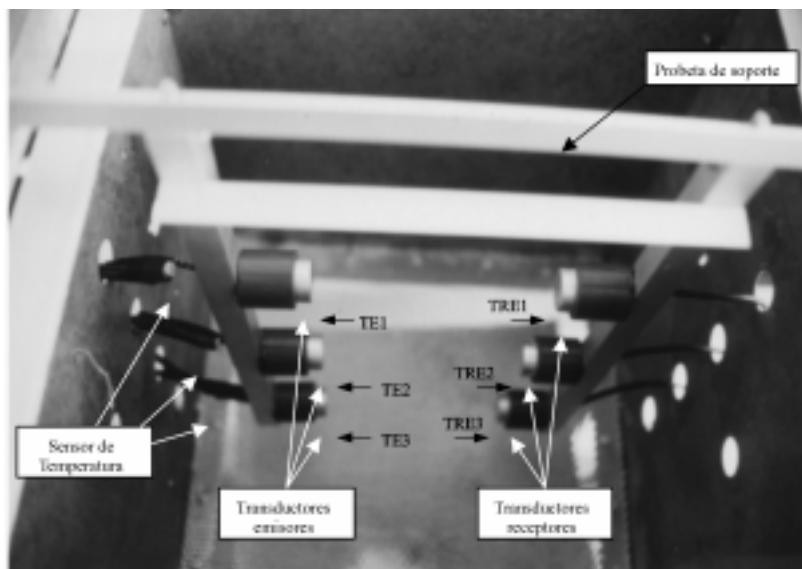


Figura 11. Probeta de soporte de transductores de ultrasonido, y disposición interna en la cámara de secado.

mico poroso disminuye con la reducción del contenido de humedad, siguiendo una relación cuadrática para contenidos de humedad entre 10 y 60% en base húmeda.

De lo anterior, se observa un aumento de 29 mV en la respuesta del sistema de transductores, pasando de 16 mV a 45 mV, con la reducción del contenido de humedad del medio poroso del 29 al 6% en base húmeda, respectivamente. El voltaje respuesta se estabiliza en un contenido de humedad alrededor del 5%, correspondiendo al contenido de humedad de equilibrio en las condiciones de ensayo (figuras 5 y 6).

La respuesta con respecto al tiempo muestra la clara tendencia de aumento del nivel de voltaje con el incremento del tiempo de secado en el intervalo entre 0 y 700 minutos. Por encima de 700 minutos el voltaje se estabiliza alrededor de 45 mV en un contenido de humedad del 5% en base húmeda. (figura 6).

El modelo final que mejor explica la respuesta del sistema de transductores de ultrasonido TRE(mV) con respecto al contenido de humedad del medio po-

roso Ch(%), en el intervalo entre el 5 y 30%, es del tipo

$$TRE(mV) = a \cdot Ch(\%)^2 + b \cdot Ch(\%) + c \quad (1)$$

Donde TRE(mV) corresponde a la respuesta en milivoltios del sistema de transductores, Ch(%) corresponde al contenido de humedad del medio poroso en base húmeda, y a, b y c son constantes del modelo.

El coeficiente de determinación es $R^2 = 0,983$, lo que muestra el buen ajuste del modelo, la baja dispersión de los datos y la alta repetitividad de la información (figura 7).

Los resultados obtenidos en la evaluación del método en arena mostraron el incremento monótonico de la respuesta en milivoltios del sistema de sensado con la reducción del contenido de humedad del medio poroso en el intervalo entre el 3.2 y 0.5 % en base húmeda (figura 8).

Al igual que en las pruebas realizadas en arroz paddy, el análisis gráfico permitió observar que las señales de cada repetición eran comparables y el análisis de com-

Al igual que en las pruebas realizadas en arroz paddy, el análisis gráfico permitió observar que las señales de cada repetición eran comparables y el análisis de com-

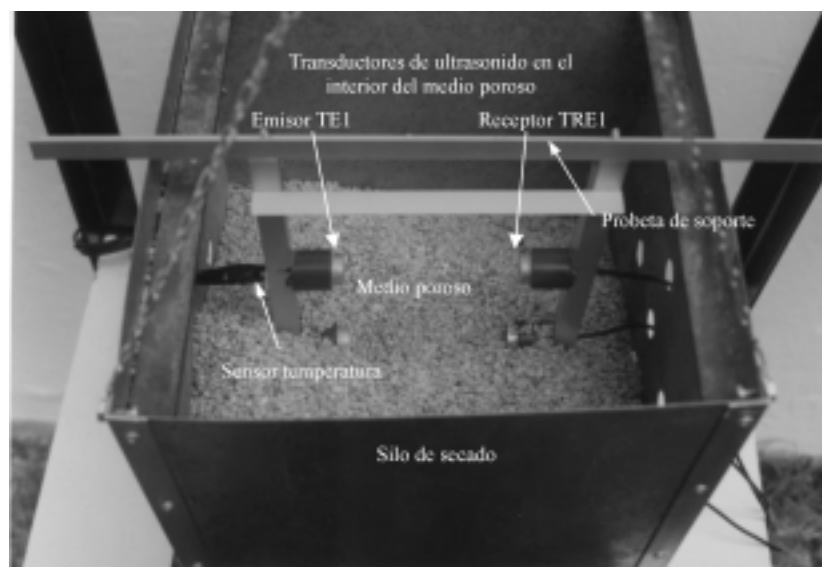


Figura 12. Disposición del sistema de transductores en el interior del medio poroso.

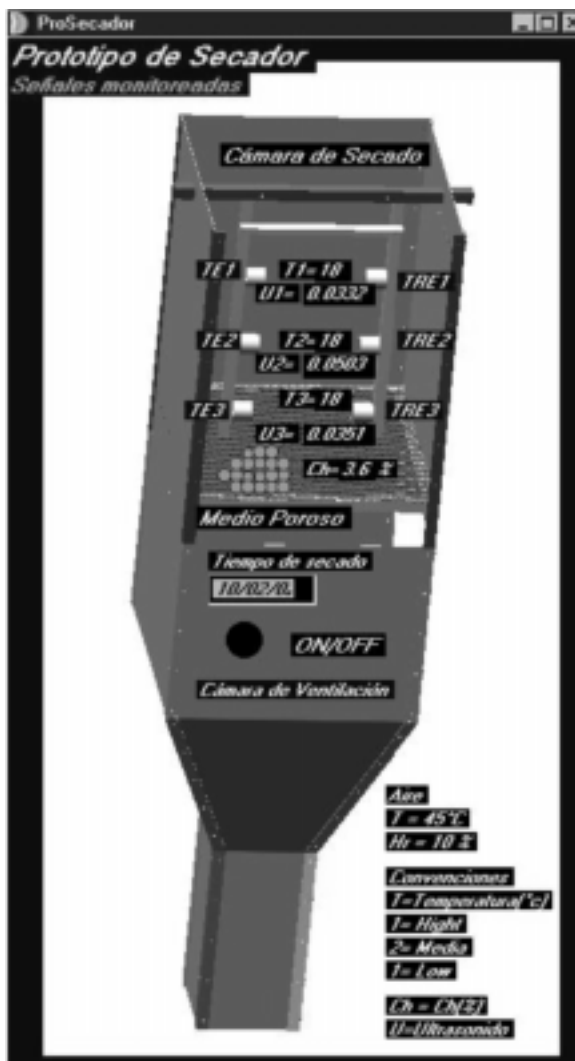


Figura 13. Esquema para el monitoreo desde *software* de la respuesta del sistema de transductores de ultrasonido, la temperatura y el contenido de humedad del medio poroso.

paración de medias no mostró diferencias estadísticamente significativas entre éstas, por lo que se trata de la misma respuesta estadísticamente (Tukey, $P \leq 0,05$).

Se observa que la respuesta del sistema de sensado presenta una tendencia lineal que describe el aumento del nivel de voltaje con respecto a la reducción del contenido de humedad en el intervalo entre 3 y 1,5%. Para contenidos de humedad menores la tendencia de lineal no se sostiene, la pendiente de los datos se reduce y el nivel de voltaje tiende a estabilizarse, constituyéndose una relación cuadrática (figura 8).

Al comienzo de la prueba, para un contenido de humedad de 3,2% el nivel de voltaje corresponde a $38 \pm 1,5$ mV. El voltaje se incrementa en forma lineal hasta los $80 \pm 1,5$ mV, en un contenido de humedad del 15%; por debajo de este contenido de humedad la pendiente de los datos de voltaje se reduce, pero continúa incrementándose hasta estabilizarse a los $108 \pm 2,2$ mV (figura 8). Lakanpal (1994) señala que en un medio cerámico poroso la atenuación acústica es función del contenido de humedad, disminuyendo con la reducción de éste, siguiendo una relación lineal para bajos contenidos de humedad ($< 10\%$), relación que no se sostiene para contenidos de humedad mayores.

El comportamiento anterior se atribuye a que la humedad presente en el medio corresponde en mayor porcentaje a humedad superficial, que es fácil de retirar; por ello la respuesta del sistema de sensores se incrementa rápidamente desde el inicio de la prueba. Con menor humedad en el medio, la tasa de secado se reduce y con ello la tasa de aumento en el nivel de voltaje, hasta llegar al voltaje de estabilización.

Por lo anterior, el modelo final que mejor se ajusta a la respuesta del sistema de transductores TRE(mV), con respecto al contenido de humedad del medio poroso Ch(%) a lo largo del intervalo de humedades entre 0,5 y 3,2%, en las condiciones de la prueba, es de la forma:

$$TRE(mV) = a \cdot Ch(\%)^2 + b \cdot Ch(\%) + c \quad (2)$$

Donde TRE(mV) corresponde a la respuesta en milivoltios del sistema de transductores, Ch(%) corresponde al contenido de humedad del medio poroso en base húmeda, y a , b y c son constantes del modelo.

El coeficiente de determinación del modelo es $R^2 = 0,964$ (figura 8). Con a , b y c , coeficientes del modelo.

Se observan diferencias en la respuesta del sistema de sensado en arroz paddy con respecto a los resultados obtenidos en arena, las que se explican en la diferente capacidad de retención de humedad de los materiales y en la forma como ésta se encuentra presente en los mismos. En arroz paddy la mayor humedad del medio se encuentra en el interior de los granos y la humedad superficial es menor, mientras que en arena gruesa ocurre lo contrario, la mayor cantidad de humedad es superficial. Por esto la curva en arena muestra el rápido incremento de la respuesta en voltaje, debido a la

rápida disminución de la humedad; dicho incremento se reduce a medida que la humedad disminuye, debido a que se presentan menores gradientes de ésta. En arroz paddy ocurre lo contrario, por lo que y el mayor incremento en la respuesta del sistema se presenta cuando se retira, en mayor proporción, la humedad interna.

Por otro lado, la respuesta en voltaje del sistema de sensores fue más alta y más dispersa en arena en relación con la respuesta obtenida en arroz paddy, diferencia que podría atribuirse a una mayor atenuación acústica producida en este último y la mayor absorción que generan los mayores contenidos de humedad.

Los resultados alcanzados con el método se constituyen en un acertado avance en la determinación de humedad, en tiempo real y empleando ultrasonido, en los medios porosos evaluados; no obstante, dada la amplitud y complejidad del tema, éstos se constituyen en resultados iniciales en la evaluación de la técnica, por lo que se debe continuar la investigación con el objeto de ajustar los sistemas de sensado obtenidos, evaluar el método en otros granos y suelos, evolucionando hacia la medición de humedad en aplicaciones en línea.

CONCLUSIONES

La evaluación del método fue satisfactoria debido a que se encontró una clara relación monótonica y repetible entre la respuesta en milivoltios del sistema de transductores de ultrasonido y el contenido de humedad en ambos medios porosos. Sin embargo, las características de las respuestas en cada material son distintas, lo que podría atribuirse a la diferente capacidad de retención de humedad y a la diferencia en la forma como el agua se presenta o se almacena en los medios.

El modelo que mejor explica la respuesta del sistema con respecto al contenido de humedad, en ambos

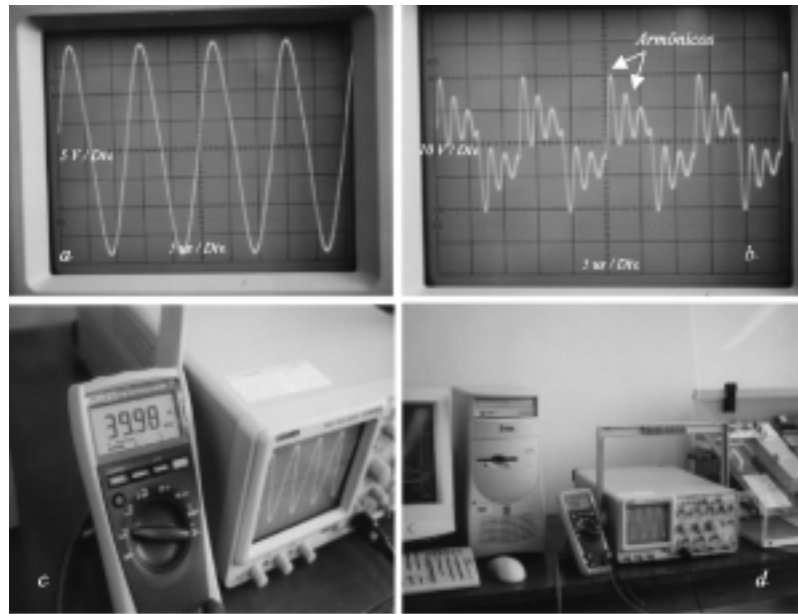


Figura 14. Señal acústica propagada dentro del medio poroso e instrumentación utilizada en el ajuste del método. a) Señal final de 40 kHz y 20 V Rms, propagada al medio poroso. b) Armónicos introducidos a la señal por una amplificación inductiva. c) Lectura de multímetro y señal en osciloscopio. d) Conjunto de elementos de medida.

medios porosos, es de tipo parabólico, con un razonable buen ajuste.

Los resultados muestran que el ultrasonido puede emplearse en el monitoreo y determinación del contenido de humedad de medios porosos como los granos y el método desarrollado, según las condiciones de evaluación, es un buen avance en la investigación con ultrasonido tendiente al desarrollo de medidores de humedad para implementarlos en aplicaciones en línea.

Así mismo, el aire de secado es un factor que produce perturbaciones en la respuesta de los transductores de ultrasonido y determina el proceso de migración de humedad del material; con todo, la alta repetitividad y la clara tendencia encontrada entre la respuesta del sistema y el contenido de humedad del medio poroso permite la implementación de apropiados procedimientos de interpretación vinculando técnicas como los sistemas expertos, que se encarguen de optimizar el análisis de la respuesta.

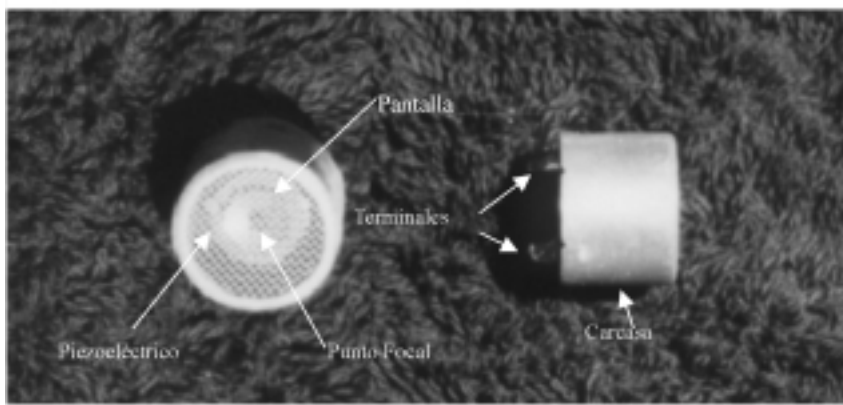


Figura 15. Fotografía de los transductores empleados en el trabajo.

Cortés, M., *Ondas planas y propagación*, marzo de 1999.

Driankov, D., Reinfrank, M. and Hellendoorn, H., *An introduction to fuzzy control*. Berlín-Heidelberg, Nueva York, Springer-Verlag, 1993.

Endres, L. and Aknight, R., Incorporating pore geometry and fluid pressure communication into modeling the elastic behavior of porous rocks. *Geophysics*, Vol. 62, N° 1, enero-febrero de 1997, pp. 106-114.

Friesen, T., An Acoustic Method of Measuring Moisture Content in Grain. *J. Agric. Engine. Res*, 1988, 39, 49-56.

BIBLIOGRAFÍA

Agricontrol 2000. July 10-12, 2000. Wageningen, the Netherlands, p. 178. International Conference on Modelling and Control in Agriculture, Horticulture and Post-harvesting Processing.

Anderson, A., Investigation of gas in bottom sediments, *Applied Research Laboratories Technical Report*, N° 70-28, 1971.

ASA (Acoustical Society of America), *The wave theory of sound*. Allan D. Pierce, 2000.

Asae Standard, Moisture Measurement-Grain and Seeds. *Agricultural Engineers Yearbook of Standards*, 1996.

Astin, T. and McCann, C., The effects of pore-fluid salinity on ultrasonic wave propagation in sandstones. *Geophysics*, Vol. 63, N° 1. May-June 1998, pp. 928-933.

Blitz, J., *Fundamentals of ultrasonic*, 2nd ed., Brunel University, London Butter Worths, 1967.

Carbó, F. y Camarasa, R., Velocidad de propagación y absorción de energía de ondas acústicas en el sistema trifásico agua-arena-aire, *Anales de Física*, Serie B, Vol. 85, 1989, pp. 212-219.

Galili, N., Shmulevich, I., Benichou, N., Acoustic testing of avocado for fruit ripeness evaluation. *Transactions of the Asae*, Vol. 41(2), 1998, pp. 399-407.

Gómez, T.E, Riera, E., Observation the a very slow ultrasonic bulk compression wave in an inhomogeneous porous material. *Ultrasonics*, 1994, Vol. 32, No. 2, p. 131.

Kasap, S.O., Lakhanpal, D., Patzer, C., Mandziak, T., Fredlund, D.G., Ultrasonic measurements on a porous ceramic to determine soil Suction. Department of Electrical Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, S7N 0W0 Canadá. *Ultrasonics*, Vol. 32, N° 5, 1994.

Kraszewski, A.W, Nelson, S.O. and Trabelsi, S., Advances in sensing grain moisture content by microwave measurements. *Transactions of the Asae*, 1998, Vol. 41(2), pp. 483-487.

Krautkrämer, J. and Krautkrämer, H., *Ultrasonic testing of materials. Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Springer-Verlag. Berlín, Heidelberg, Nueva York, 1994.

Lawrence, K.C., Windham, W.R. and Nelson, S.O., Sensing wheat moisture content independent of density. *Transactions of the Asae*, Vol. 41(3), 1998, p. 693.