



**SUELO Y AGUA**  
**SOIL AND WATER**

## **Influencia de la frecuencia de excitación y la distancia entre enrollados durante el sensoramiento de la conductividad eléctrica del suelo mediante un campo magnético variable**

*Influence of the excitement frequency and the distance among coils during sensing of soil electric conductivity by means of a variable magnetic field*

**Arturo Martínez Rodríguez<sup>1</sup>; Raisal Rodríguez Pérez<sup>2</sup>; Alfredo Pérez Sendín<sup>3</sup>**

**RESUMEN.** Se efectúa un estudio teórico experimental de la interacción campo electromagnético-suelo empleando la vía de la modelación mediante elementos finitos, así como la experimentación en un depósito de suelos. Como resultado del estudio se determina la influencia de la frecuencia de excitación de un enrollado emisor y de la distancia entre dicho enrollado y un enrollado receptor, sobre la respuesta del suelo a la acción de un campo electromagnético variable, medida a través de la corriente o voltaje inducidos en el enrollado receptor. Asimismo se obtienen criterios de validación del empleo del análisis por elementos finitos durante el estudio de la interacción de un campo magnético variable con el suelo. Se obtiene que la frecuencia de excitación que provoca la máxima inducción en el enrollado receptor se encuentra entre 10 000 y 15 000 Hz, con una tendencia al aumento de la frecuencia cuando se incrementa la distancia entre los enrollados. Asimismo se aprecia que solamente en este rango de frecuencias es posible discriminar adecuadamente los diferentes valores de la conductividad eléctrica del suelo mediante el campo electromagnético. Se determinó mediante modelación una tendencia exponencial a la disminución de la máxima densidad de la corriente inducida en el enrollado receptor en función de la distancia entre enrollados, con una asíntota en el eje de las abscisas que se interpreta como una densidad de la corriente inducida nula cuando la distancia entre enrollados tiende a infinito. La misma tendencia se obtuvo a través de las corridas experimentales realizadas sobre un suelo ferralítico rojo compactado.

**Palabras clave:** campo magnético, suelo, elementos finitos.

**ABSTRACT.** A theoretical-experimental study of the electromagnetic field-soil interaction is made using the finite element simulation, as well as the experimentation in a soil container. As a result the influence on the soil response to the action of a variable electromagnetic field is determined in function of the excitement frequency of a field-generator coil and of the distance between the field-generator coil and a receiver coil, measured through the current induced in the last one. Validation criteria of the use of finite element analysis during the study of the interaction among a variable magnetic field with the soil are obtained. Also is obtained that the excitement frequency that causes the maximum induction in the receiver coil lies between 10000 and 15000 Hz, with a tendency to grow when coil distance is increased. It is appreciated that only in this range of frequencies it is possible to discriminate changes in soil electric conductivity by means of the electromagnetic field. It was determined, by finite element simulation, an exponential tendency to decrease the maximum density of the induced current in the receiver coil in function of coil distance, with an asymptote in the axis of the abscissas, that is interpreted like a null induction when the coil distance tends to infinite. The same tendency was obtained through the experimental way on a red feralitic compacted soil.

**Keywords:** electromagnetic field, soil, finite elements.

**Recibido** 14/07/09, aprobado 21/09/10, trabajo 49/10, investigación.

<sup>1</sup> Dr.Cs., Prof. Titular, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Centro de Mecanización Agropecuaria, La Habana, Cuba, E-✉: [arturo@isch.edu.cu](mailto:arturo@isch.edu.cu)

<sup>2</sup> Estudiante de la Facultad de Ciencias Técnicas de la UNAH, La Habana, Cuba.

<sup>3</sup> MSc., Profesor Auxiliar, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, La Habana, Cuba.

## INTRODUCCIÓN

La sobreutilización de la maquinaria agrícola, así como su mal manejo durante las operaciones de labranza, originan la compactación de los suelos. Según Soane *et al* (1994) este proceso es además la causa de un significativo descenso del rendimiento de los cultivos, ocasionado por la disminución de la infiltración del agua que hace las plantas más susceptibles al estrés por sequía. En los trabajos de Bengough (1991), se vincula la compactación del suelo con la reducción del índice de crecimiento de la raíz de las plantas limitando así la disponibilidad de nutrientes.

La afectación a la porosidad del suelo es otro indicador de los cambios de la compactación (Servadio *et al.*, 2001). Pues la modificación en el tamaño y cantidad de los poros reduce la capacidad del suelo para el almacenamiento de agua y aire, así como los espacios ocupados por la mayoría de los organismos, limitando además el intercambio gaseoso. Una compactación excesiva del suelo puede, además de afectar adversamente el rendimiento de los cultivos, incrementar los requerimientos energéticos durante las operaciones de labranza, acelerar la erosión y causar un uso ineficiente del agua y los nutrientes debido a una lenta capacidad de drenaje del subsuelo (Jhonson y Bailey, 2002).

Las operaciones de labranza dirigidas a la descompactación del suelo son costosas, ya que conllevan la penetración de los implementos a profundidades relativamente grandes, por lo que es de sumo interés en la práctica agrícola la determinación con la mayor precisión posible del grado de compactación del suelo y de la distribución de los perfiles de compactación del suelo a diferentes profundidades.

La práctica tradicional de aplicación de implementos de descompactación del suelo ha sido básicamente preventiva, en lugar de estar basada en el diagnóstico, lo que puede acarrear gastos innecesarios, por lo que diversos investigadores han propuesto determinar las necesidades de aplicación de enmiendas de descompactación a partir de la medición previa de la impedancia mecánica del suelo (Hall & Raper, 2005; Bowen y Coble, 1967; Schafer *et al.*, 1981).

En la actualidad al nivel internacional, la aplicación de métodos de la Agricultura de Precisión, basados en la aplicación de tratamientos en “sitios específicos”, constituye una de las tendencias fundamentales de la agricultura moderna, dirigida tanto a la economía de insumos, combustible y tiempo, como a la disminución de los impactos indeseables sobre el medio ambiente.

Un tratamiento de descompactación en “sitios específicos” requiere de un mapeo georeferenciado del estado de compactación del suelo que posibilite, a su vez, elaborar el mapa de tratamiento correspondiente. De ahí la importancia del estudio de métodos y medios que posibiliten el sensoramiento del nivel de compactación del suelo.

Los métodos tradicionalmente empleados en la práctica agrícola al nivel internacional durante el sensoramiento del estado de compactación del suelo han estado basados en la medición directa de la densidad aparente del suelo o en el empleo del penetrómetro (Campell y O' Sullivan, 1991; Clark, *et*

*al.*, 1986; Hartge, 1985). Como indicador del índice de cono utilizado por ASAE (2003), cuya correlación con la densidad aparente del suelo ha sido demostrada. Ambos métodos son de baja productividad cuando se pretende caracterizar grandes áreas con vistas a la elaboración de mapas georeferenciados que puedan ser utilizados para la aplicación de tratamientos en sitios específicos.

Diversos procedimientos y medios han sido objeto de desarrollo desde la década de los 90 dirigidos al sensado al vuelo (on-the-fly) o sobre la marcha (on-the-go) de parámetros del suelo indicadores del nivel de compactación (Adamchuk *et al.*, 2001; Glancey *et al.*, 1996; Chukwu y Bowers, 1997; Weissbach y Wilde, 1997; Hall y Raper, 2005; Andrade-Sánchez *et al.*, 2007).

La mayor parte de los dispositivos desarrollados emplean como elemento sensor de la resistencia del suelo una cuña con un ángulo de 30°, con dimensiones más o menos en el orden de las de los conos estandarizados para la medición del índice de cono mediante penetrómetros, introduciéndose el concepto de “índice de cuña” con una definición similar a la del índice de cono estándar.

Aunque este tipo de dispositivo puede representar un avance importante en lo referente a la obtención de mapas georeferenciados del estado de compactación del suelo, no es menos cierto que su aplicación es invasiva, o sea que conlleva la penetración en la profundidad del suelo de determinados implementos que demandan determinados niveles de potencia de tiro y consumo de combustible, además de requerir de todo un sistema de captación, manipulación y transmisión de datos complejo, basados en la técnica de la extensometría eléctrica.

Un sistema de sensoramiento no invasivo, basado en la detección de cambios en la conductividad eléctrica del suelo a diferentes grados de compactación pudiera constituir una herramienta de gran valor para la elaboración de mapas georeferenciados de tratamiento.

Es conocido que la elaboración de mapas de conductividad eléctrica del suelo, dirigido fundamentalmente a la detección de zonas de salinidad, constituye una herramienta actual de la agricultura moderna, comercializándose para estos fines equipos basados en la aplicación al suelo de un campo eléctrico Sistema VERIS: Broughton (1999), o un campo electromagnético Sistemas: EM-38 y EM-31 (Geonics Ltd, 1997).

Una posible correlación entre el grado de compactación del suelo y su conductividad eléctrica, pudiera constituir una vía para la aplicación de métodos de sensoramiento no invasivos basados en la acción de un campo magnético o eléctrico sobre el suelo.

Como paso previo para abordar dicha correlación, se efectúa un estudio teórico experimental de la interacción campo electromagnético-suelo empleando la vía de la modelación mediante elementos finitos, así como la experimentación en un depósito de suelos, dirigido a determinar la influencia de la frecuencia de excitación de un enrollado emisor y de la distancia entre dicho enrollado y un enrollado receptor, sobre la respuesta del suelo a la acción de un campo electromagnético variable.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Método empleado para la modelación de la interacción del campo magnético con el suelo

Mediante un programa de diseño asistido por computadora CAD-3D fueron digitalizados los dibujos de un “bloque” de suelo, un “bloque” de aire y dos enrollados: uno para la generación del campo magnético de corriente alterna y otro para la recepción de la corriente inducida. En la Figura 1 se muestran los componentes del sistema simulado, así como las dimensiones principales. Fueron realizadas tres variantes del sistema suelo-aire-enrollados, en las cuales se asignó tres niveles a la distancia de colocación entre los enrollados: 250; 500 y 1 000 mm.

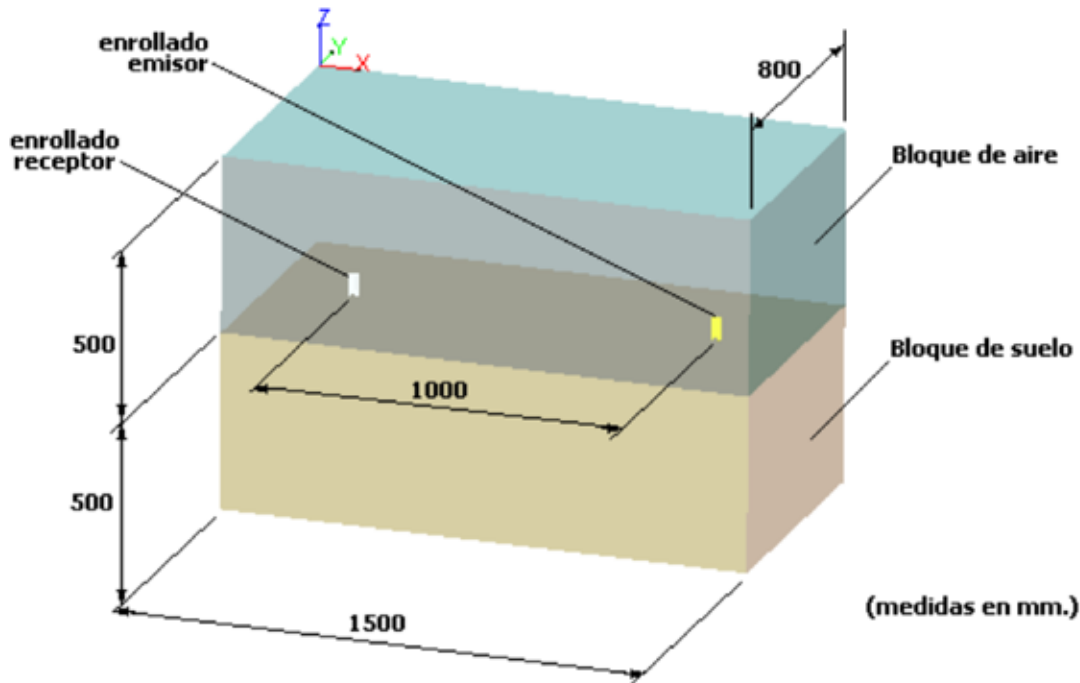


FIGURA 1. Modelación digitalizada del sistema suelo-aire-electrodos.

Para el análisis de las diferentes variantes, los dibujos correspondientes eran importados a un software de análisis por elementos finitos, efectuándose el mallado correspondiente, así como la declaración de los materiales y sus propiedades: aire, cobre (para los enrollados) y el suelo.

Con vistas a evaluar la influencia de la frecuencia de la excitación y la distancia entre los enrollados sobre la corriente inducida en el enrollado receptor, se efectuaron corridas del programa con diferentes niveles de la frecuencia de la corriente alterna aplicada al enrollado emisor, variándose este parámetro entre 60 Hz y 30 kHz y empleándose cuatro niveles para la conductividad eléctrica del suelo: 1; 25; 50 y 75 mS/m y tres niveles para la distancia entre enrollados: 250; 500 y 1 000 mm.

### Materiales y métodos empleados para la determinación experimental de la respuesta del suelo a la acción del campo magnético

Para la realización de los experimentos se habilitó un depósito construido con bloques de concreto, cuyo esquema y vista general se muestran en la Figura 2. El depósito fue llenado con un suelo ferralítico rojo con densidad aparente de 1,18 gr/cm<sup>3</sup>.

Empleando esta instalación experimental fueron realizados dos experimentos:

- Un primer experimento, dirigido a determinar la influencia de la frecuencia de excitación del enrollado emisor sobre el nivel de la respuesta (amplitud del voltaje inducido) en el enrollado receptor;
- Un segundo experimento, dirigido a determinar la influencia de la distancia entre los enrollados sobre el voltaje inducido en el enrollado receptor:

En el caso del primer experimento, para una densidad aparente y humedad fijas del suelo, así como para una distancia fija entre enrollados (25 cm), se varió la frecuencia de excitación del enrollado emisor entre 0 y 30 000 Hz, con saltos de 5 000 Hz o inferiores, anotándose el valor de la amplitud del voltaje inducido en el enrollado receptor para cada nivel de frecuencia de excitación.

En el segundo experimento, manteniéndose constantes los mismos niveles de densidad aparente y humedad, así como fijando una frecuencia de excitación de 10 000 Hz, se varió la distancia entre enrollados en seis niveles (25, 30, 35, 40, 45 y 50 cm), anotándose el valor de la amplitud del voltaje inducido en el enrollado receptor para cada nivel de distancia entre enrollados.

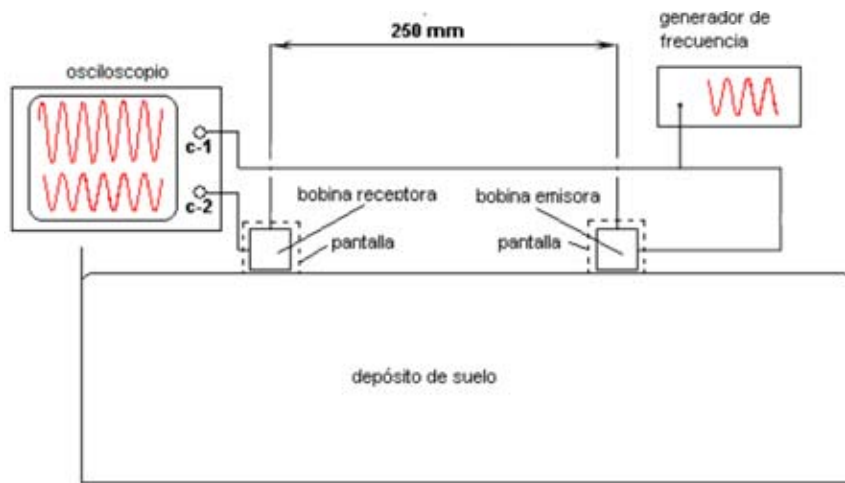


FIGURA 2. Esquema y vista de la instalación experimental.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Influencia de la distancia entre enrollados sobre la corriente inducida en el enrollado receptor obtenido mediante modelación

En la Figura 3 se muestran los resultados de la corrida del modelo fijando el valor de la frecuencia de la excitación en 10 000 Hz y variando la distancia entre los enrollados, para un nivel medio de conductividad eléctrica del suelo de 75 mS/m.

De la figura se aprecia una tendencia exponencial a la disminución de la máxima densidad de la corriente inducida (Eddy Current Density) en el enrollado receptor en función de la distancia entre enrollados, con una asíntota en el eje de las abscisas que se interpreta como una densidad de la corriente inducida nula cuando la distancia entre enrollados tiende a infinito.

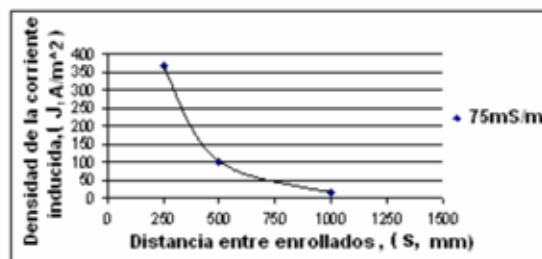


FIGURA 3. Influencia de la distancia entre enrollados sobre la corriente inducida en el enrollado receptor obtenido mediante modelación.

## Influencia de la frecuencia de excitación del enrollado emisor sobre la densidad de la corriente inducida para diferentes conductividades del suelo

Un segundo experimento virtual realizado sobre el modelo digitalizado y aplicando el análisis por elementos finitos, tuvo el objetivo de determinar la influencia de la frecuencia de la corriente alterna aplicada al enrollado emisor, sobre la respuesta de suelos con diferentes conductividades eléctricas, medida a través de la densidad de la corriente inducida en el enrollado receptor. En este experimento virtual, también se tomó como variable la distancia entre enrollados.

La Figuras 4; 5 y 6 muestran los resultados de la evaluación del modelo con diferentes frecuencias de excitación y electro-conductividad del suelo, para distancias entre enrollados de 25; 50 y 100 cm, respectivamente.

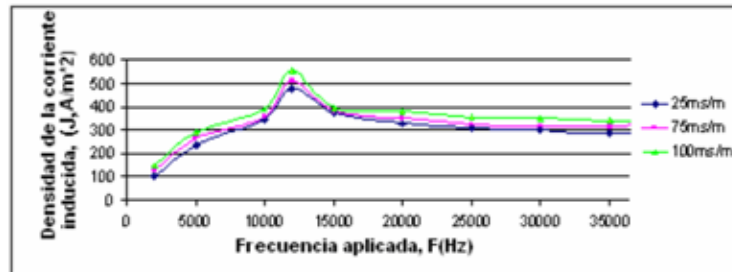


FIGURA 4. Densidad máxima de la corriente inducida en el enrollado receptor en función de la frecuencia de la excitación del enrollado emisor, para una distancia entre enrollados de 25 cm y diferentes valores de la conductividad eléctrica del suelo.

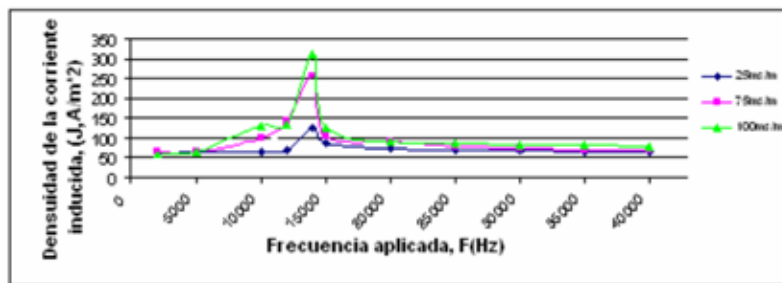


FIGURA 5. Densidad máxima de la corriente inducida en el enrollado receptor en función de la frecuencia de la excitación del enrollado emisor, para una distancia entre enrollados de 50 cm y diferentes valores de la conductividad eléctrica del suelo.

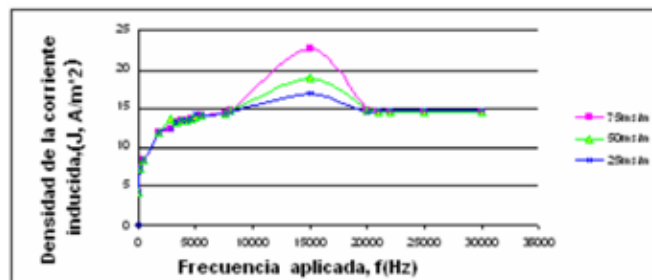


FIGURA 6. Densidad máxima de la corriente inducida en el enrollado receptor en función de la frecuencia de la excitación del enrollado emisor, para una distancia entre enrollados de 100 cm y diferentes valores de la conductividad eléctrica del suelo.

De las figuras se aprecia que en todos los casos, la frecuencia de excitación que provoca la máxima densidad de la corriente inducida se encuentra entre 10 000 y 15 000 Hz, con una tendencia al aumento de la frecuencia cuando se incrementa la distancia entre los electrodos. Asimismo se aprecia que solamente en este rango de frecuencias es posible discriminar adecuadamente los diferentes valores de la conductividad eléctrica del suelo mediante el campo electromagnético. Asimismo se aprecia que a medida que disminuye la distancia entre los electrodos se incrementan los valores de la densidad de la corriente inducida.

### Resultados de la determinación experimental de la influencia de la frecuencia de excitación y la distancia entre enrollados durante el sensoramiento de la conductividad eléctrica del suelo

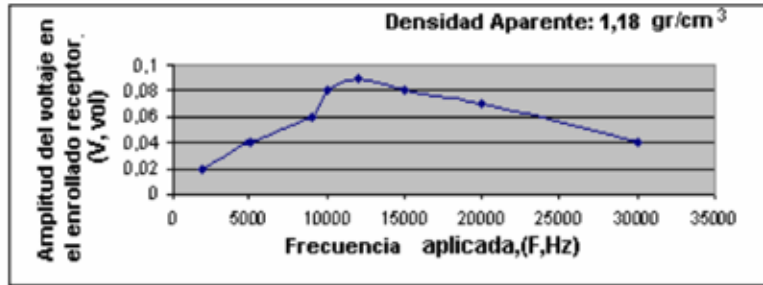
En la Figura 7a se muestra los resultados de los experimentos realizados para determinar la influencia de la frecuencia de excitación del enrollado emisor sobre la amplitud de la corriente inducida en el enrollado receptor del campo electromagnético creado en un suelo ferralítico rojo con densidad aparente de 1,18 gr/cm<sup>3</sup>. En la propia figura (Figura 7b) se muestra el mismo estudio realizado mediante la modelación (Figura 4). En ambos métodos, se fijó una distancia entre enrollados de 25 cm.

Como se aprecia de los resultados experimentales, la frecuencia de excitación produjo una corriente inducida máxima, en el rango entre 10 000 y 15 000 Hz, lo cual coincide plenamente con los resultados de la modelación, lo que constituye un criterio de validación del método de modelación empleado.

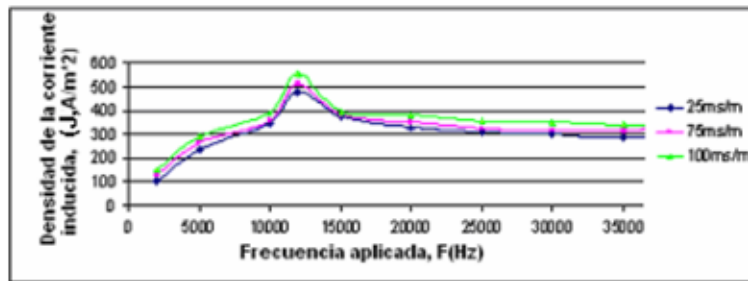
En la Figura 8 se brindan los resultados experimentales obtenidos durante la determinación de la influencia de la distancia entre los enrollados sobre la corriente inducida en el enrollado receptor. De la figura se aprecia una tendencia exponencial en la disminución de la corriente inducida cuando se incrementa la distancia entre los enrollados. El resultado de

un test de identidad aplicado entre los puntos obtenidos experimentalmente y la curva de ajuste exponencial, arrojó plena identidad entre los puntos de la curva ajustada y los puntos experimentales. La curva de ajuste se obtuvo mediante la aplicación de un programa elaborado en soporte Mathcad 2000 Professional.

La comparación de los resultados reflejados en la Figura 8 (obtenidos por la vía experimental) con los obtenidos mediante modelación (Figura 3) muestran la misma tendencia asintótica, lo cual confirma la validación del proceso de modelación empleado.



a) Resultados obtenidos experimentalmente



b) Resultados obtenidos mediante modelación.

FIGURA 7. Influencia de la frecuencia de excitación sobre la corriente inducida para una distancia entre enrollados de 25 cm.

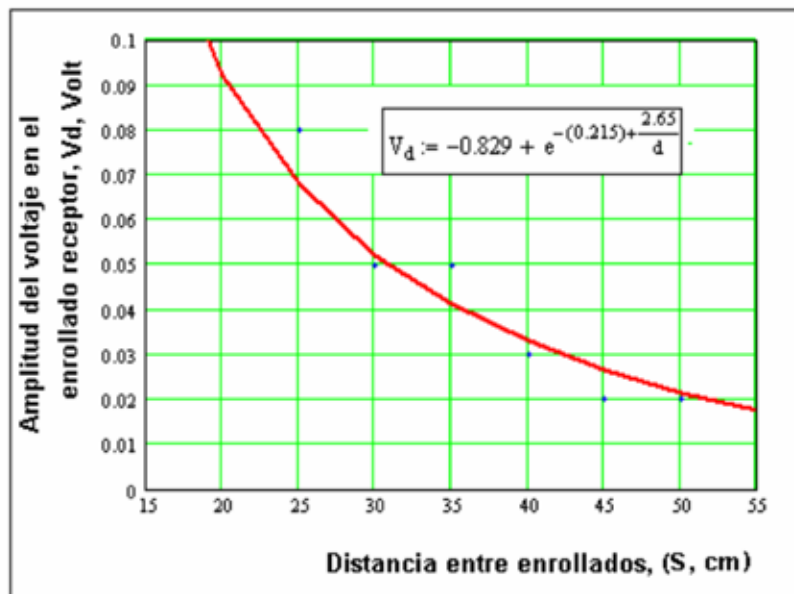


FIGURA 8. Influencia de la distancia entre enrollados sobre la corriente inducida en el enrollado receptor, obtenido experimentalmente.

## CONCLUSIONES

- Del estudio realizado mediante la modelación, se determinó la influencia de la frecuencia de excitación del enrollado emisor sobre la respuesta del suelo, obteniéndose que la frecuencia de excitación que provoca la máxima densidad de la corriente inducida, para una distancia entre enrollados entre 250 y 1000 mm, se encuentra entre 10000 y 15000 Hz, con una tendencia al aumento de la frecuencia cuando se incrementa la distancia entre los electrodos.
- Una evaluación del modelo a diferentes distancias entre enrollados y con frecuencia de excitación de 10 000 Hz mostró una tendencia exponencial en la disminución de la máxima densidad de la corriente inducida en el enrollado receptor cuando se incrementa la distancia entre enrollados
- Como resultado de los experimentos realizados para determinar la influencia de la frecuencia de excitación del enrollado emisor sobre la amplitud de la corriente inducida en el enrollado receptor del campo electromagnético creado en un suelo ferralítico rojo con densidad aparente de 1,18 gr/cm<sup>3</sup>, se determinó que la frecuencia de excitación que produjo una corriente inducida máxima, correspondió a un rango entre 10 000 y 15 000 Hz, lo cual coincide plenamente con los resultados de la modelación.
- Los resultados experimentales obtenidos durante la determinación de la influencia de la distancia entre los enrollados sobre la corriente inducida en el enrollado receptor mostraron, al igual que durante la evaluación del modelo, una tendencia exponencial en la disminución de la corriente inducida cuando se incrementa la distancia entre los enrollados.
- La comparación de los resultados experimentales y los obtenidos mediante la modelación, constituyen criterios de validación del método de modelación empleado, basado en la digitalización del sistema con herramientas CAD y el análisis por elementos finitos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMCHUK, V. I.; M. T. MORGAN, and H. SUMALI: "Application of a strain gauge array to estimate soil mechanical impedance on-the-go", *Trans. ASAE* 44(6): 1377-1383, 2001.
- ASAE STANDARDS: *EP542, Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer*, St. Joseph, Mich., USA, 2003.
- BENGOUGH, J. VAN AND D. GOENSE: Soil tillage resistance as a tool to map soil type differences, P. 605-616. In: **Proc. 3rd Intl. Conference on Precision Agr. M inneapolis, MN. ASA, CSSA, and SSSA**, Madison, WI, USA, 1996.
- BOWEN and COBLE: Environment requirement for germination and emergence. *TRANSACTIONS of the ASAE*, 11(12): 10-24, 1967.
- BROUGHTON, B.; A. MCBRATNEY; B. WHELAN & BUDIMAN: *Preliminary results with the VERIS soil electrical conductivity instrument [en línea] 1999 Disponible en: <http://www.mea.com.au/> [Consulta: mayo 2009]*.
- CAMPELL, D. J.; O'SULLIVAN M.F: The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction and tillage soil analysis, physical methods, 281pp. **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias)** Ed. Marcel Dekker, Inc.; St. Joseph, Michigan, USA, 34(3): 399-423, 1996.
- CHUKWU, E., and C. G. BOWERS: *Instantaneous multiple depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle*, ASAE Paper No. 971077, St. Joseph, Mich., USA, 2005.
- GEONICS LIMITED: *Applications of electromagnetic methods: Soilsalinity*. Geonics Limited, Mississauga, ON, Canada, [en línea] 1997 Disponible en: <http://agron.scijournal.org/cgi/content/full/95/3/483>. [Consulta: mayo 2009].
- GLANCEY, J.L., UPADHYAYA, S.K., W.J. CHANCELLOR, J.W., RUMSEY: "Prediction of agricultural implement draft using an instrumented analog tillage tool". *Soil Tillage Res.*, 37(1): 47-65, 1996.
- HALL, H. E.; R. L. RAPER: "Development and concept evaluation of an on-the-go Soil strength measurement system", *Transactions of the ASAE*, 48(2): 469-477 2005.
- HARTGE, K.H.: "Penetrometer measurements for screening soil physical variability", (Amsterdam) *Soil & Tillage Research*, 5(4): 343-350, 1985.
- JOHNSON, C. E., and A. C. BAILEY: "Soil compaction. Advances in Soil Dynamics", St. Joseph, Mich., USA, *Transactions of the ASAE*, 2: 155-178, 2002.
- SERVADIO, R. and L. HUFFMAN: "Vehicle and heel factors influencing soil compaction crop response in different traffic regimes", *Soil & tillage research*, 11: 239-282, 1988.
- SOANE, B. D., and C. VAN OUWERKERK: *Soil compaction problems in world agriculture*, In Soil Compaction in Crop Production, eds. B. D. Soane and C. Van Ouwerkerk, ch. 1, 1-21, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1994.
- WEISSBACH and WILDE: "Cone penetration resistance equation as a function of the clay ratio, soil moisture content and specific weight", *Journal of Terramechanics* 24(1): 41-56, 1997.