

APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE RADIO-ONDAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS SUELOS DE LA PORCIÓN NW DE LAS PROVINCIAS HABANERAS, CUBA

Omar Delgado-Rodríguez¹⁻² y Armando Pascual-García²

¹ Instituto de Geofísica y Astronomía. CITMA

Calle 212 #2906, La Lisa, Ciudad de la Habana, Cuba

² Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM

Ciudad Universitaria, Circuito Exterior, Coyoacán, 04510, México, D.F.

E-mail: omar@quetzalcoatl.igeofcu.unam.mx

RESUMEN

Se muestran los resultados de la aplicación del método de Inclinación de la Onda para determinar por primera vez en Cuba, las propiedades eléctricas del suelo en un perfil radial con centro en una antena radio-difusora, observándose la influencia de la heterogeneidad del medio en los resultados obtenidos. Se comparó el valor de la conductividad eléctrica obtenido por este método con el determinado por el método de Atenuación del Campo. Además se expone una variante metodológica que permite, utilizando mediciones de SEV y conociendo el comportamiento del relieve en un perfil, estimar la conductividad eléctrica equivalente, creando así una forma rápida y eficaz de utilizar los algoritmos planteados con anterioridad para estos fines.

INTRODUCCIÓN

Existen numerosos métodos para determinar las propiedades eléctricas del suelo. El conocimiento de estas propiedades es de gran importancia para la mayoría de los servicios radioeléctricos. Específicamente la conductividad eléctrica equivalente es imprescindible para la planificación y desarrollo de los servicios de radiodifusión en la banda de ondas medias (540-1700 kHz), ya que un conocimiento adecuado de este parámetro permite la correcta ubicación de los radio-transmisores y la posibilidad de elegir de manera eficiente la potencia de los mismos.

Con el objeto de estudiar y comparar diferentes métodos de medición de la conductividad eléctrica equivalente, se realizó un diseño experimental en un polígono ubicado al Noroeste de las provincias habaneras, Cuba (Figura 1), aplicándose los métodos de Atenuación del Campo, Sondeo Eléctrico Vertical e Inclinación de la Onda.

En este trabajo se muestran los resultados de la aplicación, por primera vez en Cuba, del método de Inclinación de la Onda para determinar la constante dieléctrica relativa (ϵ_r) del terreno. Se analizan los resultados y las posibilidades de estimar la conductividad eléctrica equivalente mediante este método en comparación con otro de amplia difusión, el de Atenuación del

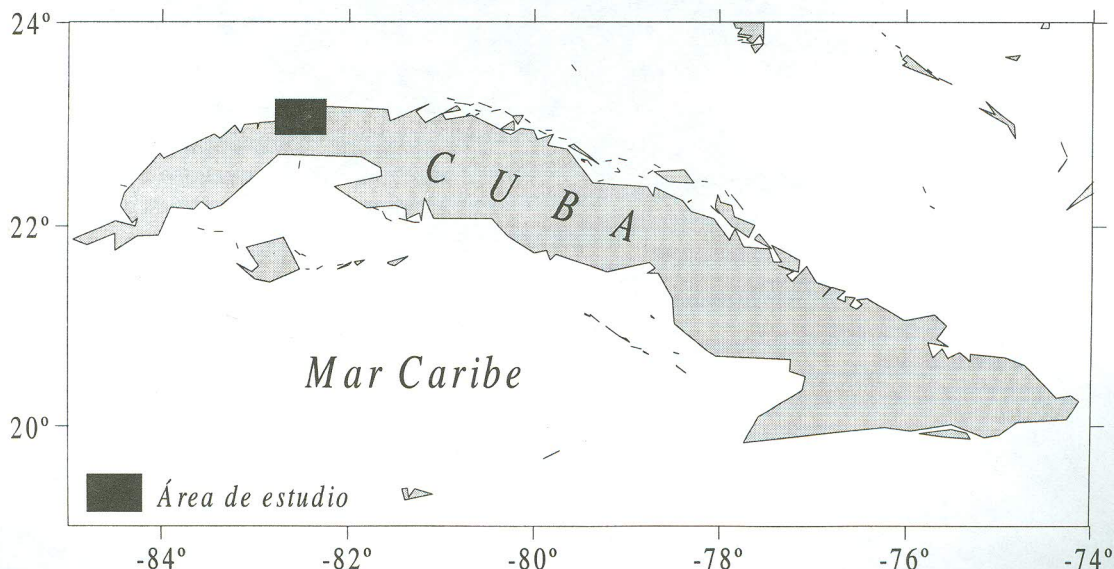


Figura1. Localización del área de estudio en la República de Cuba.

Campo. Además, se expone una adecuada metodología para la obtención y procesamiento de los datos necesarios para estimar la conductividad eléctrica equivalente, utilizando un algoritmo que permite tener en cuenta la influencia del relieve.

MATERIALES Y MÉTODOS

MÉTODO DE INCLINACIÓN DE LA ONDA

El método de Inclinación de la Onda (MIO) tiene la ventaja de poder determinar la ϵ_r del medio. Este parámetro eléctrico no siempre se toma en cuenta en los cálculos de radiopropagación. En el mejor de los casos se supone un valor en el intervalo de 1-30, lo que es aceptable en los casos de un terreno homogéneo (Jordan, 1972). Para la banda de radiodifusión esta aproximación no parece ser tan severa, ya que por regla general es despreciable el efecto de las corrientes de desplazamiento en comparación con las de conducción (CCIR, 1982a).

Además, si el terreno estuviera compuesto por estratos planos paralelos donde la primera capa tuviera un espesor grande (>10m) entonces, para la banda de radiodifusión, la onda de superficie se propagaría por un medio homogéneo y sería válido suponer, de acuerdo al tipo de suelo o litología predominante, un valor de ϵ_r dentro del rango 1 a 30. Sin embargo esta consideración puede acarrear problemas cuando el medio es multiestratificado y/o posee una tectónica compleja.

Este método se basa en el hecho de que el frente de onda electromagnética que se propaga por el terreno sufre una inclinación respecto a la vertical, y el desfase existente entre la componente vertical y la horizontal hacen que el campo resultante trace una elipse.

Existe una relación sencilla entre la conductividad eléctrica equivalente y la constante dieléctrica relativa equivalente, con las dos componentes del campo (CCIR, 1982b):

$$\sigma_{eq} = \frac{f \left| \frac{E_v}{E_h} \right|^2 \text{Sen}(2\varphi)}{18} \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \left| \frac{E_v}{E_h} \right|^2 \text{Cos}(2\varphi) \quad (2)$$

- E_v - componente vertical del campo en mV/m.
- E_h - componente horizontal del campo en mV/m.
- φ - desfase entre las dos componentes en grados.
- ϵ_r - constante dieléctrica relativa equivalente (adimensional).
- σ_{eq} - conductividad eléctrica equivalente en mS/m.
- f - frecuencia de la onda de superficie en MHz.

Para el cálculo de la relación entre las componentes y su desfase se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\left| \frac{E_v}{E_h} \right| = \frac{1 + r^2 \text{Tan}^2(\theta)}{r^2 + r^2 \text{Tan}^2(\theta)} \quad (3)$$

$$\text{Cos}(2\varphi) = \frac{(1 - r^2) \text{Sen}(2\theta - 4r^2)}{(1 + r^2) \text{Sen}(2\theta + 4r^2)} \quad (4)$$

donde:

r - razón entre las proyecciones del campo en los dos semiejes de la elipse de rotación.

θ - inclinación del frente de onda en grados.

MÉTODO DE ATENUACIÓN DEL CAMPO

El método de Atenuación del Campo (MAC) consiste, como su nombre lo indica, en la determinación de la atenuación que sufre el campo electromagnético al propagarse la onda de superficie a lo largo de una trayectoria en particular (Kashprovskii y Kuzubov, 1971).

Con este fin se realizaron una serie de mediciones de la intensidad del campo generada por un transmisor, permitiendo calcular la conductividad eléctrica equivalente de la trayectoria considerada. En este trabajo se utilizó para la elaboración de las mediciones el método simplificado (CCIR, 1975; Pascual et al., 1995); esto es, para cada punto de medición se determina la intensidad de campo E_i . Este valor de intensidad de campo es comparado con el valor de intensidad E_o (medido en las proximidades del transmisor), el cual es considerado como la intensidad de salida de la onda del transmisor.

A partir de esta comparación es posible determinar la atenuación sufrida por la onda electromagnética a la distancia R_i del transmisor según:

$$W_i = \frac{E_i R_i}{E_o}$$

Una vez conocida W_i se puede calcular la distancia numérica de acuerdo a:

$$\rho_i = \frac{(0.3 - W_i) + (0.09 + 4.2W_i - 3.2W_i)^{\frac{1}{2}}}{1.2W_i}$$

La distancia numérica ρ puede ser también definida en base a los parámetros eléctricos del suelo, siendo para el caso de un medio homogéneo:

$$\rho_i = \frac{\pi R_i f}{1.8 \times 10^4 \sigma \lambda}$$

donde:

- σ - conductividad eléctrica del medio (mS/m).
- λ - longitud de onda de la señal (metros).
- f - frecuencia de la señal (MHz).
- R_i - distancia del transmisor a punto i de medición (km).

Es decir, tomando en cuenta la existencia de un medio homogéneo y una señal de radio determinada, la r varía de manera proporcional con la distancia R .

Si $f = (c / \lambda)$, entonces:

$$\rho_i = \frac{\pi R_i c}{1.8 \times 10^4 \sigma \lambda^2},$$

donde c es la velocidad de la luz (3×10^5 km/s)

$$\rho_i = \frac{30 \pi R_i}{1.8 \times \sigma \lambda^2}$$

Luego, asumiendo que para un medio homogéneo con superficie plana horizontal el valor de la conductividad eléctrica del medio se refiere a la conductividad eléctrica equivalente (σ_{eq}), se puede obtener la siguiente expresión para el cálculo de σ_{eq} :

$$\sigma_{eqi} = 52.36 \times 10^3 \frac{R_i}{\lambda^2 \rho_i}$$

SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL

Un tercer método de amplia difusión, el método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), fue aplicado para determinar en cada punto de medición el modelo geoelectrico.

Existen varios arreglos electródicos que pueden ser usados en la ejecución de un SEV (Orellana, 1982), en nuestro caso se utilizó la configuración tetraelectródica de Schlumberger (Figura 2).

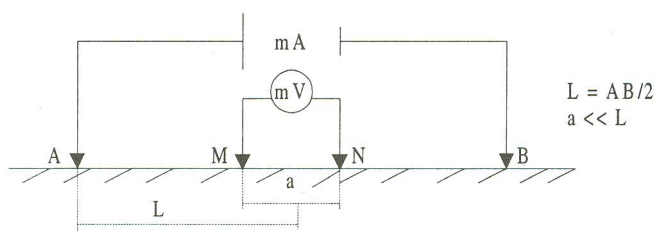


Figura 2. Configuración tetraelectródica de Schlumberger utilizada en la ejecución del método SEV.

El método SEV consiste en pasar corriente eléctrica al subsuelo mediante los electrodos de corriente A y B, mientras en los electrodos M y N se registra una diferencia de potencial ΔU . Esta operación se repite cada vez que se aumenta la distancia

entre los electrodos A y B (Figura 2), garantizando de esta forma el aumento de la profundidad de estudio. Por cada medición realizada se calcula un valor de resistividad eléctrica, según:

$$\rho = k \frac{\Delta U}{I}$$

donde:

- k - constante dependiente de la posición mutua de los electrodos (constante geométrica).
- ΔU - diferencia de potencia (mV/m) registrada entre los electrodos M y N.
- I - corriente eléctrica (mA) inyectada al terreno por los electrodos de corriente A y B.
- ρ - resistividad eléctrica (ohm-m).

Si el medio fuera homogéneo el valor de ρ sería constante para cualquier distancia entre los electrodos A y B. En la práctica no es así, el valor registrado de ρ varía con la distancia $AB/2$ y se denomina resistividad eléctrica aparente (ρ_a), por no representar el valor real de la resistividad del medio sino una contribución de los diferentes materiales a través de los cuales se conduce la corriente eléctrica inyectada por los electrodos A y B (Orellana, 1982).

Del cálculo de los valores de resistividad para los diferentes valores de $AB/2$ se genera una curva de valores de ρ_a (ohm-m) vs $AB/2$ (metros) que es sometida a procesos de modelación y/o inversión, resultando finalmente el modelo geoelectrico unidimensional que le corresponde a cada SEV (Orellana, 1982).

Existen algoritmos que permiten, mediante el conocimiento del corte geoelectrico, determinar parámetros importantes para el estudio de la propagación de la radio-onda, como son: la conductividad eléctrica efectiva (intrínseca) y la profundidad de penetración de la onda electromagnética a determinada frecuencia (Kashprovskii, 1963).

Algoritmos empíricos, que toman en cuenta el efecto atenuante del relieve, vinculan la conductividad eléctrica equivalente con la conductividad eléctrica efectiva, permitiendo estimar un parámetro a partir del conocimiento del otro y del perfil topográfico (Kuzubov, 1966).

TRABAJO DE CAMPO: EQUIPAMIENTO Y METODOLOGÍA

Para la ejecución de las mediciones de MAC y MIO se tuvo en cuenta un transmisor ubicado en la Ciudad de la Habana ($23^{\circ}04'40''N$ y $82^{\circ}23'31''W$), que emite una señal de radio de frecuencia 820 KHz con una potencia de 8 Kw (Radio Cadena Habana). Las mediciones se realizaron sobre tres perfiles radiales con centro en el transmisor mencionado (Figura 3), cuyas características se exponen en la Tabla 1.

El equipo utilizado para la ejecución de las mediciones fue un medidor de intensidad de campo de fabricación japonesa

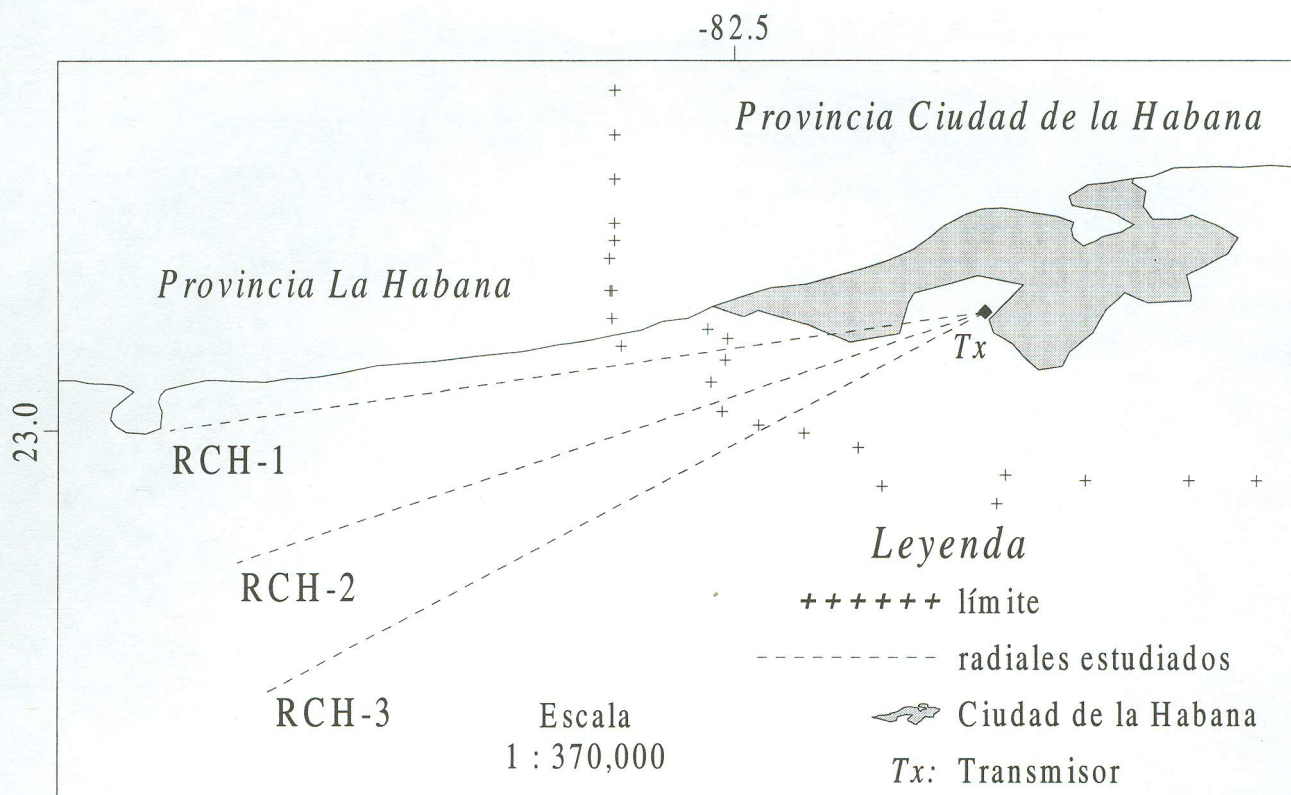


Figura 3. Ubicación de los perfiles radiales (RCH-1, RCH-2 y RCH-3) con centro en el transmisor Radio Cadena Habana ($f = 820$ KHz, $P = 8$ Kw).

Tabla 1. Características generales de los perfiles radiales medidos

Radial	Azimuth Norte (grados)	Longitud (km)	Métodos Empleados
RCH-1	261	38	SEV y MAC
RCH-2	249	41	SEV y MAC
RCH-3	239	38	MIO y MAC

(Anritsu). Para el caso de MIO se realizaron las mediciones en los puntos seleccionados para el MAC y para hacer posible su aplicación, se adaptó una antena tipo dipolo a la base de un teodolito que, conectada al Anritsu, permitió medir la inclinación del frente de onda respecto a la vertical con la precisión de un grado; éste es el ángulo de inclinación para el cual se obtiene el máximo de intensidad de campo. Posteriormente se giró la antena hasta lograr el ángulo en que se registra el mínimo de intensidad de campo, permitiendo de esta forma determinar las componentes E_v y E_h que conforman la elipse resultante del campo. Una vez conocido esto, se pudo determinar mediante (4) el ángulo ϕ y en (1) y (2) la ϵ_r y σ_{eq} para el punto en cuestión. Los valores de conductividad eléctrica equivalente calculados por ambos métodos, fueron ajustados a los valores característicos de los intervalos (0.5, 1, 3, 5, 7, 10, 15 y 30 mS/m), según lo propuesto por el Comité Internacional de Radiocomunicaciones (CCIR) (Pascual *et al.*, 1995).

Para el método SEV se dispuso de un equipo IKC-1 (modificado) y se realizaron inicialmente sondeos simultáneos con las mediciones del MAC. Posteriormente y como resultado

de una elaboración inicial de los datos, se concluyó que era necesario un mayor número de sondeos para conocer el comportamiento de la conductividad eléctrica efectiva a lo largo del perfil.

La profundidad de estudio con este método depende de la distancia existente entre los electrodos de alimentación (AB/2), cuya distancia máxima utilizada fue de 40 m, la cual es suficiente para garantizar una determinación precisa de la conductividad eléctrica efectiva del suelo (Orellana, 1982).

De esta forma se determina la conductividad y espesor de cada capa, para calcular finalmente, para una frecuencia específica, la conductividad eléctrica efectiva y profundidad activa (aquella a la que se atenúa la señal a un 37%), utilizando el método Kashprovskii y Kuzubov (1971).

Todos los puntos de medición fueron seleccionados teniendo en cuenta su fácil ubicación en los mapas topográficos a escala 1:50,000 y la ausencia de líneas de alta tensión u otro factor que pudiera distorsionar la medición del campo electromagnético de interés.

COMPARACIÓN ENTRE EL MIO Y EL MAC

Se comprobó durante la ejecución de las mediciones que el MIO es menos cómodo y sencillo que el MAC, ya que éste no necesita de una nivelación del teodolito y posterior orientación

de la antena tipo dipolo. De estos dos aspectos que demoran la medición con el MIO, el de menor importancia es la orientación de la antena tipo dipolo según la dirección de arribo del frente de onda. Se pudo comprobar que un error de ± 10 grados está dentro del error del Anritsu, o sea ± 1 dB. Este resultado permite agilizar esta etapa de la medición; no obstante sigue siendo más complejo el uso del MIO que el MAC en una campaña de mediciones.

En la Figura 4b se observan los valores de σ_{eq} obtenidos en el perfil radial RCH-3 por los métodos MAC y MIO. La magnitud de los valores de σ_{eq} determinados por ambos métodos difiere en menos de 1 mS/m, lo cual no es significativo, si se tiene en cuenta que ambas curvas indican la presencia de valores bajos, con el mismo comportamiento de la conductividad en este perfil.

Sin embargo, el resultado más interesante consiste en los valores obtenidos de la ϵ_r (Figura 4a) que sobrepasan al intervalo característico para los suelos homogéneos (1-30).

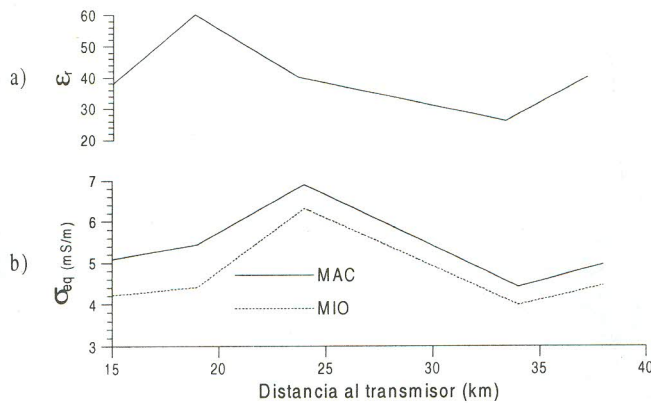


Figura 4. Resultados obtenidos en el perfil RCH-3. a) Comportamiento de la ϵ_r determinado por MIO. b) Comparación de los valores de σ_{eq} resultantes de la aplicación de los métodos MIO y MAC.

Como es conocido la precisión con que se mide la ϵ_r mediante el MIO depende fundamentalmente de la exactitud con que se mide la relación de las componentes del campo, y que en las mediciones fue de ± 1 dB, por lo que es de suponer que los valores anómalos no se deben a errores experimentales.

Otro hecho que confirma este resultado es que los valores de σ_{eq} obtenidos por ambos métodos no difieren en su comportamiento, sino de manera no significativa en la magnitud de este parámetro en cada punto de medición.

El análisis geológico-tectónico del área realizado en trabajos anteriores (Frías, 1989), mostró numerosas dislocaciones disyuntivas y plicativas, lo que a su vez se correspondió con los resultados obtenidos con los SEV's realizados simultáneamente en el perfil. Por ello, es de suponer que este último aspecto es el causante de los valores anómalos de ϵ_r en el perfil RCH-3.

ESTIMACIÓN DE LA σ_{eq} A PARTIR DE LA σ_{ef}

La σ_{eq} tiene en cuenta la influencia de los siguientes factores:

- Naturaleza del medio en que se transmite la onda.
- Irregularidades del terreno.
- Vegetación.
- Grado de humedad del terreno.
- Frecuencia de la onda.

La σ_{ef} va a estar determinada por la naturaleza del medio, el grado de humedad del terreno y la frecuencia de la onda que se transmite (Fuentes, 1978).

La influencia de la vegetación es relativamente pequeña, solo en algunos casos donde se presentan grandes extensiones con desarrollo exuberante de la misma, su influencia en el proceso de difusión es significativa.

Teniendo en cuenta el papel fundamental que juega el relieve en la difusión de las ondas electromagnéticas (Kashprovskii y Kuzubov, 1963), se puede afirmar que de existir algún algoritmo que, considerando la influencia del relieve, pudiera corregir los valores de σ_{ef} , se podrían estimar valores precisos de σ_{eq} .

Kashprovskii y Kuzubov (1963) han considerado que el cálculo de la intensidad de una onda media de radio sobre un medio heterogéneo con superficie irregular, puede ser reducido al cálculo del campo sobre un medio con superficie plana horizontal con parámetros eléctricos aparentes σ_a y ϵ_a . Para esto definen el parámetro h que incluye las propiedades eléctricas (σ y ϵ) del medio:

$$\eta = \frac{1}{\epsilon - j60\lambda\sigma}$$

Luego se puede definir el parámetro eléctrico aparente η_a , por la expresión:

$$\eta_a^{1/2} = \eta_l^{1/2} + \eta_r^{1/2},$$

donde:

η_l está determinado por los parámetros eléctricos locales σ_l y ϵ_l .

η_r lo determina la forma del relieve en la trayectoria comprendida desde el transmisor al punto en cuestión.

Si se toma en cuenta el cumplimiento de la condición $60\lambda\sigma_{ef} > \epsilon_r$ (por lo general se cumple en ondas medias) se puede considerar al parámetro η como:

$$\eta \approx 1 / (j60\lambda\sigma)$$

Por lo que finalmente, el algoritmo utilizado para estimar la conductividad eléctrica equivalente a partir de la corrección

topográfica y la conductividad eléctrica efectiva se expresa de la manera siguiente (Kuzubov, 1966):

$$\sigma_{eq}^{-1/2} = \sigma_{ef}^{-1/2} + \sigma_r^{-1/2},$$

donde:

σ_{eq} - conductividad eléctrica equivalente en mS/m.

σ_{ef} - conductividad eléctrica efectiva en mS/m.

σ_r - conductividad eléctrica aparente debido al efecto del relieve en mS/m.

$$\sigma_r = 1.68 \cdot 10^{-2} L^3 / H^4$$

donde:

L - longitud promedio de las elevaciones del terreno (metros).

H - altura promedio de las elevaciones del terreno (metros).

La influencia del relieve en la dispersión de las ondas de radio se analiza como un empeoramiento en la conductividad eléctrica del suelo a lo largo del perfil; debido a esto se expresa como σ_r , aunque solo para ser incluido en la expresión empírica anteriormente expuesta, que relaciona el efecto dispersivo del relieve con las conductividades σ_{eq} y σ_{ef} .

Para utilizar este algoritmo debe cumplirse que:

- La longitud de la onda (λ) sea mayor que 300 m.
- La difusión de las ondas de radio se realice sobre elevaciones con una altura mucho menor que la longitud de onda considerada ($H \ll \lambda$).
- Estas elevaciones no sean tan abruptas, es decir, que ($H/L \ll 1$).
- La conductividad eléctrica efectiva sea mayor que 1 mS/m.
- $60\lambda\sigma_{ef} > \epsilon_r$, siendo ϵ_r la constante dieléctrica relativa.

Estos requisitos hacen imposible la utilización de este algoritmo para estimar la conductividad eléctrica equivalente en zonas montañosas, así como en las zonas de congelación permanente, donde la baja σ_{ef} y la alta ϵ_r hacen que la condición $60\lambda\sigma_{ef} > \epsilon_r$ no se cumpla.

La σ_{ef} y la σ_r pueden relacionarse de la manera:

$$K = \sigma_{ef} / \sigma_r$$

Cuando $K \leq 10$ es el comportamiento de la σ_{ef} a lo largo del perfil, el factor principal en la difusión de las ondas electromagnéticas, en caso contrario, es decir $K > 10$, el factor fundamental sería la influencia del relieve (Kashprovskii, 1965).

Los datos del relieve deben ser tomados de hojas cartográficas a escala 1 : 10,000 o 1 : 20,000 para que puedan obtenerse con precisión las distintas variaciones del relieve. Para obtener las alturas relativas y longitudes del relieve se traza un nivel de referencia tomando en consideración las alturas menores registradas respecto al nivel medio del mar.

El algoritmo utilizado en la estimación de la σ_{eq} está preparado de forma tal que brinda varios valores estimados en un mismo perfil, en dependencia de las variaciones bruscas del relieve y/o de la magnitud de la σ_{ef} presente en el mismo.

En un primer análisis de los resultados obtenidos en los perfiles pudo comprobarse, como anteriormente se mencionó, que la medición con el método SEV simultáneamente con el MAC es insuficiente para la estimación de la σ_{ef} característica del perfil, pues para caracterizar la σ_{eq} de un perfil por el MAC basta con realizar mediciones cada 3.5 Km, mientras que por el método SEV es recomendable realizar mediciones a intervalos no mayores de 1.5 Km. Esto se debe a que la tectónica de la zona tiene dislocaciones disyuntivas bastante marcadas y plegamientos que provocan cambios bruscos de σ_{ef} para pequeñas variaciones de la distancia en el perfil (Frías, 1989).

En la Tabla 2 se observan los valores obtenidos de σ_{eq} en el perfil RCH-1 mediante los dos métodos, siendo el comportamiento de este parámetro semejante en ambos casos. Los valores obtenidos mediante la corrección topográfica se mantuvieron mayores que los obtenidos por el MAC, sugiriendo que no se han considerado algunos efectos atenuantes de menor influencia tales como las zonas pobladas.

Tabla 2. Resultados obtenidos por ambos métodos en el perfil RCH-1.

H _{prom} (m)	L _{prom} (m)	K	σ_{eq} (est.)	σ_{eq} (MAC)	Dist. (km)
39	660	28.5	1	1	3.6
35	1130	4.0	7	5	10.0
32	1053	3.4	7	5	10.4
30	1054	2.8	10	5	12.0
29	1222	1.4	15	7	14.9
28	1333	1.0	15	7	18.1
26	1278	0.8	15	7	18.9
24	1174	0.7	15	10	24.9
24	1191	0.6	15	10	27.3
24	1391	0.5	15	10	28.2
27	1141	1.2	15	10	31.1
26	1098	1.2	15	10	31.2
29	1010	2.4	10	5	33.3
34	908	5.8	5	5	37.8

El hecho de que al final del perfil exista una mayor coincidencia se debe a que los valores promedios de la σ_{ef} tienden al valor característico del perfil al final del mismo, como es de esperarse ya que el número de mediciones es mayor. Un hecho interesante que se observa es la coincidencia al inicio del perfil, donde es poca la cantidad de mediciones con el método SEV; sin embargo, si se tiene en cuenta que en este tramo del perfil el valor de K es mayor que 10, entonces la influencia del relieve en esta zona es tan fuerte que el valor de σ_{eq} va a estar más determinado por las variaciones del relieve que por el comportamiento de la σ_{ef} , demostrando que los datos del relieve fueron tomados con la precisión correcta.

En la Tabla 3 se muestran los valores de conductividad eléctrica equivalente calculados a partir de ambos métodos para el perfil RCH-2, en el cual se observa un comportamiento similar a lo ocurrido en el perfil RCH-1.

Tabla 3. Resultados obtenidos por ambos métodos en el perfil RCH-2.

H _{prom.} (m)	L _{prom.} (m)	K	σ_{eq} (est.)	σ_{eq} (MAC)	Dist. (km)
23	842	2.6	15	7	12.3
24	953	1.6	15	7	14.5
23	947	1.5	15	5	15.3
23	1045	1.1	15	7	18.4
26	1081	1.9	15	10	21.7
28	1082	3.0	15	15	24.9
30	1143	4.0	15	15	26.1
42	1069	18.9	5	5	31.5
48	1314	19.8	5	5	36.4
50	1317	21.5	5	5	41.1

Para cuantificar las diferencias entre los valores obtenidos por ambos métodos en los dos perfiles, se consideraron como magnitudes reales los valores obtenidos por el MAC, y magnitudes estimadas las determinadas por el método SEV y las correcciones topográficas, de esta forma se determinó el error estándar en la estimación de la muestra, siendo éste de 5.2 mS/m para el perfil RCH-1 y 5.6 mS/m para el perfil RCH-2.

CONCLUSIONES

a) Una buena estimación de los valores de σ_{eq} , aplicando la corrección topográfica a los valores de σ_{ef} obtenidos, es posible si los perfiles son lo suficientemente extensos, de forma tal que permitan obtener el valor medio de la σ_{ef} característica del perfil con una buena precisión.

b) La distancia a partir de la cual se estiman valores precisos de σ_{eq} en el perfil, dependerá del intervalo de medición utilizado en el método SEV; no obstante, se recomienda realizar las mediciones en un intervalo no mayor de 1.5 Km.

c) Se puede concluir además, que los valores anómalos de ϵ_r se deben a la marcada heterogeneidad del medio, es decir a la presencia de múltiples fallas y plegamientos que caracterizan la tectónica del área, así como a la multiestratificación observada en los horizontes más superficiales del subsuelo (Eliassen, 1957; Frías, 1989; Wait, 1970).

Por lo anterior, se recomienda que este parámetro eléctrico del suelo se tenga en cuenta para servicios radioeléctricos cuya frecuencia de trabajo lo requiera, ya que en los medios de alta heterogeneidad la ϵ_r puede tomar valores que difieren marcadamente del intervalo característico usualmente utilizado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la dirección del Instituto de Geofísica y Astronomía del CITMA por el soporte financiero brindado, el cual hizo posible la realización de los trabajos de campo. A la dirección del Ministerio de Comunicaciones de la República de Cuba, por su interés en este proyecto, proporcionando el equipamiento necesario para la ejecución de las mediciones de intensidad de campo. Al Dr. Carlos Flores

Luna, por la revisión del manuscrito y sus atinados comentarios, que enriquecieron e hicieron posible la publicación de este trabajo.

REFERENCIAS

- Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones, 1975, Reunión Técnica Regional de Trabajo sobre el revelamiento de datos de conductividad del suelo y ruido radioeléctrico. Lima, Perú.
- Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones, 1982a, Atlas mundial de la conductividad del suelo. Informe 717. Asamblea Plenaria, Ginebra, 5 pp.
- Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones, 1982b, Método para calcular las características eléctricas efectivas de la superficie de la Tierra. Informe AA15 (MODF).
- Eliassen, K.E., 1957, A survey of ground conductivity and dielectric constant in Norway within the frequency range 0.2-10 MHz. Geofysiske Publikasjoner, 19, N. 11.
- Frías, I., 1989, El método SEV en la determinación de la conductividad eléctrica efectiva de los suelos. Trabajo de Diploma, IGA-ACC, La Habana, Cuba.
- Fuentes, N., 1978, Confección del mapa de la conductividad eléctrica efectiva de las provincias de La Habana y Ciudad de la Habana, Trabajo de Diploma, IGA-ACC, 93 pp.
- Jordan, E.C., 1972, Electromagnetic waves and radiating systems. Segunda Edición, Ed. Rev., p. 628-665.
- Kashprovskii, V.E., 1963, Local conductivities of soils and their distribution over the territory of the USSR. Geomagnetism and Aeronomy, Vol. III, p. 240-248.
- Kashprovskii, V.E., 1965, Characteristics of ground wave propagation in the permafrost zone, Geomagnetism and Aeronomy, Vol. V, p. 596-598.
- Kashprovskii, V.E. and F.A. Kuzubov, 1963, Soil relief irregularities and their influence on the propagation of surface waves, Geomagnetism and Aeronomy, Vol. III, p. 427-435.
- Kashprovskii, V.E. y F.A. Kuzubov, 1971, Propagación de las ondas medias terrestres (en ruso), Ed. Comunicaciones, Moscú, p. 32-175.
- Kuzubov, F.A., 1966, Some characteristics of the propagation of medium wave over irregular relief, Geomagnetism and Aeronomy, Vol. VI, p. 835-838.
- Orellana, E., 1982, Prospección geoelectrica en corriente continua, Ed. Paraninfo, Madrid, 579 pp.
- Pascual, A., O. Delgado y N. Fuentes, 1995, Determinación de la conductividad eléctrica equivalente de los suelos de la República de Cuba. Geofísica Internacional, Vol. 34, N. 2, p. 233-237.
- Wait, J.R., 1970, Electromagnetic waves in stratified media. Pergamon Press, MacMillan, Nueva York (2nd Edition).