

DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE LA TIERRA UTILIZANDO EL METODO DE INCLINACION DE LA ONDA

Ing. Mario Cevallos V.
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Ing. Tarquino Sánchez A.
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

RESUMEN

Se describe un método alternativo para la determinación de las características eléctricas de la tierra, empleando el método de la " INCLINACION DE LA ONDA ", el mismo que a diferencia de otros métodos, permite la medición directa de conductividad y permitividad. Para este efecto se desarrolló un equipamiento especial cuyas características y funciones se detallan.

ABSTRACT

This work describes an alternative method to determine ground electric constants by the " TILT OF THE SURFACE WAVE ".

This method, unlike others, lets to measure the conductivity and the permittivity directly. For getting this purpose we have developed an especial equipment which features are mentioned in the following text.

1.- INTRODUCCION

El estudio de las características eléctricas de la superficie de la tierra, la permitividad relativa ϵ , y la conductividad σ , se basa en el comportamiento de la onda electromagnética que viaja desde un punto emisor (transmisor) hacia un punto colector (receptor), el cual depende de innumerables factores como son: las irregularidades de la superficie, estructura geológica, temperatura, frecuencia, humedad, etc. El comportamiento de estas características muestran un efecto predominante en la propagación por onda superficial, cuyo rango de aplicación es la banda de ondas medias (0.3 - 3 MHz.)

2.- FACTORES QUE INFLUYEN EN EL VALOR DE LAS CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE LA TIERRA

Naturaleza del suelo.- Aun cuando las numerosas mediciones efectuadas han permitido establecer que el valor de las características eléctricas varía según la naturaleza del suelo, es probable que esta variación no se deba tanto a la composición química del suelo si no a sus propiedades de absorción y de retención de la humedad.

Grado de humedad.- Es muy probable que el grado de humedad del suelo sea el parámetro que más influye en el valor de las constantes eléctricas. Las mediciones efectuadas en laboratorio han demostrado que, incrementando el grado de humedad a partir de un pequeño valor, los valores aumentan rápidamente y van alcanzando el máximo a medida que el grado de humedad se aproxima al valor que normalmente existe en los suelos reales.

Temperatura.- Mediciones de laboratorio de las características eléctricas del suelo han demostrado que, para frecuencias bajas la variación de la conductividad con la temperatura es del orden del 3% por grado Celsius; en cambio la variación de la permitividad es despreciable. Cuando se alcanza el punto de congelación, se produce una disminución considerable tanto en la permitividad como en la conductividad.

Variaciones estacionales.- El efecto de las variaciones estacionales sobre la pérdida de propagación por onda de superficie depende del cociente entre la profundidad del suelo donde se manifiestan las variaciones estacionales y la profundidad de penetración de las ondas.

Estructura geológica general.- Los terrenos por encima de los cuales se efectúa la propagación, no son homogéneos; por consiguiente las características eléctricas efectivas dependen de varios tipos de suelos. Por ello importa conocer la estructura geológica de la región que se estudia.

Absorción de la energía por los objetos situados en la superficie.- Los objetos que se encuentran en la superficie de la tierra no influyen directamente en el valor de las características del suelo pero pueden contribuir significativamente a la atenuación de las ondas de superficie.

Los efectos de esas pérdidas de energía pueden considerarse empleando valores convenientemente modificados de las características del suelo en cálculos de propagación.

Penetración y dispersión de las ondas.-

Las mediciones de laboratorio efectuadas con distintos tipos de suelo han demostrado que hay una variación de la permitividad y la conductividad con la frecuencia que depende de su grado de humedad.

La medida en que las capas inferiores del suelo influyen en el valor de las características eléctricas depende de la profundidad de penetración de la energía radioeléctrica.

3. METODOS PARA EVALUAR LAS CARACTERISTICAS DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

3.1 METODO DE LA ATENUACION DEL CAMPO ELECTRICO DE LA ONDA SUPERFICIAL

Este método consiste en efectuar mediciones de la intensidad de campo a lo largo de líneas radiales que parten de una antena transmisora de polarización vertical, y en comparar los datos experimentales con curvas teóricas tales como las presentadas en la Recomendación 368 del CCIR. Si las curvas coinciden, las constantes efectivas del suelo a lo largo de una línea radial son iguales a las utilizadas para calcular las curvas teóricas.

3.2 METODO DE LA INCLINACION DE LA ONDA SUPERFICIAL

Se basa fundamentalmente en que las pérdidas de energía electromagnética en la superficie del suelo requieren una componente radial del vector de campo eléctrico, la cual al tener una relación arbitraria de fase, hace que la onda tenga polarización elíptica, donde el eje mayor esta inclinado hacia adelante debido al flujo de potencia que penetra en el suelo.

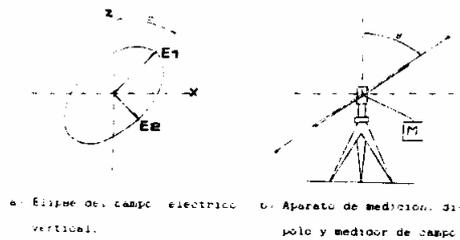
Este método, precisa una medida del ángulo de inclinación de la onda comprendido entre la vertical y el eje mayor de la elipse, y una medida de las intensidades de campo máximo y mínimo. Este método se ha utilizado con éxito para medir la no homogeneidad de la superficie terrestre en sentido horizontal.

4. MEDICION DE CARACTERISTICAS DE LA TIERRA POR EL METODO DE INCLINACION DE LA ONDA

4.1 PARAMETROS DE INTERRELACION DE LA CONDUCTIVIDAD Y PERMITIVIDAD

En una superficie de conductividad finita, el campo eléctrico producido por una fuente de polarización vertical tendrá una pequeña componente horizontal en la dirección de propagación, como consecuencia el vector de campo eléctrico total experimenta una inclinación respecto a la vertical como se indica en la figura No. 4.1

Fig. No. 4.1



Dado que las componentes vertical Ez, y horizontal Ex, del campo no están en fase, el campo traza una elipse en el plano definido por la vertical y la dirección de propagación. Existe una relación simple entre las características eléctricas y las componentes de campo eléctrico, que son:

$$\epsilon_r = |Ez/Ex|^2 \cos(2\beta) \quad (1a)$$

$$\sigma/f = |Ez/Ex|^2 \sin^2(2\beta)/18 \quad (1b)$$

donde: β es el ángulo de fase eléctrica entre las componentes de campo y f es la frecuencia de la onda de superficie expresada en MHz.

En la práctica es muy difícil medir la componente horizontal Ex, una pequeña falta de alineación de la antena de medición introduce un importante error. Además, la medición del ángulo de fase β , requiere un costoso equipo.

Un método corriente de medición de la inclinación de la onda, consiste en utilizar un aparato medidor de la intensidad de campo conectado a una antena que puede girar alrededor de su centro sobre un eje normal a las componentes de campo. Luego se procede a medir las intensidades de campo máxima E1, y mínima E2, a medida que gira la antena, y se registra la relación de campo $r = E2/E1$; además el ángulo θ , entre la vertical y la dirección de E1.

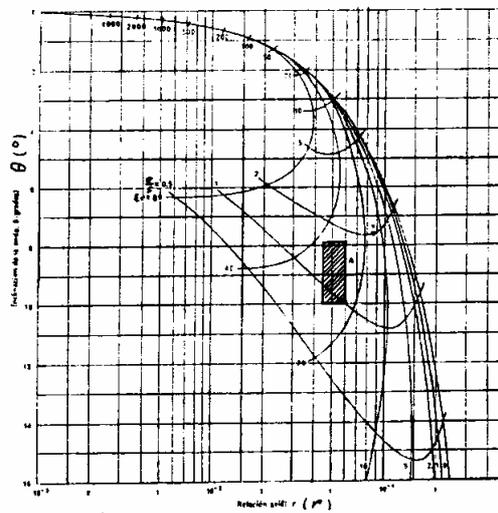
Las variables de la ecuación (1) se relacionan con las cantidades medidas r y θ mediante las fórmulas:

$$|Ex/Ez|^2 = \frac{[r^2 + \tan^2(\theta)]}{[1 + r^2 \tan^2(\theta)]} \quad (2a)$$

$$\cos(2\beta) = \frac{[(1-r^2)\text{sen}(2\theta) - 4r^2]}{[(1-r^2)\text{sen}(2\theta) + 4r^2]} \quad (2b)$$

Como alternativa al análisis numérico las características eléctricas pueden obtenerse directamente por medio de la figura No. 4.2

Fig. No.4.2 Relación entre r, θ , y las características eléctricas del suelo



4.2 PRECISION DE LAS MEDICIONES DE LA INCLINACION DE LA ONDA

El rectángulo sombreado A de la fig. No.4.2 corresponde a un error de medición de $\pm 1^\circ$ en el ángulo de inclinación y de ± 1 dB en la relación axial.

Se puede deducir de la figura que la precisión para determinar la conductividad efectiva depende de la precisión con que se mide el ángulo de inclinación de la onda; y la precisión de la permitividad efectiva guarda estrecha relación con la exactitud de la relación axial.

Sobre un terreno homogéneo, el ángulo de inclinación y la relación axial serán independientes de la distancia a la fuente, si las mediciones se efectúan a varias longitudes de onda; para trayectos no homogéneos el ángulo de inclinación y la relación axial variarán bruscamente en la frontera de la conductividad.

5. DISEÑO DEL EQUIPO PARA LA DETERMINACION DE LAS CONSTANTES DE LA TIERRA.

5.1 EQUIPO REQUERIDO

Para la determinación experimental de las constantes de la tierra se requiere la construcción de :

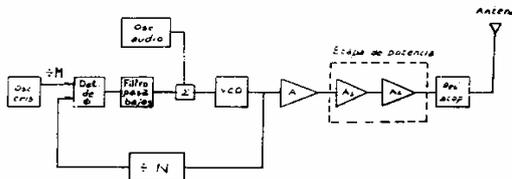
- Un equipo transmisor, que permite enviar una señal de audio frecuencia la cual es objeto de medición.
- Un equipo receptor, que permite captar la señal transmitida y cuantificar la intensidad de campo.

5.2 EQUIPO DE TRANSMISION

Básicamente es un modulador de frecuencia, el cual utiliza para este propósito un circuito asegurador de fase, un generador de audio y radio frecuencia, un amplificador sintonizado y la etapa de potencia para la emisión de la señal a través de un monopolo

En la figura No. 5.1 se indica un diagrama de bloques de las partes fundamentales de un transmisor con modulación en frecuencia.

Fig. No. 5.1 Diagrama de bloques del Tx.



El transmisor esta formado por un oscilador de cristal que genera la señal de portadora la cual entra a un divisor de frecuencia que es un contador de módulo programable.

Esta señal llega a un lazo asegurador de fase, IC. NE 564 el cual trabaja como un sintetizador de frecuencia que permite obtener a la salida, la señal de audio modulada en frecuencia; con el propósito de que alcance los niveles adecuados para la transmisión, la señal F.M. se alimenta a una etapa excitadora y luego a la etapa de salida, la misma que se acopla a una antena de transmisión.

CARACTERISTICAS TECNICAS

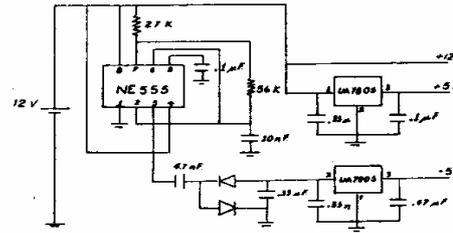
Las características impuestas para el Tx. son:

- Potencia de transmisión : 30 W.
- Radio frecuencia : 1.6 MHz.
- Audio frecuencia : 1.0 KHz.
- Tipo de modulación : F.M.

CIRCUITO DE FUENTE

El transmisor requiere para su funcionamiento de voltajes continuos de ± 5 V. y $+12$ V., los cuales permiten polarizar a circuitos integrados y tansistorizados. Para el efecto se dispone de una batería de $+12$ V. y 40 Ah. El circuito diseñado es el de la figura No. 5.2

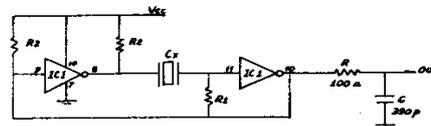
Fig. 5.2 Circuito de fuente



OSCILADOR DE CRISTAL Y AUDIO FRECUENCIA

El oscilador de cristal esta diseñado en base a compuertas lógicas TTL básicas y el empleo del cristal asegura la precisión de la oscilación, es decir, que no exista un corrimiento de la portadora. Además dispone de un filtro RC pasa bajos que permite obtener una señal completamente sinusoidal.

Fig. No. 5.3 Oscilador de cristal.



La generación del tono de prueba de 1 KHz. requiere de un amplificador operacional y los criterios de un oscilador RC, tipo Wien Bridge de máxima estabilidad, el circuito se denota en la figura No. 5.4

Fig. No. 5.4 Oscilador de audio.

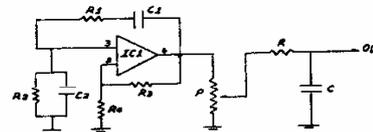
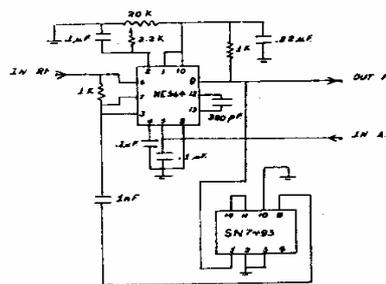


Fig. 5.5 Modulador



MODULADOR

Para el diseño se utilizó el IC. NE 564 que es un PLL el cual permite realizar la modulación de frecuencia, el circuito utiliza un contador como divisor de frecuencia para obtener una portadora variable.

PREAMPLIFICADOR Y AMPLIFICADOR DE POTENCIA

La etapa de potencia esta constituido por:

Un preamplificador que trabaja en clase C; diseñado para una ganancia en potencia de 11 dB, este circuito utiliza una red de acoplamiento tipo L a la entrada y una red tipo π a la salida con un factor de calidad $Q = 2$. Este amplificador acepta por entrada una señal de 0.2 W. y permite obtener una señal de 2.5 W. que excitará a la siguiente etapa con la se obtiene 30 W. da salida.

Fig. No. 5.6 Preamplificador de potencia

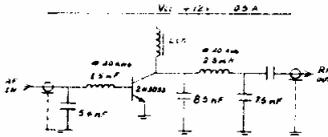
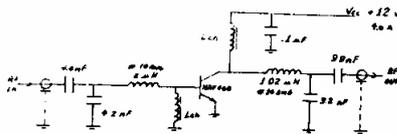


Fig. No. 5.7 Amplificador de potencia



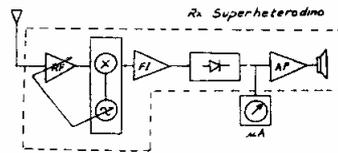
ANTENA TRANSMISORA

La zona primaria de servicio de un transmisor por onda media viene determinado por la señal que se propaga por el suelo, es decir por la onda superficial. En este modo de propagación, a señal transmitida debe tener polarización vertical. Para el presente caso se utilizó un monopolo corto (10 m. de altura) y un plano de tierra de 16 radiales de 6 m. de longitud. Estas dimensiones se eligieron para cumplir con los requerimientos electromagnéticos y para disponer de un equipo portátil.

5.3 EQUIPO DE RECEPCION

El receptor consiste en un medidor de campo que ha sido concebido especialmente para la banda media, el cual permite cuantificar el campo radiado y escuchar el tono de prueba considerado. En la figura 5.8 se muestra un diagrama de bloques de la estructura básica del receptor, el cual consta de una antena receptora, de un receptor superheterodino y de un medidor de señal.

Fig. No. 5.8 Diagrama de bloques del RX.



Se requiere para el diseño que el circuito cumpla con las siguientes características:

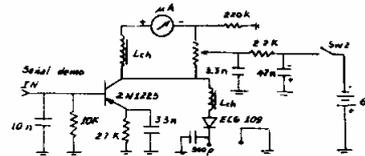
- Un medidor de campo que permita captar la señal de RF enviada por el Tx, que posibilite transformar la señal recibida en una magnitud de intensidad de campo proporcional a la señal de audio frecuencia, y además permita cuantificar la intensidad de campo.

- Una antena dipolo de 1 m. de longitud que tenga posibilidad de girar en todas las direcciones.

Para la etapa de recepción se utilizó un receptor A.M. comercial con funcionamiento a pilas, el cual fue modificado en su etapa de detección.

La señal demodulada es derivada a un circuito que emplea un transistor de germanio que permite detectar las variaciones de campo como una variación de corriente. Un microamperímetro de desviación con escala cero intermedio de $\pm 150 \mu A$. servirá de elemento de medida.

Fig. No. 5.9 Circuito medidor de campo



6. MEDICION DE LA CONDUCTIVIDAD Y LA PERMITIVIDAD EN UNA REGION DETERMINADA.

6.1 PROCEDIMIENTO A SEGUIR

Cuando se elige el método para evaluar las constantes del suelo, se debe considerar que no se pretende determinar los valores en puntos específicos; si no que, se trata de obtener valores en regiones representativas de una zona en particular.

Los pasos a seguir son:

- Establecimiento de áreas representativas de medición; para la que se considera los siguientes factores:
 - Disponibilidad de cartas topográficas de la zona.
 - Facilidad de acceso a los puntos previstos.
 - Disponibilidad del personal capacitado y vehículo apropiado.
 - Factibilidad de las condiciones climáticas para realizar el trabajo de campo.

b). La etapa de planificación, que contempla:

- Elección de la frecuencia de portadora
- Adquisición de cartas topográficas de las zonas de interés.
- Ubicación de la estación transmisora, selección de los radiales, y puntos de medición.
- Elaboración de las planillas de medición
- Adquisición de accesorios.

c). Medición y recopilación de datos, que comprende:

La medición de la intensidad de campo máxima E1, mínima E2 y el ángulo θ , estas mediciones conviene realizarlas dentro del período comprendido entre dos horas después de la salida del sol y dos horas antes de la puesta, con el propósito de evitar errores en los valores medidos debido a reflexiones ionosféricas.

d). Procesamiento de datos, que consta de los siguientes puntos principales:

- Recopilación de planillas y cartas geográficas utilizados en la medición.
- Ordenamiento de las planillas de medición según la región y distancia radial en los puntos de interés.
- Ubicación en la carta geográfica los puntos donde se encuentra el equipo transmisor y los puntos de medición.
- Cálculo de la conductividad y permitividad del suelo a partir de los parámetros de interrelación medidos.

e). Resultados

Luego de obtener los valores de las características de la tierra, se procede a tabular estos resultados para posteriormente elaborar la carta de conductividad.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en tres zonas de la provincia de Imbabura: Salinas (estación de transmisión No 1), Chaltura (estación de transmisión No 2) y San Pablo del Lago (estación de transmisión No 3).

Los resultados finales de las mediciones en las tres regiones se presenta a continuación:

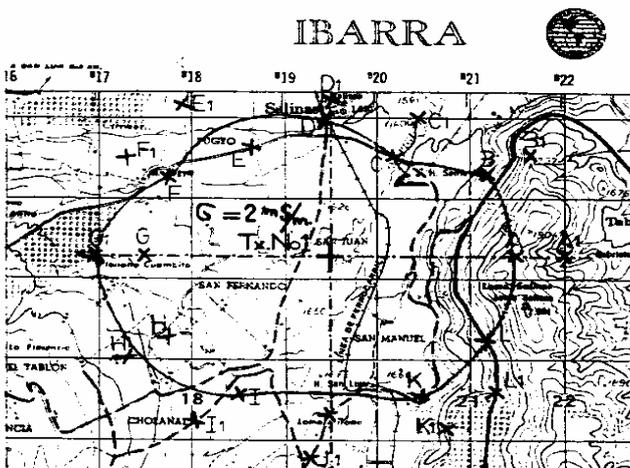
Fig. No. 6.2 Resultados.

ESTACION DE TRANSMISION No. 1			CIUDAD : Salinas		
PUNTOS	PARAMETROS DE INTER-RELACION		PERMITIVIDAD RELATIVA ϵ_r	CONDUCTIVIDAD (Calculada) σ (nS/m)	CONDUCTIVIDAD (asignada) σ (nS/m)
	r (E ₁ /E ₂)	θ (°)			
A	0.0454	07	54.47	1.85	2.0
B	0.1176	08	19.69	1.78	2.0
C	0.1111	08	21.59	1.99	2.0
D	0.1578	06	09.54	2.32	2.5
E	0.1428	07	33.74	2.18	2.0
F	0.1566	07	18.42	2.94	2.0
G	0.1547	05	08.78	2.70	2.5
H	0.0380	06	75.40	2.32	2.5
I	0.0444	07	54.93	1.82	2.0
J	0.1900	06	32.05	3.11	2.0
K	0.1090	08	22.19	1.89	2.0
L	0.0833	09	26.04	1.53	1.5
MI	---	---	---	---	---
NI	0.0540	07	49.80	2.15	2.0
OI	0.1333	05	16.18	3.18	2.0
PI	---	---	---	---	---
QI	0.0925	08	27.43	1.97	2.0
RI	0.1333	07	15.36	1.92	2.0
SI	0.1400	07	09.60	2.90	2.0
TI	0.0632	07	45.87	2.25	2.0
UI	0.0510	08	11.47	1.49	1.5
VI	---	---	---	---	---
XI	0.1420	05	12.52	2.76	2.0
LI	---	---	---	---	---

ESTACION DE TRANSMISION No. 2			CIUDAD : Chaltura		
PUNTOS	PARAMETROS DE INTER-RELACION		PERMITIVIDAD RELATIVA ϵ_r	CONDUCTIVIDAD (Calculada) σ (nS/m)	CONDUCTIVIDAD (asignada) σ (nS/m)
	r (E ₁ /E ₂)	θ (°)			
A	0.1333	12	11.09	1.61	1
B	0.1428	14	40.47	0.73	1
C	0.0508	12	19.26	0.45	0.5
D	0.0526	09	33.40	1.16	1
E	0.0816	10	22.43	1.27	1
F	0.2332	10	02.16	1.91	1
G	0.1224	12	12.29	0.99	1
H	0.0510	10	27.92	0.89	1
I	0.1311	12	13.38	0.76	1
J	---	---	---	---	---
K	0.1200	09	17.27	1.64	1.5
L	---	---	---	---	---
MI	0.0675	09	29.94	1.37	1.5
NI	0.2325	10	02.33	1.82	1
OI	0.1200	10	15.37	1.38	1.5
PI	0.0500	10	26.48	0.99	1
QI	---	---	---	---	---
RI	0.1333	11	12.87	1.67	1
SI	0.0741	08	32.01	1.86	2.0
TI	0.0333	09	37.09	0.80	1
UI	0.0526	10	27.47	0.91	1
VI	---	---	---	---	---
XI	0.1250	09	16.19	1.64	1.5
LI	---	---	---	---	---

ESTACION DE TRANSMISION No. 3			CIUDAD : San Pablo del Lago		
PUNTOS	PARAMETROS DE INTER-RELACION		PERMITIVIDAD RELATIVA ϵ_r	CONDUCTIVIDAD (Calculada) σ (nS/m)	CONDUCTIVIDAD (asignada) σ (nS/m)
	r (E ₁ /E ₂)	θ (°)			
A	0.1200	10	15.37	1.38	1.5
B	0.0500	10	26.48	0.99	1.0
C	0.1250	09	16.19	1.64	1.5
D	0.0800	09	26.87	1.50	1.5
E	0.0508	08	33.40	1.16	1.5
F	---	---	---	---	---
G	0.1142	09	18.55	1.44	1.5
H	0.0975	08	33.43	1.85	2.0
I	0.1619	06	08.52	2.26	2.5
J	0.0842	09	25.82	1.55	1.5
K	0.0777	09	27.43	1.48	1.5
L	0.0833	09	26.04	1.53	1.5
MI	---	---	---	---	---
NI	0.0222	06	85.01	1.48	1.5
OI	---	---	---	---	---
PI	0.0795	09	29.21	1.41	1.5
QI	0.0600	10	26.48	1.01	1.0
RI	---	---	---	---	---
SI	0.0520	08	41.13	1.51	1.5
TI	0.0333	06	78.00	2.06	2.0
UI	0.1086	09	19.84	1.64	1.5
VI	0.1276	07	18.17	2.72	2.5
XI	---	---	---	---	---
LI	0.0788	09	22.26	1.44	1.5

Fig. No. 6.1 Mapa de mediciones de la estación de Tx. No.1



7. CONCLUSIONES

El método de la inclinación de la onda superficial es muy ventajoso, puesto que no requiere de una calibración exacta del receptor debido a que no involucra en el cálculo valores absolutos de la intensidad de campo; además el ángulo de inclinación θ , no depende de la potencia del transmisor.

Una característica particular de este método, es que permite determinar la conductividad y permitividad de la tierra al mismo tiempo. A diferencia del método de la atenuación permite únicamente determinar un solo parámetro, (la conductividad), asumiendo valores normalizados para la permitividad.

Los efectos de nuestra topografía variada, se encuentra plasmado en el valor de la conductividad del suelo; producido por la dispersión, difracción y reflexión de las señales de radio. No obstante, esto explica la razón de los valores de conductividad que se obtuvieron en la provincia de Imbabura; 2.5 mS/m. en Salinas, 1 mS/m. en Chaitura y 1.5 mS/m. en San Pablo del Lago.

Al comparar estos valores con datos disponibles de estudios anteriores, concluimos que los resultados son de gran validez, puesto que son consecuencia de una conductividad equivalente y corresponden a una región de pobre conductividad.

Finalmente, la determinación de las constantes eléctricas de la tierra reviste especial importancia, para realizar los siguientes trabajos:

- El cálculo de áreas de cobertura y la intensidad de campo de estaciones de radio en onda media.
- Designación de frecuencias para nuevas estaciones en esa banda.
- Para el reordenamiento de frecuencias por la potencia de las estaciones nacionales, regionales y locales.
- Adecuada ubicación de los transmisores de las estaciones de radiodifusión.

8. REFERENCIAS

- [1] King, J. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. January, 1976
- [2] Dolukhanov, M. Propagation of radio waves. U.R.S.S. 1975
- [3] Picquenard, A. Métodos de medida del ruido y de la conductividad del suelo. Ministerio de Aeronáutica. Brasil, 1989
- [4] Volumen V del CCIR, XIV Asamblea Plenaria. KIOTO, 1979
- [5] Volumen V del CCIR, Informe 229-4, Informe 879. Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1978 - 1982
- [6] Jordan, E. Ondas Electromagnéticas y Sistemas Radiantes. Madrid, 1973
- [7] Duranton, P. Radio Aficionados. Madrid 1983
- [8] Texas Instruments, Circuit Design for Audio, AM/FM and TV.

BIOGRAFIAS

Ing. MARIO CEVALLOS VILLACRESES

Profesor principal a tiempo completo de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional, obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en 1968, posteriormente ha realizado cursos de Postgrado y ha participado en proyectos de investigación en Holanda. En 1982 obtuvo el Premio Escuela Politécnica Nacional a la mejor investigación publicada.

Ing. TARQUINO F. SANCHEZ ALMEIDA

Nació en Atuntaqui el 18 de Marzo de 1966. Obtuvo el título de bachiller en humanidades modernas en el Colegio Particular Sánchez y Cifuentes de Ibarra. Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional y obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en 1991. Actualmente es Profesor Asistente a tiempo completo de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.