

PRECISION COMPARADA ENTRE DISTINTOS METODOS DE EVALUACION DE
CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE SUELOS

Víctor H. Padula Pintos
Instituto Tecnológico de Buenos Aires

RESUMEN

Se hace una exposición de distintos métodos utilizables para determinar características eléctricas de suelos. Se estudian las posibles causas de errores asociadas con ellos. Se comparan los resultados, que fundamentan la adopción de una metodología "clásica", ajustada para eliminar la subjetividad que le es inherente.

SUMMARY

Different usable methods for measuring electrical characteristics of ground are reviewed. The possible causes of errors associated with each method are studied. The results, which make advisable the use of a "Classical" methodology adjusted to avoid subjective errors, are compared.

1.-INFLUENCIA DE LAS CARACTERISTICAS EFECTIVAS DEL SUELO EN LA PROPAGACION DE
FRECUENCIAS MEDIAS POR ONDA DE SUPERFICIE.

El alcance de una emisión, con una determinada intensidad de campo, depende de su potencia, de la frecuencia, de las características de la antena, y de las características del suelo sobre el cual se propaga la onda. A igualdad de todas las otras condiciones, se muestran en la Figura I las diferentes distancias que pueden lograrse con una misma calidad de señal, en función de la conductividad del suelo.

En general, esta conductividad es el valor más representativo del tipo del terreno y el que por lo tanto se toma en cuenta para estimar alcances. En efecto la permeabilidad relativa es normalmente igual a la unidad y la constante dieléctrica tiene una influencia que se advierte sólo en algunos casos particulares, ya que interviene en la programación modificando la expresión de ϵ' según:

$$\epsilon' = \epsilon - j 18.000 \sigma / f$$

donde σ es la conductividad y está dada en Siemens por metro, f es la frecuencia en megahertz y ϵ es la constante dieléctrica. Se advierte en la Tabla I que sólo con las conductividades más bajas la influencia de ϵ se hace notable, y aún entonces, trabajando en la parte baja de la banda, los errores que se pueden cometer por asumir un valor equivocado de constante dieléctrica no serán apreciables.

Esto justifica que en la mayoría de los casos se considere un valor dado de ϵ y se lo mantenga como constante en los cálculos. El Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones ha adoptado el valor 4 y la Federal Communications Commission, de Estados Unidos, 15, para calcular sus curvas de propagación de la onda de superficie.

2.-FACTORES QUE INFLUYEN EN EL VALOR DE LAS CONSTANTES DEL SUELO.

La constitución del suelo determina el valor de sus características eléctricas. Sin embargo, la humedad que contenga puede hacer variar esas características dentro de márgenes muy grandes. Esto lleva a pensar que los valores que pueden medirse en determinadas condiciones pueden ser diferentes según se hayan hecho después de una lluvia o después de una época de sequía. Sin embargo, dentro de ciertos límites, se puede decir que a poco de terminada la lluvia, el escurrimiento normal y la evaporación lleva al suelo a sus valores normales, aunque está comprobado que después de una larga sequía las condiciones del suelo muestran apartamientos de lo que podrían considerarse condiciones normales.

La temperatura no constituye un factor crítico, a pesar de que la conductividad disminuye con aquélla, especialmente cerca de los 0°C.

A medida que aumenta la profundidad las variaciones de temperatura del suelo se hacen menos notables por lo que cuando la penetración es mayor, como sucede en las frecuencias más bajas, las diferencias que se advierten son menores.

Esa penetración en el suelo depende de sus características y de la frecuencia. En la banda de radiodifusión en frecuencias medias, se puede estimar que la penetración, considerada hasta donde la señal se atenúa a $1/e$, o sea al 37% de su valor de superficie, está aproximadamente entre 2 ó 3 y más de 100 metros, según se trate de terrenos de alta o baja conductividad.

3.-CARACTERISTICAS DE LOS METODOS DE MEDICION .

3.1-Medición en laboratorio de muestras de suelos.

El método consiste en extraer muestras del suelo en estudio y hacer luego mediciones en laboratorio. Por lo general se utiliza el material extraído como dieléctrico de un condensador, cuya resistencia y reactancia se miden. Normalmente por razones técnicas y de costo, debido a los requerimientos de máquinas y de tiempo sólo es posible hacer extracciones de la parte más cercana a la superficie. Cuando la penetración de la onda sea mayor que la profundidad a que se llegó para obtener la muestra, los datos que se saquen de ésta no serán válidos para poder aplicarlos a cálculos de radiopropagación, a menos que se tenga una absoluta certeza de que el suelo es uniforme a cualquier profundidad. En general se puede tener tal certeza sólo cuando se trate de agua o,

a veces, de rocas.

Si se pretende mejorar la precisión de los resultados habría que extraer muestras de todos los posibles niveles, medirlos y luego calcular la contribución de cada uno al resultado efectivo total, que por supuesto, será función de la frecuencia.

Si se supone un suelo compuesto por sólo 2 estratos de distinta constitución, definidos por $(\sigma_1; \epsilon_1)$ y $(\sigma_2; \epsilon_2)$ con un espesor x_1 del medio que está en la superficie, como se ve en la Figura 2, la penetración en el "medio compuesto" será:

$$\sigma = \frac{1 + x_1 (\alpha_2 - \alpha_1)}{\alpha_2}$$

donde α es la constante de atenuación. Es decir, el "medio compuesto" se comporta como si tuviera una constante de atenuación:

$$\alpha_{ef} = 1/\sigma = \frac{\alpha_2}{1 + x_1 (\alpha_2 - \alpha_1)}$$

El error que se puede cometer al tomar en lugar de este valor el que corresponde al medio del cual se obtuvo la muestra, puede alcanzar los elevados valores que se ven en las Figuras 3 y 4, que corresponden a 0,5 y a 1,5 MHz., respectivamente.

A esos errores hay que agregar los derivados de la diferencia entre la humedad y la compactación reales existentes en el suelo y las que tendrá la muestra al medirse en laboratorio, después del traslado.

Es prácticamente imposible conocer y mantener la compactación del material. Normalmente durante el proceso de extracción se afecta esa compactación, que sin duda se modifica de nuevo al colocar la muestra en el recipiente en que se la transporta. Para disminuir estos inconvenientes sería necesario extraer un bloque grande de suelo, por ejemplo de 50 cm o 1m de lado o bien utilizar un tubo de sección suficiente y bordes afilados que ya sirviera como contenedor para el transporte. Los elementos necesarios y el tiempo que requiere la obtención de cada muestra, llevan las dificultades y el costo a valores que sólo se justifican si se tratara de hacer limitadas mediciones o si el método ofreciera apreciables ventajas sobre los otros posibles.

La variación de la resistividad por modificación de la compactación resulta difícil de estimar ya que normalmente se debe partir de un valor inicial desconocido.

Por último, debe tenerse presente que el método permitiría obtener resultados que sólo serían válidos para el lugar del que se extrajo la muestra. Dicha validez se podría extender a una zona más o menos extensa solamente si se tuviera la certeza de su uniformidad y como para tenerla el único modo sería medirla, se cae en la cuenta de que el método no resulta aconsejable cuando se trata de determinar las características efectivas del suelo que afectan a la radiopropagación en frecuencias medias y en extensiones geográficas grandes.

3.2.-Determinación de la resistividad del suelo por medio de sondas.

El método consiste en introducir en el suelo sondas en forma de "lanzas" conductoras, haciendo pasar corriente entre pares de ellas. Como señala el Informe 229-3 del CCIR, la mayoría de las veces las medidas se hacen con corriente continua. Para que la contribución de las capas profundas no sea despreciable la separación entre lanzas debe ser grande, lo que complica el procedimiento en el terreno. Pero por otra parte con separaciones grandes es posible que aparezcan efectos debidos a contribuciones de estratos más profundos que los que corresponden a la penetración de las radiofrecuencias. Esto lleva a pensar en la conveniencia de trabajar con frecuencias cercanas a las de la banda para la que interesa determinar las constantes del suelo. Además juega un papel importante la profundidad a que se colocan las sondas, así como el espesor relativo entre el primero y los siguientes estratos, cuyo efecto se aprecia en la Tabla II, calculada para $f=1,5$ MHz. Con frecuencias menores la longitud de la sonda será una fracción aún menor de la penetración. Se supone además una sonda de 2 mts, un primer estrato (x_1) de 1 m y otro mayor de 2 mts, y un segundo estrato ilimitado. La última columna da, en forma en cierto modo arbitraria una idea de la parte de campo que no es tenida en cuenta en la medición. Es decir: lo que estamos midiendo con sondas de 2m. es sólo una parte de lo que mediríamos a la profundidad de penetración.

3.3.-Determinación de las características del suelo por medición de la inclinación del frente de onda.

En frecuencias medias, el modo principal de propagación es por onda de superficie. Normalmente se utiliza polarización vertical. Si el terreno por sobre el que se propaga la onda fuera de conductividad infinita no se producirían pérdidas y esa polarización se mantendría a cualquier distancia de la antena transmisora. Pero en todos los casos prácticos, los terrenos dan lugar a pérdidas, y entonces el frente de onda se inclina. Es decir, el vector de Poynting pasa a tener una componente vertical, proporcional a las pérdidas, en lugar de ser perfectamente horizontal. Por su parte el vector del campo eléctrico tam-

bién se inclina, presentando una componente vertical, como era la polarización inicial, y otra componente horizontal. La inclinación es función de la magnitud de aquellas pérdidas, es decir, es función de las características eléctricas del suelo.

Se comprende entonces que estas características pueden deducirse si se conoce o se mide la inclinación del frente de onda. Sin embargo las dificultades que aparecen hacen que la precisión de los resultados se vea seriamente afectada. En efecto, se ha demostrado (Padula Pintos y otros, 1975) que con el instrumental de que se dispone en plaza hay indefiniciones como las que se muestran en la Figura 5.

En otro trabajo (Padula Pintos, 1978) se ha analizado la precisión con que pueden medirse la inclinación y la excentricidad de la elipse de polarización, y los resultados a que se llega, se muestran en la Figura 6. Es evidente que la indeterminación que puede alcanzar el σ hallado puede llegar a estar en la relación de 1 a 4.

3.4.-Método de atenuación de la onda de superficie en función de la distancia.

3.4.1.-Metodología clásica.-Consiste en medir la intensidad de campo a diferentes distancias de la antena, a lo largo de un mismo radial, repitiendo la operación en 8 o más direcciones o radiales. Los valores hallados se vuelcan sobre las curvas de intensidad en función de distancia y de conductividad calculadas teóricamente, para lo cual será necesario normalizar los datos ya que las curvas están trazadas para una determinada potencia y antena, que por lo general no coinciden con las de la emisora que se mide. Se obtienen así gráficos como el que se muestra en la Figura 7 de los que, en gabinete se debe deducir la conductividad efectiva en cada terreno. Se comprueba que difícilmente dos operadores darán un mismo valor. Las diferencias alcanzan, en algunos casos amplitudes que invalidan el método por depender demasiado de apreciaciones subjetivas. Si a ésto se le agrega que el instrumento puede dar un error de medición de más o menos 2db y que es prácticamente imposible en la práctica seguir estrictamente un radial a menos que se disponga de un helicóptero, se concluye que esta metodología es notablemente imprecisa.

3.4.2.-Método de atenuación entre pares de puntos.- Se trata de un ajuste de la metodología anterior, que consiste en medir cuidadosamente la intensidad de campo en varios puntos a una distancia relativamente corta de la antena, por ejemplo 10 Km, y comparar cada valor con el que se obtiene a una distancia mayor. Haciendo una cantidad suficiente de mediciones a 10 Km se puede trazar una representación polar de la intensidad de campo en función del azimut, lo que per-

mitirá realizar las observaciones más lejanas en los puntos en que resulte posible o conveniente. Con la atenuación entre pares de puntos se entra en curvas como las mostradas en la Figura 8 y se obtiene la conductividad.

Esta metodología elimina la influencia de los errores subjetivos de que adolece la anterior. No es posible en cambio evitar los errores derivados de la imprecisión de los instrumentos de que se dispone. En el caso extremo de que se cometan errores de distinto signo en la distancia tomada como "referencia" (10 Km) y en la que se comparará con ella, el valor de la atenuación podría llegar a tener una indefinición de ± 4 db. Se ve en la Figura 8 que, en 1 MHz esto puede llegar a dar una diferencia máxima en el valor de σ que estaría aproximadamente en la relación de 1 a 4.- Pero si en cada lugar de medición se repiten las lecturas en varios puntos (4 ó 5) separados poco entre sí y se toma como representativos para el entorno los valores medianos de la serie, se comprueba que los errores se reducen a aproximadamente ± 1 db, lo que lleva a errores en σ que estaría en relación menor que 1 a 2.-

4.-CONCLUSIONES

La sucinta comparación que se ha hecho en los puntos precedentes lleva a apreciar que la metodología de obtener conductividades en base a la atenuación de la señal entre pares de puntos es la que ofrece mejores posibilidades tanto en lo que se refiere a precisión como en lo que hace a simplicidad. Esto independientemente de las ventajas que tiene un método que determina valores efectivos en cada trayecto y no en lugares determinados solamente, que pueden no ser representativos para toda una zona más o menos extensa.

BIBLIOGRAFIA

- CCIR;1978:"Determinación de las características eléctricas de la superficie de la tierra"; Informe N°229-3 del Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones.
- CCIR;1978;"Curvas de propagación de la onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 KHz y 10 MHz"; Recomendación N°368 del Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones.
- Padula Pintos V.H.,Perez Corral J.C. y Farrel S. ;1975"Metodología para determinar características de suelo";Documento Técnico del Programa Nacional de Radiopropagación DT-7.
- Padula Pintos B.H. y Farrel S.;1975"La inclinación del frente de onda de propagación por onda de superficie";Documento Técnico del Programa Nacional de Radiopropagación DT-8.

Padula Pintos V.H., Perez Corral J.C., Wilder J., Alvarez Ovide B., Irigoín J. y Núñez F.;1976;"Método de atenuación relativa entre pares de puntos para calcular conductividades de suelos";Documento Técnico del Programa Nacional de Radiopropagación DT-16.

Padula Pintos V.H.;1978;"Sobre la posibilidad de medición de conductividades de suelos por el método de inclinación del frente de onda";Documento Informativo del Programa Nacional de Radiopropagación DI-9.

Rep. de Venezuela;1973;"Intensidad eléctrica de la onda de superficie:535-1605 KHz" ;Ministerio de Comunicaciones; Dirección de Telecomunicaciones.

T A B L A I

f (mHz)	σ (S/m)	j 18.000 σ/f	ϵ	/ ϵ' /	Dif. (%)
0,5	10^{-3}	36	4	36,2	7,73
			15	39	
	5×10^{-3}	180	4	180,4	0,11
			15	180,6	
	10^{-2}	360	4	360,2	0,027
			15	360,3	
3×10^{-2}	1080	4	1080	0,009	
		15	1080,1		
1,0	10^{-3}	18	4	18,4	27,17
			15	23,4	
	5×10^{-3}	90	4	90,1	1,22
			15	91,2	
	10^{-2}	180	4	180,04	0,31
			15	180,6	
3×10^{-2}	540	4	540,01	0,035	
		15	540,2		
1,5	10^{-3}	12	4	12,65	51,78
			15	19,2	
	5×10^{-3}	60	4	60,1	2,83
			15	61,8	
	10^{-2}	120	4	120,07	0,691
			15	120,9	
3×10^{-2}	360	4	360,02	0,077	
		15	360,3		

T A B L A II

σ_1 (S/m)	α_1 (1/m)	x_1 (m)	σ_2 (S/m)	α_2 (1/m)	$E_{2m}/E_{Sup.}$	$E_{2m} - F_{penet}$
						E_{2m} (%)
10^{-3}	0,042	1	5×10^{-3} 3×10^{-2}	0,098 0,24	0,869 0,754	58
		>2				51
						61
5×10^{-3}	0,098	1	10^{-3} 3×10^{-2}	0,042 0,24	0,869 0,713 0,822	58
		>2				48
						55
3×10^{-2}	0,24	1	10^{-3} 5×10^{-3}	0,042 0,098	0,754 0,713 0,618	51
		>2				48
						40

EPIGRAFES DE LAS FIGURAS

Figura 1.-Distancias alcanzadas con una misma intensidad de campo en función de conductividades del suelo.

Figura 2.-Ejemplo de suelo estratificado con un primer nivel de espesor x_1 y el siguiente de x_2 .

Figuras 3 y 4.-Errores porcentuales que pueden cometerse al suponer suelo uniforme en lugar de estratificado, para distintos espesores de x_1 , frecuencias: 0,5 MHz y 1.5MHz respectivamente y las siguientes conductividades:

Trazo 1 : $\sigma_1 =$	10^{-3}S/m	;	$\sigma_2 = 5 \times 10^{-3} \text{S/m}$
Trazo 2 : $\sigma_1 =$	10^{-3}S/m	;	$\sigma_2 = 3 \times 10^{-2} \text{S/m}$
Trazo 3 : $\sigma_1 =$	$5 \times 10^{-3} \text{S/m}$;	$\sigma_2 = 3 \times 10^{-2} \text{S/m}$
Trazo 4 : $\sigma_1 =$	$5 \times 10^{-3} \text{S/m}$;	$\sigma_2 = 10^{-3} \text{S/m}$
Trazo 5 : $\sigma_1 =$	$3 \times 10^{-2} \text{S/m}$;	$\sigma_2 = 5 \times 10^{-3} \text{S/m}$

Figura 5.- Angulos de indeterminación en el uso del método de inclinación del frente de onda.

Figura 6.-Errores en la determinación de características del suelo para el método de inclinación del frente de onda.

Figura 7.-Valores observados a lo largo de un radial para aplicar el método clásico de atenuación en función de distancia.

Figura 8.-Curvas para cálculo de características de suelos por el método de atenuación entre pares de puntos.

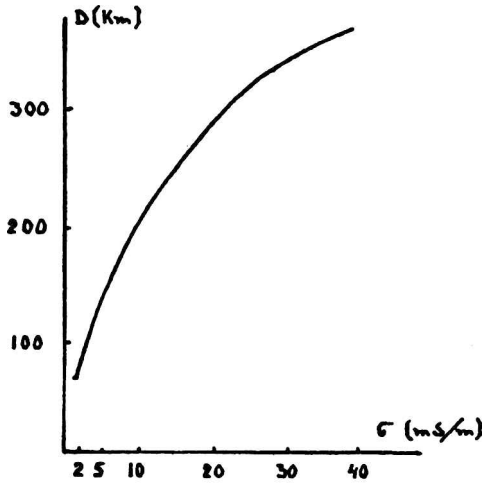


FIGURA 1.-

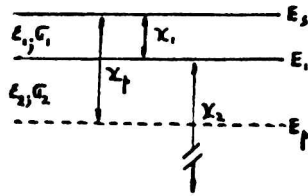


FIGURA 2.-

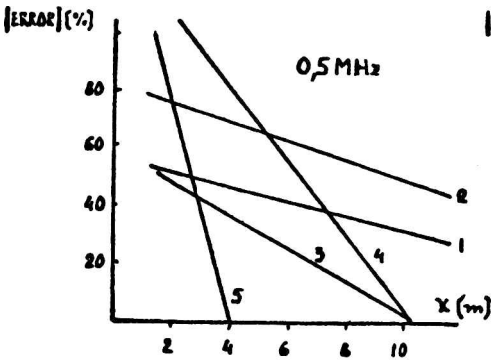


FIGURA 3.-

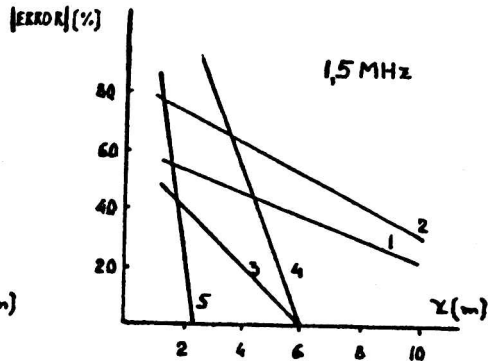


FIGURA 4.-

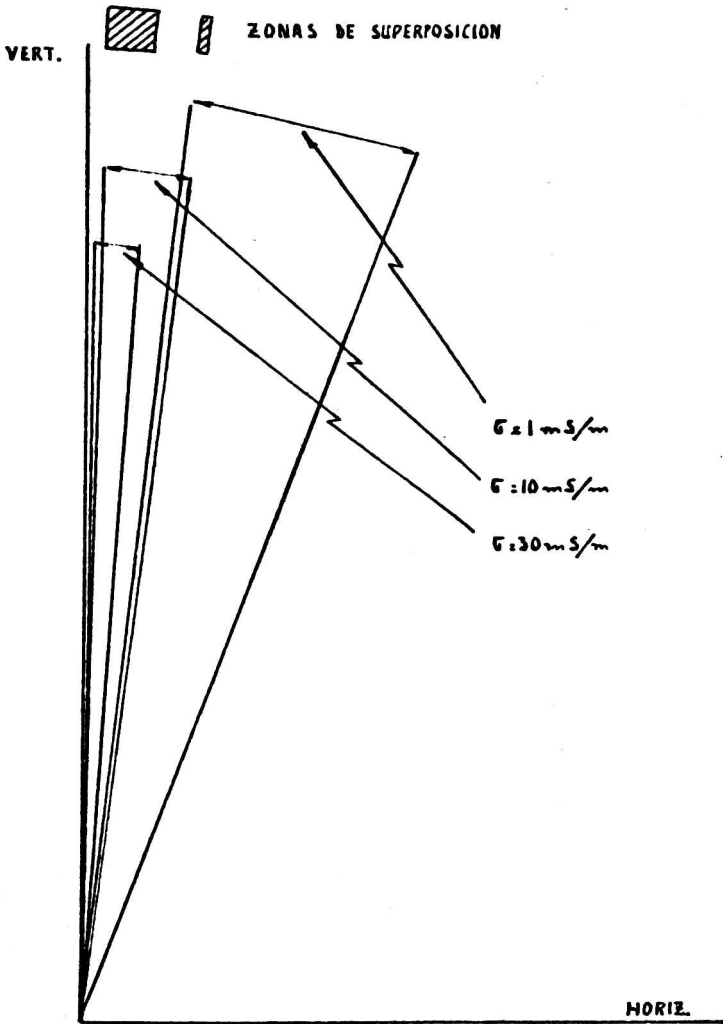


FIGURA 5.-

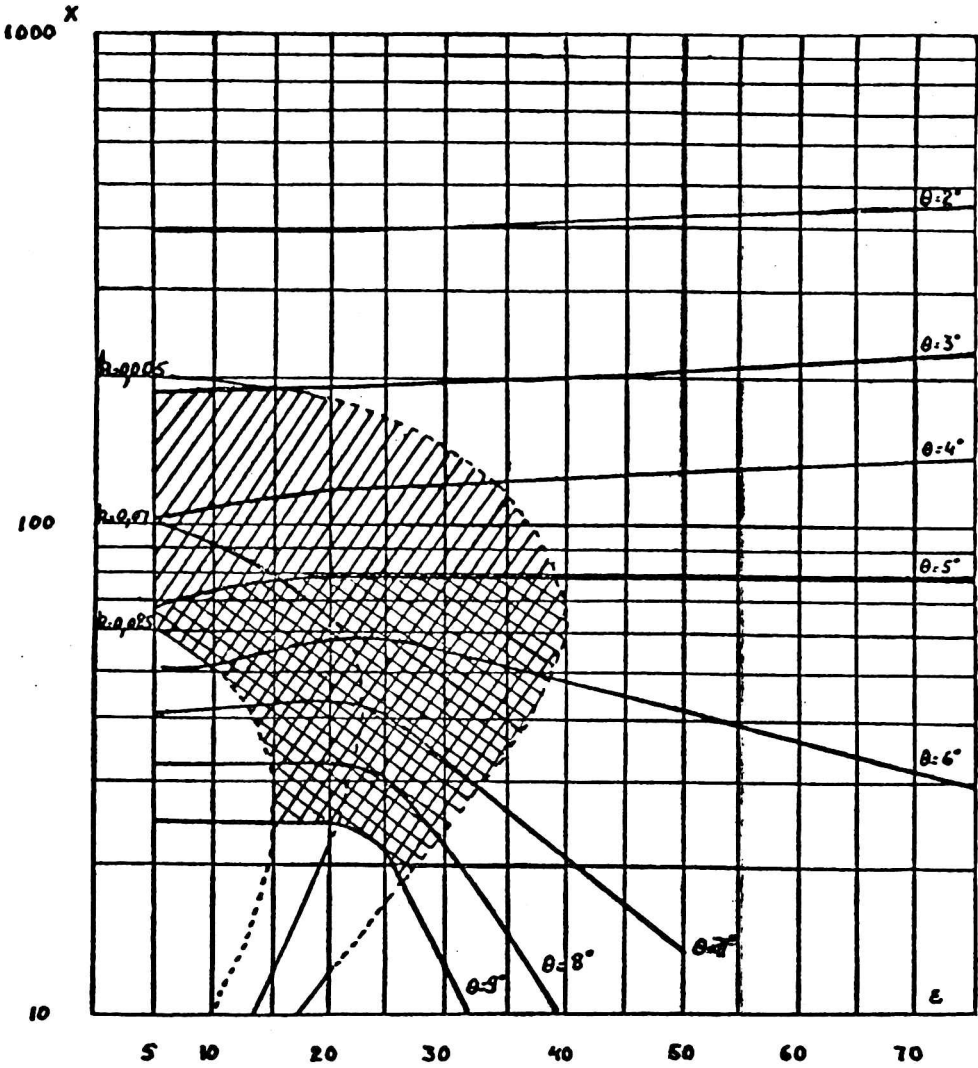


FIGURA 6.

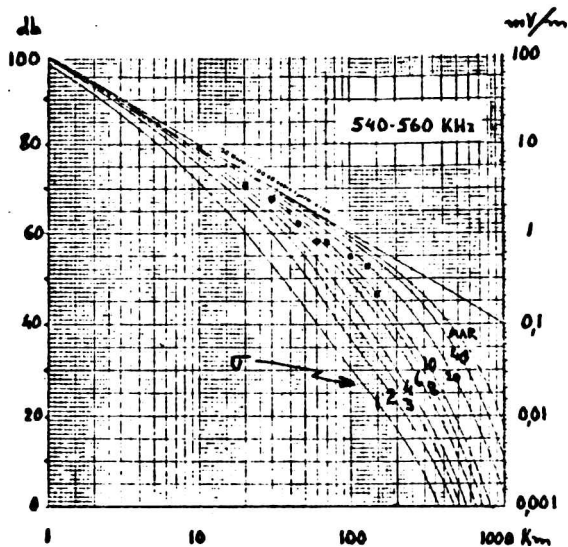


FIGURA 7.-

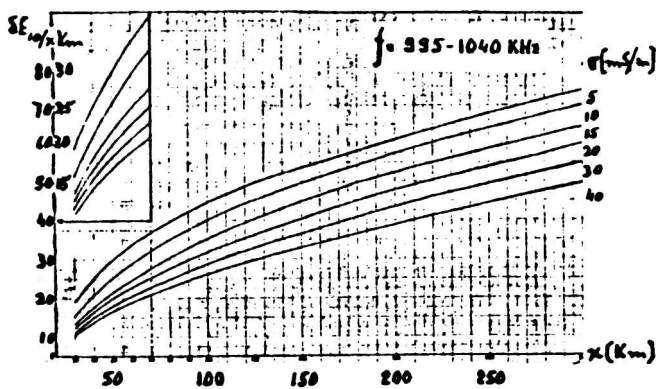


FIGURA 8.-