

MANUAL SOBRE PROPAGACIÓN POR ONDA DE SUPERFICIE

EDICIÓN DE 2014
OFICINA DE RADIOCOMUNICACIONES



Manual sobre

Propagación por

onda de superficie

Edición de 2014

Oficina de Radiocomunicaciones



Introducción

La propagación por onda de superficie reviste especial interés para las comunicaciones, especialmente la radiodifusión, a las frecuencias más bajas en las que este modo se ha estado utilizando durante más de 90 años.

El Manual se divide en cuatro partes principales:

- fundamentos y teoría;
- consideraciones principales a gran escala y métodos de predicción empleados para las evaluaciones de compatibilidad y los procedimientos de planificación utilizados en la gestión del espectro y a efectos de cobertura;
- variabilidad a escala más reducida que puede ser de gran importancia para evaluar la calidad de los servicios;
- mediciones y fase.

Las personas indicadas a continuación, por orden alfabético, han contribuido a la elaboración del Manual:

Itziar ANGULO

Les BARCLAY

Yuri CHERNOV

Nick DEMINCO

Igor FERNÁNDEZ

Unai GIL

David GUERRA

John MILSOM

Iván PEÑA

David DE LA VEGA.

ÍNDICE

	<i>Página</i>
PARTE 1 – Consideraciones teóricas.....	1
1 Introducción	1
2 Desarrollo de la teoría de la onda de superficie	1
3 Teoría de la onda de superficie	2
3.1 Introducción a la teoría.....	2
3.2 Teoría de una tierra lisa homogénea.....	4
3.3 Efecto de la atmósfera	7
PARTE 2 – Método de predicción recomendado por el UIT-R	9
4 Recomendación UIT-R P.368	9
5 Impedancia de la superficie.....	11
6 Conductividad del suelo	11
6.1 Conductividad del terreno	11
6.2 Conductividad del mar	13
PARTE 3 – Variaciones con respecto al procedimiento de predicción principal	15
7 Tierra lisa de conductividad mixta	15
7.1 Efecto de recuperación sobre el mar	15
7.2 Método Millington para trayectos mixtos	17
7.3 Estimación de un valor de conductividad representativo para trayectos mixtos en la banda de ondas hectométricas	18
8 Mar agitada	18
9 Entornos rurales	19
10 Entornos urbanos	20
10.1 Efecto de las zonas urbanas con gran densidad de construcción, 0,1 a 20 km	20
10.2 Distancias superiores a 25 km	27
11 Variaciones estacionales en la propagación por onda de suelo.....	30
11.1 Historia	30
11.2 Variaciones diarias en la propagación por onda de suelo.....	32
PARTE 4	35
12 Antenas de recepción	35
13 Caracterización de la variabilidad espacial de la intensidad de campo.....	35
14 Terreno irregular	37

	<i>Página</i>
15	Efectos locales en las zonas edificadas 39
	15.1 Mediciones en zonas urbanas con elevado índice de construcción 39
	15.2 Influencia de la frecuencia de transmisión en entornos urbanos 44
	15.3 Variación a gran escala de la intensidad de campo 44
16	Variación espacial de la intensidad de campo a pequeña escala 45
17	Propagación en interiores 46
PARTE 5 49
18	Métodos de medición 49
	18.1 Medidor de intensidad de campo..... 49
	18.2 Medición de la potencia radiada..... 49
	18.3 Medición de la conductividad efectiva del suelo 50
19	Fase de la onda de suelo..... 51
	19.1 Introducción..... 51
	19.2 Tierra homogénea lisa 51
	19.3 Perturbaciones de la fase secundaria 51
	19.4 Trayectos no homogéneos 51
	19.5 Irregularidades del terreno..... 52
	19.6 Efectos meteorológicos 52
Anexo 1 – Método Lee Generalizado 55
20	Referencias 57

PARTE 1

Consideraciones teóricas

1 Introducción

A frecuencias medias, durante las horas diurnas las señales radioeléctricas que se propagan a través de la ionosfera resultan fuertemente atenuadas y la onda de superficie, o más estrictamente la onda de suelo, es el modo de propagación que cursa todas las señales que ocupan la banda de radiodifusión en ondas hectométricas. Las ondas de superficie también soportan el funcionamiento de la radiodifusión en ondas kilométricas, las comunicaciones y los sistemas de navegación en ondas miriamétricas/kilométricas, las comunicaciones de corto alcance en ondas decamétricas y algunas clases de radar en ondas decamétricas, aunque en estos casos también pueden estar presentes modos de propagación por onda ionosférica.

La propagación por onda de superficie depende de las corrientes que fluyen por el suelo. La existencia de la atmósfera cambia las características de propagación pero no es esencial para el modo. Las ondas de superficie con polarización horizontal resultan fuertemente atenuadas y su utilidad práctica es muy reducida o nula. Todas las aplicaciones mencionadas anteriormente emplean ondas de superficie con polarización vertical.

A diferencia de las señales con propagación ionosférica, las ondas de superficie sufren una dispersión casi despreciable de manera que, en principio, las señales de banda amplia pueden transmitirse cuando sólo está activa la onda de superficie.

El desvanecimiento aparece únicamente cuando se produce alguna variación temporal en el trayecto de propagación. Las ondas de superficie sobre tierra son señales estables, en algunos casos con algunas variaciones estacionales, y pueden producirse variaciones en pequeñas distancias donde existen estructuras o características topográficas significativas. La propagación por onda de superficie sobre el mar puede estar sujeta a un desvanecimiento lento debido a los efectos de las mareas y a la atenuación causada por la agitación del mar.

Los métodos basados en consideraciones teóricas, que constituyen la base de la Recomendación UIT-R P.368, han demostrado a lo largo de muchos años que son un modo potente y bastante sencillo de predecir la cobertura de los sistemas de radiodifusión en ondas hectométricas y kilométricas, por ejemplo. Los métodos para la predicción en zonas urbanas de edificios muy altos aún están incompletos. Las pérdidas adicionales debidas a obstrucciones locales, topografía abrupta, etc. son importantes, especialmente cuando se evalúa la calidad global de un servicio recibido. Utilizando métodos de modulación robustos, dispersión de tiempo y frecuencia de la onda de superficie y modos combinados de propagación por onda de superficie y por onda ionosférica, no es probable que se produzca una degradación significativa.

La primera parte de este Manual presenta la teoría de la onda de superficie y describe técnicas y procedimientos adecuados para realizar predicciones globales de cobertura a gran escala a efectos de gestión, planificación y diseño del espectro. Sin embargo, especialmente en sistemas con modulación digital, los efectos a pequeña escala debidos a edificios, topografía, etc. pueden afectar el comportamiento y la calidad de servicio. Por último, se da alguna información sobre mediciones y sobre la fase relativa de la onda de superficie.

2 Desarrollo de la teoría de la onda de superficie

En 1909, Sommerfeld [1] obtuvo una solución para un dipolo eléctrico vertical en la interfaz del plano entre un aislante y un conductor. Los trabajos de Sommerfeld no estaban estructurados de forma práctica para su aplicación por los ingenieros y condujeron a algunos errores que derivaron en cierta confusión. En 1936, Norton [2] solucionó ampliamente estos problemas y en un artículo aparecido en 1937 [3] proporcionó un método para realizar cálculos sobre una tierra plana. Van der Pol y Bremmer [4] en un conjunto de artículos redactados entre 1937 y 1939 demostraron la forma de calcular las intensidades de campo en puntos distantes situados sobre la superficie de la Tierra esférica utilizando series de residuos. En otro artículo de 1941, Norton [5] realizó una propuesta más práctica para los ingenieros.

Estos métodos no permiten variaciones en las constantes de la Tierra (permitividad y conductividad) a lo largo del trayecto, lo cual reviste gran importancia cuando el trayecto consiste en una combinación de tierra y mar donde las conductividades difieren en un factor de aproximadamente mil. En 1949, Millington [6] presentó un método semiempírico que proporciona resultados bastante precisos para un trayecto que incluye cambios en las constantes de la Tierra. En 1952, Hufford [7] publicó un artículo en el que los cálculos permitían cambios arbitrarios en las constantes y la forma de la Tierra a lo largo del trayecto. Todo ello se representa en forma de una ecuación integral que, a efectos prácticos, es imposible resolver manualmente. En 1970, Ott y Berry [8] publicaron un método informático para hallar la solución de esta ecuación.

En 1982, Hill [9] describió un método analítico para ampliar el método de Ott y Berry [8] para predecir la propagación sobre terrenos forestales y edificados que presenta tales terrenos como capas de dieléctrico sobre un terreno irregular. En el Apéndice del informe de Hill aparece un código fuente. Otros trabajos cuyos resultados se publicaron en 1986 por DeMinco [10], [11] proporcionan implementaciones de un modelo informático de fácil utilización de Ott y Berry [8] y el modelo de Hill [9]. Además, estos modelos de DeMinco contienen un modelo de onda de superficie de trayecto mixto sobre Tierra esférica lisa que hace uso del método de Millington [6], [19], [20] para el cálculo de trayecto mixto descrito posteriormente y también modelos para diversas antenas de ondas kilométricas, hectométricas y decamétricas a efectos de cálculos en el sistema. Los modelos informáticos se han verificado haciendo uso de datos medidos por Kissick y *otros* [12], [13], Ott, Vogler y Hufford [14] y Adams y *otros* [15]. En trabajos posteriores de DeMinco [16], [17] en 1999 y 2000 se combinó el modelo de trayecto mixto en Tierra esférica lisa y el modelo de trayecto mixto en Tierra irregular con modelos de antenas y cálculos del sistema en un modelo de ondas kilométricas/hectométricas basado en el sistema Windows [15], [17] para uso práctico como una herramienta de análisis a fin de realizar predicciones punto a punto y punto a zona con antenas situadas en el suelo y elevadas. También se incluyeron varios modelos de onda ionosférica.

Rotheram [18], [19], [20] estudió la influencia de la atmósfera de la Tierra sobre la propagación por onda de superficie y desarrolló un método general de predicción de la propagación por onda de superficie y un programa informático asociado. El método incorpora un perfil de refractividad atmosférica exponencial y constituye la base para las curvas de propagación de antenas en tierra que aparecen en la Recomendación UIT-R P.368.

El programa asociado, para la predicción de la intensidad de campo de la onda de superficie con antenas en tierra y elevadas sobre una tierra esférica lisa, GRWAVE, está disponible en la página web de la Comisión de Estudio 3.

Unas campañas de medición de transmisiones de radiodifusión demostraron que aparecían anomalías en la propagación a través de zonas urbanas y Causebrook [21], [22] también demostró que las zonas urbanas y el terreno irregular no pueden describirse fácilmente debido a que el flujo de corriente en los conductores verticales, e incluso en los árboles, produce efectivamente un plano de tierra inductivo. Ello da lugar a una atenuación muy distinta con la distancia, comparada con una tierra lisa sencilla, y la relación entre las intensidades de campo eléctrico y magnético no es igual a la impedancia intrínseca en el espacio libre en este entorno obstruido.

Debido a la reciente importancia que han adquirido las técnicas de modulación digital cada vez hay más interés en determinar las variaciones locales de la señal a pequeña escala, que para la recepción móvil corresponde al desvanecimiento temporal, ya que pueden afectar la calidad de la señal recibida.

3 Teoría de la onda de superficie

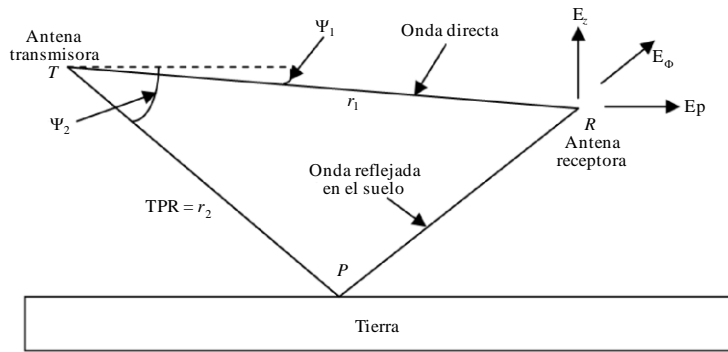
3.1 Introducción a la teoría

Considérese el caso de una antena transmisora, T , situada sobre un terreno plano perfectamente conductor, como muestra la Fig. 1. La tensión, V , inducida en la antena receptora en una posición de recepción arbitraria, R , puede expresarse como un vector suma de las componentes directa y reflejada:

$$V = QI \left\{ Q_1 \frac{\exp(-jk r_1)}{r_1} + Q_2 R \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} \right\} \tag{1}$$

siendo I la corriente en la antena transmisora, Q es una constante, Q_1 y Q_2 tienen en cuenta los diagramas polares de la antena transmisora y de la antena receptora, R es el coeficiente de reflexión apropiado y k es el número de onda radioeléctrica = $2\pi/\lambda$. En la Fig. 1 se definen otros términos.

FIGURA 1
Geometría de las ondas directa y reflejada en el suelo



Ground Wave Prop. 0

En muchos casos, especialmente cuando la frecuencia radiada se encuentra en la banda de ondas métricas o en bandas de frecuencias más elevadas, el cálculo anterior proporcionará un resultado perfectamente aceptable para aplicaciones prácticas. Sin embargo, una completa descripción del campo en R requiere una contribución adicional a la resultante:

$$V = QI \left\{ Q_1 \frac{\exp(-jk r_1)}{r_1} + Q_2 R \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} + S \frac{\exp(-jk r_2)}{r_2} \right\} \tag{2}$$

siendo S un factor complicado que depende de las propiedades eléctricas del terreno, de la polarización transmitida, de la frecuencia y de los emplazamientos del terminal.

Cuando se presenta de esta forma parece lógico considerarlo como una contribución pequeña que tiene interés fundamentalmente para el físico matemático. No obstante, este tercer término representa la onda de superficie y es un modo de propagación de un gran valor práctico para los sistemas de radiocomunicaciones que funcionan en las bandas de ondas decamétricas y en bandas de frecuencias inferiores.

A veces, esta combinación de ondas mostrada en la ecuación (2) se denomina la onda de superficie, que comprende una onda espacial y una onda de suelo:

$$\text{onda de superficie} = \underbrace{\text{onda directa} + \text{onda reflejada}}_{\text{onda espacial}} + \text{onda de suelo}$$

Pero hay diferentes usos de esta terminología y la onda de suelo se denomina a menudo onda de superficie o a veces onda de superficie de Norton u onda de suelo de Norton, en honor a Norton que desarrolló métodos manejables para su cálculo.

Cuando los puntos T y R están próximos al suelo, el coeficiente de reflexión en la superficie es -1 y las ondas directa y reflejada en el suelo se cancelan entre sí, quedando la onda de suelo como la única componente importante.

3.2 Teoría de una tierra lisa homogénea

3.2.1 Tierra plana de conductividad finita

Teoría de la tierra plana de Sommerfeld-Norton:

Sommerfeld [1] y Norton [2], [3] obtuvieron expresiones para las componentes de intensidad de campo de la onda de superficie sobre una tierra plana de conductividad finita debido a un elemento de corriente vertical corta. En su forma completamente desarrollada la ecuación (2) pasa a ser:

$$E_z = j30kIdl \left[\left\{ \cos^2 \psi_1 \frac{\exp(-jkr_1)}{r_1} + \cos^2 \psi_2 R_v \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} \right\} + \left\{ (1 - R_v)(1 - u^2 + u^4 \cos^2 \psi_2) F \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} \right\} \right] \quad (3)$$

$$E_\rho = -j30kIdl \left[\sin \psi_1 \cos \psi_1 \frac{\exp(-jkr_1)}{r_1} + \sin \psi_2 \cos \psi_2 R_v \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} - \cos \psi_2 (1 - R_v) u \sqrt{1 - u^2 \cos^2 \psi_2} \left\{ 1 - \frac{u^2}{2} (1 - u^2 \cos^2 \psi_2) + \frac{\sin^2 \psi_2}{2} \right\} F \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} \right] \quad (4)$$

donde ψ_1 y ψ_2 se definen en la Fig. 1, Idl es el producto de la corriente de la fuente y la longitud (el momento del dipolo), R_v es el coeficiente de reflexión de Fresnel de onda plana para la polarización vertical y F es la función de atenuación que depende del tipo de terreno y de la longitud del trayecto. F viene dada por la expresión:

$$F = \left[1 - j \sqrt{(\pi w) \exp(-w)} \left\{ \operatorname{erfc}(j\sqrt{w}) \right\} \right] \quad (5)$$

erfc es la función error complementaria y

$$w = \frac{-j2kr_2 u_2 (1 - u^2 \cos^2 \psi_2)}{(1 - R_v)} \quad (6)$$

$$u^2 = \frac{2}{(\epsilon_r - jx)} \quad (7)$$

y

$$x = \frac{\sigma}{(w\epsilon_0)} = 1,8 \times 10^4 \frac{\sigma}{f_{MHz}} \quad (8)$$

σ es la conductividad de la tierra en S/m, $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ es la permitividad relativa de la Tierra y f_{MHz} es la frecuencia en MHz.

Obsérvese que las ecuaciones (3) y (4) representan las componentes de campo en las direcciones vertical y radial de un sistema de coordenadas cilíndricas.

3.2.1.1 Caso especial de terminales en tierra

Cuando los puntos T y R se encuentran en el suelo de manera que $R_v = -1$ y $\psi_1 = \psi_2 = 0$, las ondas directa y reflejada en la superficie actúan en oposición y su suma es cero. Tales circunstancias prevalecerán en muchas aplicaciones prácticas a las frecuencias inferiores. Cuando ello sucede predomina la onda de superficie y puede describirse por expresiones algo simplificadas de las ecuaciones (3) y (4) como sigue:

$$E_z = j60kIdl(1-u^2 + u^4)F \frac{\exp(-jkr)}{r} \quad (9)$$

$$E_\rho = j30kIdl \left\{ u \sqrt{(1-u^2)(2-u^2 + u^4)} \right\} F \frac{\exp(-jkr)}{r} \quad (10)$$

Por consiguiente, para la onda de superficie con antenas en tierra las componentes vertical y radial del campo eléctrico siguen estando presentes. En términos físicos, ello significa que el frente de onda de propagación está inclinado. La componente radial de la ecuación (10) es pequeña con respecto a la componente vertical descrita por la ecuación (9). La relación de fase es tal que la pequeña inclinación del frente de onda es hacia delante en el sentido de la propagación. El grado de inclinación depende de la conductividad del suelo y de la frecuencia. Las mediciones de la inclinación de onda pueden utilizarse para deducir las propiedades eléctricas del terreno local (véase el § 18.3.3). Como E_ρ tiene un valor finito y la componente de campo magnético es horizontal, existe una componente hacia abajo del vector de Poynting y se pierde energía de la onda de propagación horizontal. De esta forma, aparece atenuación adicional a la causada por la dispersión que sigue la ley de la inversa del cuadrado de la distancia. En la teoría de Sommerfeld-Norton esta atenuación adicional viene dada por el término F , véase la ecuación (5) donde para los terminales en tierra w se simplifica convirtiéndose en:

$$w = \frac{-jkr u^2}{2} (1-u^2) \quad (11)$$

3.2.1.2 Interpretación

Las predicciones de cobertura radioeléctrica se realizan casi invariablemente en términos de intensidades de campo eléctrico. Esto también se aplica a la radiodifusión en ondas kilométricas y hectométricas aunque la mayoría de los receptores domésticos incorporan antenas de campo magnético en forma de varilla de ferrita. Excepto en circunstancias en que un entorno con obstáculos contiene conductores verticales (véanse los § 11 y 12) la onda de superficie que se propaga contiene una componente magnética horizontal, H_ϕ que está relacionada aproximadamente con la componente eléctrica principal mediante la expresión:

$$H_\phi = -\frac{E}{Z_0} \quad (12)$$

donde Z_0 es la impedancia intrínseca en espacio libre ($120\pi \Omega$). Por tanto, es suficiente planificar las coberturas del servicio de radiocomunicaciones en términos de intensidad de campo eléctrico.

La atenuación de la onda de superficie se produce a través de la inclinación hacia delante de su campo eléctrico. La tasa de atenuación es más acusada a medida que aumenta el ángulo de inclinación. Combinando las ecuaciones (9) y (10) es posible demostrar que la relación entre las componentes de campo eléctrico es la siguiente:

$$\frac{E_\rho}{E_z} \approx u = \frac{1}{\sqrt{K_r}} \quad (13)$$

K_r es la permitividad dieléctrica compleja del suelo. Varía con la frecuencia y con las propiedades eléctricas del terreno.

En el Cuadro 1 aparecen algunos valores representativos.

CUADRO 1

Valores típicos de K_r , permitividad dieléctrica compleja, para diferentes tipos de suelos y distintas frecuencias

Tipo de superficie	Frecuencia (kHz)	
	200 (ondas kilométricas)	1 000 (ondas hectométricas)
Mar ($\sigma=5$ S/m, $\epsilon_r=70$)	70-j450000	70-j90000
Superficie de buena calidad ($\sigma=10^{-2}$ S/m, $\epsilon_r=10$)	10-j900	10-j180
Superficie de baja calidad ($\sigma=10^{-3}$ S/m, $\epsilon_r=4$)	4-j90	4-j18

Los valores elevados de K_r corresponden a una pequeña inclinación hacia delante y, por tanto, a una atenuación baja. El agua de mar tiene una conductividad sorprendentemente elevada y la onda de superficie, con un campo eléctrico casi vertical, se propaga sobre el mar sufriendo una atenuación relativamente baja. Por otro lado, la atenuación de la onda de superficie es mayor sobre un terreno de baja conductividad y a frecuencias radioeléctricas altas.

El factor $(1 - u^2 + u^4)$ de la ecuación (9) toma un valor próximo a la unidad para todas las situaciones prácticas. Puede demostrarse entonces que la amplitud de la componente vertical del campo eléctrico viene dada por la expresión:

$$|E_z| = \frac{300}{r} \sqrt{P} |F| \quad (14)$$

siendo P la potencia radiada total por un elemento de corriente de dipolo hertziano, o por un radiador vertical corto, expresada en kW, r es la longitud del trayecto en km y E es la intensidad de campo eléctrico en mV/m.

Esta ecuación se aplica a una antena vertical corta situada en un terreno plano perfectamente conductor y constituye una referencia.

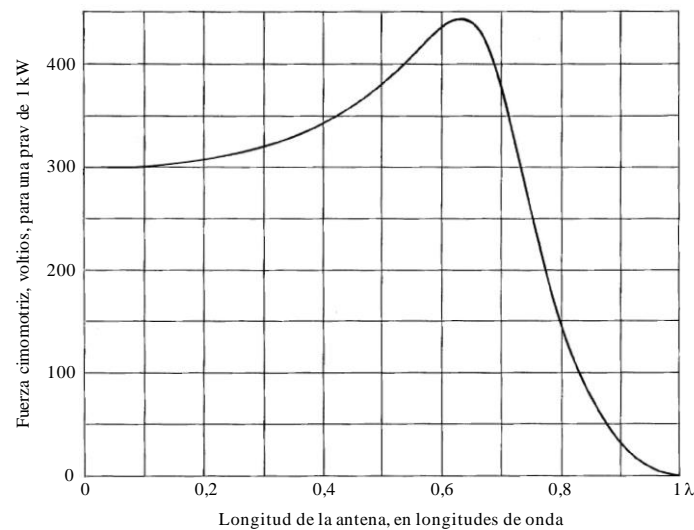
En unas pocas longitudes de onda de la antena $|F|$ es aproximadamente la unidad y la intensidad de campo varía como $1/r$; es decir, en relación inversa a la distancia. A distancias suficientemente grandes, mientras la hipótesis de Sommerfeld de una tierra plana sigue siendo válida, $|F|$ sufre una transición pasando a ser inversamente proporcional a la distancia; es decir, la intensidad de campo varía como $1/r^2$.

Para una antena vertical de $\lambda/4$ la constante del término de la derecha de la ecuación (14) pasa a ser 314 (véase la Recomendación UIT-R P.341, Anexo 1, Cuadro 1, donde esta constante se indica como fuerza cimomotriz).

La Fig. 2 representa los valores constantes correspondientes a antenas verticales puestas en tierra con alturas variables.

FIGURA 2

Fuerza cimomotriz para antenas verticales sobre terrenos planos perfectamente conductores



Ground Wave Prop. 0

3.2.2 Tierra esférica de conductividad finita

El aparato matemático de la propagación por onda de superficie en torno a la Tierra curva es complicado y difícil de entender. Ha sido descrito por Bremmer [23]. Para cortas distancias se aplica, sin necesidad de adaptación, el modelo de onda de superficie de Sommerfeld. Para mayores distancias es preciso calcular los campos teniendo debidamente en cuenta la difracción en torno a la Tierra curva. Hay un tercer régimen de distancia, normalmente más allá de aquel en el que se producen variaciones proporcionales a la inversa del cuadrado de la distancia, en el cual la disminución del campo eléctrico es exponencial en torno a la Tierra curva. La distancia a partir de la cual se produce este comportamiento exponencial puede estimarse mediante la siguiente expresión. La Tierra puede considerarse plana a una distancia d (en kilómetros) que viene dada por [24]:

$$d = \frac{80}{\sqrt[3]{f(\text{MHz})}} \tag{15}$$

Aparte de este comportamiento adicional para grandes distancias, la mayoría del resto de características de la onda de superficie sobre una tierra esférica son idénticas a las deducidas a partir del modelo de Tierra plana de Sommerfeld.

3.3 Efecto de la atmósfera

Los trabajos teóricos de Sommerfeld, Norton, Van der Pol y Bremmer ignoraron los efectos atmosféricos, suponiendo que la propagación de las ondas en el espacio por encima del suelo se produciría en línea recta. En la práctica, la atmósfera de la Tierra se encuentra estratificada y posee un índice de refracción que normalmente disminuye con la altura. Por término medio, la variación con la altura del índice de refracción es exponencial (véase la Recomendación UIT-R P.453).

En cualquier atmósfera en la que el índice de refracción disminuye con la altura, la onda radioeléctrica se refractará hacia abajo en dirección del suelo. En el primer kilómetro por encima del suelo la variación exponencial puede aproximarse por un decrecimiento lineal y en este caso los trayectos radioeléctricos pueden tratarse como desplazamientos en línea recta incrementando artificialmente el radio efectivo de la Tierra. Este tratamiento se aplica a menudo a las frecuencias de ondas métricas y frecuencias superiores [25] donde un valor típico para el factor radio efectivo de la Tierra es 4/3.

Para las ondas de superficie a frecuencias por debajo de 10 kHz la atmósfera tiene un efecto despreciable y el factor tiende a la unidad [26]. En las proximidades de la banda de radiodifusión en ondas hectométricas el factor se encuentra ente 1,20 y 1,25 para la mayoría de las clases de terreno. Véase Rotheram [18].

Estos resultados se aplican a condiciones atmosféricas típicas (en las que la refractividad a nivel del mar es $N_0 = 315$ y la altura de escala es de 7,35 km) y se utilizan en las presentaciones gráficas de la Recomendación UIT-R P.368. Cuando las condiciones atmosféricas no son las típicas, pueden necesitarse otros factores del radio efectivo de la Tierra para simular los efectos de propagación que predominan. La información sobre las condiciones atmosféricas puede conseguirse a partir de observaciones climáticas locales o en la Recomendación UIT-R P.453 y estos parámetros pueden utilizarse como datos de entrada para el programa informático GRWAVE.

PARTE 2

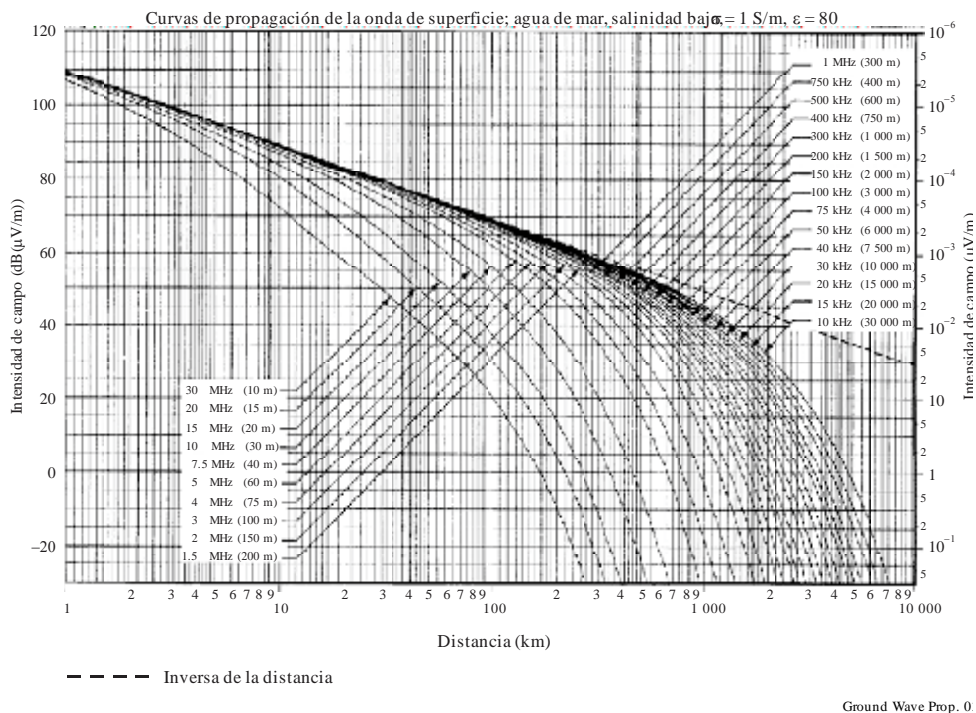
Método de predicción recomendado por el UIT-R

4 Recomendación UIT-R P.368

Las curvas de propagación recomendadas por el UIT-R para la intensidad de campo de la onda de superficie figuran en la Recomendación UIT-R P.368, se basan en los principios descritos en el § 3 anterior y se calculan utilizando el programa informático GRWAVE. Aunque el método se aplica estrictamente para Tierra lisa, pueden obtenerse predicciones satisfactorias para terrenos con alturas irregulares pequeñas comparadas con la longitud de onda y donde los cambios de altura no son abruptos. La variabilidad debida a las características de la superficie a pequeña escala, que pueden afectar a la calidad de servicio, se discute posteriormente en este Manual. Las referencias [10] y [11] presentan comparaciones de predicciones con datos medidos para mostrar la diferencia entre el cálculo con Tierra esférica lisa y el cálculo con Tierra irregular. Esta información puede utilizarse para determinar cuándo es preciso utilizar el modelo de Tierra irregular en vez del modelo de Tierra lisa. Cuando sea posible es conveniente emplear el modelo de Tierra lisa debido al excesivo tiempo de cálculo que exige la ejecución del programa del modelo de trayecto mixto con Tierra irregular haciendo uso de ordenadores de alta velocidad disponibles hoy en día. El tema de la resolución del terreno también se aborda en estas referencias para determinar la precisión del cálculo sobre terreno irregular en frecuencias de ondas kilométricas y hectométricas.

FIGURA 3

Ejemplo de las curvas de la Recomendación UIT-R P.368



Las curvas de propagación para frecuencias más elevadas aparecen en el Manual «Curvas de propagación de las ondas radioeléctricas sobre la superficie de la Tierra» y varias Recomendaciones tratan aspectos específicos de la propagación a estas frecuencias más elevadas (véase la Recomendación UIT-R P.1144).

Aunque las curvas de la onda de superficie son aplicables a antenas situadas sobre el terreno, pueden utilizarse con antenas elevadas cuando $\epsilon_r < 60\sigma\lambda$ para alturas de hasta $h = 1,2\sigma^{1/2}\lambda^{3/2}$.

Existen dos conjuntos de curvas en la Recomendación. El primero contiene curvas para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz y cada figura se refiere a un valor distinto de las constantes del terreno (en el Cuadro 2 aparecen las constantes del terreno utilizadas). En la Fig. 3 se representa un ejemplo de estas curvas. Para mayor conveniencia, se presenta una disposición alternativa en un segundo conjunto de curvas, en las que cada figura se refiere a una sola frecuencia (de 30 kHz a 3 000 kHz) y una gama de constantes del terreno.

CUADRO 2

Gráficos de propagación por onda de superficie para diversos valores de constantes del terreno, que aparecen en la Recomendación UIT-R P.368

Número de la figura	Descripción	Conductividad (S/m)	Permitividad relativa
1	Agua de mar, salinidad baja	1	80
2	Agua de mar, salinidad media	5	80
3	Agua dulce	3×10^{-3}	80
4	Tierra	3×10^{-2}	40
5	Tierra húmeda	1×10^{-2}	30
6	Tierra	3×10^{-3}	22
7	Tierra moderadamente seca	1×10^{-3}	15
8	Tierra seca	3×10^{-4}	7
9	Tierra muy seca	1×10^{-4}	3
10	Hielo de agua dulce, $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$	3×10^{-5}	3
11	Hielo de agua dulce, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	1×10^{-5}	3

Cada conjunto de curvas también incluye la curva inversa de la distancia como una línea recta de trazos.

Por motivos prácticos, las curvas se dan para el caso de 1 kW prax; es decir, para 1 kW radiado omnidireccionalmente por un radiador vertical corto situado en una tierra esférica lisa. Deben tenerse en cuenta la potencia del transmisor real o propuesta, las pérdidas en la red de acoplamiento que alimenta a la antena, el diagrama de radiación acimutal si se utilizan sistemas de antenas directivas y la longitud de los elementos de antena (la Fig. 2 presenta las variaciones de la ganancia con la altura de la antena en términos de la fuerza cimomotriz; la Recomendación UIT-R P.341 también presenta la ganancia para algunas antenas de referencia). También es preciso considerar las ineficiencias del sistema radial de toma de tierra de la antena. En el § 18.2 se describe un método para medir la prax real de un sistema existente.

El programa GRWAVE también está escrito para el mismo caso de 1 kW radiado omnidireccionalmente por un radiador vertical corto situado sobre una tierra esférica lisa. Para ello, el momento del dipolo utilizado en los cálculos es $5\lambda/2\pi$.

Obsérvese que el uso del concepto de pérdidas de transmisión puede llevar a confusión cuando la presencia del terreno restringe la radiación al semiespacio situado sobre el suelo (véase la Recomendación UIT-R P.341, Anexo 2).

Las curvas indican el campo total a la distancia r con un error inferior a 1 dB cuando kr es mayor de 10, aproximadamente, cuando siendo $k = 2\pi/\lambda$. Los efectos de campo cercano pueden incluirse aumentando la intensidad de campo en decibelios mediante la expresión:

$$10 \log \left\{ 1 - \frac{1}{(kr)^2} + \frac{1}{(kr)^4} \right\} \quad (16)$$

Como resultado se obtiene el campo total situado entre $\pm 0,1$ dB para el mar y para el suelo húmedo, y entre ± 1 dB para toda conductividad del terreno superior a 10^{-3} S/m.

En la referencia [27] figura una discusión interesante sobre la precisión para determinar la frontera de transición de campo cercano a campo lejano en términos de minimizar la diferencia de fase del campo eléctrico a través de la apertura de cualquiera de las antenas, el error de amplitud de la predicción de intensidad de campo y la distancia necesaria para que los términos $1/r^2$ y $1/r^3$ del campo eléctrico sean significativos (campo cercano) o despreciables (campo lejano) en comparación con el campo $1/r$.

5 Impedancia de la superficie

Una forma alternativa de considerar las pérdidas que aparecen en la propagación por onda de superficie es comenzar con la relación inversa del cuadrado de la distancia para la potencia de la señal (una relación inversa con la distancia para la intensidad de campo, como muestra la Recomendación UIT-R P.368) y a continuación expresar por separado la atenuación debida a las pérdidas de propagación por onda de superficie.

Puede demostrarse que el factor de atenuación [28] es:

$$A = 1 - i\sqrt{\pi\rho} \exp(-\rho) \operatorname{erfc}(i\sqrt{\rho}) \quad (17)$$

y ρ puede expresarse como:

$$\rho = -\frac{i\pi\eta^2 r}{\lambda} \quad (18)$$

siendo η la impedancia de la superficie que viene dada por:

$$\eta = \frac{(\varepsilon - i60\sigma\lambda - 1)^{1/2}}{\varepsilon - i60\sigma\lambda} \quad (19)$$

La impedancia de la superficie es un medio útil para describir características complejas de la superficie tales como las irregularidades del terreno, los árboles, las estructuras artificiales, los edificios y las olas del mar.

6 Conductividad del suelo

6.1 Conductividad del terreno

Para la planificación inicial y para las evaluaciones de compatibilidad o reutilización de frecuencias, la información de la Recomendación UIT-R P.368 y su correspondiente procedimiento GRWAVE está bien asentada y es ampliamente utilizada. Sin embargo, la mayor incertidumbre probablemente sea la estimación de las constantes del terreno, y en particular su conductividad. Las características eléctricas de la superficie de la Tierra se discuten en la Recomendación UIT-R P.527. Cabe señalar que se espera que las características sean independientes de la frecuencia en las bandas de ondas decamétricas y en frecuencias inferiores (aparte del caso de hielo de agua dulce en ondas kilométricas y miriamétricas).

No obstante, es importante señalar la profundidad de penetración, o profundidad del efecto pelicular, esperada de las ondas radioeléctricas en el suelo¹. Para el agua de mar, la profundidad de penetración (profundidad a la cual las señales resultan atenuadas 1/e del valor en la superficie) es sólo de unos 25 cm a 1 MHz. Pero para un

¹ La profundidad de penetración en un material arbitrario viene dada por:

$$\delta = \left(\frac{\sqrt{2}}{\omega\sqrt{\mu_r\mu_0\varepsilon_r\varepsilon_0}} \right) \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_r\varepsilon_0} \right)^2} - 1 \right]^{-1/2} \quad (20)$$

siendo:

δ la profundidad de penetración, $\omega = 2\pi f$, σ la conductividad, μ_0 la permeabilidad en el espacio libre, μ_r la permeabilidad relativa, ε_0 la permitividad en el espacio libre y ε_r la permitividad relativa.

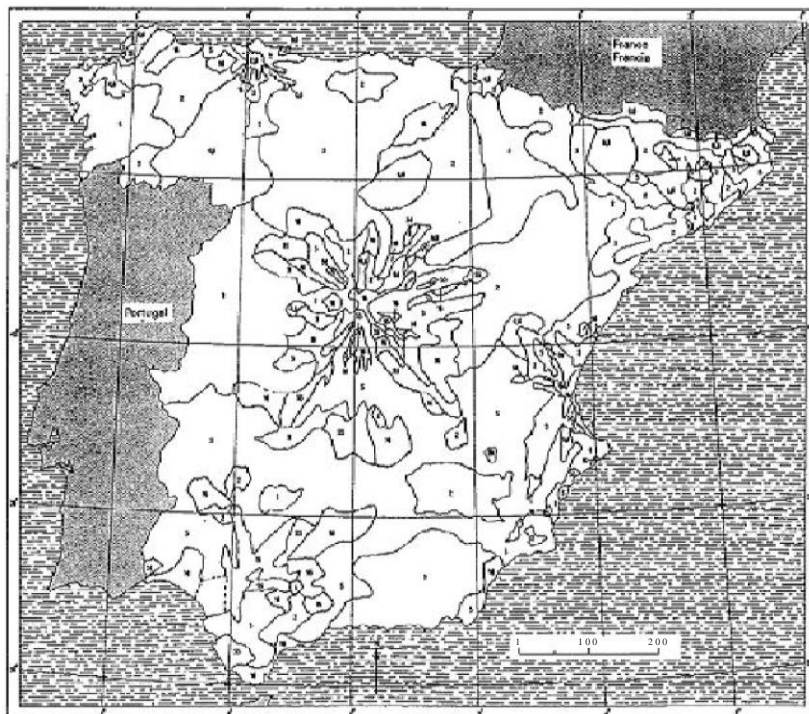
terreno moderadamente seco es de unos 25 m. Por tanto, para determinar o estimar la conductividad efectiva que debe utilizarse en la predicción de la cobertura en ondas hectométricas, e incluso más en ondas kilométricas, será importante tener debidamente en cuenta la geología del subsuelo. En la referencia [68] aparece más información sobre la profundidad de penetración del campo eléctrico en el suelo y sobre las mediciones de las propiedades dieléctricas del terreno.

Es bastante improbable que los métodos para determinar la conductividad que hacen uso de sondas de tierra u otros medios de medición de una muestra de suelo arrojen resultados útiles ya que normalmente medirán únicamente las características de la capa superior del suelo. Las mediciones más útiles se hacen utilizando transmisores de prueba u operacionales y realizando una serie de medidas a diversas distancias. Véase el § 18.3.

La Recomendación UIT-R P.832 proporciona mapas de conductividad para las bandas de ondas miriamétricas y hectométricas. Los mapas para las bandas de ondas miriamétricas se refieren a zonas continentales y se extienden sobre casi todas las zonas terrestres del mundo. Los mapas para las bandas de ondas hectométricas se refieren a muchos países o grupos de países indicados por las administraciones. El Ruego UIT-R 91-1 indica que las administraciones deben verificar y, si es preciso, revisar la información que aparece en el Atlas Mundial, observando que en algunos casos puede ser necesario incluir cambios estacionales; que las nuevas administraciones deben comprobar que sus necesidades quedan cubiertas en el actual Atlas Mundial de la conductividad del suelo y contribuir a la revisión de los datos y que las administraciones correspondientes de los países para los que no aparecen datos en el Atlas Mundial, recopilen y proporcionen datos de conformidad con la información que aparece en la Recomendación UIT-R P.832.

FIGURA 4

**Ejemplo de mapa de conductividad del suelo
incluido en la Recomendación UIT-R P.832**



Ground Wave Prop. 04

Cuando no se dispone de información detallada, también se incluye en la Recomendación un mapa mundial de conductividad en ondas hectométricas. Sin embargo, este mapa sólo proporciona una somera indicación de la conductividad que puede ser adecuada para las evaluaciones mundiales o regionales de los requisitos de espectro pero no es probable que sea adecuado para efectuar una estimación de la cobertura individual. Cuando no se tiene otra información, la mejor forma de determinar la conductividad es examinar los mapas geológicos

y comparar las circunstancias con otra zona del mundo que posea un clima y unas características geológicas similares.

6.2 Conductividad del mar

Para el agua de mar, la Recomendación UIT-R P.368 proporciona predicciones para conductividades típicas y bajas de 5 y 1 S/m. Sin embargo, la conductividad variará tanto con la salinidad como con la temperatura del agua de mar y para obtener predicciones más precisas puede hacerse uso de la conductividad esperada en el programa GRWAVE.

La conductividad del agua de mar viene dada por:

$$\sigma = 0,18C^{0,93} (1 + 0,02(T - 20)) \quad \text{S/m} \quad (21)$$

donde:

C : salinidad (gramos de sal por litro)

T : temperatura (°C).

En mares fríos, σ es del orden de 3,5 S/m y en mares calientes toma un valor en torno a 5 S/m.

PARTE 3

Variaciones con respecto al procedimiento de predicción principal

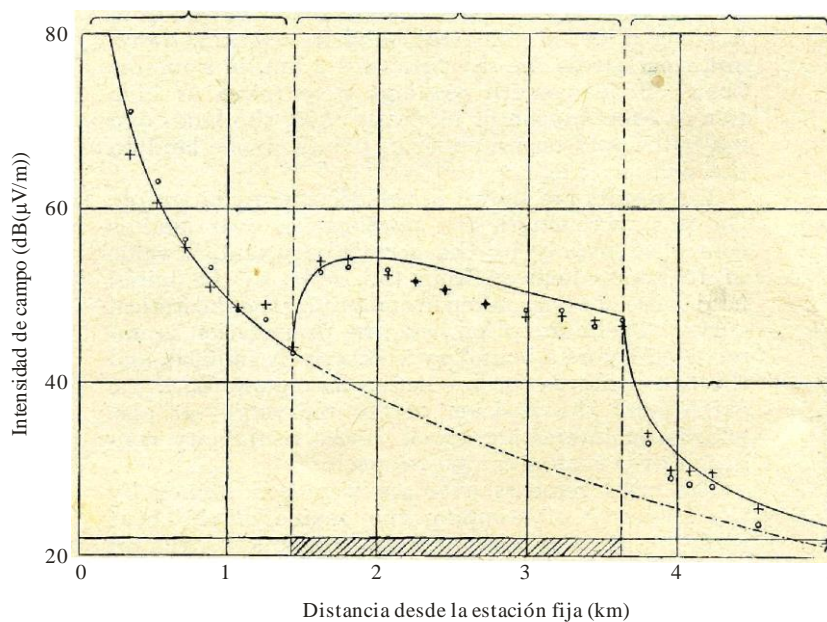
7 Tierra lisa de conductividad mixta

7.1 Efecto de recuperación sobre el mar

Cuando las características del terreno varían a lo largo del trayecto de propagación, la intensidad de campo resultante presenta una variación sorprendente con la distancia. La intensidad de campo en un trayecto sobre tierra, sobre mar y luego sobre tierra nuevamente disminuye a través de la región de tierra inicial pero al alcanzar la costa experimenta un rápido incremento seguido de una disminución más gradual y a continuación una abrupta disminución al cruzar la costa nuevamente. Los primeros métodos de abordar este problema producían resultados incorrectos que no satisfacían los requisitos de reciprocidad. Millington [6] estableció un procedimiento que forzaba la reciprocidad y que ha demostrado ser muy satisfactorio en el caso de una tierra moderadamente lisa, produciendo resultados similares a los del método más complejo desarrollado por Hufford [7]. Un estudio teórico de la propagación sobre una superficie compleja muestra un buen acuerdo con los resultados experimentales [29].

FIGURA 5

Demostración inicial del efecto de recuperación de la onda de superficie sobre el mar a 77 MHz

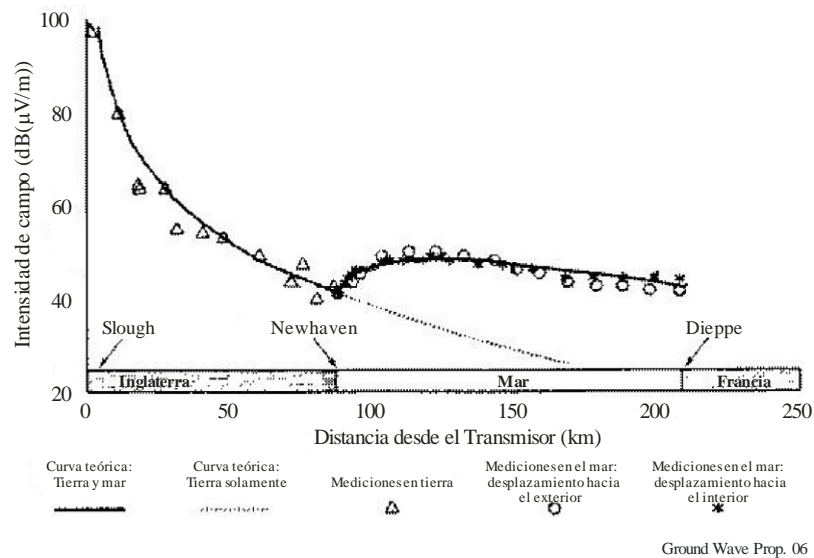


Ground Wave Prop. 05

Las primeras pruebas de Millington se realizaron a una frecuencia de 77 MHz para distancias cortas y demostraron este efecto de recuperación [30], véase la Fig. 5. Para confirmar este efecto, la prueba inicial fue seguida por un experimento para largas distancias a través del Canal de la Mancha a la frecuencia de 3 MHz [31], véase la Fig. 6.

FIGURA 6

Pruebas del efecto de recuperación de la onda de superficie a 3 MHz



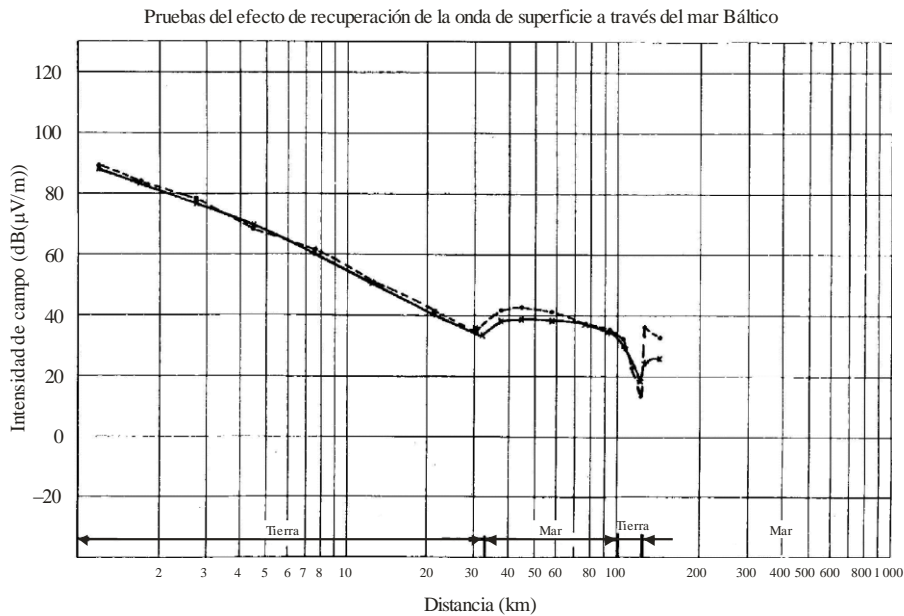
Este efecto es tan inesperado que puede que sea necesario demostrar nuevamente su existencia a las nuevas generaciones de ingenieros.

En las referencias [12] y [14] aparecen otras confirmaciones del efecto de recuperación que demuestran que este efecto sobre un trayecto tierra-mar presenta una similitud razonable entre las predicciones de propagación y las mediciones en la gama de frecuencias de 100 a 2 000 kHz. La referencia [9] muestra un efecto de recuperación similar cuando la transición en el trayecto de propagación se produce entre una zona boscosa y un campo abierto a la frecuencia de 10 MHz. La referencia [32] muestra los efectos de recuperación en trayectos tierra-agua en mediciones en la gama de frecuencias de 285 a 325 kHz.

La Fig. 7 representa los resultados de una prueba más compleja a 3,9 MHz en un trayecto tierra-mar-tierra en el Mar Báltico [33].

FIGURA 7

Pruebas del efecto de recuperación de la onda de superficie a través del mar Báltico



Ground Wave Prop. 07

7.2 Método Millington para trayectos mixtos

El procedimiento de Millington, por ejemplo para un trayecto tierra-mar-tierra, consiste en seguir la curva de intensidad de campo de la onda de superficie en la sección de tierra inicial. En el límite costero la curva sobre el mar se ajusta al valor sobre tierra en ese emplazamiento. La curva del mar se sigue hasta la siguiente costa y la curva sobre tierra adecuada se ajusta a esa distancia. La curva de tierra se sigue a la distancia requerida. Con ello se obtiene el primer valor intermedio. A continuación se intercambian los emplazamientos del transmisor y el receptor y se repite el procedimiento para el trayecto inverso a fin de obtener un segundo valor intermedio. La predicción requerida se obtiene a continuación calculando la media geométrica de los dos valores de intensidad de campo intermedios (la media aritmética cuando las intensidades de campo se expresan en decibelios).

Este proceso puede realizarse mediante un simple procedimiento gráfico si las curvas se dibujan a una escala de distancia lineal o mediante una sencilla rutina informática.

El procedimiento también se describe en el Anexo 2 a la Recomendación UIT-R P.368:

Paso 1. Para una frecuencia determinada se escoge la curva correspondiente a la sección S_1 , y se determina el valor de la intensidad de campo $E_1(d_1)$ en $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ a la distancia L_1 . A continuación, mediante la curva correspondiente a la sección S_2 se determinan las intensidades de campo $E_2(L_1)$ y $E_2(L_1+L_2)$ y, procediendo de la misma manera con la curva correspondiente a la sección S_3 , se determinan las intensidades de campo $E_3(L_1 + L_2)$ y $E_3(L_1 + L_2 + L_3)$ y así sucesivamente.

Paso 2. La intensidad de campo recibida se define entonces como sigue:

$$E_R = E_1(L_1) - E_2(L_1) + E_2(L_1 + L_2) - E_3(L_1 + L_2) + E_3(L_1 + L_2 + L_3) \tag{22}$$

Paso 3. Se invierte luego el procedimiento, denominando R al transmisor y T al receptor, lo que conduce a una intensidad de campo E_T definida por la ecuación:

$$E_T = E_3(L_3) - E_2(L_3) + E_2(L_3 + L_2) - E_1(L_3 + L_2) + E_1(L_3 + L_2 + L_1) \tag{23}$$

Paso 4. La intensidad de campo requerida bien dada por:

$$E_M(R) = \frac{(E_R + E_T)}{2} (\text{dB}\mu\text{V/m}) \quad (24)$$

7.3 Estimación de un valor de conductividad representativo para trayectos mixtos en la banda de ondas hectométricas

Como se indicó anteriormente, la estimación de la conductividad del suelo probablemente sea la parte más indeterminada del proceso de predicción y cuando se aplica puede no estar justificado emprender el procedimiento de predicción de trayecto mixto antes descrito para trayectos sobre tierra en los que la conductividad variable no es muy extrema. En estos casos, puede utilizarse un método de predicción basado en un valor representativo de la conductividad de la parte total sobre tierra de un trayecto. Las referencias [32] y [13] confirman esta hipótesis para frecuencias de la banda de ondas kilométricas próximas a 300 kHz. Las referencias [12] [14] y [9] confirman esta hipótesis en las bandas de ondas kilométricas y hectométricas. La referencia [1] apoya esta hipótesis para la banda de ondas decamétricas.

La conductividad ponderada se define como la media de los valores de la conductividad a lo largo del trayecto, ponderados con la longitud de cada sección de conductividad:

$$\sigma_{\text{weighted}} (\text{mS} / \text{m}) = \frac{\sum_i \sigma_i \cdot d_i}{\sum_i d_i} \quad (25)$$

siendo σ_i los diferentes valores de la conductividad a lo largo del trayecto y d_i las longitudes de las secciones a lo largo del trayecto con un valor de la conductividad constante.

La conductividad ponderada es un valor de la conductividad representativo del trayecto que puede emplearse en el procedimiento de predicción. Proporciona buenos resultados para las estimaciones de los niveles de intensidad de campo en trayectos mixtos sobre tierra. En el caso de trayectos mixtos tierra-mar-tierra, la conductividad ponderada sólo debe utilizarse para las secciones de tierra y entonces debe aplicarse el método de Millington.

8 Mar agitada

La conductividad efectiva del agua marina se discute en el § 6 para el caso de mares en calma. Sin embargo, las olas del mar que causan agitación en la superficie provocan pérdidas adicionales ya que la energía se dispersa por el modo de onda de superficie.

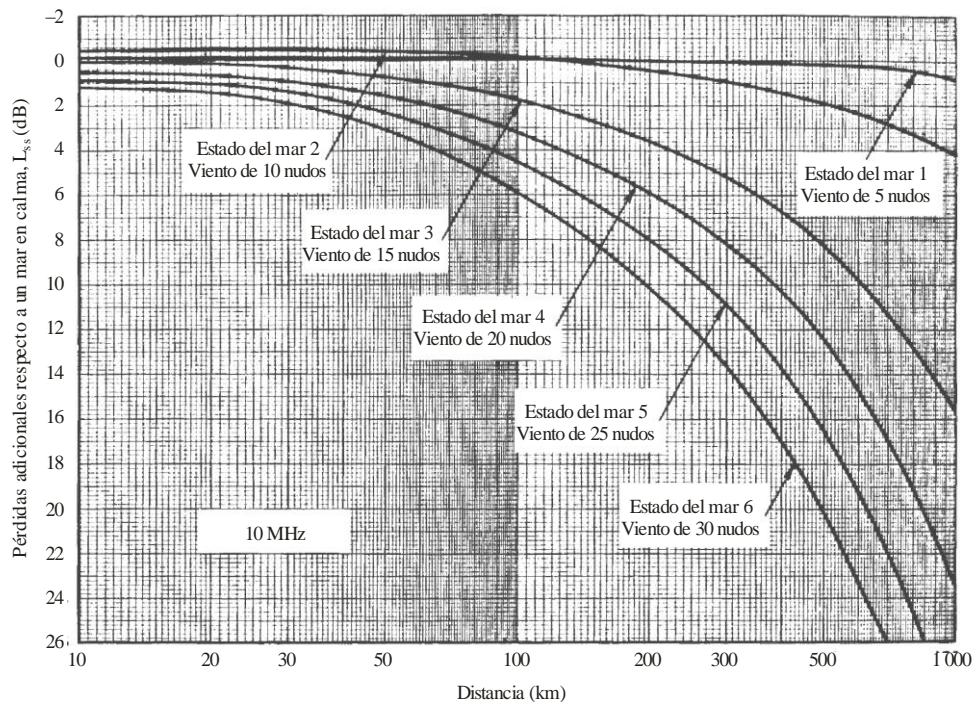
La teoría elaborada por D. E. Barrick [34], [35] es ampliamente utilizada en la propagación por onda de superficie en ondas decamétricas sobre mares agitados. Este método se combina fácilmente con el método de intensidad de campo de la onda de superficie sobre Tierra lisa. Barrick demostró que los efectos de una superficie ligeramente rugosa pueden modelarse sustituyendo la impedancia de la superficie lisa por la impedancia de la superficie efectiva que depende de la rugosidad de la superficie. La teoría de Barrick se basa en tres hipótesis:

- i) la altura de la superficie sobre el plano medio es pequeña comparada con la longitud de onda radioeléctrica;
- ii) las pendientes de la superficie son pequeñas;
- iii) el medio por debajo de la superficie presenta una elevada conductividad.

Estas condiciones son satisfechas por la propagación de las ondas decamétricas sobre el mar. No las cumplen las ondas radioeléctricas de la banda de ondas métricas que se propagan a través de mares moderadamente agitadas y ninguna banda en relación con la propagación sobre tierra.

En la Fig. 8 aparecen ejemplos de pérdidas según el estado del mar a 10 MHz para el modelo de Phillips [36] del espectro de olas del mar. Generalmente, las pérdidas aumentan con la longitud del trayecto, el estado del mar y la frecuencia radioeléctrica. Esta figura muestra un fenómeno característico: a distancias de hasta 100 km de la costa, pero más allá del alcance en el que aparece el efecto de recuperación, la intensidad de campo en mares ligeramente agitadas es mayor que en mares en calma. Esto puede apreciarse en la Fig. 8 para el estado del mar 2. Para una longitud de onda de 295 m se ha observado un incremento de 1,5 – 2 veces [28].

FIGURA 8
Pérdidas según el estado del mar a 10 MHz



Ground Wave Prop. 08

9 Entornos rurales

El nivel medio de intensidad de campo en el entorno rural depende de las propiedades eléctricas del terreno, de la frecuencia, de la distancia al transmisor y de las variaciones a gran escala debidas a la influencia de las irregularidades del terreno en las proximidades del emplazamiento del receptor. Todos estos aspectos se han descrito en capítulos anteriores.

En situaciones prácticas que aparecen en entornos reales, incluso cuando la distancia entre emplazamientos es mucho menor que la distancia al transmisor, las condiciones de recepción no serán idénticas debido a la presencia de cambios locales en el terreno, a los árboles y a la vegetación, a los edificios y estructuras artificiales, a los cables aéreos etc. En muchos entornos aparentemente abiertos la diferencia en los niveles de una señal en emplazamientos próximos sigue una distribución log-normal con una desviación típica de un valor medio aproximado de 2-4 dB.

El caso especial de propagación a través de bordes de acantilados fue estudiado por Furutsu [37]. Pielou [38] mostró un ejemplo del efecto.

10 Entornos urbanos

10.1 Efecto de las zonas urbanas con gran densidad de construcción, 0,1 a 20 km

10.1.1 Introducción

Hay un cierto número de aplicaciones para las cuales las frecuencias radioeléctricas en la banda de ondas hectométricas pueden utilizarse a cortas distancias (por ejemplo, la organización de redes de radiodifusión urbanas y regionales, el desarrollo de servicios públicos, etc.). Por tanto, es necesario conocer las características de un campo en la banda de ondas hectométricas a distancias comprendidas entre varias decenas de metros y varias decenas de kilómetros. No obstante, la distribución y atenuación de las frecuencias medias en regiones urbanas a distancias más cortas que la longitud de onda aún no ha sido suficientemente estudiada.

Se han realizado estudios sobre el comportamiento en una zona urbana de la intensidad del campo electromagnético lejano; por ejemplo, por Causebrook [22] (véase el § 10.2) y Chernov [39].

En el campo cercano, la intensidad de campo crece abruptamente a distancias más cortas y la velocidad de cambio de las componentes eléctrica y magnética no es la misma. La componente con el mayor incremento depende del tipo de antena transmisora. En particular, al acercarse a una antena de medición del campo eléctrico (por ejemplo, un monopolo vertical) en el límite existe únicamente la componente eléctrica causada por la corriente en la antena.

A cortas distancias, el campo disminuye en primer lugar como R^{-3} , a continuación como R^{-2} ; y a gran distancia como R^{-1} . Para construcciones urbanas, estas leyes presentan algunas peculiaridades.

La hipótesis inicial, confirmada por estudios preliminares, consiste en que la atenuación de las ondas en zonas con construcciones urbanas debe ser superior que en la tierra lisa. Si este exceso es significativo, la atenuación puede expresarse en una fórmula sencilla.

10.1.2 Breve teoría (véase por ejemplo [28], [60])

La intensidad de campo producida por un radiador eléctrico elemental en una dirección perpendicular al eje del radiador para las componentes eléctrica E_{el} y magnética, H_{el} del campo

$$E_{el} = \left(\frac{ijklZ_0}{4\pi} \right) \left(\frac{\exp(ikR)}{R} \right) \left(1 + \frac{1}{ikR} - \frac{1}{k^2R^2} \right) \quad (26)$$

$$H_{el} = \left(\frac{ijkl}{4\pi} \right) \left(\frac{\exp(ikR)}{R} \right) \left(1 + \frac{1}{ikR} \right) \quad (27)$$

De forma similar, para un radiador magnético las componentes magnética H_m y eléctrica E_m se pueden expresar como sigue:

$$E_m = \left(\frac{ikJl}{4\pi} \right) \left(\frac{\exp(-ikR)}{R} \right) \left(1 + \frac{1}{ikR} \right) \quad (28)$$

$$H_m = \left(\frac{1kJl}{4\pi Z_0} \right) \left(\frac{\exp(-ikR)}{R} \right) \left(1 + \frac{1}{ikR} - \left(\frac{1}{k^2R^2} \right) \right) \quad (29)$$

donde J es la corriente en el radiador, l es la longitud del radiador, Z_0 es la resistencia de la onda de espacio libre ($120\pi \Omega$) y $k = 2\pi/\lambda$. Los índices « el » y « m » se refieren a los radiadores eléctrico y magnético.

En el campo cercano, donde $R \approx 1/k$; $\exp(-ikR)$ puede aproximarse a la unidad de modo que:

$$E_{el} = JIZ_0 / (i4\pi R^3) \quad (30)$$

$$H_{el} = Jl / (4\pi R^2) \quad (31)$$

$$E_m = Jl / (4\pi R^2) \quad (32)$$

A partir de estas expresiones puede observarse que el campo eléctrico próximo al radiador crece abruptamente y que la velocidad de aumento de las componentes eléctrica y magnética es diferente.

La relación E_{el}/H_{el} en el campo cercano aumenta en proporción inversa a la distancia:

$$E_{el}/H_{el} = W / (iR) \quad (33)$$

De las ecuaciones [26] a [29] puede verse que en la zona de campo cercano el campo disminuye como R^{-3} , a continuación R^{-2} , y posteriormente, en la zona alejada, como R^{-1} . Además, en el campo cercano, las componentes magnética y eléctrica están separadas en fase aproximadamente 90° , de manera que el campo tiene carácter reactivo y no se radia, puesto que el vector de Poynting es aproximadamente cero.

En muchos textos básicos sobre electrodinámica y antenas (véase por ejemplo [40]) no se lleva a cabo un análisis completo de una zona de campo cercano ni tampoco se describe la forma en que se crea un campo distante. Sin embargo, para nuestros efectos, es esencial realizar un análisis del campo cercano. Para ello, el término $\exp(-ikR)$ a distancias cortas puede aproximarse por la expresión $(1-ikR)$ y las ecuaciones (26) y (27) pasan a ser:

$$E_{el} = \left(\frac{ijkIZ_0}{4\pi R}\right) \left(-\frac{1}{k^2 R^2} - ikR\right) \quad (34)$$

$$H_{el} = \left(\frac{ijkI}{4\pi R}\right) \left(\frac{1}{ikR} - ikR\right) \quad (35)$$

De estas expresiones se deduce que el modulo del vector de Poynting $\Pi = [H_{el}^* E_{el}]$ consta de dos partes. En primer lugar una parte imaginaria $\Pi_{im} \approx (kJI/4\pi)^2 Z_0 / (k^3 R^5)$ y en segundo lugar una parte real que viene dada por el producto de la parte real de la componente magnética (donde el primer término en los segundos paréntesis es evidentemente más significativo que el segundo término) y la parte real de la componente eléctrica. La componente magnética del vector disminuye como $1/R^2$ y la componente eléctrica permanece constante. Su producto es:

$$\Pi_{Re} \approx (kJI/4\pi)^2 Z_0 / R^2 \quad (36)$$

Por consiguiente, cerca de la antena transmisora la velocidad de disminución de la densidad de potencia es la misma que en la zona distante, en la cual a partir de (26) y (27) para grandes R se obtendrá (36). En otras palabras, la parte real de la densidad de potencia, radiada por la antena de medición del campo eléctrico, varía con la distancia en las zonas cercana, intermedia y distante como $1/R^2$, correspondiente a la ley tradicional de expansión esférica. Normalmente se produce un aumento de la relación entre las componentes imaginaria y real próximas al radiador.

$$\Pi_{im}/\Pi_{Re} = 1 / k^3 R^3 \quad (37)$$

En ondas hectométricas la zona cercana está limitada a distancias mucho menores que $1/k$. De esa forma, para longitudes de onda de 200 a 300 m donde $1/k$ toma valores entre 31 y 48 m la zona cercana es de unos 10 m.

En la zona distante, para ondas hectométricas más allá de aproximadamente 300-500 m, la intensidad de campo viene dada por la expresión:

$$E = (300 P^{1/2}/R) \cdot V \text{ mV/m} \quad (38)$$

donde:

P : potencia radiada en kW

R : distancia en km.

La función de atenuación, V , depende del parámetro ρ :

$$\rho = -i(\pi R/\lambda) \cdot [(\epsilon' - 1)/(\epsilon')^2], \quad \epsilon' = \epsilon - i \cdot 60\lambda\sigma \quad (39)$$

donde:

- λ : longitud de onda en m
- ε' : permeabilidad dieléctrica compleja
- ε : parte real de la permeabilidad y
- σ : conductividad del suelo en S/m.

Para longitudes de onda en la gama 200-300 m (1,5-1,0 MHz) y conductividades comprendidas entre 10^{-3} y 10^{-2} S/m:

$$\varepsilon' = \varepsilon - i \cdot 60 \cdot (200 \cdot 10^{-3} \dots 300 \cdot 10^{-2}) = \varepsilon - i \cdot (12 \dots 180).$$

En un terreno de baja conductividad ε' , el primer término de la ecuación (39) puede despreciarse, de manera que.

$$\rho \approx 10^5 \cdot \pi R / (6 \lambda^2 \cdot \sigma)$$

Con R en km, λ en m y σ en mS/m

De acuerdo con esto, para $\sigma = 1$ mS/m y $\lambda = 200$ m, y para $R = 1$ y 10 km $\rho = 1,31$ y $13,1$.

La función de atenuación se aproxima por la expresión:

$$V = (2 + 0,3\rho) / (2 + \rho + 0,6\rho^2) \quad (40)$$

Para valores elevados de ρ , la ecuación (40) presenta una dependencia próxima a $1/\rho$ y el factor de atenuación es proporcional a R^{-1} .

Por consiguiente, para una conductividad del terreno baja y frecuencias de trabajo elevadas, la dependencia de la intensidad de campo con la distancia varía entre $1/R$ (26) y $1/R^2$ a distancias mayores de aproximadamente 1 km. A esas distancias, teniendo en cuenta (38) y (40) se obtiene:

$$E = 300 P^{1/2} \cdot 6 \lambda^2 \sigma / (10^5 \pi R^2) = 5730 \cdot P^{1/2} \lambda^2 \sigma / R^2 \quad \mu\text{V/m} \dots \quad (41)$$

expresándose P en kW, R en km, λ en m y σ en mS/m.

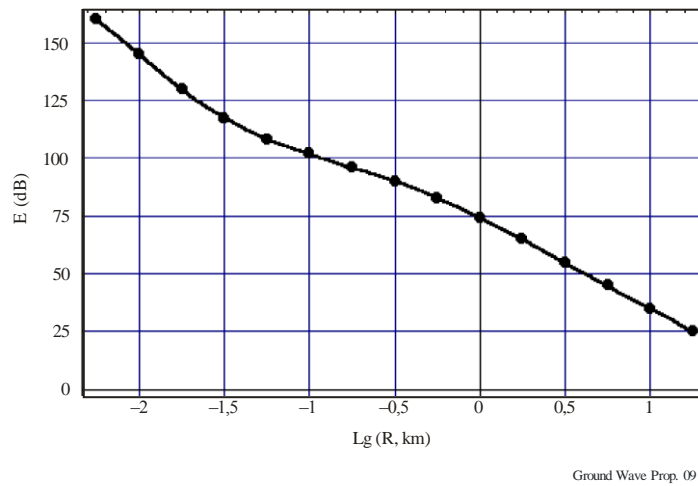
Es importante destacar que $1/R^2$, como se indica en [41], es teóricamente la velocidad de disminución más rápida de la intensidad de campo con la distancia desde el transmisor en condiciones urbanas homogéneas, a distancias a las que puede considerarse que la superficie terrestre es plana. La expresión define la dependencia limitada, de manera que en el marco de las anteriores hipótesis se consideraría imposible una disminución más abrupta con la distancia, en cualquier condición. Utilizando este enfoque Chernov [41] dedujo una solución común adecuada para todas las distancias, a partir de unas decenas de metros:

$$E(R) = 74,72 - 33,36R - 10,47R^2 - 1,25R^3 + 367R^4 + 077R^5, \text{ dB } (\mu\text{V/m}), \quad (42)$$

siendo $R = \lg(R, \text{ km})$

Esta dependencia aparece representada en la Fig. 9.

FIGURA 9

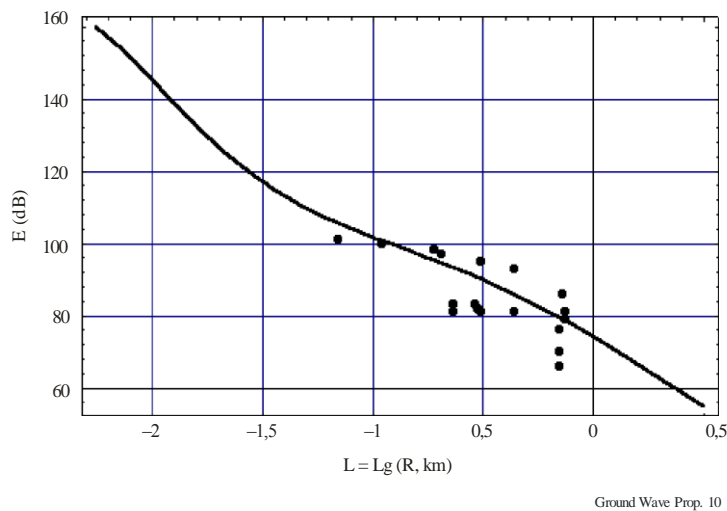


10.1.3 Resultados de las mediciones

Para estimar el error de esta curva (Fig. 9) y la atenuación de las señales en ondas hectométricas a cortas distancias del transmisor, utilizando un medidor de intensidad de campo con antena de bucle apantallada, se realizaron mediciones a distancias del transmisor de hasta 1000 m para varias condiciones urbanas [41], [61] y [63].

Los datos medidos de intensidad de campo y dependencia teórica [41] se representan en la Fig. 10.

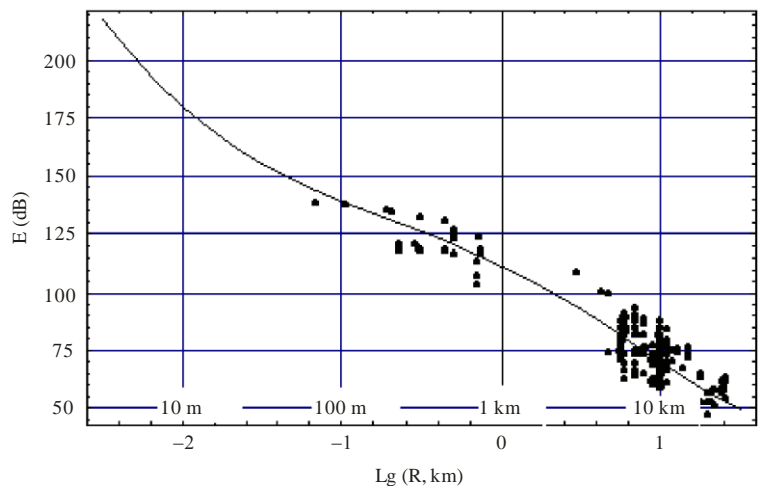
FIGURA 10



En la figura puede verse que los datos medidos se ajustan satisfactoriamente a la curva calculada. Es importante observar que los datos experimentales están agrupados y no dispersos, incluso cuando las mediciones se llevaron a cabo dentro de los edificios. Aparecieron excepciones en un ascensor, donde la atenuación adicional provocada por las paredes metálicas fue de hasta 40 dB.

Estos resultados junto con los obtenidos anteriormente en una ciudad a distancias comprendidas entre 0,5 y 30 km con una potencia radiada de 5 kW [41] se representan en la Fig. 11.

FIGURA 11



Ground Wave Prop. 11

Esta investigación ha demostrado que a distancias superiores a 500 m, empiezan a tener efecto las pérdidas urbanas específicas y la propagación por ondas hectométricas en zonas urbanas construidas es similar a la propagación sobre suelo de baja conductividad, $\sigma=1$ mS/m.

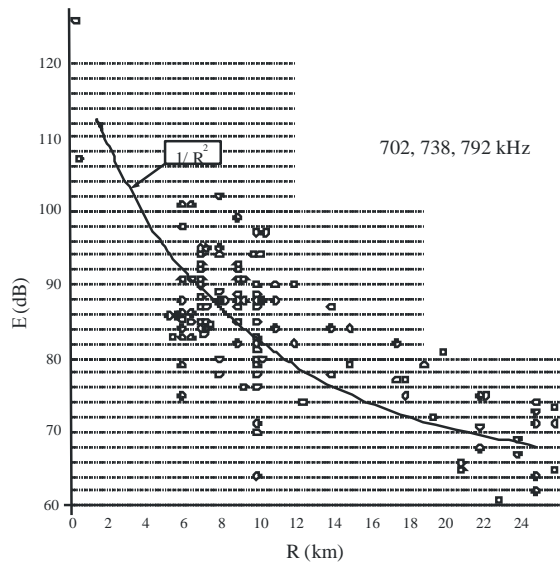
Se realizó otra serie de mediciones de transmisores situados en una ciudad, con longitudes de trayecto comprendidas entre 0,5 km y 26 km en frecuencias entre 702 kHz y 1 539 kHz. A continuación se dan dos ejemplos de distribución de niveles de un campo a lo largo de líneas.

Para incrementar la cantidad de datos, la Fig. 12 agrupa los resultados de mediciones de intensidad de campo para tres transmisores con frecuencias próximas a la parte inferior de la banda de ondas hectométricas y la Fig. 13 agrupa los resultados de cuatro transmisores con frecuencias cercanas a la parte superior de la banda. La potencia de cada transmisor se fijó en 5 kW.

En estas dos figuras se observa que la curva de la ley de la inversa del cuadrado se ajusta a los resultados de las mediciones bastante bien.

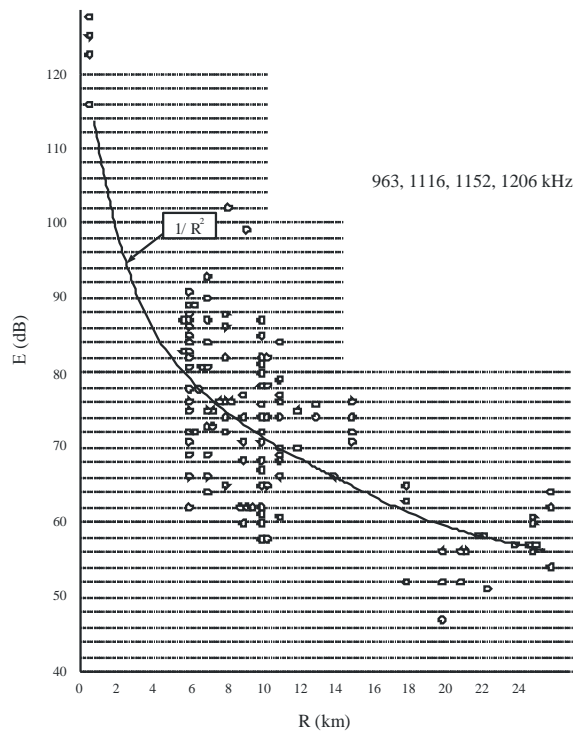
Además de los resultados anteriores para transmisores ubicados dentro de la ciudad, también se realizaron investigaciones sobre transmisores suburbanos situados a distancias de los transmisores desde 10-12 km hasta algunas decenas de kilómetros, durante un periodo de cuatro días. Las medidas de intensidad de campo se llevaron a cabo con un vehículo de mediciones en movimiento en la ciudad de Moscú y los alrededores. Sin embargo, los emplazamientos seleccionados para el análisis se limitaron a trayectos que atravesaban el centro de la ciudad (Fig. 14).

FIGURA 12



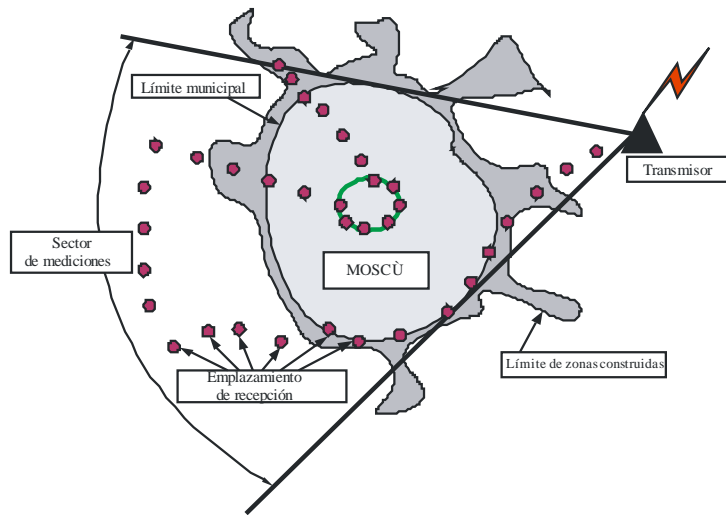
Ground Wave Prop. 12

FIGURA 13



Ground Wave Prop. 13

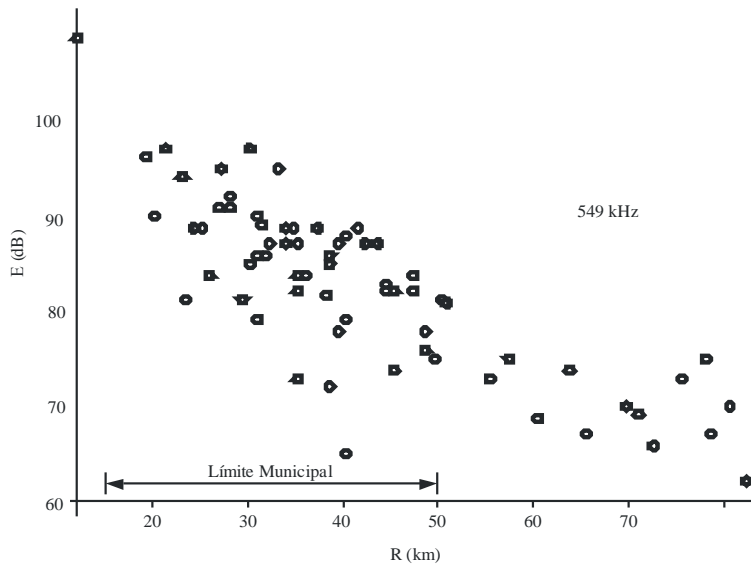
FIGURA 14



Ground Wave Prop. 14

Las Figs. 15 y 16 proporcionan ejemplos de los resultados para uno de los transmisores suburbanos en dos frecuencias distintas.

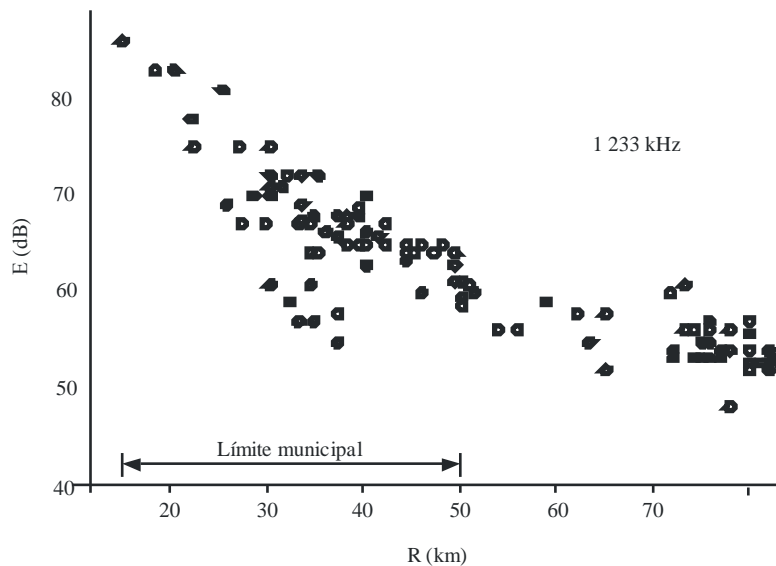
FIGURA 15



Ground Wave Prop. 15

Además de los resultados obtenidos a frecuencias medias, debe señalarse que se realizaron trabajos similares [42] para llevar a cabo una investigación en una banda de ondas decamétricas. Estos trabajos demostraron que a distancias del transmisor de hasta 100-700 m la intensidad de campo es prácticamente proporcional a $1/R$, mientras que a distancias de 0,7-10 km la ley se aproxima a $1/R^2$. En la referencia [39] figuran detalles adicionales de las mediciones efectuadas en la zona de Moscú.

FIGURA 16



Ground Wave Prop. 16

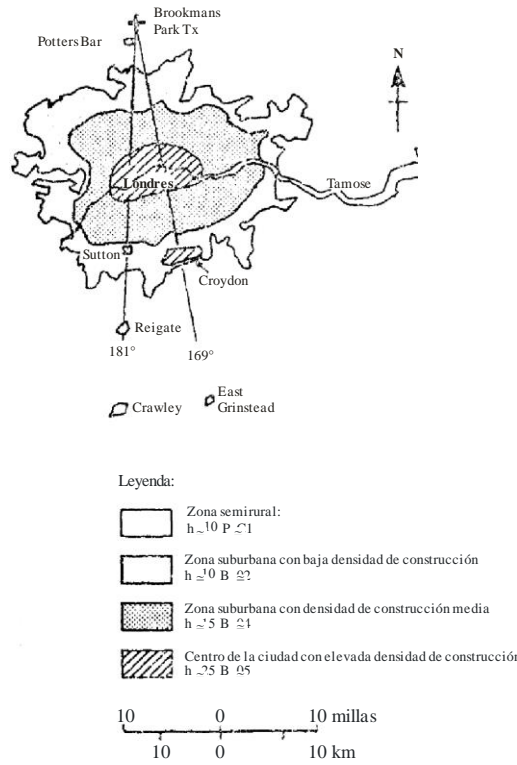
10.2 Distancias superiores a 25 km

Tras la introducción de la radiodifusión en ondas hectométricas en los años 20 del siglo pasado, se estudiaron las variaciones de la señal recibida. Se observaron los efectos de la conductividad del suelo, la altura de las irregularidades del terreno, el apantallamiento por edificios etc., los efectos de las horas nocturnas en las ondas ionosféricas, hasta entonces desconocidos, y especialmente el aumento de la tasa de atenuación con la distancia en zonas urbanas [43], [44], [45] y [46]. Una vez comprendidos los principios generales de la propagación por onda de superficie en las frecuencias de las ondas hectométricas se observó que las predicciones de cobertura global basadas en una propagación sobre una tierra lisa de conductividad apropiada eran bastante precisas en la mayoría de los casos para transmisiones de alta potencia que cubren una combinación de entornos rurales y urbanos. No obstante, un renovado interés en la radiodifusión local destinada fundamentalmente a poblaciones, a ciudades y a sus suburbios demostró la insuficiencia de tales métodos en zonas urbanas. Ello revestirá cada vez más importancia en la radiodifusión digital donde existe una frontera más crítica entre la recepción satisfactoria y el fallo en la recepción debido a bajas relaciones señal/ruido.

El efecto de los edificios y otras estructuras que contienen elementos verticales conductores, así como de los árboles, fue identificado por Bown y otros [44], que lo explicaron en términos de circuitos resonantes en las estructuras verticales. Posteriormente, Causebrook [47] realizó estudios a través de Londres y elaboró una explicación sobre los efectos encontrados en zonas urbanas con gran densidad de edificios. Las mediciones se realizaron en tres frecuencias sobre dos acimuts a través de Londres. Véase la Fig. 17.

FIGURA 17

Trayectos de las mediciones a través de Londres

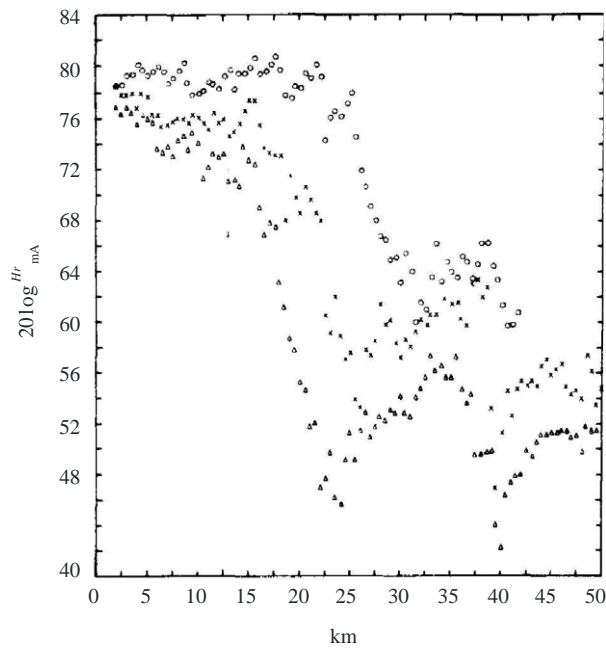


Ground Wave Prop. 17

La Fig. 18 representa las mediciones de Causebrook a través de Londres para el acimut de 169° . En las tres frecuencias, la intensidad de campo cerca del transmisor no disminuye de la forma esperada, pero luego se produce una rápida caída hasta un mínimo, seguida de una recuperación. Causebrook consideró la modificación de la impedancia de la superficie debida a una estructura similar a una capa de «clavos conductores» y examinó el plano complejo de la función ρ (véase la ecuación (18)) representando la atenuación A (véase la ecuación (17)) y la fase, como aparece en la Fig. 19.

FIGURA 18

Mediciones en tres frecuencias a través de Londres



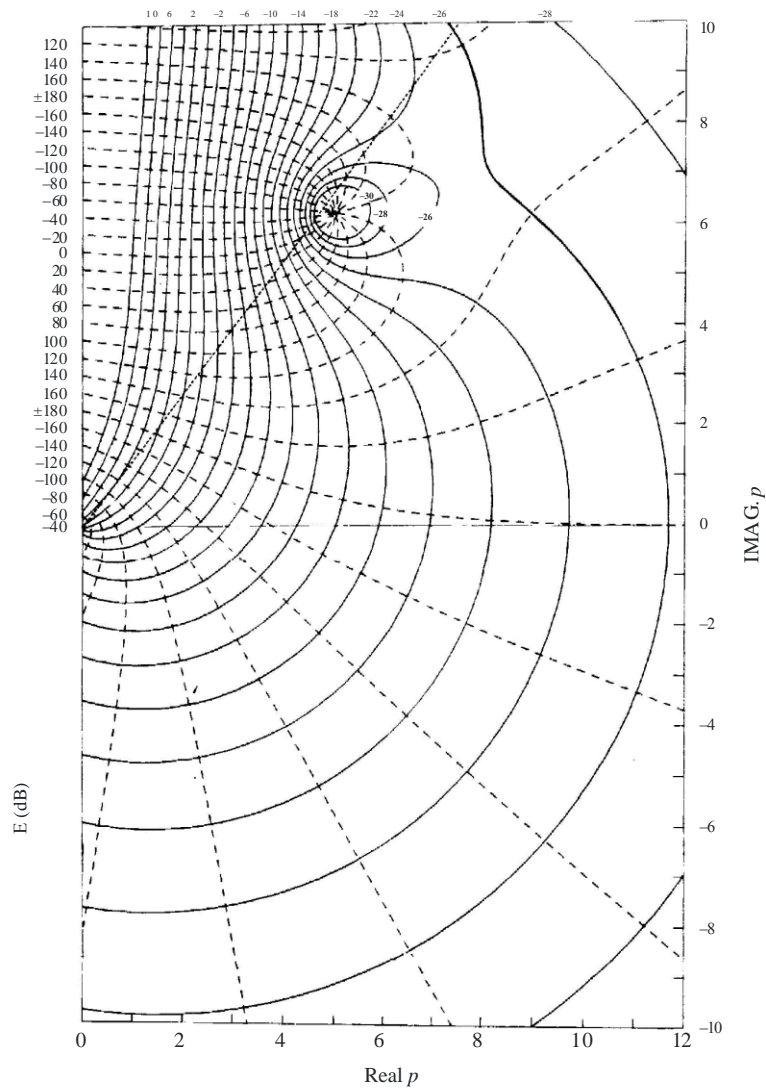
Ground Wave Prop. 18

Demostó que para una tierra lisa y para la mayoría de los entornos rurales, la propagación se encuentra en la mitad inferior de la Fig. 19, en la que los contornos presentan una forma regular. Sin embargo los resultados en el entorno urbano denso aparecen en la mitad superior de la figura, donde se observa una variación inusual de la atenuación, incluido un punto nulo.

Se propuso un método de cálculo en el que el trayecto fue segmentado en partes con diferentes conductividades y distintas características de la superficie, que incluía parámetros para tener en cuenta la altura de las estructuras artificiales y la fracción de la zona cubierta por edificios. Este método hasta ahora no ha sido desarrollado ni probado ampliamente como herramienta de predicción.

Luo [48] dio otro enfoque a este problema elaborando un método que define una serie de componentes de pérdidas para la longitud del trayecto, la reflexión, la difracción y la refracción en los edificios, etc.

FIGURA 19

El plano complejo ρ 

Ground Wave Prop. 19

11 Variaciones estacionales en la propagación por onda de suelo

En algunos casos pueden producirse variaciones estacionales en la propagación por onda de suelo que pueden deberse a cambios en la refractividad de la troposfera (véase el § 3.3) o al estado de la cubierta de vegetación; a cambios en el nivel de la capa de agua del terreno, a las condiciones de congelación en las que el agua se convierte en hielo o a una capa de nieve espesa etc., donde pueden causar modificaciones en la conductividad efectiva del suelo. Todos estos cambios pueden afectar a la intensidad del campo de la onda de suelo. En particular, estos cambios estacionales pueden desembocar en una reducción de la intensidad de campo en verano.

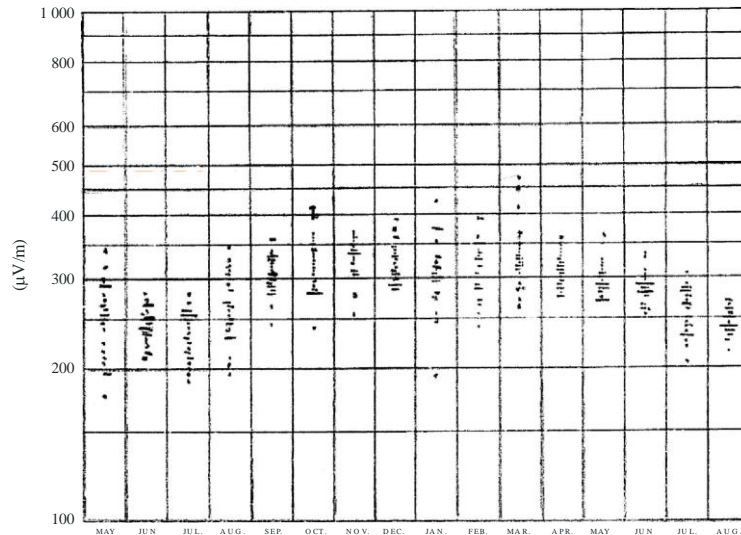
11.1 Historia

En los años 20 del pasado siglo se llevaron a cabo por primera vez mediciones del nivel de señal en horas diurnas de una estación de ondas hectométricas situada cerca de Filadelfia, EE.UU. [49] y para distancias de hasta varios centenares de km. Las mediciones demostraron que las medianas semihorarias de día a día no permanecen constantes sino que cambian en hasta varios decibelios. Además, el nivel medio de la señal también cambió de un mes a otro con una variación estacional más acusada en los meses de invierno. Los valores mensuales medios de los cambios estacionales de un nivel de señal fueron de hasta 4-5 dB. Se intentó

conocer las razones de dichos cambios de la señal y se determinó la correlación de los cambios de nivel de la señal con la temperatura ambiente, la humedad, la presión y otros parámetros atmosféricos. El mayor valor de la correlación negativa apareció con la temperatura. Los motivos físicos de este fenómeno no quedaron claros. En la Fig. 20 aparece un ejemplo de cambios del nivel de la señal en un intervalo anual.

FIGURA 20

Ejemplo de variación estacional registrada en EE.UU.



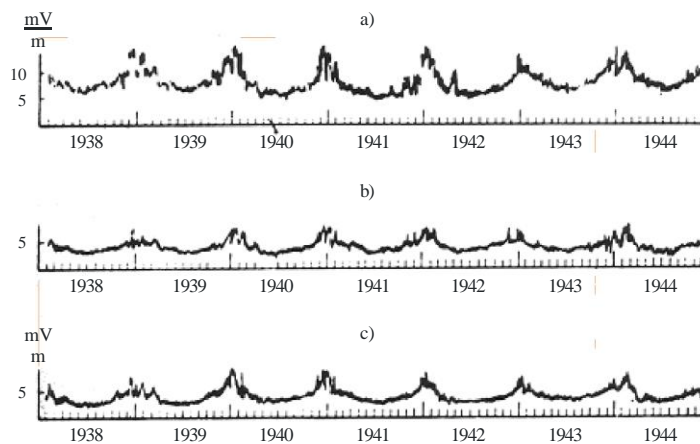
Diario 1:30 P.M., EST, intensidades de campo, Filadelfia, Pa., (WCAU) a Baltimore, Md. 170 km, 76 millas. Mayo, 1939-Agosto, 1940.

Ground Wave Prop. 20

En Suiza se llevaron a cabo mediciones similares en ondas hectométricas a distancias de hasta 100 km durante el periodo 1938-1944. Los resultados se publicaron en 1945 [50]. El clima centroeuropeo tiene una mayor gama de temperaturas y los cambios estacionales también presentan un mayor valor, hasta 8 dB. Los resultados obtenidos en Suiza en horas diurnas se muestran en la Fig. 21.

FIGURA 21

Ejemplo de variación estacional registrada en Suiza



- a) Beromünster - Berna (556 kHz, 62 km)
- b) Beromünster - St Gall (556 kHz, 93 km)
- c) Sottens - Berna (677 kHz, 63 km)

Ground Wave Prop. 21

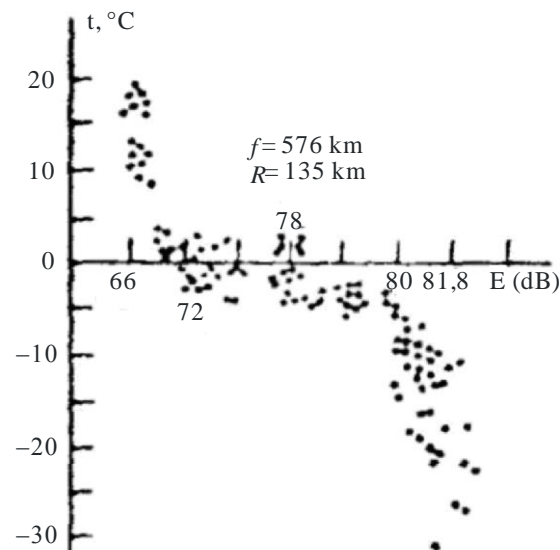
A finales del siglo XX se realizaron mediciones en muchas frecuencias de las bandas de ondas kilométricas y hectométricas a diversas horas del día y sobre trayectos de varias longitudes, desde 11 km hasta 2 500 km cerca de Moscú y en la Región de Siberia.

Los resultados de las primeras mediciones llevadas a cabo en la zona de Moscú aparecen en [51]. En programas de mediciones más largos y completos los valores de los cambios estacionales en ondas hectométricas sobre diversos trayectos cerca de Moscú arrojaron un valor medio de 10-15 dB.

En la región siberiana, donde aparecen las mayores diferencias de temperatura entre el invierno y el verano, se observaron cambios de aproximadamente 15 dB y superiores [52]. En la Fig. 22 aparece un ejemplo de cambios de intensidad de campo cerca de Tomsk. Los trayectos en latitudes medias que presentan una parte significativa con cubierta vegetal experimentan los mayores cambios estacionales en el nivel de la señal, de 5 a 15 dB o más [53] [54]. El Cuadro 3 muestra los valores medios del cambio H (dB) entre los meses de invierno y verano [61].

FIGURA 22

Variaciones estacionales de la intensidad de campo a 576 kHz con la temperatura para un trayecto de 155 km en las proximidades de Tomsk



Ground Wave Prop. 22

CUADRO 3

Variaciones estacionales del nivel de señal

Temperatura media en enero (°C)	4	0	-10	-16
Variación típica, H (dB)	4	8	13	15

Los anteriores resultados aparecen reflejados en las Recomendaciones UIT-R P.368-9 y P. 1321-3.

11.2 Variaciones diarias en la propagación por onda de suelo

También se observan cambios diarios en todos los trayectos en ondas hectométricas en la región de Moscú [39] y en la mayoría de los trayectos en ondas kilométricas. En la Fig. 23 se ilustran algunos ejemplos. En la leyenda aparecen especificadas las frecuencias de funcionamiento y las longitudes del trayecto. En ondas

kilométricas el valor eficaz de la desviación del nivel de la señal oscila desde fracciones de un decibelio para trayectos cortos en el borde de bajas de frecuencias de la banda, con un valor medio de 0.8 dB, hasta aproximadamente 10 dB en la parte de frecuencias superiores de la banda para longitudes de trayecto de hasta 1 000 km y superiores. En ondas hectométricas, los cambios de nivel de la señal para trayectos de decenas de kilómetros son mucho mayores que en ondas kilométricas, normalmente 2-4 dB superiores y ocasionalmente hasta 5-6 dB superiores. Véase la Fig. 24.

El desvanecimiento en los trayectos de la onda de superficie presenta una fuerte dependencia con la frecuencia y la longitud del trayecto. En la banda de ondas hectométricas incluso trayectos de 20-100 km presentan valores eficaces de las variaciones con una apreciable dependencia de la estación del año y de la frecuencia, como puede observarse en las Figs. 25 y 26.

FIGURA 23

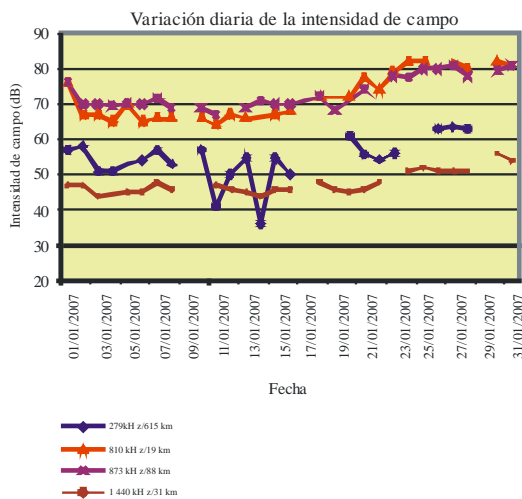


FIGURA 24

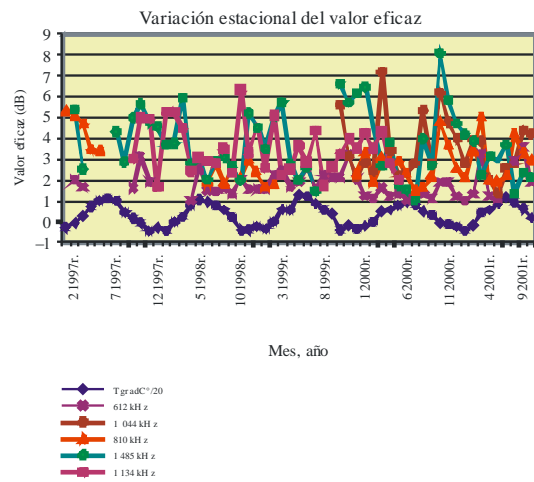


FIGURA 25

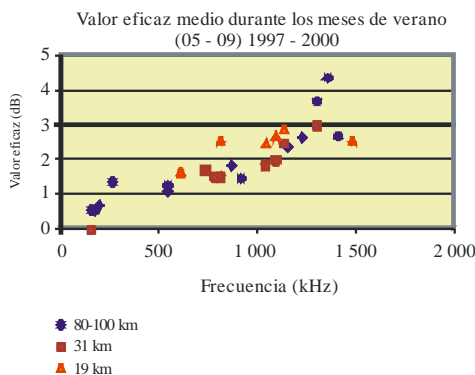
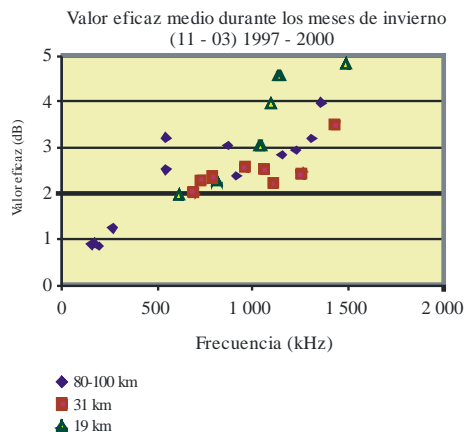


FIGURA 26



PARTE 4

12 Antenas de recepción

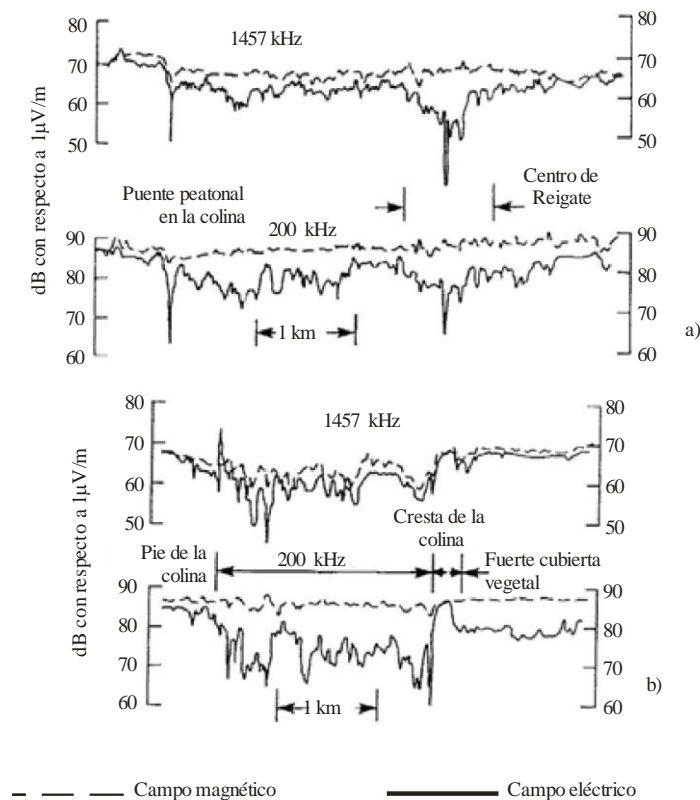
Como se indicó en el § 3.2.1.2, en entornos abiertos la intensidad de campo eléctrico vertical y la intensidad de campo magnético horizontal están relacionadas según la ecuación (12). Las antenas utilizadas para las mediciones y para la recepción del servicio pueden ser antenas de varilla o de alambre que responden al campo eléctrico (como algunas antenas de radio de los automóviles) o antenas de bucle de ferrita que responden al campo magnético (como en los receptores domésticos de radiodifusión).

En entornos obstruidos la variabilidad espacial del campo eléctrico a menudo es considerablemente mayor que en las antenas magnéticas. La mayoría de los receptores portátiles de medición de intensidad de campo utilizan antenas de bucle calibradas para campo eléctrico mediante la ecuación (12).

La Fig. 27 muestra la variación para las antenas de campo eléctrico y magnético en dos rutas de ejemplo [55].

FIGURA 27

Mediciones en dos rutas con antenas magnética y eléctrica



Ground Wave Prop. 27

13 Caracterización de la variabilidad espacial de la intensidad de campo

El texto anterior proporciona una caracterización del comportamiento general de la onda de suelo que se propaga a través de zonas con varios valores de conductividad y a través de zonas marítimas y urbanas. Debido a los efectos locales, a cambios en la topografía o la presencia de estructuras individuales o grupos de estructuras etc., la intensidad de campo eléctrico recibida variará en distancias de unos pocos metros.

La variabilidad de la intensidad de campo puede expresarse como la combinación de dos términos. Cada uno de ellos representa una componente de señal de diferente naturaleza cuyas variaciones se deben a causas diferenciadas [56].

- Variabilidad espacial a gran escala $m(x)$: causada por variaciones a gran escala a lo largo del trayecto entre el transmisor y el receptor. En el caso de propagación por onda de superficie se debe a la alteración de las características del trayecto transmisor-receptor o al entorno de recepción urbano y la influencia de las características eléctricas del terreno y de las rugosidades del terreno.
- Variabilidad espacial a pequeña escala $r_0(x)$: representa la variaciones locales de la señal, superpuestas al nivel mediano a gran escala, debidas principalmente a la influencia del entorno de recepción local tal como la variaciones causadas por diferentes elementos tales como puentes, líneas de energía eléctrica, etc.

La relación entre ellas, en escala lineal, es:

$$r(x) = m(x) \cdot r_0(x) \quad (43)$$

La componente a largo plazo $m(x)$, o la variabilidad a gran escala de la señal, se obtiene promediando la señal $r(x)$ para suprimir la influencia del entorno local donde se encuentra ubicado el receptor. La señal $m(x)$ corresponde a una serie de valores medios locales de la señal $r(x)$ para recepción móvil.

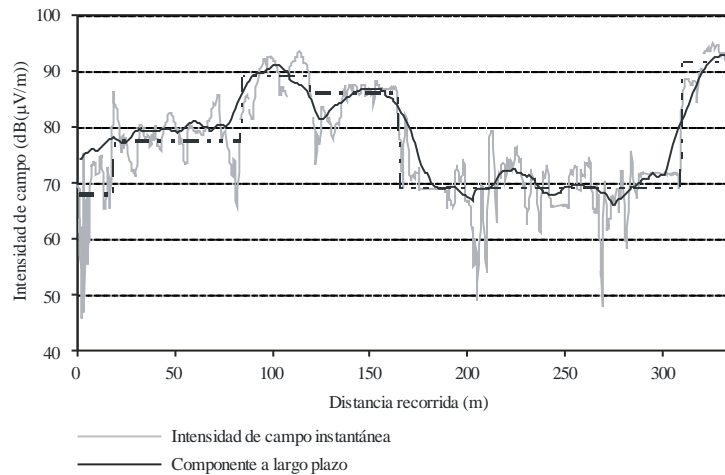
La componente a corto plazo $r_0(x)$ o variación rápida de la señal en torno al valor medio $m(x)$, representa las variaciones locales de la señal $r(x)$. En consecuencia, para realizar una estimación de la componente a corto plazo, debe calcularse previamente la componente a largo plazo promediando las muestras de señal situadas en un intervalo en torno a cada emplazamiento y eliminando a continuación esta componente de la envolvente de la señal.

Una diferenciación adecuada de las componentes $m(x)$ y $r_0(x)$ de la señal permite realizar un análisis más preciso de la variabilidad espacial de la señal y una correcta determinación de las fuentes que provocan la atenuación media de la intensidad de campo en una zona amplia, y las variaciones locales de la intensidad de campo debidas a las condiciones de recepción locales.

El Método Lee Generalizado (véase el Anexo 1) es el método de referencia para estimar los valores medios locales de la señal a largo plazo a lo largo de una ruta. La Fig. 28 muestra un ejemplo de variación espacial instantánea y a largo plazo de una señal registrada en movimiento en un entorno urbano. La variación a corto plazo es la variación rápida en torno a los valores locales medianos.

FIGURA 28

Variación espacial a largo plazo de la intensidad de campo en recepción urbana



Ground Wave Prop. 28

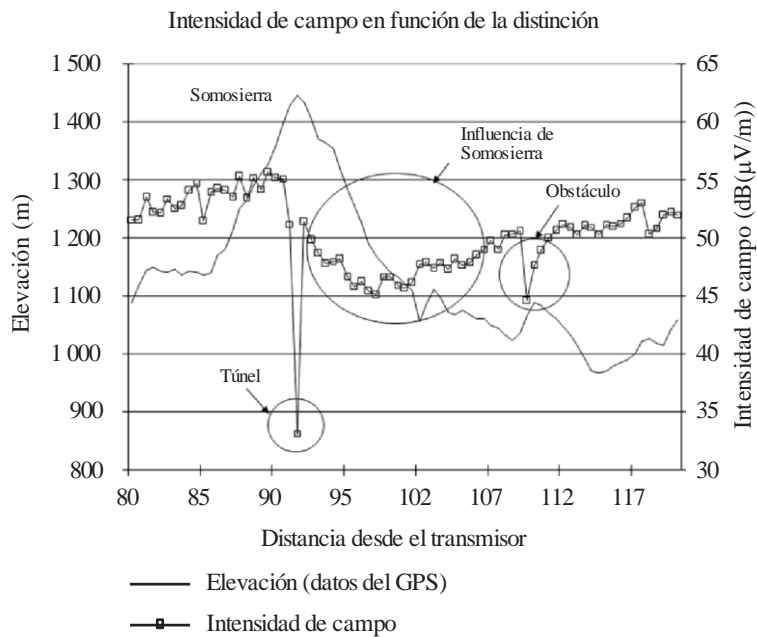
14 Terreno irregular

Aunque las propiedades eléctricas del suelo son el factor principal que determina la atenuación de la onda de suelo, las rugosidades del terreno generan pérdidas de trayecto adicionales en la banda de ondas hectométricas [8], [57], [58].

Estas pérdidas de intensidad de campo son significativas sólo cuando el trayecto transmisor-receptor se encuentra obstruido por irregularidades del terreno importantes (comparadas con la longitud de onda) situadas en las proximidades del emplazamiento del receptor. Todas las irregularidades significativas a lo largo de la longitud completa del trayecto tiene un efecto apreciable sobre las pérdidas totales a lo largo del trayecto, aunque las irregularidades cerca del receptor pueden tener un efecto predominante, especialmente si la pendiente del lado lejano de la irregularidad es abrupta [11]. El nivel de intensidad de campo disminuye en los emplazamientos de recepción ubicados tras los obstáculos. Esta variación de la señal depende del grado de obstrucción causado por las irregularidades del terreno a lo largo del perfil del trayecto y puede considerarse como un factor de atenuación adicional que debe añadirse al valor medio de las pérdidas de transmisión del trayecto.

FIGURA 29

Variación de la intensidad de campo en función de la distancia al transmisor registrada en una campaña de mediciones. Se indican los valores los valores de elevación del terreno medidos por el GPS



Ground Wave Prop. 29

La Fig. 29 presenta un ejemplo de variación de la intensidad de campo cuando el receptor se desplaza a lo largo de una ruta y las irregularidades del terreno obstruyen el trayecto transmisor-receptor. La ruta es virtualmente radial desde el transmisor y atraviesa la cordillera montañosa de Somosierra (España). En la figura, se representan los valores obtenidos en la ruta de medición 12 km antes y 28 km después de la cumbre de Somosierra con sus correspondientes gamas de perfiles de altura. Un túnel atraviesa la cordillera montañosa cerca de la cumbre causando un desvanecimiento profundo en la señal de intensidad de campo. Puede observarse una significativa atenuación de la intensidad de campo en el lado «sombreado» de la montaña (más de 10 dB si se consideran los valores medianos).

En el lado de sombra del obstáculo a medida que el receptor se va alejando del transmisor, los valores de intensidad de campo siguen una tendencia creciente. Este comportamiento de la intensidad de campo en las proximidades de las irregularidades del terreno, en función de la distancia al transmisor, lo explica Otto [44], y fue previamente previsto por Wait [59], como una interferencia constructiva de un rayo difractado directo y un rayo difractado que se desplaza a lo largo de la superficie.

Siguiendo el análisis del ejemplo, la siguiente caída de la intensidad de campo se midió a 109,5 km y se debe al segundo obstáculo más bajo, que no es muy alto ($\lambda/4$ de altura siendo λ 221 m) pero se encuentra muy cerca del emplazamiento del receptor. La corta distancia desde el obstáculo al emplazamiento del receptor parece ser un parámetro muy influyente. La pendiente del lado lejano de la irregularidad (hacia el receptor) es la causa principal determinante de las pérdidas de trayecto, que se producirían probablemente para una corta distancia de las irregularidades al receptor.

La atenuación de la intensidad de campo debida a la obstrucción que provoca un obstáculo significativo depende principalmente de dos parámetros [67]:

- la distancia d entre el obstáculos y el emplazamiento del receptor;
- la altura del obstáculo h sobre la línea de visibilidad entre el transmisor y el receptor.

En un emplazamiento del receptor obstruido específico. La intensidad de campo disminuye para obstáculos del terreno más elevados y para distancias más cortas entre el obstáculo y el emplazamiento del receptor. A

este respecto, se han observado valores de atenuación significativos para obstáculos mayores de $\lambda/2$. Cuando el obstáculo está situado cerca del receptor, los obstáculos inferiores a $\lambda/2$ también pueden causar una notable reducción de la intensidad de campo.

La pérdida de intensidad de campo adicional debida a las irregularidades del terreno en la banda de ondas hectométricas sigue una tendencia logarítmica positiva con la altura del obstáculo h y una tendencia logarítmica negativa con la distancia d , como indica la siguiente ecuación:

$$L_{irr}(\text{dB}) = (-17,2 \cdot \log_{10}(d) + 25,1) \cdot (\log_{10}(2,84 \cdot h)) \quad (44)$$

siendo:

- L_{irr} : pérdidas debidas a irregularidades del terreno (dB)
- d : distancia entre el obstáculo y el receptor (km)
- h : altura del obstáculo sobre la línea de visibilidad directa entre el transmisor y el receptor (en número de longitudes de onda).

Las pérdidas debidas a las irregularidades del terreno (L_{irr}) deben sustraerse del valor de intensidad de campo obtenido por medio de los métodos descritos en los puntos anteriores. No deben considerarse valores inferiores a 1 en el argumento de los logaritmos. Para valores de d superiores a 25 km y alturas del obstáculo h inferiores a 2λ puede desprejarse L_{irr} .

Si el perfil del trayecto contiene varias irregularidades representativas (comparadas con la longitud de onda) sólo debe considerarse el valor de atenuación más elevado debido a la obstrucción más significativa. Esto es similar al enfoque del que hacen uso muchos métodos sencillos de cálculo de las pérdidas de difracción por múltiples aristas, tales como los métodos: Epstein-Peterson, Deygout, Burlington y Giovanelli.

15 Efectos locales en las zonas edificadas

Cuando una onda de suelo se encuentra con una zona edificada sus características de propagación resultan modificadas por la presencia de grandes estructuras que son parcialmente conductores eléctricos o que obstruyen la propagación normal. Tales estructuras, grandes en tamaño pero eléctricamente pequeñas cuando se comparan con la longitud de onda, provocan una disminución de la intensidad de campo de amplitud significativa en los entornos locales. A efectos de planificación, las apariciones de variación local afectan a la calidad del servicio, y por consiguiente, pueden impedir el logro de una cobertura satisfactoria con buena recepción, especialmente en los servicios de radiodifusión digital donde se produce una transición abrupta entre buena calidad y ausencia de señal. Por tanto, la caracterización de estas variaciones locales es esencial para los planificadores de sistemas a fin de tener en cuenta el incremento de potencia de transmisión necesario para operar las distintas degradaciones en la recepción.

Las mediciones llevadas a cabo en espacios abiertos, zonas extensas y calles anchas en las ciudades han demostrado que de forma simultánea, una reducción significativa del nivel medio de una señal (en comparación con un distrito rural a idéntica distancia del transmisor) de aproximadamente 5 dB, aumenta la desviación típica de un campo. Las desviaciones típicas en varias zonas de una ciudad no son idénticas, oscilando entre 1,7 y 5 dB, para un valor medio $\sigma = 3,5$ dB.

15.1 Mediciones en zonas urbanas con elevado índice de construcción

Las mediciones de señales procedentes de transmisores rurales dirigidas a zonas urbanas con elevado índice de construcción en el patio de edificios elevados han mostrado un incremento abrupto del nivel de la señal de 15-20 dB; sin embargo, el número de tales casos es insuficiente y no pueden extraerse conclusiones estadísticamente significativas. Sólo es posible considerar que la desviación típica es al menos de 6-8 dB.

Las Figs. 30 a 33 ilustran la variabilidad de la intensidad de campo en zonas edificadas para cuatro frecuencias, medida en una ruta que atraviesa Moscú y sus suburbios. En todos los casos el nivel de la señal en zonas urbanas cambia de manera caótica. A las frecuencias más bajas la desviación típica de la dispersión del nivel de la señal es 3-4 dB. A las frecuencias de ondas hectométricas más elevadas, en las Figs. 32 y 33 donde la dispersión de las mediciones en la zona edificada bien marcada por una línea de puntos, dicha desviación típica es de 7-10 dB.

La Fig. 34 muestra resultados similares obtenidos en Sao Paulo [60].

El porcentaje de la distancia afectada por estas disminuciones locales en la recepción móvil depende en gran medida del entorno de recepción, principalmente en zonas urbanas. En recepción urbana se han observado porcentajes del 10% (Madrid, España) al 18 % (Delhi, India). Los porcentajes para la recepción móvil en zonas rurales pueden ser del 3% o inferior.

La caracterización de la propagación urbana requiere la identificación y cuantificación de las causas que generan variaciones de la intensidad de campo espacial a largo plazo y a corto plazo. Para ello, debe eliminarse del análisis la influencia de la distancia al transmisor y las características del perfil de elevación.

Se llevó a cabo un análisis amplio basándose en los datos recopilados durante cuatro campañas de medición distintas para evaluar el sistema DRM (Digital Radio Mundial) con recepción móvil [61]. Estas campañas de medición cubrían toda la gama de la banda de ondas hectométricas (666, 810, 1 060 y 1 260 kHz) y se realizaron en diferentes entornos de recepción urbana: México DF (México), Nueva Delhi (India) y Madrid (España). Estas ciudades presentan características urbanas muy diferentes y son representativas de los principales tipos distintos de entornos urbanos. Para efectuar un análisis global representativo de los efectos urbanos, se midieron y analizaron un total de 96 rutas aleatorias que cubrían más de 500 km.

FIGURA 30

Variabilidad de la intensidad de campo en zonas edificadas a 171 kHz

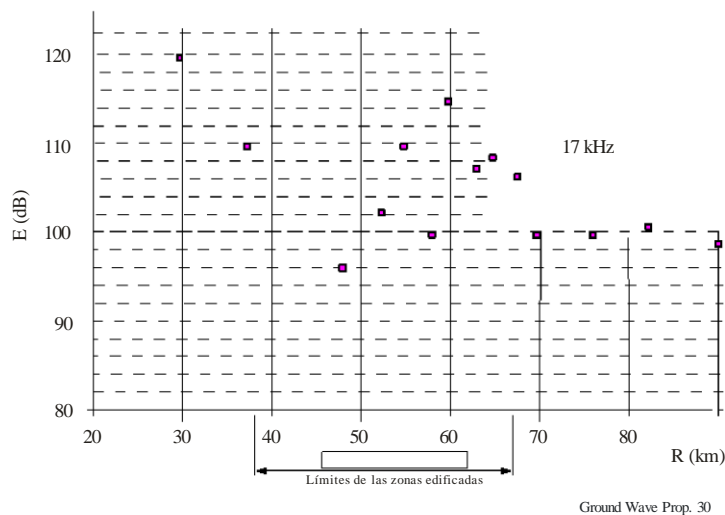


FIGURA 31

Variabilidad de la intensidad de campo en zonas edificadas a 549 kHz

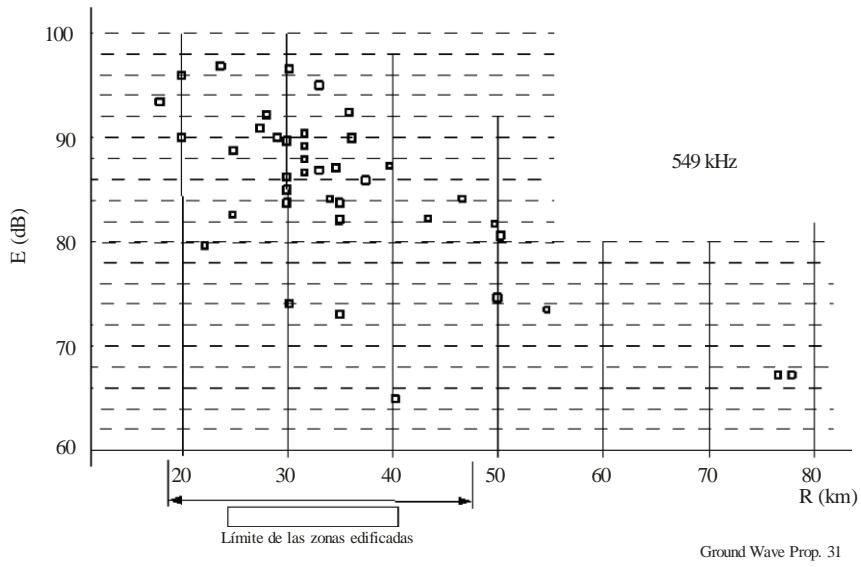


FIGURA 32

Variabilidad de la intensidad de campo en zonas edificadas a 846 kHz

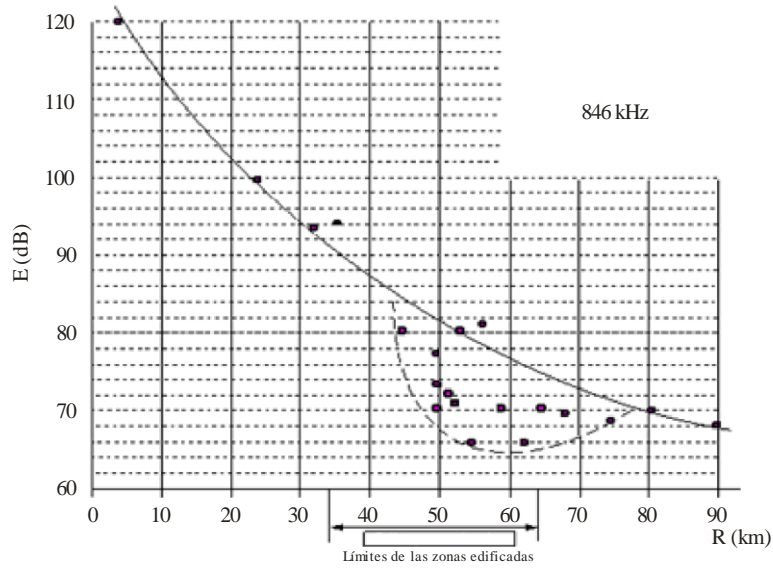
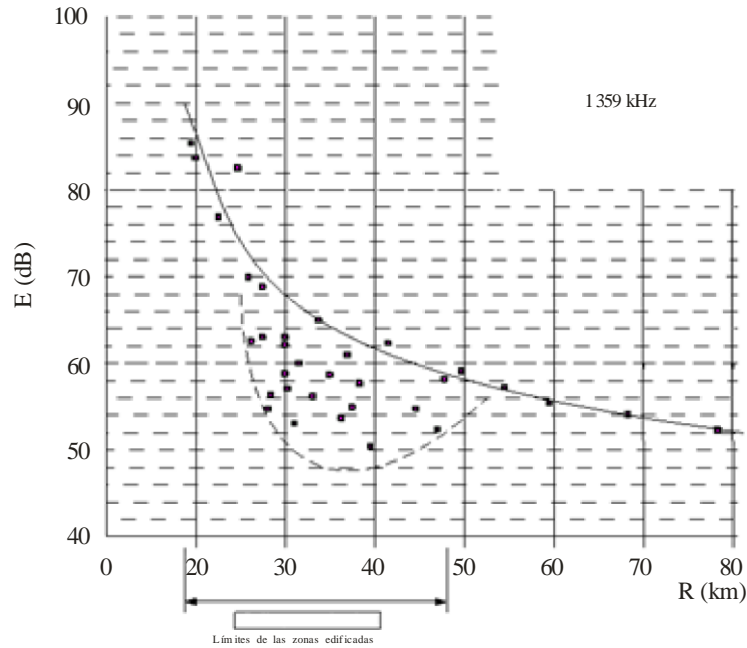


FIGURA 33

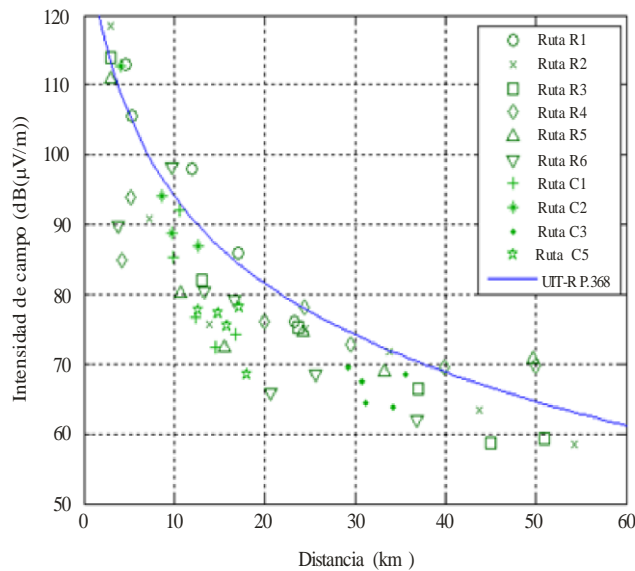
Variabilidad de la intensidad de campo en zonas edificadas a 1 359 kHz



Ground Wave Prop. 33

FIGURA 34

Mediciones a 1 210 kHz en 11 rutas de Sao Paulo comparadas con las mediciones de la Recomendación UIT-R P.368



Ground Wave Prop. 34

También se han efectuado mediciones en ondas decimétricas [42], Figs. 35 a 38. En cada caso la parte superior muestra la variación de la intensidad de campo con la distancia mientras que la parte inferior de cada figura presenta la desviación típica de las mediciones. Desafortunadamente en la mayoría de los casos se conocían

con precisión las propiedades directivas de la antena y las correcciones de ganancia se realizaron según el sector.

A distancias cortas entre unos 100 m y 700 m la dependencia con la distancia es aproximadamente la lineal inversa pero entre 700 m y 10 km la dependencia es muy próxima a la inversa de cuadrado; al aproximarse a los límites de una ciudad (10-24 km de distancia del transmisor) la dependencia pasa a ser nuevamente más plana.

FIGURA 35

Variación de la intensidad de campo con la distancia al aproximarse a una ciudad, 14 MHz

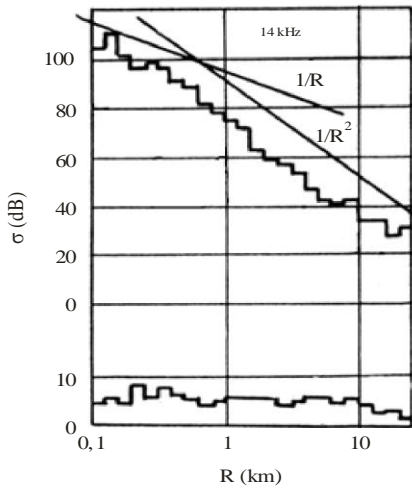
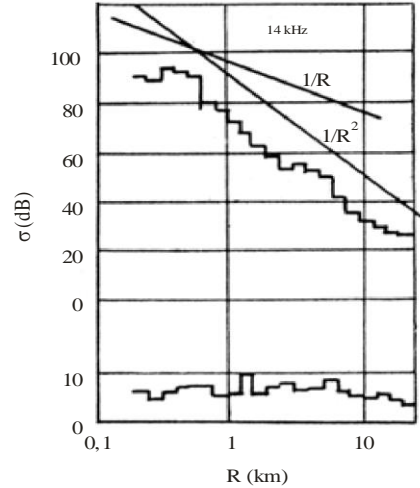


FIGURA 36

Variación de la intensidad de campo con la distancia al aproximarse a una ciudad, 14 MHz



Ground Wave Prop. 35

FIGURA 37

Variación de la intensidad de campo con la distancia al aproximarse a una ciudad, 7 MHz

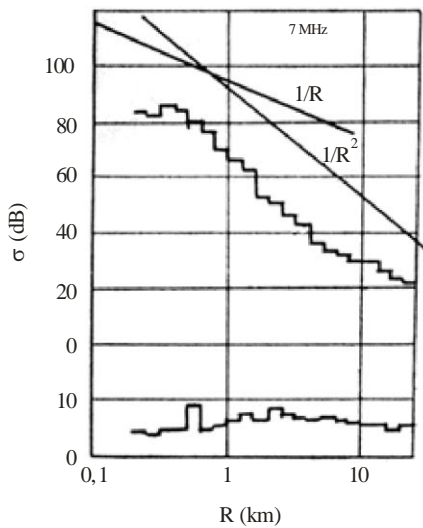
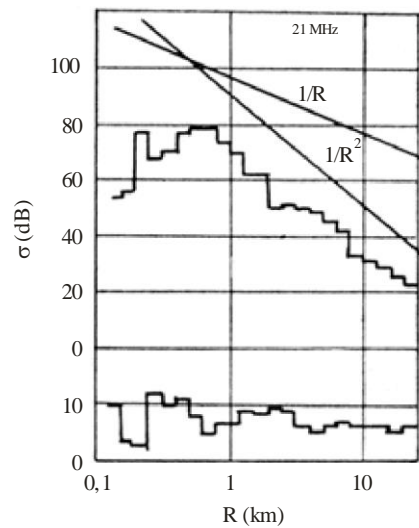


FIGURA 38

Variación de la intensidad de campo con la distancia al aproximarse a una ciudad, 21 MHz



Ground Wave Prop. 37

15.2 Influencia de la frecuencia de transmisión en entornos urbanos

Aunque se ha destacado la importancia de la frecuencia de transmisión en la variación de la intensidad de campo de los servicios de radiodifusión en la recepción urbana [62] no ha habido una caracterización empírica de este tema. Las Figs. 28 y 30 a 33 muestran la diferencia en decibelios de los valores medios de intensidad de campo registrados en las mismas condiciones de transmisión y recepción. Por ejemplo, para dos frecuencias de transmisión diferentes (810 kHz y 1 260 kHz), en todos los casos los valores de intensidad de campo a 810 kHz fueron superiores a los registrados a 1 260 kHz en cada emplazamiento de recepción.

Se ha calculado que las diferencias se encuentran entre 6 y 28 dB, la mayoría de ellas entre 6 y 16 dB dependiendo de las características urbanas específicas de las zonas medidas. Los casos en los que las diferencias son mayores que los valores de 20 dB corresponden a emplazamientos con edificios más elevados.

15.3 Variación a gran escala de la intensidad de campo

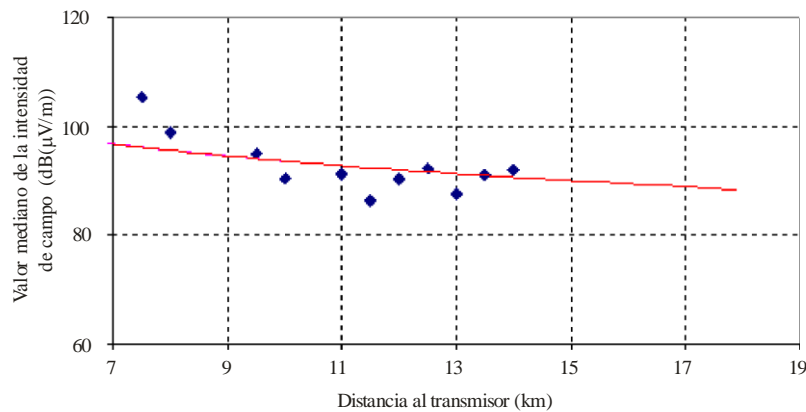
Las variaciones de la componente espacial a largo plazo vienen causadas por factores urbanos que presentan dimensiones del mismo orden de magnitud que el valor óptimo de la ventana promediada $2L$, indicado en el método Lee Generalizado. De acuerdo con los resultados descritos en la sección anterior la longitud de la ventana media para recepción urbana corresponde a la longitud de onda, que en la radiodifusión por ondas hectométricas oscila entre 221 m (1 359 kHz) y 370 m (80 kHz).

Se observó que la causa principal de la variación a gran escala era el cambio de anchura de las calles durante la recepción de la señal [63], [64]. Para cuantificar las pérdidas de intensidad de campo debidas a la recepción urbana se elaboró un proceso en tres etapas. En primer lugar, se clasificaron los resultados de las pruebas en funcionamiento real de acuerdo con la anchura de las calles y se estimaron los valores locales medios. En segundo lugar, se compararon los valores medios de las calles más anchas con las curvas de propagación de la Recomendación UIT-R P.268. Por último, se determinaron las pérdidas adicionales debidas a la recepción en calles estrechas.

Para cuantificar la aparición de variaciones a largo plazo se eligieron calles amplias con más de ocho carriles de circulación. La Fig. 39 muestra los valores medianos locales estimados a partir de los resultados de mediciones en pruebas en funcionamiento real llevadas a cabo en Madrid a 1 260 kHz. Como puede observarse, los valores de intensidad de campo recibidos bajo esta hipótesis son próximos a los estimados de acuerdo con las curvas de propagación de la Recomendación UIT-R P.368.

FIGURA 39

Valores medianos locales de la intensidad de campo en calles anchas comparados con las curvas de la Recomendación UIT-R P.368



Ground Wave Prop. 39

Se calcularon las pérdidas adicionales en la componente a largo plazo debidas a la recepción en calles estrechas. El Cuadro 4 muestra las diferencias medias entre las hipótesis de recepción de referencia (calles anchas con más de ocho carriles de circulación) y calles más estrechas.

Los valores de las pérdidas adicionales estuvieron relacionados con el grado de heterogeneidad del entorno urbano, por un lado, y con la frecuencia transmitida, por otro lado. Como puede observarse, Madrid que muestra el entorno más heterogéneo arrojó los valores de pérdidas más elevados y a 1 260 kHz el efecto es casi el doble que a 810 kHz

CUADRO 4

Variación espacial para diferentes casos de recepción con respecto a las curvas de la Recomendación UIT-R P.368

Ciudad – frecuencia (kHz)	Calle de anchura media MED ± DESV. TÍPICA (dB)	Calles estrechas MED ± DESV. TÍPICA (dB)
Delhi – 666	4 ± 1	No se ha determinado
Madrid – 810	6 ± 4	12 ± 6
México – 1 060	3 ± 3	9 ± 5
Madrid – 1 260	11 ± 6	19 ± 8
Madrid – 1 359	No disponible	No disponible

16 Variación espacial de la intensidad de campo a pequeña escala

La presencia de líneas de energía eléctrica, de grandes edificio o de construcciones metálicas puede incrementar la intensidad de campo en comparación con los valores en un distrito abierto, en hasta 10 dB o en algunos casos raros reducirlo en 15 a 20 dB; es posible explicar tal ambigüedad por las diversas variantes de acuerdo mutuo del transmisor, las construcciones metálicas y el emplazamiento de una medición de campo.

El Cuadro 5 muestra los valores medianos empíricos de la profundidad de desvanecimiento ocasional debido a la presencia de grandes estructuras situadas cerca del receptor. Las mediciones se realizaron con una antena

de campo eléctrico vertical. La distancia a la que aparecen variaciones de la intensidad de campo constituye el desvanecimiento espacial; es decir, la distancia a la que resulta afectada la recepción móvil vista en un vehículo en movimiento como si fuera un desvanecimiento temporal.

CUADRO 5

Profundidad de desvanecimiento y longitud del desvanecimiento de la variación de intensidad de campo

Estructura	Anchura (m)	Profundidad de desvanecimiento (dB)
Autopista o paso elevado de carretera	18-24	23,1
	14-16	12,6
	10-12	9,8
	6-9	8,3
	Todas	9,1 (valor medio)
Paso elevado para peatones	2-3	6,5
Puente	–	5,1

17 Propagación en interiores

La atenuación de las señales radioeléctricas que se propagan a través de los edificios y por su interior tiene un efecto importante sobre el comportamiento de los sistemas de radiocomunicaciones. Con frecuencia, se crean modelos de pérdidas por penetración en los edificios para calcular una atenuación adicional a los niveles de la señal en exteriores. También es necesario caracterizar la variabilidad espacial de la señal en interiores a fin de cuantificar las variaciones de la señal alrededor de su valor mediano.

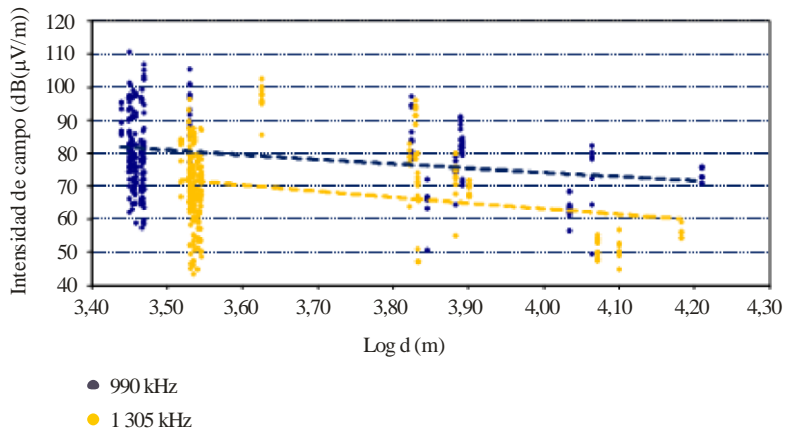
La recepción diurna de las señales radioeléctricas en interiores en ondas hectométricas se ha caracterizado basándose en una amplia base de datos de emplazamientos de interiores en ciudades del norte de España en seis frecuencias distintas (612, 639, 990, 1 197, 1 305 y 1 602 kHz) [65]. Se realizaron mediciones en interiores en 21 edificios y el número total de emplazamientos fue de 360. A fin de cuantificar las pérdidas por penetración en los edificios también se realizaron 110 mediciones en exteriores a lo largo del perímetro de dos edificios en cada planta.

Las pruebas de funcionamiento real se basaron en mediciones efectuadas sobre transmisiones comerciales con modulación de amplitud (AM). No obstante, los resultados deben ser directamente aplicables a los sistemas digitales ya que se han considerado los canales con ruido auditivo blanco gaussiano (AWGN) para la propagación por onda de superficie en onda media a horas diurnas sin dispersión de tiempo y frecuencia, de manera que se espera que el canal sea plano.

Como en muchos otros programas de medición llevados a cabo en entornos en interiores en las bandas de frecuencia más elevadas, se ha observado una alta variabilidad espacial incluso en emplazamiento en interiores ubicados con unos pocos metros de separación. La Fig. 40 muestra como ejemplo ilustrativo los valores medianos de intensidad de campo en muchos emplazamientos en interior en diferentes edificios en función de la distancia a 990 kHz y 1 305 kHz.

FIGURA 40

Valores medianos de los niveles de intensidad de campo en emplazamientos en interiores a 990 y 1 305 KHz



Ground Wave Prop. 40

Puede observarse que la variabilidad espacial es elevada con diferencias de hasta 50 dB entre el emplazamiento con el valor de intensidad de campo más alto y más bajo dentro del mismo edificio. De hecho, se ha comprobado que el valor mediano del nivel de intensidad de campo en ondas hectométricas sigue una distribución log-normal con una desviación típica $\sigma = 11,8$ dB.

También se ha observado que el nivel de intensidad de campo en interior disminuye con la distancia al transmisor y con la frecuencia de transmisión. Sin embargo, la variabilidad en el tiempo puede ignorarse ya que las desviaciones típicas del tiempo son inferiores a 1 dB.

Para cuantificar las pérdidas por penetración en el edificio en ondas hectométricas, se calculó para cada una de las plantas de dos edificios situados en el norte de España la diferencia entre el valor métrico de intensidad de campo con emplazamientos fuera del perímetro de un edificio y el valor mediano de intensidad de campo con todos los emplazamientos dentro del edificio y a la misma altura.

También se llevaron a cabo mediciones en Moscú, dentro de los edificios en una entrada y en un ascensor. Estas mediciones demostraron una reducción adicional de la señal por un valor comprendido entre 8 dB y 20 dB y en el caso de recintos metálicos de ascensores, hasta 40 dB. [67]

Como la variabilidad espacial tanto en exteriores como en interiores es muy elevada, se han obtenido grandes diferencias en las pérdidas de penetración en el edificio para distintas plantas y frecuencias, sin que exista una tendencia clara. Promediando las pérdidas de penetración en el edificio calculadas (para cada planta y frecuencia) en los edificios analizados en Madrid, se obtuvieron respectivamente los valores de 5,9 dB y 7,5 dB, de manera que se propone un valor medio de 6,7 dB para cuantificar las pérdidas de penetración en el edificio en ondas hectométricas.

Los niveles de la señal en interiores pueden predecirse sustrayendo las pérdidas de penetración en el edificio de los valores previstos de intensidad de campo en exteriores. Sin embargo, se propone actualmente utilizar un modelo de predicción alternativo para tomar como referencia los niveles de intensidad de campo propuestos en la Recomendación UIT-R P.368 para la propagación por onda de superficie en ausencia de obstáculos.

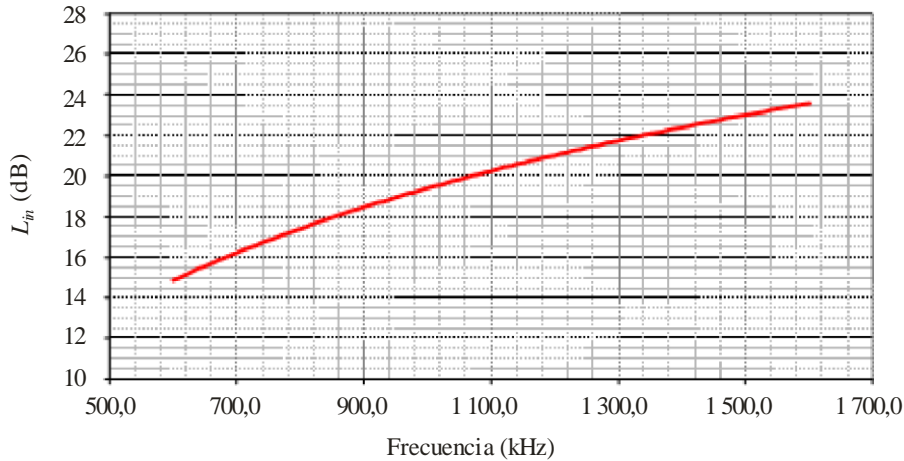
En cada emplazamiento se han calculado las pérdidas en interiores adicionales a las determinadas por las curvas de propagación por onda de superficie de la Recomendación UIT-R P.368 y se han aplicado regresiones lineales para predecir las pérdidas en interiores en función de la frecuencia en onda media [66].

$$L_{interiores}(dB) = -42,1 + 20,5 \cdot \log(f(\text{kHz})) \quad (45)$$

Las pérdidas $L_{interiores}$ con respecto a las curvas de onda de superficie de la Recomendación UIT-R P.368 varían entre unos 15 dB a 600 kHz hasta 24 dB a 1 600 kHz, según los cálculos realizados de acuerdo a la anterior fórmula de predicción y se ilustran gráficamente en la Fig. 41.

FIGURA 41

Pérdidas en interiores respecto a las curvas de propagación por onda de superficie de la Recomendación UIT-R P.368



Ground Wave Prop. 41

Para validar la ecuación de predicción de $L_{interiores}$ se aplicó a algunas señales DRM en interiores las mediciones realizadas en siete edificios de Madrid y se obtuvo un error de predicción medio relativamente bajo de 1,2 dB.

En consecuencia, se recomienda predecir el valor mediano de intensidad de campo en interiores rebasado en el 50% de emplazamientos sustrayendo el correspondiente valor $L_{interiores}$ a la intensidad de campo obtenida con arreglo a la Recomendación UIT-R P.368, como sigue:

$$E_{interiores}(\text{dB}\mu\text{V/m}) = E_{UIT-R P.368}(\text{dB}\mu\text{V/m}) + 42,1 - 20,5 \cdot \log(f \text{ (kHz)}) \quad (46)$$

A continuación, debe aplicarse la distribución log-normal con una desviación típica para calcular los valores medianos de los niveles de intensidad de campo en interiores rebasados en otro porcentaje de emplazamientos.

PARTE 5

18 Métodos de medición

18.1 Medidor de intensidad de campo

En la Recomendación UIT-R P. 378 se consideran las técnicas de medición de la intensidad de campo. En el Manual de la UIT sobre Comprobación técnica del espectro, aparece una discusión más detallada al respecto. La citada Recomendación indica que una medición individual estará sujeta a cierta incertidumbre con una precisión de la medición de ± 2 dB.

Como las mediciones de la intensidad de campo magnético resultan menos perturbadas en entornos imperfectos es preferible realizar estas mediciones con una antena de bucle (véase el § 12). Los instrumentos comerciales a tal efecto se calibrarán normalmente para hacer la conversión de intensidad de campo magnético a intensidad de campo eléctrico.

Se produce una excepción cuando las mediciones se realizan para evaluar el comportamiento en entornos obstruidos de sistemas de recepción que utilizan antenas de campo eléctrico, como las radios de los automóviles.

Debe tenerse precaución al seleccionar el mejor emplazamiento para la medición, para que represente a ese entorno, en la medida de lo posible sin árboles, sin estructuras conductoras verticales, sin edificios y sin cables aéreos. La variabilidad a pequeña escala de la intensidad de campo puede tenerse en cuenta efectuando varias mediciones cercanas y seleccionando el valor mediano.

Con un instrumento de medición portátil con antena de bucle puede ser más eficaz hacer girar el bucle hasta encontrar un nulo y a continuación girar la antena 90° para obtener la máxima lectura. Debe buscarse una relación entre los valores de cresta y mínimo de al menos 20 dB, un nulo menor indicará probablemente un problema particular en ese emplazamiento. En emplazamientos muy buenos puede lograrse a veces una relación de 40 dB.

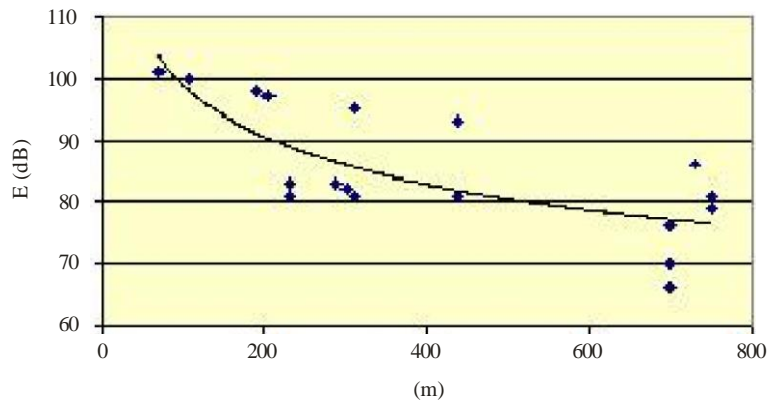
18.2 Medición de la potencia radiada

El campo puede medirse a una distancia algo superior a la que los efectos del campo cercano pueden ser importantes, a 1 km aproximadamente de la antena de transmisión. Debido a la dificultad de encontrar buenos emplazamientos de medición en zonas edificadas, debe realizarse un cierto número de mediciones y determinar el valor mediano. Si estos emplazamientos se encuentran a diferentes distancias del transmisor, las mediciones deben corregirse de acuerdo a la relación de campo eléctrico inversa de la distancia. A continuación debe compararse el valor mediano de las mediciones con el valor de 109,5 dB (1 V/m) a 1 km (es decir, 300 MV/m a 1 km) que es el valor para 1 kW prava.

En zonas urbanas con gran densidad de construcción la influencia del apantallamiento causado por edificios en las proximidades es bastante acusada. La Fig. 42 es un ejemplo de tales mediciones a 1 200 kHz, donde la antena de transmisión se ubicó entre dos edificios de gran altura. Estas mediciones presentan una desviación típica de 6,6 dB [67].

FIGURA 42

Ejemplo de mediciones próxima a un transmisor a una zona urbana con gran densidad de construcción



Ground Wave Prop. 42

18.3 Medición de la conductividad efectiva del suelo

18.3.1 Método de atenuación

Una vez determinada la potencia radiada puede efectuarse mediciones a distancias del transmisor cada vez mayores. Estas mediciones deben normalizarse a continuación al valor de 1 kW prax y la tendencia de los resultados debe compararse con las curvas de la Recomendación UIT-R P.368 (o de GRWAVE) para encontrar la conductividad efectiva. Si hay una clara discontinuidad en la curva puede aplicarse el método de Millington.

Como las mediciones estarán sujetas a variaciones locales y la propagación depende de la geología del subsuelo, sería difícil aplicar la técnica para determinar los cambios a pequeña escala en la conductividad efectiva.

DeMinco y otros [68] describen un método sobre la forma de utilizar las mediciones de la propagación de la Onda de Suelo Norton entre dos antenas monopolo para determinar las constantes del suelo en el emplazamiento de medición. En el informe aparecen las ecuaciones simplificadas de la Onda de Suelo Norton. Las antenas son monopolo montados en un plano de tierra donde todos los sistemas de antena se encuentran situados directamente en el terreno de manera que sólo se trasmite la onda de suelo. Las mediciones se realizaron en la banda de frecuencias de 30 a 915 MHz en un emplazamiento de prueba para eliminar la permisividad y la conductividad del dieléctrico.

18.3.2 Método del coeficiente de reflexión

En otro informe, DeMinco [69] describe un método sobre cómo hacer uso del coeficiente de reflexión medido y del análisis multicapa para determinar las constantes de la superficie de la tierra multicapa. Los datos medidos se incluyen en ambos informes que muestran ecuaciones y gráficos sobre la profundidad de penetración en el suelo del campo eléctrico y sus efectos en la propagación por onda de superficie.

Este informe también discute la sensibilidad de las pérdidas de propagación con la conductividad y la constante dieléctrica del terreno. Como parte del esfuerzo del análisis se llevó a cabo un estudio utilizando el Modelo de Campo sin Perturbaciones ITS [27] a fin de determinar la sensibilidad de las pérdidas de propagación con las variaciones en la conductividad y la permeabilidad relativa. Las alturas de las antenas del transmisor y el receptor se fijaron a cero. Las distancias utilizadas en el análisis y en las mediciones oscilaban entre 2 m y 250 m y cubrían la gama de frecuencias de 30 a 915 MHz. A estas cortas distancias y en esta gama de frecuencias aún hay una onda de suelo significativa incluso a 915 MHz. Se determinó que para baja conductividad el valor de las pérdidas depende en gran medida de la permitividad relativa pero para un valor de la conductividad más elevado las pérdidas tienen menos dependencia respecto a la permitividad relativa, especialmente en frecuencias por debajo de 150 MHz. Las pérdidas también parecen depender de la conductividad a frecuencias

inferiores a unos 150 MHz. A frecuencias superiores a 150 MHz la dependencia de las pérdidas de propagación con la conductividad es despreciable pero la dependencia con la permisividad relativa es bastante importante.

18.3.3 Método de la onda inclinada

El método de medición de la onda inclinada, que es difícil de aplicar en la práctica, depende de la medición con una antena de varilla adecuadamente montada del ángulo de inclinación hacia delante, α , del eje mayor del vector de campo eléctrico y de la relación, a , entre el eje menor y el eje mayor de la elipse. El método lo describe Eaton [70] que indica que requiere mediciones estrictas y un terreno uniforme muy plano.

19 Fase de la onda de suelo

19.1 Introducción

La estabilidad de la fase de la onda de suelo es importante para algunos sistemas de radionavegación.

Conviene definir la fase de la onda de superficie, Φ , como la suma de una fase primaria y una fase secundaria, Φ_s . A una distancia, d , del transmisor, la fase de la onda de superficie puede expresarse como sigue:

$$\Phi = nkd + \Phi_s$$

siendo n el valor en la superficie del índice de refracción de la atmosfera y $k = 2\pi/\lambda$, donde λ es la longitud de onda en espacio libre. En esta ecuación la fase secundaria Φ_s , viene en radianes.

Sin embargo, en la mayoría de aplicaciones se expresa con un tiempo de retardo de fase en microsegundos, según la relación:

$$t_s = \frac{\Phi_s \lambda}{2\pi \cdot 300} = \frac{\Phi_s \cdot 10^6}{2\pi f_{\text{Hz}}}$$

siendo:

- t_s : tiempo de retardo de la fase secundaria (μs)
- Φ_s : fase secundaria (rad)
- λ : longitud de onda (m)
- f_{Hz} : frecuencia (Hz).

19.2 Tierra homogénea lisa

El punto de partida básico para el cálculo de la fase secundaria es la teoría de la propagación por onda de superficie sobre una tierra homogénea lisa [72], utilizando métodos que son idénticos al empleado para calcular la amplitud de la onda de superficie. Para extender este método básico a casos más generales, es conveniente formular los cálculos en términos de impedancia general de la superficie.

19.3 Perturbaciones de la fase secundaria

A frecuencias por debajo de unos 3 MHz, la teoría de la tierra homogénea lisa puede utilizarse para calcular la fase de la onda de superficie con el grado de precisión requerido por los sistemas de navegación sobre trayectos marítimos incluidos los trayectos con olas de gran tamaño. Sin embargo, en los trayectos terrestres la fase secundaria resulta modificada por cambios en las características eléctricas a lo largo del trayecto, las irregularidades del terreno y las capas del subsuelo [74]. Se han desarrollado varios métodos para predecir la perturbación en la fase secundaria debida a estos factores [75].

19.4 Trayectos no homogéneos

Cuando las características eléctricas o la impedancia de la superficie a lo largo de un trayecto se modifican (por ejemplo en la frontera tierra-mar), se produce un correspondiente cambio repentino tanto en la amplitud como en la fase de la onda de superficie. En ese caso puede calcularse la fase por el método de Millington-

Pressey [76]. Este método es completamente análogo al método de Millington para calcular la amplitud de la onda de superficie sobre trayectos no homogéneos. La fase de una señal por onda de superficie a lo largo de un trayecto de dos secciones puede calcularse por el método de Millington si las amplitudes en las fórmulas se sustituyen por las correspondientes fases de la tierra homogénea.

Cuando las características eléctricas de la Tierra son distintas en direcciones diferentes, el frente de onda se desvía hacia la zona con la conductividad más baja. Esto puede dar problemas a los sistemas de radiogoniometría.

19.5 Irregularidades del terreno

Cuando existen importantes irregularidades en el terreno es más eficiente utilizar el método de la ecuación integral para determinar la fase de la onda de superficie, a fin de obtener la precisión deseada en las aplicaciones de navegación.

La Fig. 43 muestra una comparación entre los métodos de cálculo y las mediciones experimentales [59]. El trayecto cruza el Valle de la Muerte, California, con una elevación de 100 m bajo del nivel del mar y la cordillera montañosa de Sierra Nevada. Los puntos medidos se representan con el símbolo (I). La línea continua se calculó mediante el método de la ecuación integral. La línea de puntos se calculó mediante el método Millington-Pressey con un modelo de impedancia efectiva de tierra lisa de dos capas.

A 100 kHz una fase secundaria de 36° corresponde a $1 \mu\text{s}$ (véase el § 19.1).

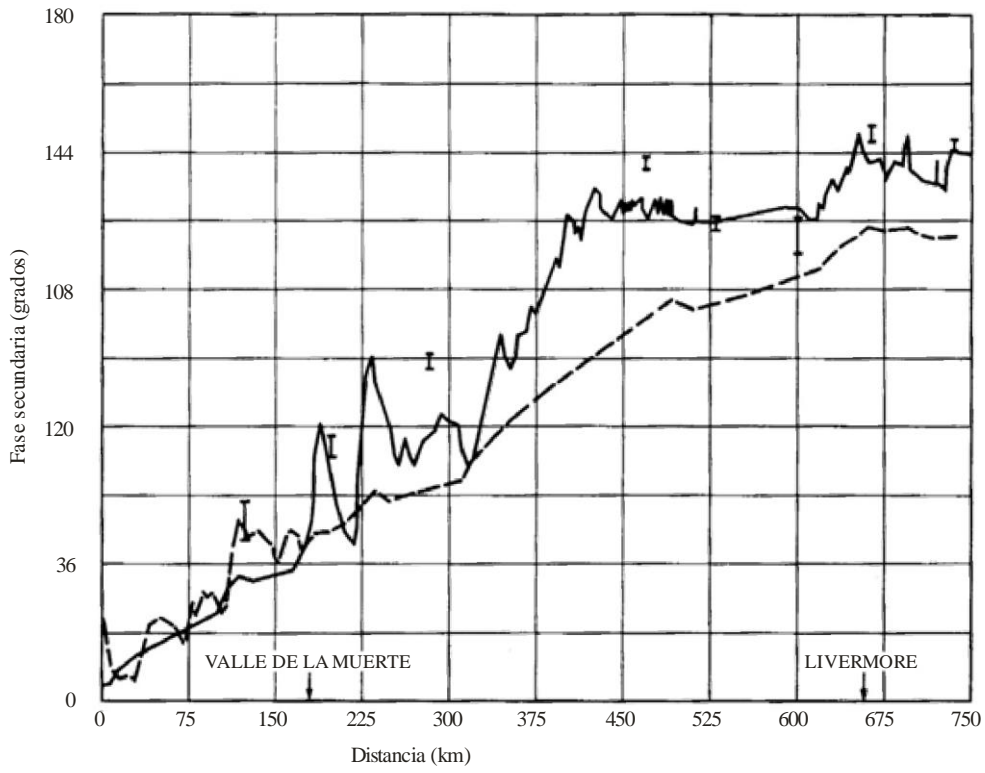
19.6 Efectos meteorológicos

Varias investigaciones sobre la estabilidad de las señales Loran-C han revelado variaciones de fase correspondientes a variaciones del tiempo de llegada de hasta $\pm 0,5 \mu\text{s}$ ([77] y [78]).

Estas variaciones tienen características diurnas y a largo plazo, y están corraladas con cambios en el gradiente del término seco del índice de refracción de la atmósfera. Las variaciones a plazo más largo están asociadas al paso de un frente meteorológico a lo largo del trayecto de medición.

FIGURA 43

Comparación entre la fase medida y calculada para el sistema Loran-C en la costa oeste de Estados Unidos de América



ANEXO 1

Método Lee Generalizado

El método Lee ([79], [80]) es una técnica de referencia para determinar los valores locales medios de la componente a largo plazo de la variabilidad de la señal. Esta técnica se describe en la Recomendación UIT-R SM.1708 y también en el Informe de la CEPT [81].

Los valores medios locales se estiman aplicando una media móvil a una serie de mediciones instantáneas de la intensidad de campo, $r(x)$, para ello, es preciso determinar los valores adecuados de tres parámetros distintos:

- la ventana promediada $2L$ o la distancia que debe considerarse alrededor del punto x (punto donde se va a calcular el valor medio de la intensidad de campo);
- el mínimo número de muestras independientes N dentro de cada intervalo $2L$ necesarias para calcular la media local con un cierto nivel de confianza;
- una mínima distancia d entre muestras consecutivas que garantizan que las muestras no están correlacionadas.

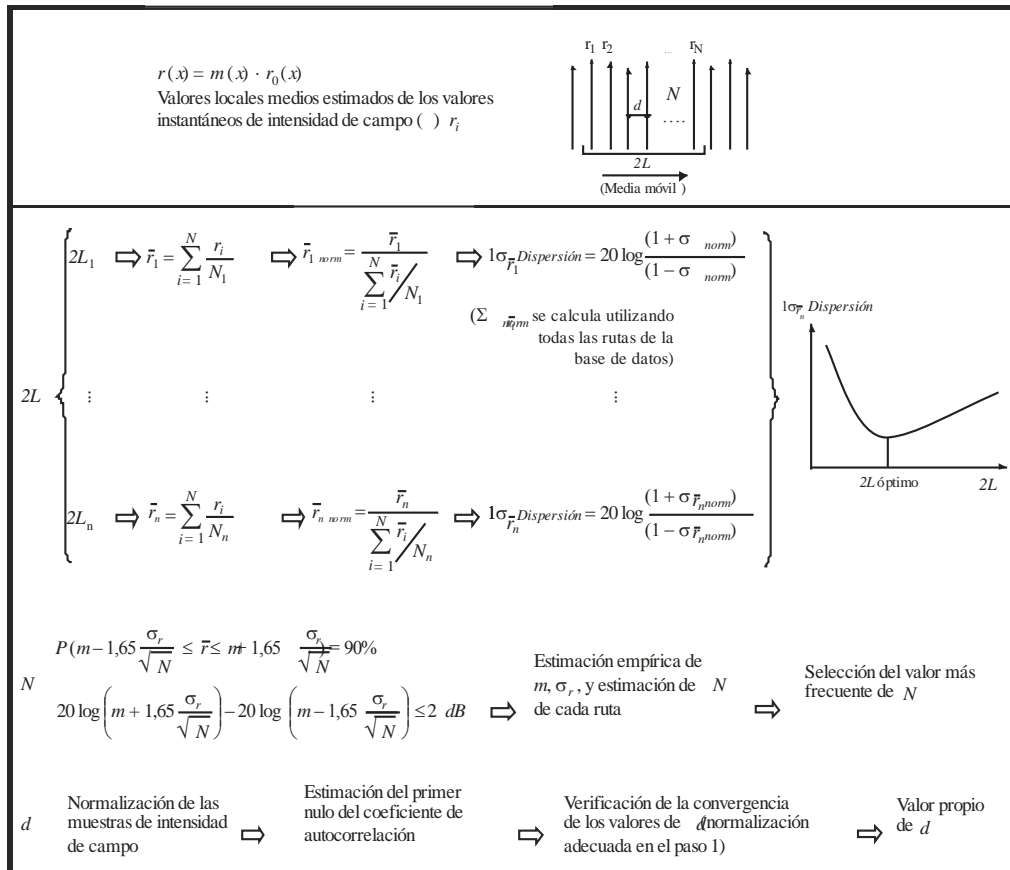
Las medias locales se evalúan promediando un mínimo de N muestras sin correrla, con una distancia d entre muestras consecutivas dentro de una ventana de promediación $2L$.

Lee ([79], [80], [82]) y posteriormente Parsons [83] calcularon teóricamente los valores propios de estos parámetros para el caso específico del canal de propagación de Raleigh y la banda de frecuencias de ondas decimétricas (con algunas menciones específicas a la banda de ondas métricas [80]). No obstante, ni los valores obtenidos ni el método para calcularlos pueden generalizarse para otras condiciones de recepción.

Se ha definido un Método Lee Generalizado [84] para determinar los valores de tales parámetros en cualquier condición de recepción (banda de frecuencias, entorno de recepción y factores de propagación). Este método se resume en la Fig. A1.

FIGURA A1

Resumen del Método Lee Generalizado



Ground Wave Prop. A1

Valores de los parámetros del método para la banda de ondas hectométricas

La aplicación del Método Lee Generalizado requiere la selección de valores apropiados de los mencionados parámetros ($2L, N$ y d) para la banda de frecuencias y el entorno de recepción estudiado. Mediante una campaña de mediciones [85], [86] se obtuvieron los valores de estos parámetros en el caso de señales recibidas en la banda de ondas hectométricas ([72], [87], [88] y [89]). El Cuadro A1 incluye un resumen de los resultados obtenidos para tres tipos distintos de entornos: rural, urbano y suburbano.

CUADRO A1

Valores de referencia de los parámetros del Método Lee Generalizado para la banda de ondas hectométricas y distintos entornos de recepción

Parámetro	Entornos de recepción		
	Rural	Suburbano	Urbano
$2L$	$0,9 \lambda - 2,1 \lambda$	$0,9 \lambda - 2,1 \lambda$	λ
d	$0,17 \lambda$	$0,14 \lambda - 0,16 \lambda$	$0,05 \lambda$
$N^{(1)}$	8	11	20

(1) Los valores de N se obtuvieron para un máximo error de la media real de 1 dB y un nivel de confianza del 90%.

En todos los casos es posible tomar un mínimo número de muestras N dentro de la ventana de promediación $2L$ que satisface el requisito para la distancia d entre las muestras no correlacionadas ($N d \leq 2L$). El uso de estos valores garantiza la adecuada promediación de las variaciones locales de intensidad de campo.

20 Referencias

- [1] Sommerfeld, A.: «The propagation of waves in wireless telegraphy», *Ann. Phys.*, 1909, 28, p.665.
- [2] Norton, K.A.: «The propagation of radio waves over the surface of the Earth and in the upper atmosphere. Part 1», *Proc. Inst. Radio. Eng.*, 1936, 24. pp. 1367-1387.
- [3] Norton, K.A.: «The propagation of radio waves over the surface of the Earth and in the upper atmosphere. Part 2», *Proc. Inst. Radio. Eng.*, 1937, 25. pp. 1203-1236.
- [4] Van Der Pol, B., y Bremmer, H.: «The diffraction of electromagnetic waves from an electrical point source round a finitely conducting sphere», *Philos. Mag. Ser. 7*, 1937, 24, pp. 141-176 and pp. 825-864; 1938, 25, pp. 817-834; and 1939, 26, pp. 261-275.
- [5] Norton, K. A.: «The calculation of ground-wave field intensity over a finitely conducting spherical Earth», *Proc. Inst. Radio Eng.*, 1941, 29, pp. 623-639.
- [6] Millington, G., 1949, «Ground-wave propagation over an inhomogeneous smooth earth», *Proc. IEE*, 96, 53.
- [7] Hufford, G.A. 1952, «An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface», *Quart. Appl. Math.*, 9, 391.
- [8] Ott, R.H., y L.A. Berry, 1970, «An alternative integral equation for propagation over irregular terrain», *Radio Sci.*, Part 1, 5(5), pp. 767-771.
- [9] Hill D.A. «Ground-wave propagation over Forested and Built-up Terrain» NTIA Report 82-114, Dic. 1982.
- [10] DeMinco, N. «Automated Performance Analysis for Ground-Wave Communication Systems,» NTIA-Report 86-209, Dic. 1986.
- [11] DeMinco, N «Ground-Wave Analysis Model for MF Broadcast Systems,» NTIA-Report 86-203, Sept. 1986.
- [12] Kissick, W.A., y otros, «Measurements of LF and MF Radio Propagation over Irregular, Inhomogeneous Terrain,» NTIA-Report 78-12, Nov. 1978.
- [13] Hoffman J. R., y otros, «DGPS Field Strength Measurements at a GWEN Site,» NTIA-Report 98-346, Abril 1998.
- [14] Ott, R. H. y otros, «Ground Wave Propagation Over Irregular, Inhomogeneous Terrain: Comparisons of Calculations and Measurements,» NTIA Report 79-20, Mayo 1979.
- [15] Adams, J. E., y otros, «Measurements and Predictions of HF Ground Wave Propagation over Irregular, Inhomogeneous Terrain, »NTIA-Report 84-151, Julio 1984.
- [16] DeMinco, N, «Medium Frequency Propagation Prediction Techniques and Antenna Modeling for Intelligent Transportation Systems (ITS) Broadcast Applications,» NTIA-Report 99-368, Agosto 1999.
- [17] DeMinco, N, «Propagation Prediction Techniques and Antenna Modeling (150 to 1705 kHz) for Intelligent Transportation Systems (ITS), *IEEE AP Magazine*, AP Vol. 42, No. 4, Agosto 2000, pp. 9-34.
- [18] Rotheram, A.S.: «Ground-wave propagation. Part 1 Theory for short distances», *IEE Proc, F*, 1981,128, pp. 275-284.
- [19] Rotheram, A.S.: «Ground-wave propagation. Part 2 Theory for medium and long distances and reference propagation curves», *IEE Proc. F*, 1918, 128, pp. 285-295.
- [20] Rotheram, A.S.: «Ground-wave propagation», *Marconi Rev.*, 1982, 45, (1), pp. 18-48.
- [21] Causebrook, J.H., 1977, «Groundwave propagation at medium frequency in built-up areas». BBC Engineering Research Department Report RD 1977/25.

- [22] Causebrook, J.H., 1978, «Medium-wave propagation in built-up areas», Proc. IEE, Vol. 125, 9, pp. 804-808.
- [23] Bremmer, H.: «Terrestrial Radio Waves» Elsevier, 1949.
- [24] Picquenard, A.: «Radio Wave Propagation», New York: John Wiley and Sons, 1974, p. 80.
- [25] Craig K.H. «Clear Air Characteristics of the Troposphere», in «Propagation of radio waves» 2nd ed, ed Barclay L W, 2003 ISBN 0 85296 102 2, Capítulo 7.
- [26] «Propagación por onda de superficie en una atmósfera exponencial», Informe del CCIR 714-2, 1990.
- [27] DeMinco, N «Propagation Loss Prediction Considerations for Close-In Distances and Low Antenna Height Applications,» NTIA-Report TR-07-449, Julio 2007.
- [28] Кашпровский В.Е., Кузубов Ф.А., «Распространение средних радиоволн земным лучом» (Kashprovsky V.E., Kuzubov F.A., «Propagation of medium waves by terrestrial ray»), «Svyaz», 1971, 220 páginas.
- [29] Feinberg, E.L., «Propagation of radiowaves along a terrestrial surface» Iss AS USSR M 1961, p.546.
- [30] Millington G, 1949, Nature 163 p. 128.
- [31] Millington G. y Isted G.A. 1950 «Ground-wave propagation over an inhomogeneous Earth, Part 2 Experimental evidence and practical implications», Proc. IEE, 97, 209.
- [32] Hoffman, J.R., y otros, «Field Strength Measurements of DGPS and FAA Beacons in the 285 to 315 kHz Band», NTIA-Report 97-337, Junio 1997.
- [33] Damboldt Th. 1981 «HF ground-wave field strength measurements on mixed land-sea paths», IEE 2nd Int Conf Antennas and Propagation, Heslington, York, UK; IEE Conf Proc No. 195.
- [34] Barrick, D.E., (1971a), «Theory of HF and VHF propagation across the rough sea, 1, The Effective Surface Impedance For A Slightly Rough Highly Conducting Medium At Grazing Incidence», Rad. Sci, V6, pp. 517-526.
- [35] Barrick, D.E., (1971b), «2. Application to HF and VHF propagation over the sea», Rad. Sci., V6 pp 527-533.
- [36] Phillips, O.M. (1957): «On the generation of surface waves by turbulent wind», J. Fluid Mech., Vol.2, pp. 417-445.
- [37] Furutsu, K. Radio Science vol 17 pp. 1037-1050, 1982.
- [38] J.M. Pielou, J.D. Milsom y R N Herring «HF ground wave propagation from a cliff top site» IEE Conf ICAP87, p. 103, 1987
- [39] Chernov Yu. A., Zhiltsov A.U. «The Statistical characteristics of a terrestrial wave in a range LF-MF», «Radiotekhnika», 1997, № 2, pp. 41-45.
- [40] Stratton G.A., «The Theory of electromagnetism», «Gostekhizdat», 1948.
- [41] Chernov Yu. A. «Distribution of average radiowaves in urban environment», Trudy NIIR, 2004, pp. 131-136.
- [42] Buchatskaja G.B. «An experimental research of distribution of a field HF-waves in city for a transmitter, located within the limits of this city», Trudy NIIR, 1989, № 4, pp. 14-19.
- [43] Bown, R. Martin, D.K. y Potter, R.K. «Some Studies in Radio Broadcast Transmission» 1924, Proc IRE V12 pp. 57-131.
- [44] Bown, R y Gillett, G.D., «Distribution of radio Waves From Broadcasting Stations Over City Districts» 1924, Proc IRE V12 pp. 395-409.
- [45] Barfield, R.H. y Munro, G.H. «The Attenuation of Wireless waves Over Towns», 1929, Proc IEE, V67, pp. 253-270.
- [45] Naismith, R. «Field Strength Measurements on Daventry 5XX», 1931, Proc IEE V69 pp. 881-890.
- [47] Causebrook, J.H «Medium-wave propagation in built-up areas», 1978, Proc. IEE, V125, pp. 804-808.
- [48] Luo Lichen, «A New MF and HF Ground-wave Model for Urban Areas», 2000, IEEE Antennas and Prop. Mag, V42, pp. 21-32.

- [49] Gracely, F.R. «Temperature Variations of Ground-Wave Signal Intensity at Standard Broadcast Frequencies », Proc. I.R.E., abril, 1949, pp. 360-363.
- [50] Gerber W. y A. Werthmüller, Ueber die vegetabile Absorption der Bodenwelle, Techn. Mitt.T.T., Sw., 1945, № 1, 12-19.
- [51] Chernov Yu. A. «Seasonal changes of a field intensity of a ground wave in day time in LF and MF bands» Trudy NIIR, 2005, pp. 109-115.
- [52] Захаренко В.Н., «Влияние вариаций электропроводности подстилающей поверхности на амплитуду напряженности земной волны диапазонов СВ и ДВ», Электросвязь, 1992, № 1, pp. 34-35. [V.N. Zakharenko, «Influence of variations in electroconductivity of a ground surface on amplitude of intensity of a ground wave signal in the MF and LF bands», Elektrosvyaz, 1992, № 1, pp. 34-35.
- [53] Recomendación UIT-R P.1321-3.
- [54] Чернов, Ю.А. Цифровое радиовещание до 30 МГц: иллюзии и реальность. Часть 2. Длинные и средние волны. Темное время суток, Электросвязь, 2012, № 2. (Yu. Chernov, Digital broadcasting up to 30 MHz: illusions and reality. Part 2. LW and MW. Dark time of day, Electrosvyaz, 2012, № 2.).
- [55] Causebrook J H y Tait B, 1979, «Ground Wave propagation in a realistic terrain» BBC Research Dept Report RD 1979/19.
- [56] ERC Recommendation (00)08, 2000, «Field Strength Measurements along a Route with Geographical Coordinate Registrations» <http://www.ero-docdb.dk/docs/doc98/Official/Pdf/Rec0008.pdf>
- [57] Ott, R.H. 1971, «An alternative integral equation for propagation over irregular terrain», Radio Sci., Part 2, 6 (4), pp. 429-435.
- [58] de la Vega, D y otros, «Analysis of the Attenuation Caused by Orography Influence in the Medium Wave Band», 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference – VTC2007.
- [59] Wait J R 1962, «Electromagnetic Waves in Stratified Media,» Oxford, Pergamon.
- [60] Almeida, M.P.C.; David, R.P.; Souza, R.S.L.; Castellanos, P.V.G. ; Cal Braz, J.A.; Lima, M.V.; Lima, F.F.; Silva Mello, L.A.R.; «Medium wave DRM field trials in Brazil - some daytime and night-time results in urban environment», Measurement (London. Print), v. 45, p. 1-9, 2012.
- [61] Report ITU-R BS.2144. «Planning parameters and coverage for Digital Radio Mondiale (DRM) broadcasting at frequencies below 30 MHz», May 2009.
- [62] Causebrook, J.H., 1977, «Ground Wave Propagation at Medium Frequency in Built-up Areas» BBC Research Dept Report 1977/25.
- [63] Gil, U, y otros, 2009, «Medium Wave Field Strength Spatial Variability in Urban Environments», 3rd European Conference on Antenas and Propagation 2009.
- [64] Gil, U, y otros, 2010, «Empirical Analysis of Medium Wave Field Strength Prediction in Urban Environments», IEEE Int Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Shanghai 2010.
- [65] Fernandez, I, y otros, 2011, «Carrier and Noise Measurements in the Medium Wave Band for Urban Indoor Reception of Digital Radio» IEEE Trans Broadcasting.
- [66] Fernandez, I, y otros, 2011, «Carrier and Noise Measurements in the Medium Wave Band for Urban Indoor Reception of Digital Radio» IEEE Trans Broadcasting.
- [67] Chernov Yu, «Distribution of terrestrial wave signal levels in a service zone at medium frequencies» Trans NIIR, 2006, pp. 81-90.
- [68] DeMinco, N., y otros, «Free-Field Measurements of the Electrical Properties of Soil Using the Surface Wave Propagation Between Two Monopole Antennas,» NTIA-Report TR-12-484, enero 2012.
- [69] DeMinco, N., y otros, «Free-Field Measurements of the Electrical Properties of Soil Using the Measured Reflection Coefficient at Normal Incidence and Multilayer Analysis,» NTIA-Report TR-13-494, febrero 2013.

- [70] Eaton J L 1976 «The wave tilt method of measuring electrical ground constants in the lf and mf bands» BBC Research Report RD 1976/15. www.bbc.co.uk/rd/pubs/reports/1976-15.pdf
- [71] Informe del CCIR, 716-3, 1990.
- [72] Johler, J.R., Kellar, W.J. and Walters, L. C. 1956, «Phase of the low radio-frequency ground wave». NBS Circular 573, <http://tf.boulder.nist.gov/general/pdf/2302.pdf>
- [73] Hill, D.A. y Wait, J. R., 1980, «Ground-wave attenuation function for a spherical earth with arbitrary surface impedance». *Radio Sci.* Vol. 15, 3.
- [74] Johler, J.R. y Horowitz, S. 1974 «Propagation of a Loran pulse over irregular, inhomogeneous ground». Paper 28, AGARD Conf. Proc. No. 144 on Electromagnetic wave propagation involving irregular surfaces and inhomogeneous media, ed A. N. Ince. NTIS Accession Number AD A008583, National Technical Information Service, Springfield, Va. 22161, EE.UU.
- [75] Samaddar, S.N. 1979, «The theory of Loran-C ground-wave propagation - A review». *Navigation*, Vol. 26, 3.
- [76] Pressey, B.G., Ashwell, G.E. and Fowler, C.S. 1953, «The measurements of the phase velocity of ground-wave propagation at low frequencies over a land path». *Proc. IEE*, 100, Pt. III.
- [77] Doherty, R.H. y Johler, J. R. 1975, «Meteorological influences on Loran-C ground-wave propagation». *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 37, pp. 1117-1124.
- [78] Samaddar, S.N. 1980 «Weather effects on Loran-C propagation». *Navigation*, Vol. 27, 1.
- [79] Lee, W C Y, 1986, «Mobile Communications Design Fundamentals», Howard W. Sams and Co.
- [80] Lee, W C Y, 1985, «Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal», *IEEE Trans Vehicular Technology*, Vol. VT-34, N° 1.
- [81] ERC Recommendation (00) 08, 2000, «Field Strength Measurements along a Route with Geographical Coordinate Registrations» <http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/Official/Pdf/Rec0008.pdf>
- [82] Lee, W C Y, 1982, «Mobile Communications Engineering», Ed. McGraw-Hill Book Company.
- [83] J. D. Parsons, 2000, «The Mobile Radio Propagation Channel», 2nd. Ed, John Wiley & Sons Ltd, 2000, ISBN 0 471 98857 X.
- [84] de la Vega, D, y otros, 2009 «Generalization of the Lee Method for the Analysis of Signal Variability», *IEEE Trans Vehicular Technology*, Vol. 58, N° 2, pp. 506-516.
- [85] Gil, U, y otros, 2008, «DRM Field Trials for Urban Coverage in Spain», *EBU Technical Review 2008-Q2*.
- [86] Gil, U, y otros, 2008, «DRM 20 kHz Simulcast Field Trials in the Medium Wave Band in Mexico D.F.» *IEEE Trans Broadcasting*, Vol. 54, N° 1, pp. 58-61.
- [87] de la Vega, D, y otros, 2008, «Evaluation of the Lee Method for the Analysis of the Long-Term and Short-Term Variations in the Digital Broadcasting Services in the MW Band», *IEEE Int Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, Las Vegas, EE.UU., marzo 2008.
- [88] de la Vega, D, y otros, 2008, «Empirical Analysis of the Sample Correlation for the Planning of Field Trials in the Digital Broadcasting Services at MF Band,» *Proc IEEE Int Instrumentation and Measurement Technology Conference – I²MTC 2008*, pp. 2201-2204, Victoria BC, Canadá, mayo 2008.
- [89] Gil, U, y otros, 2010, «Statistical Characterization of the Medium Wave Field Strength Spatial Variability in Urban Environments Using the Generalized Lee Method» *Proc. 4th European Conf on Antennas and Propagation*, Barcelona, España, abril 2010.
-

Unión Internacional de Telecomunicaciones
División de Ventas y Comercialización
Place des Nations
CH-1211 Ginebra 20
Suiza
Fax: +41 22 730 5194
Tel.: +41 22 730 6141
E-mail: sales@itu.int
Web: www.itu.int/publications

ISBN 978-92-61-14643-6 SAP id
3 8 9 8 2



9 789261 146436

Impreso en Suiza
Ginebra, 2015

Derechos de las fotografías: Shutterstock