RECOMENDACIÓN UIT-R P.368-8*

Curvas de propagación por onda de superficie para frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz

(1951-1959-1963-1970-1974-1978-1982-1986-1990-1992-2005)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

que, por la complejidad del cálculo, sería útil disponer de un juego de curvas de propagación por onda de superficie que correspondan a un cierto número de valores-tipo de frecuencias y de características del suelo,

recomienda

1. que se utilicen las curvas del Anexo 1, aplicadas en las condiciones que se indican, para la determinación de la intensidad de campo de la onda de superficie para las frecuencias comprendidas entre 10 kHz y 30 MHz;

2. que, por regla general, se utilicen estas curvas para dicha determinación de la intensidad de campo sólo en los casos en que pueda preverse con certeza una amplitud despreciable de las reflexiones ionosféricas;

3. que no se utilicen estas curvas para aplicaciones en que la antena receptora está situada a una altura considerable por encima de la superficie de la Tierra;

NOTA 1 – Es decir, cuando $\varepsilon_r \ll 60\,\lambda\sigma$ las curvas son utilizables hasta una altura $h = 1{,}2\,\sigma^{1/2}\,\lambda^{3/2}$. Las curvas de propagación correspondientes a alturas de antena de hasta 3 000 m y a frecuencias de hasta 10 GHz se pueden encontrar en la publicación de la UIT titulada «Manual de curvas de propagación de las ondas radioeléctricas sobre la superficie de la Tierra»;

4. que estas curvas, establecidas para trayectos homogéneos con arreglo a las condiciones señaladas en el Anexo 1, se utilicen también para la determinación de la intensidad de campo en trayectos mixtos, de acuerdo con lo indicado en el Anexo 2.

Anexo 1

Curvas de propagación y condiciones de validez (trayectos homogéneos)

Las curvas de propagación de la presente Recomendación se calculan con arreglo a las hipótesis siguientes:

– la Tierra es una esfera homogénea lisa;

– en la troposfera, el índice de refracción disminuye exponencialmente en función de la altura, conforme se describe en la Recomendación UIT-R P.453;

---

* La Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones efectuó modificaciones de redacción en esta Recomendación en 2000 de conformidad con la Resolución UIT-R 44.

– tanto las antenas transmisoras como las receptoras se hallan situadas en tierra;

– el elemento radiante es un monopolo vertical corto. Se supone dicha antena vertical en la superficie de una Tierra plana, perfectamente conductora y excitada de forma que radie 1 kW, en cuyo caso la intensidad de campo a 1 km de distancia será de 300 mV/m; esto corresponde a una fuerza cimomotriz de 300 V (véase la Recomendación UIT-R P.525);

– las curvas se han trazado para distancias medidas siguiendo la curvatura de la Tierra;

– las curvas dan el valor de la componente vertical de la intensidad del campo de radiación, es decir, el que puede efectivamente medirse en la región de campo lejano de la antena.

NOTA 1 – La curva «inversa de la distancia» mostrada por la línea en trazos en las Figuras, a la cual las curvas son asintóticas en distancias cortas, pasa por el valor de intensidad de campo de 300 mV/m cuando la distancia es de 1 km. Para referir las curvas a otras antenas de referencia véase el Cuadro 1 de la Recomendación UIT-R P.341.

NOTA 2 – Para el cálculo de las curvas se utilizó el programa de computador GRWAVE, que se describe brevemente en el Anexo 3.

NOTA 3 – La pérdida básica de transmisión correspondiente a las mismas condiciones en función de las cuales se calcularon las curvas puede obtenerse a partir del valor del campo E (dB(μV/m)), utilizando la ecuación siguiente:

$$L_b \equiv A_i = 142{,}0 + 20 \log f_{\mathrm{MHz}} - E \qquad \text{dB}$$

Para la influencia del entorno en ambas antenas, transmisora y receptora, consúltese la Recomendación UIT-R P.341.

NOTA 4 – La intensidad de campo por onda de superficie puede variar con las temperaturas de las diferentes estaciones del año. La diferencia media anual entre los valores medianos mensuales de las intensidades de campo en invierno y verano, para la banda 500-1 000 kHz, oscila entre 5 dB (cuando la temperatura media en enero en el hemisferio Norte es +4º C) y 15 dB (cuando la temperatura media en el mes de enero en el hemisferio Norte es –16º C).

NOTA 5 – Las curvas indican el campo total a una distancia r con un error inferior a 1 dB cuando kr es superior a aproximadamente 10, donde $k = 2\pi/\lambda$. Pueden incluirse efectos de campos cercanos (por ejemplo, campos estáticos y de inducción), aumentando la intensidad de campo (dB) en:

$$10 \log \left\{ 1 - \frac{1}{(k\,r)^2} + \frac{1}{(k\,r)^4} \right\}$$

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

NOTE 6 – En toda antena, si el emplazamiento está situado por encima de la elevación media del terreno a lo largo del trayecto entre las antenas, la altura efectiva de antena es la altura de la antena por encima de la elevación media del terreno a lo largo del trayecto. El valor de la altura efectiva de la antena debe compararse con el valor calculado de la altura límite de la antena del *recomienda* 3, para determinar si las curvas son válidas para el trayecto.

Las Figs. 1 a 11 contienen curvas de intensidad de campo en función de la distancia, con la frecuencia como parámetro.

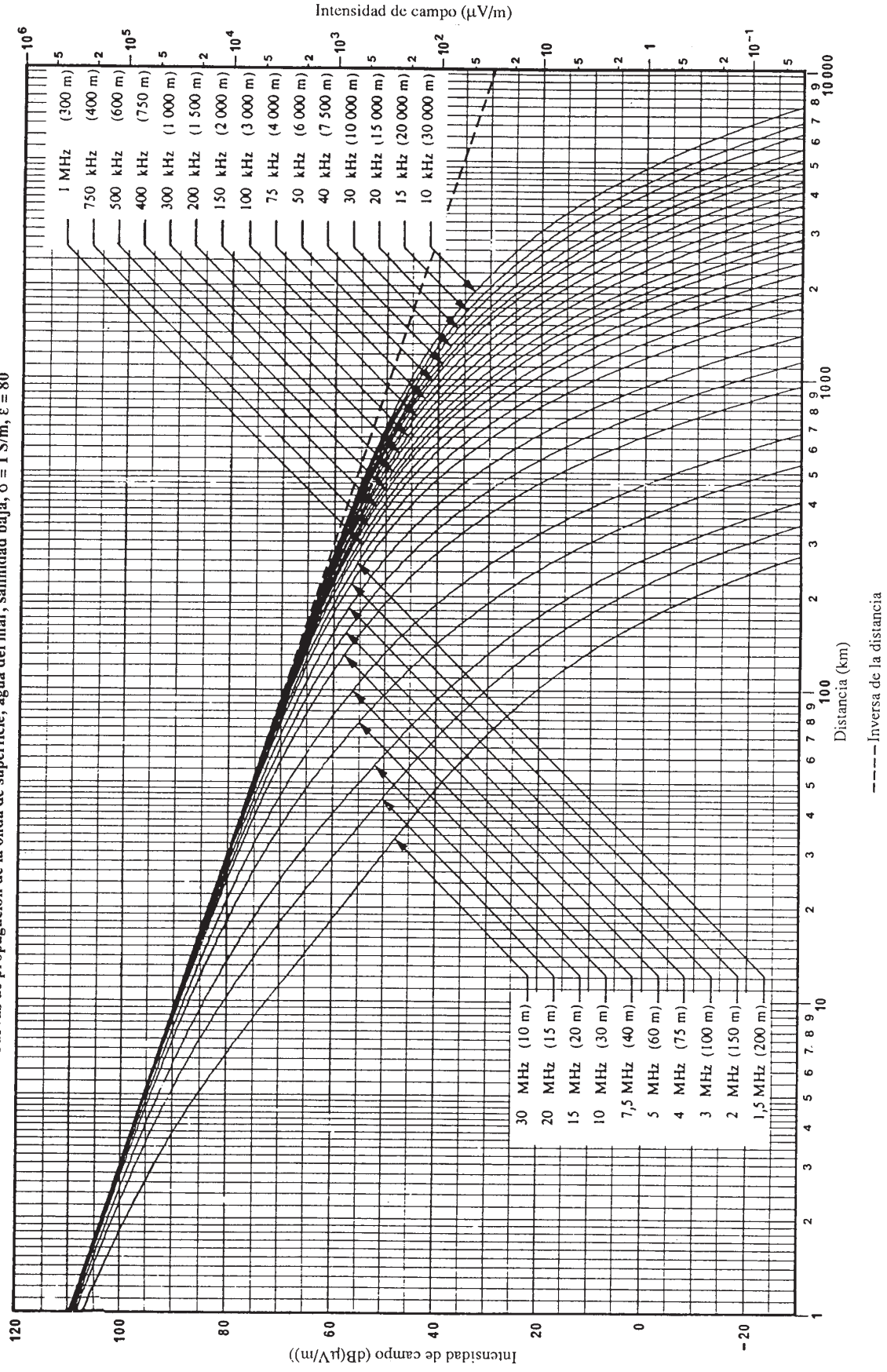


FIGURA 1

Curvas de propagación de la onda de superficie; agua del mar, salinidad baja, σ = 1 S/m, ε = 80

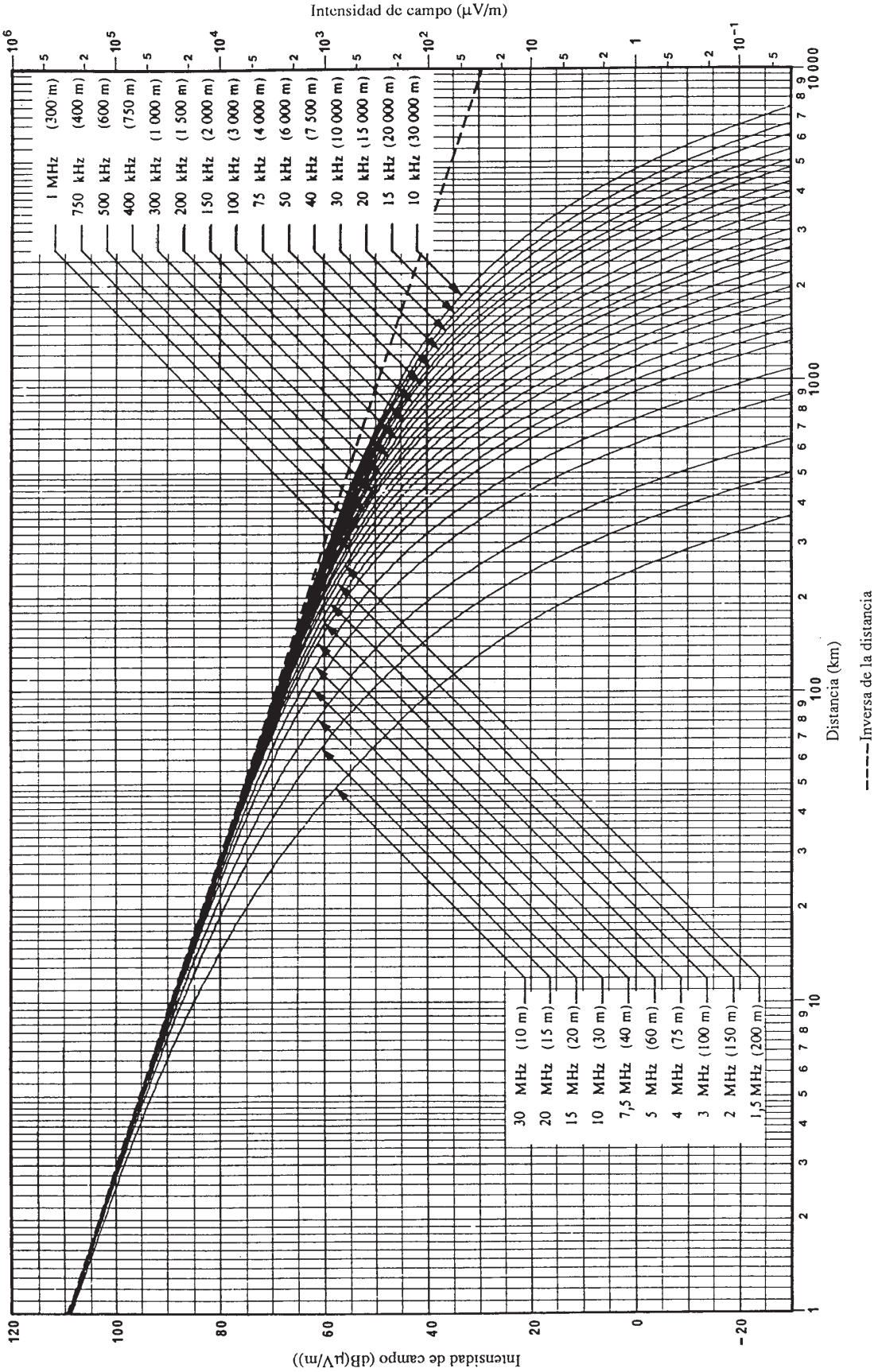


FIGURA 2

Curvas de propagación de la onda de superficie; agua del mar, salinidad media, σ = 5 S/m, ε = 70

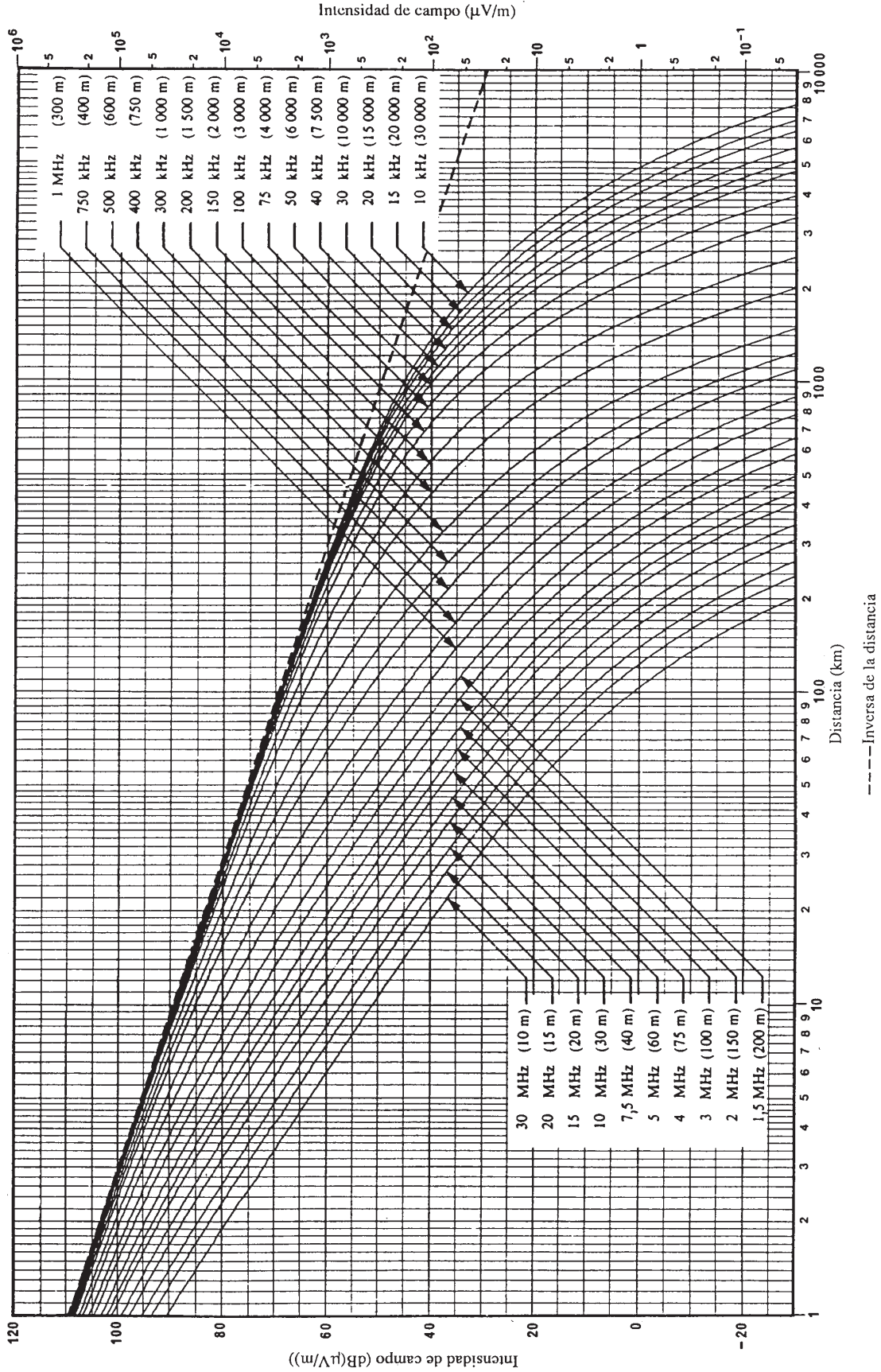


FIGURA 3

Curvas de propagación de la onda de superficie; agua dulce, $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ S/m, $\varepsilon = 80$

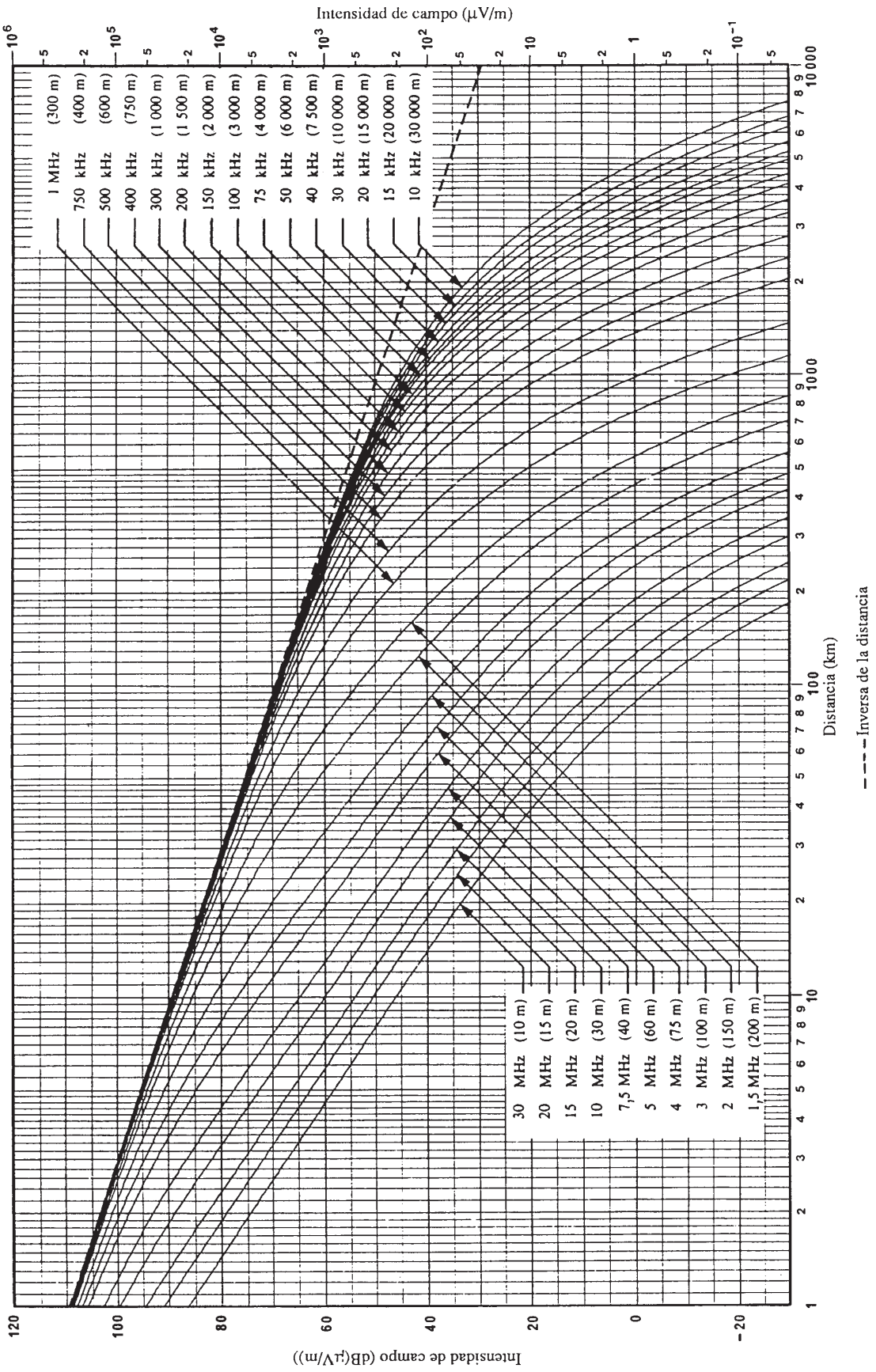


FIGURA 4

Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra, $\sigma = 3 \times 10^{-2}$ S/m, $\varepsilon = 40$

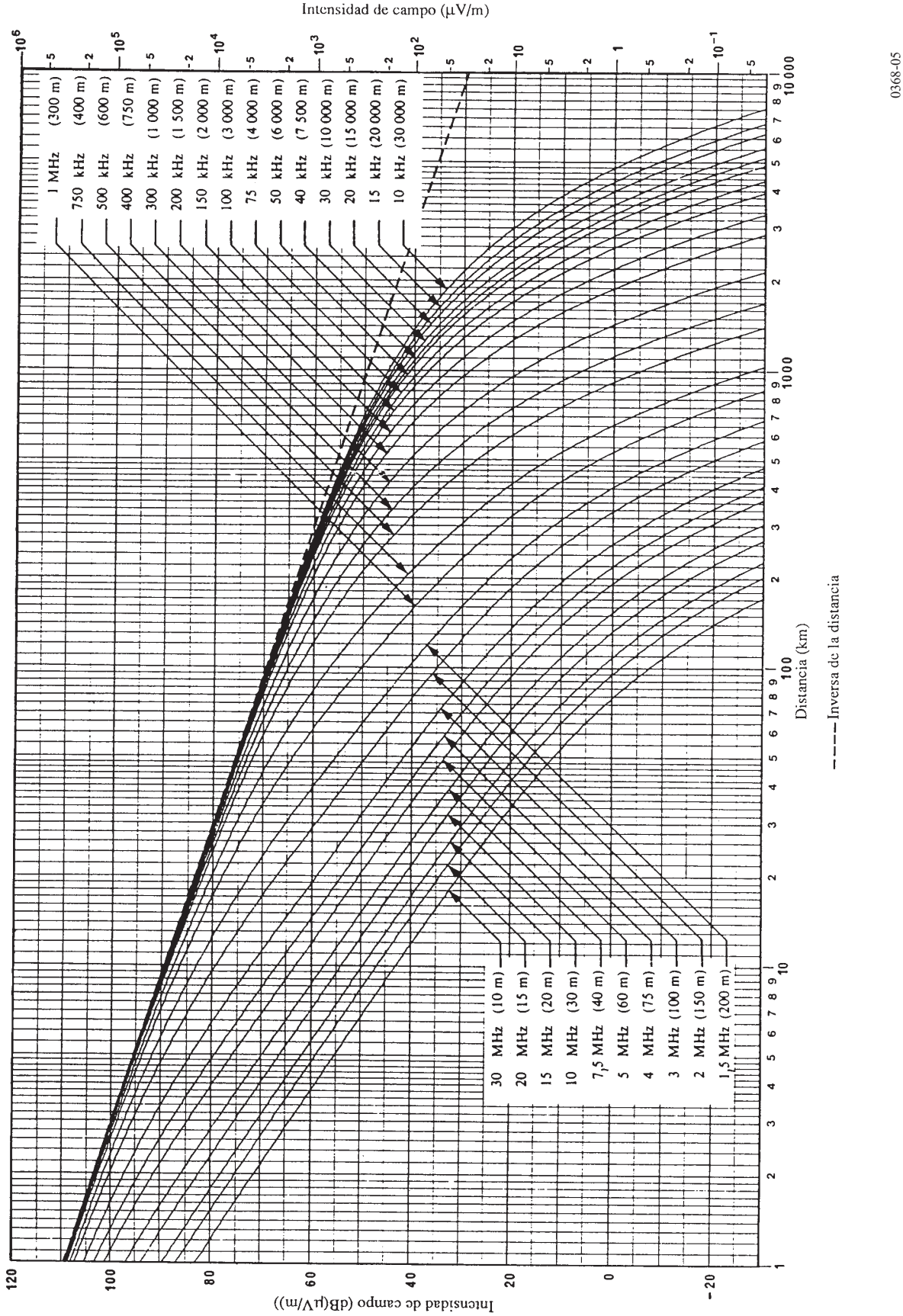


FIGURA 5

Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra húmeda, $\sigma = 10^{-2}$ S/m, $\varepsilon = 30$

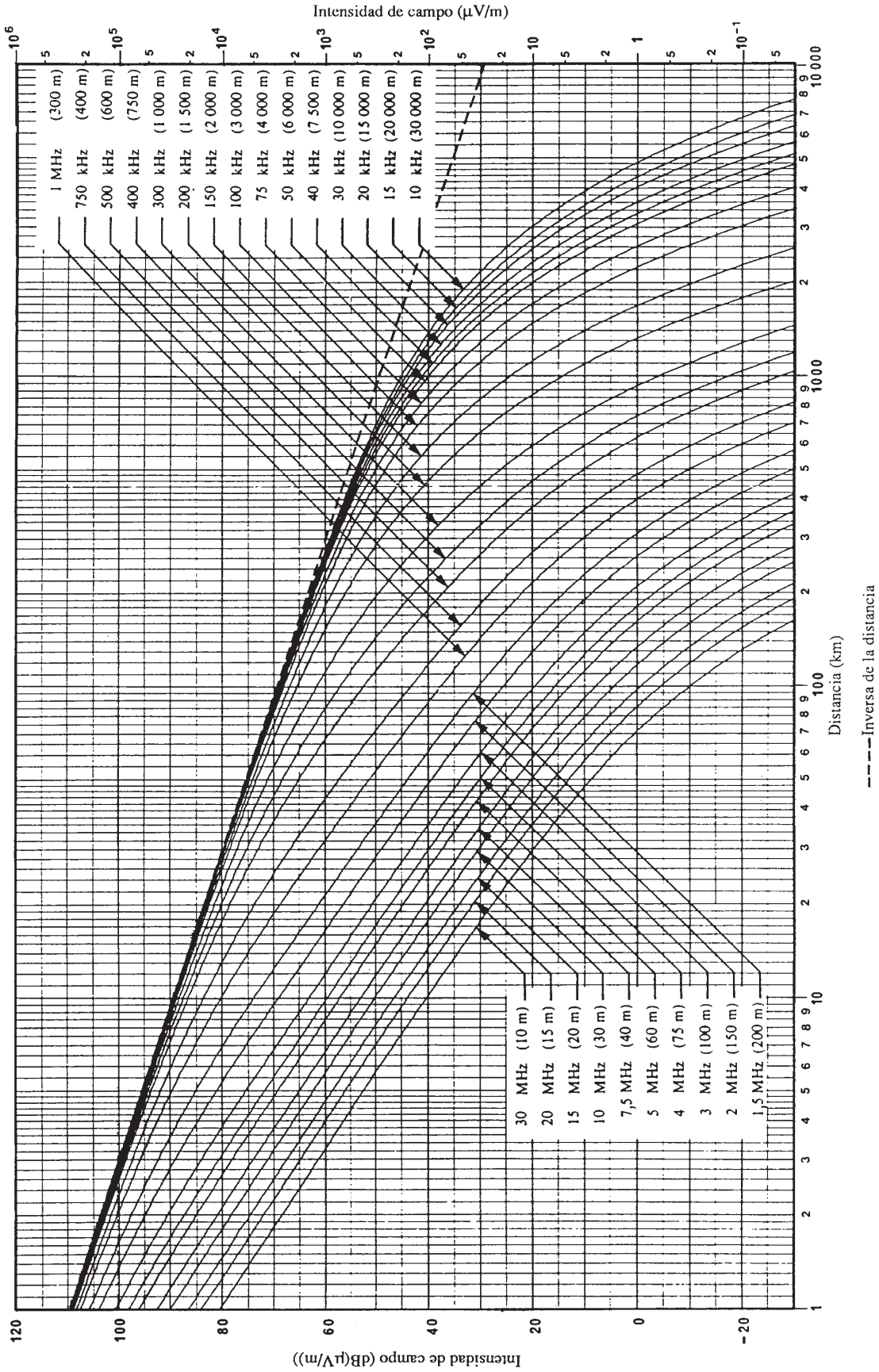


FIGURA 6

Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra, $\sigma = 3 \times 10^{-3}$ S/m, $\varepsilon = 22$

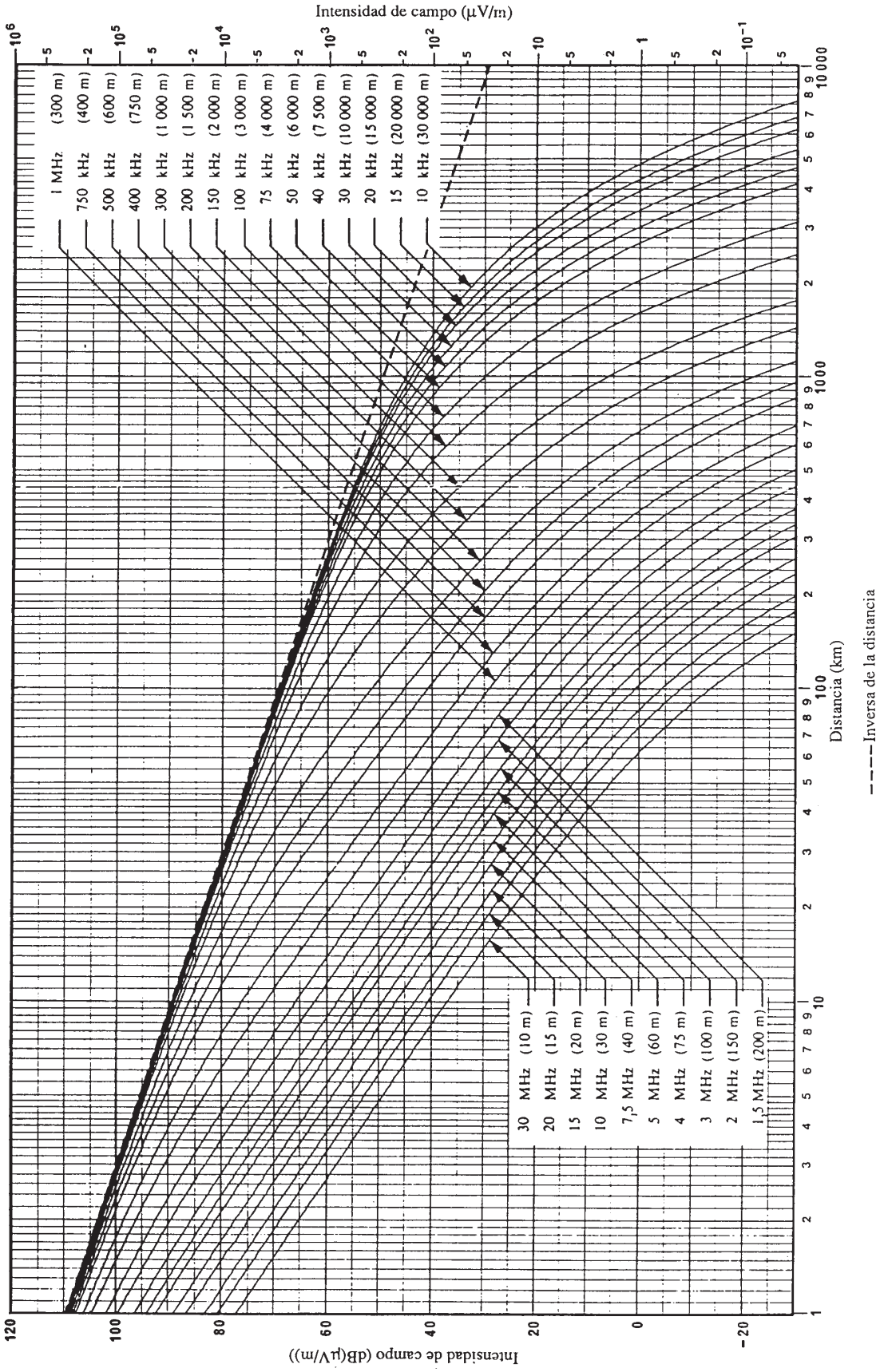


FIGURA 7

Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra moderadamente seca, $\sigma = 10^{-3}$ S/m, $\varepsilon = 15$

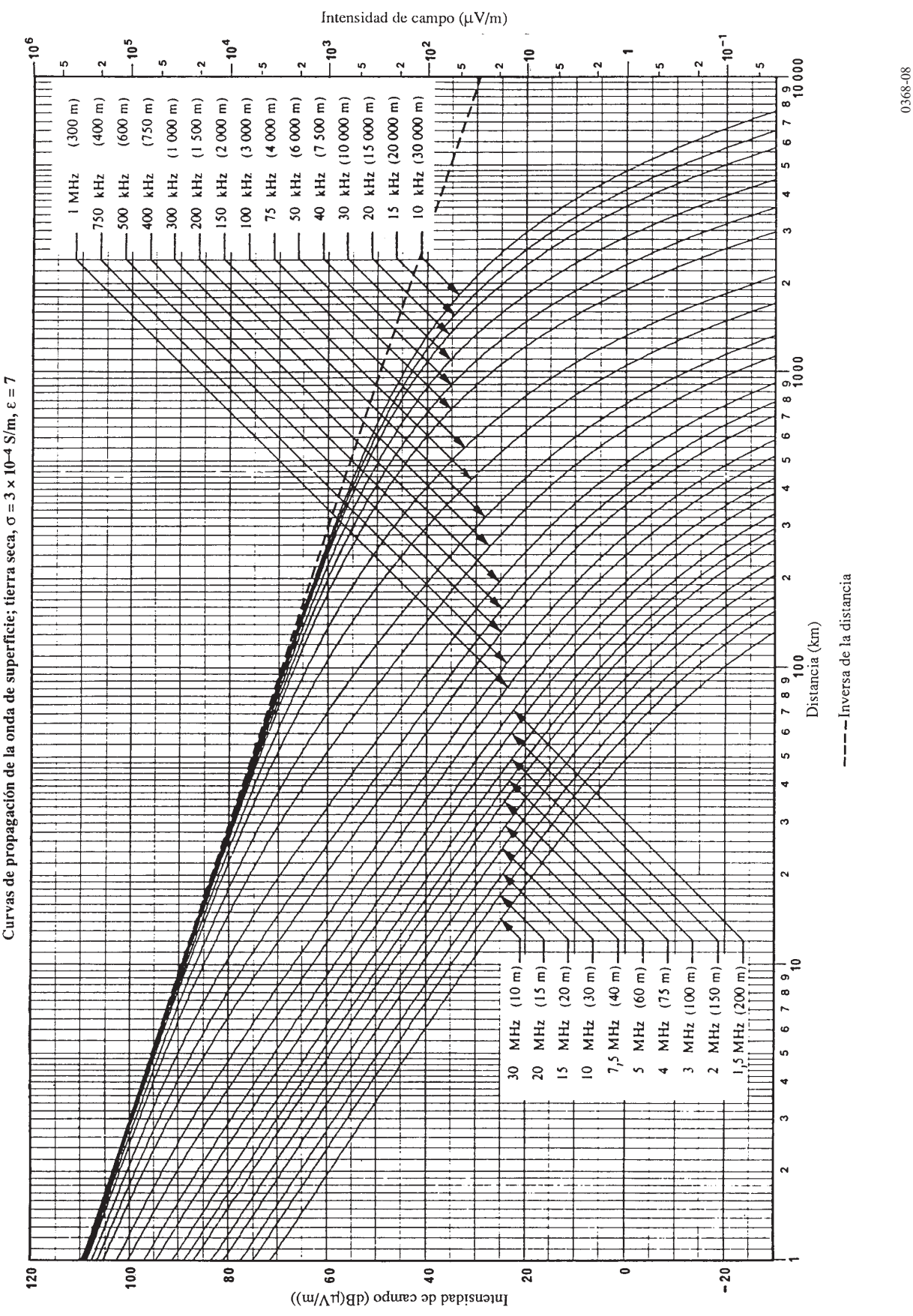


FIGURA 8

Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra seca, $\sigma = 3 \times 10^{-4}$ S/m, $\varepsilon = 7$

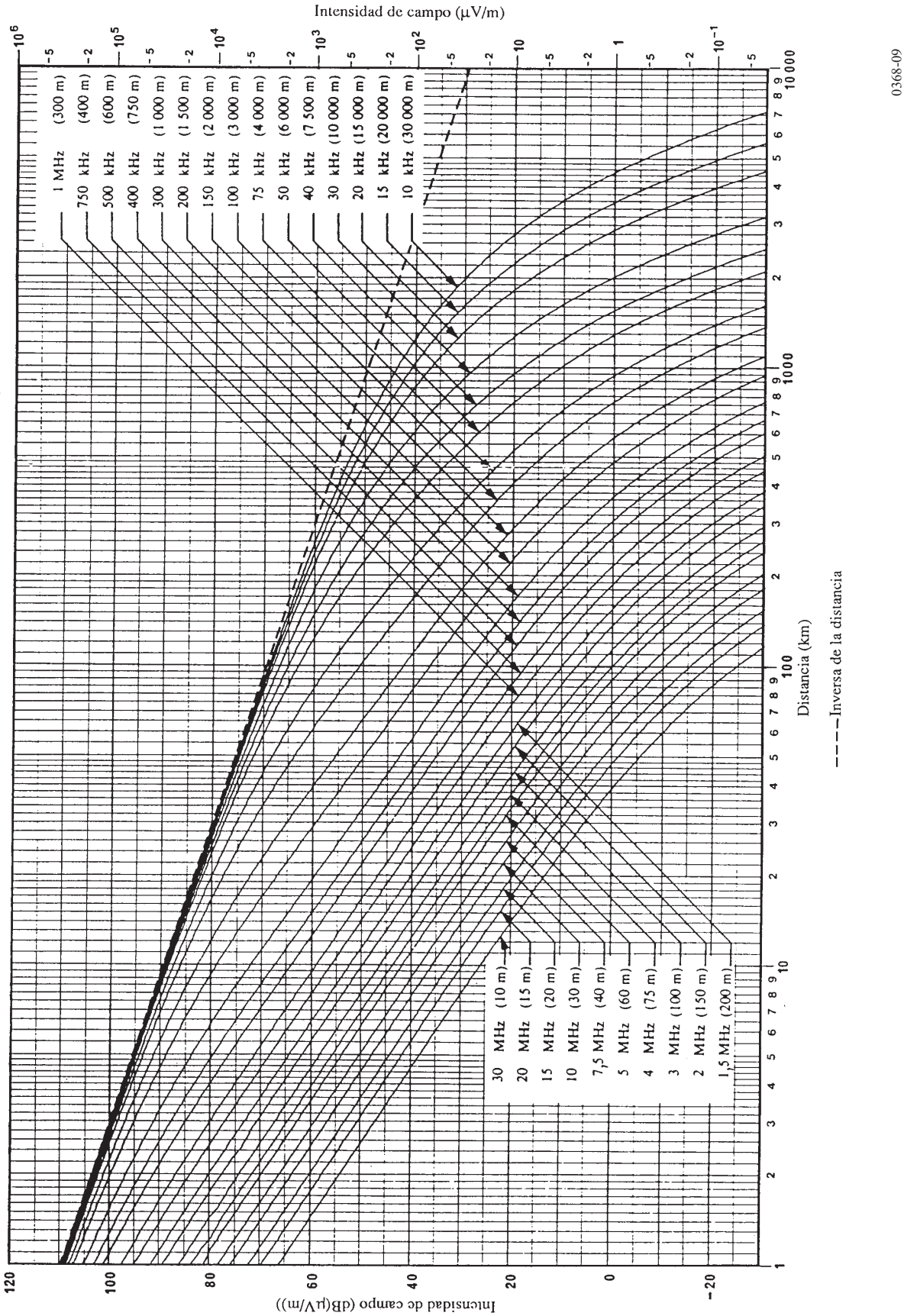
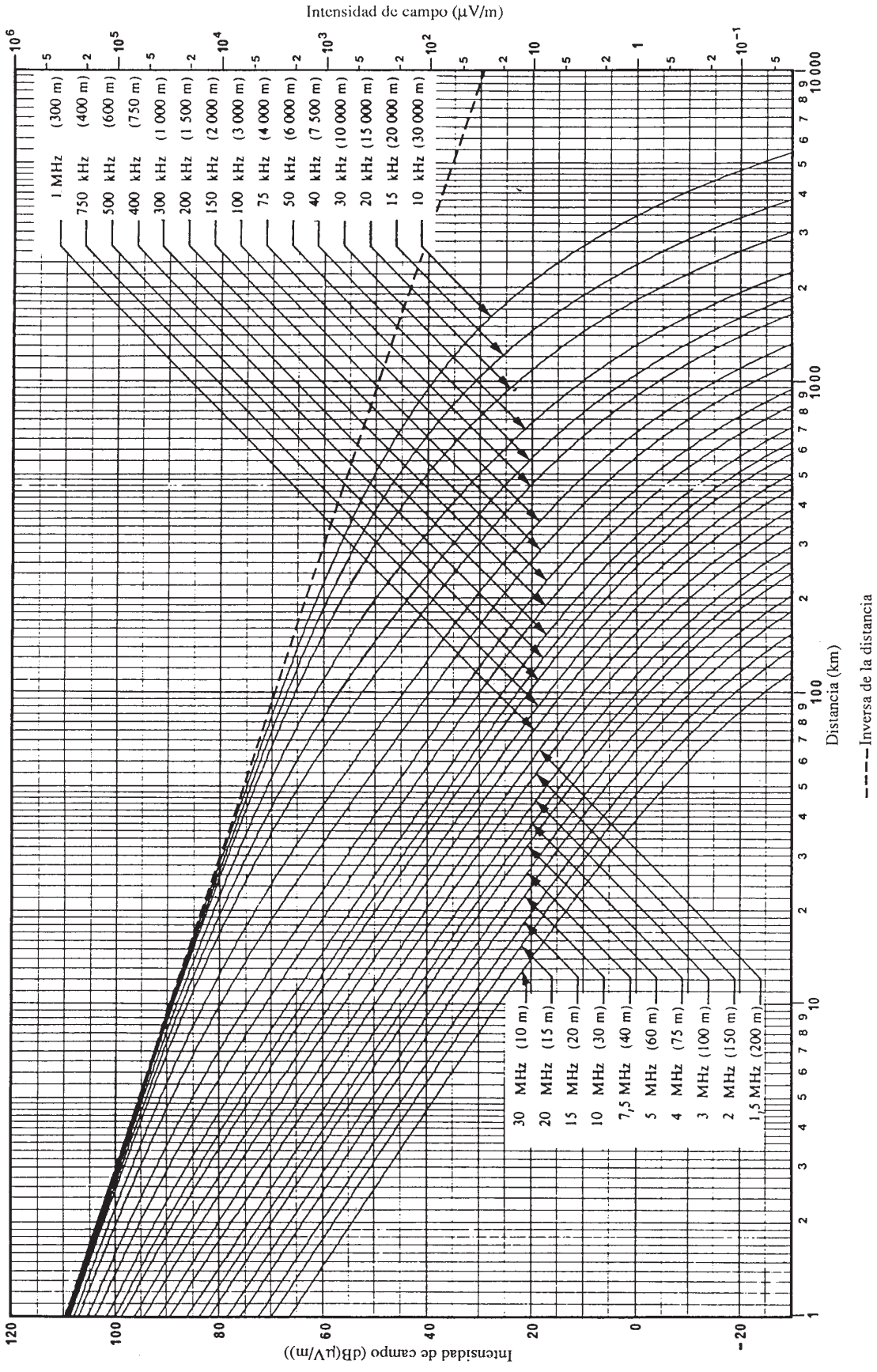


FIGURA 9

Curvas de propagación de la onda de superficie; tierra muy seca, $\sigma = 10^{-4}$ S/m, $\varepsilon = 3$

FIGURA 10

Curvas de propagación de la onda de superficie; hielo de agua dulce, –1 °C, $\sigma = 3 \times 10^{-5}$ S/m, $\varepsilon = 3$



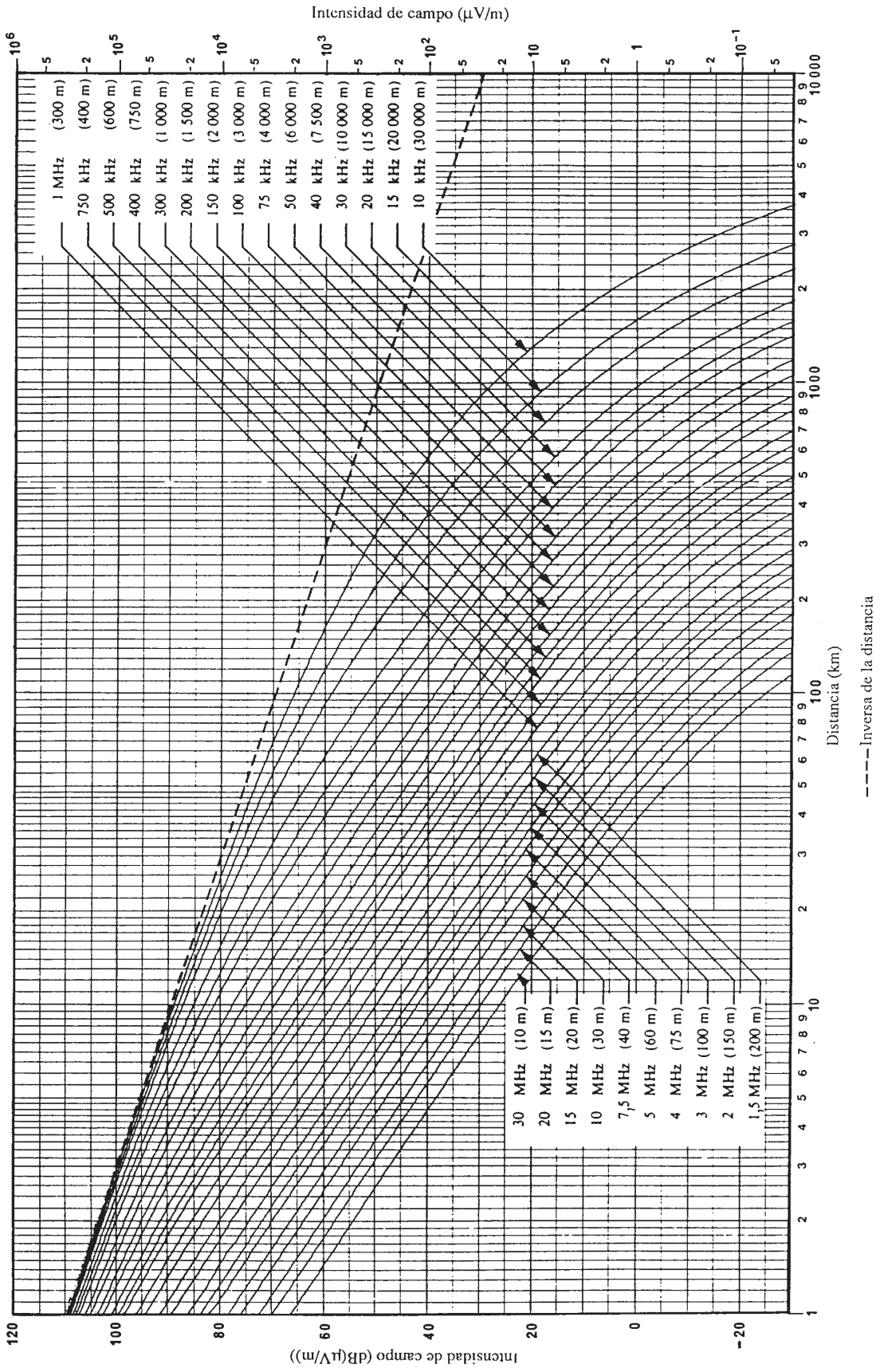


FIGURA 11

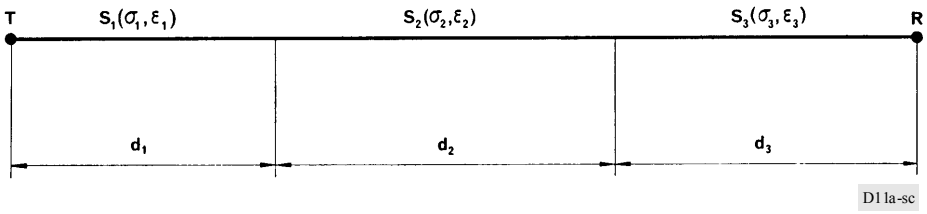
Curvas de propagación de la onda de superficie; hielo de agua dulce, –10 °C, σ = –10–5 S/m, ε = 3

Anexo 2

Aplicación a trayectos mixtos (trayectos inhomogéneos)

1 Las Figs. 14 a 50 de este Anexo pueden utilizarse para determinar la propagación por trayectos mixtos (Tierra lisa no homogénea), como se indica a continuación:

Esos trayectos pueden estar constituidos por las secciones S_1, S_2, S_3, etc., de longitudes d_1, d_2, d_3, etc., cuyas conductividades y permitividad son σ_1, ε_1; σ_2,ε_2; σ_3, ε_3, tal como se indica en la ilustración para tres secciones:



El método de Millington utilizado en este Anexo para determinar la propagación sobre trayectos mixtos, es el más preciso disponible y satisface la condición de reciprocidad. En su aplicación se consideran disponibles las curvas correspondientes a los distintos tipos de terreno de las secciones S_1, S_2, S_3, etc., supuestas individualmente homogéneas; también se suponen dichas curvas trazadas con relación a un mismo origen T, definido, por ejemplo, mediante una curva «inversa de la distancia». Los valores para cualquier otro origen podrán así obtenerse con sólo aplicar un coeficiente.

Se escoge entonces para una determinada frecuencia la curva correspondiente a la sección S_1, y se determina el valor de la intensidad de campo $E_1(d_1)$ en dB(μV/m) a la distancia d_1. Mediante la curva correspondiente a S_2 se determinan las intensidades de campo $E_2(d_1)$ y $E_2(d_1 + d_2)$ y, procediendo de la misma manera con la curva correspondiente a la sección S_3, se determinan las intensidades de campo $E_3(d_1 + d_2)$ y $E_3(d_1 + d_2 + d_3)$ y así sucesivamente.

La ecuación (1) define así una intensidad de campo recibida E_R:

$$E_R = E_1(d_1) - E_2(d_1) + E_2(d_1 + d_2) - E_3(d_1 + d_2) + E_3(d_1 + d_2 + d_3) \quad (1)$$

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

$$E_T = E_3(d_3) - E_2(d_3) + E_2(d_3 + d_2) - E_1(d_3 + d_2) + E_1(d_3 + d_2 + d_1) \quad (2)$$

La intensidad de campo requerida viene dada por $\frac{1}{2}[E_R + E_T]$, siendo evidente la forma de extender el cálculo a un número mayor de secciones.

En principio este método puede extenderse a los cambios de fase, siempre y cuando se disponga de las correspondientes curvas de la fase en función de la distancia para terrenos homogéneos. Esta información resultará indispensable para las aplicaciones relacionadas con los sistemas de navegación. La utilización del método suele ser fácil, sobre todo con la ayuda de un computador.

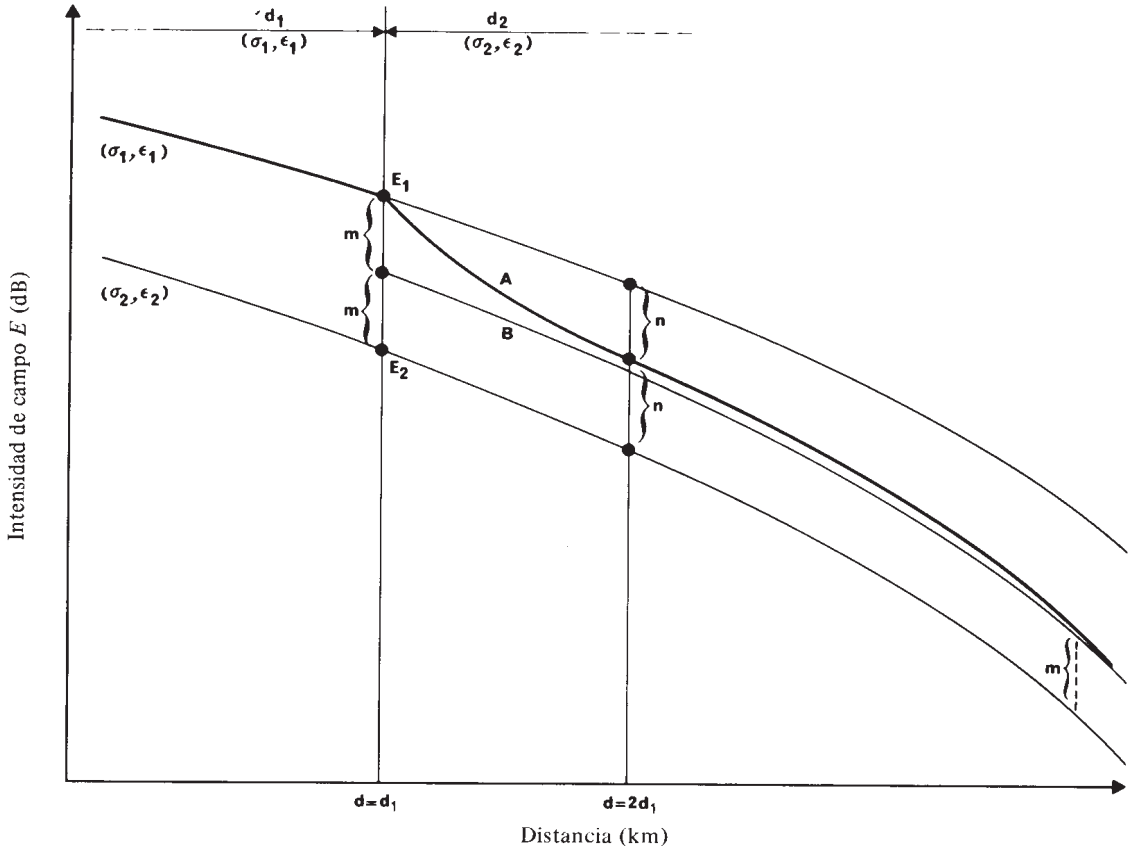
2 A efectos de planificación, cuando se requiere conocer la zona de servicio de un determinado transmisor, es conveniente un *procedimiento gráfico*, basado en el mismo método, para el cálculo rápido y general de la distancia a la cual la intensidad de campo tiene un valor determinado.

A continuación se ofrece una breve descripción del procedimiento gráfico.

La Fig. 12 se aplica a un trayecto compuesto por dos secciones homogéneas con características eléctricas σ_1, ε_1 y σ_2, ε_2 y longitudes d_1 y d_2 respectivamente. Se supone que en este ejemplo, el módulo de la permitividad compleja (constante dieléctrica) $| \varepsilon'(\sigma_1, \varepsilon_1) |$ es superior al módulo $| \varepsilon'(\sigma_2, \varepsilon_2) |$. Para distancias d superiores a d_1, la curva de intensidad de campo obtenida por el método de Millington (§ 1) se halla entre las curvas correspondientes a las dos secciones de propiedades eléctricas diferentes, $E(\sigma_1, \varepsilon_1)$ y $E(\sigma_2, \varepsilon_2)$. Para la distancia $d = 2\ d_1$, en que d_1 es la distancia desde el transmisor al límite de las dos secciones, la curva pasa por el punto a media distancia entre los correspondientes a las curvas $E(\sigma_1, \varepsilon_1)$ y $E(\sigma_2, \varepsilon_2)$, siempre que la intensidad de campo se exprese en forma lineal en decibelios. Además, la misma curva se aproxima a una asíntota, que difiere en m dB de la curva $E(\sigma_2, \varepsilon_2)$, según se indica en la Fig. 12, donde m es la mitad de la diferencia en dB entre las dos curvas $E(\sigma_1, \varepsilon_1)$ y $E(\sigma_2, \varepsilon_2)$ para $d = d_1$. El punto para $d = 2\ d_1$ y la asíntota permiten trazar fácilmente la curva de intensidad de campo resultante.

FIGURA 12

Comparación de resultados



A: Curva de intensidad de campo calculada
B: Curva asíntota

0368-12

La Fig. 13 muestra también la curva para un trayecto de dos secciones, cuyas características eléctricas son σ_2, ε_2 en primer lugar, y a continuación σ_1, ε_1, y el módulo de la permitividad compleja $| \varepsilon'(\sigma_1, \varepsilon_1) |$ es superior al módulo $| \varepsilon'(\sigma_2, \varepsilon_2) |$. Cabe aplicar aquí el mismo procedimiento, teniendo presente que la asíntota es ahora paralela a la curva $E(\sigma_1, \varepsilon_1)$.

Para trayectos compuestos por más de dos secciones, cabe considerar separadamente cada cambio, del mismo modo que en el primer caso. La curva resultante debe ser una curva continua, y las

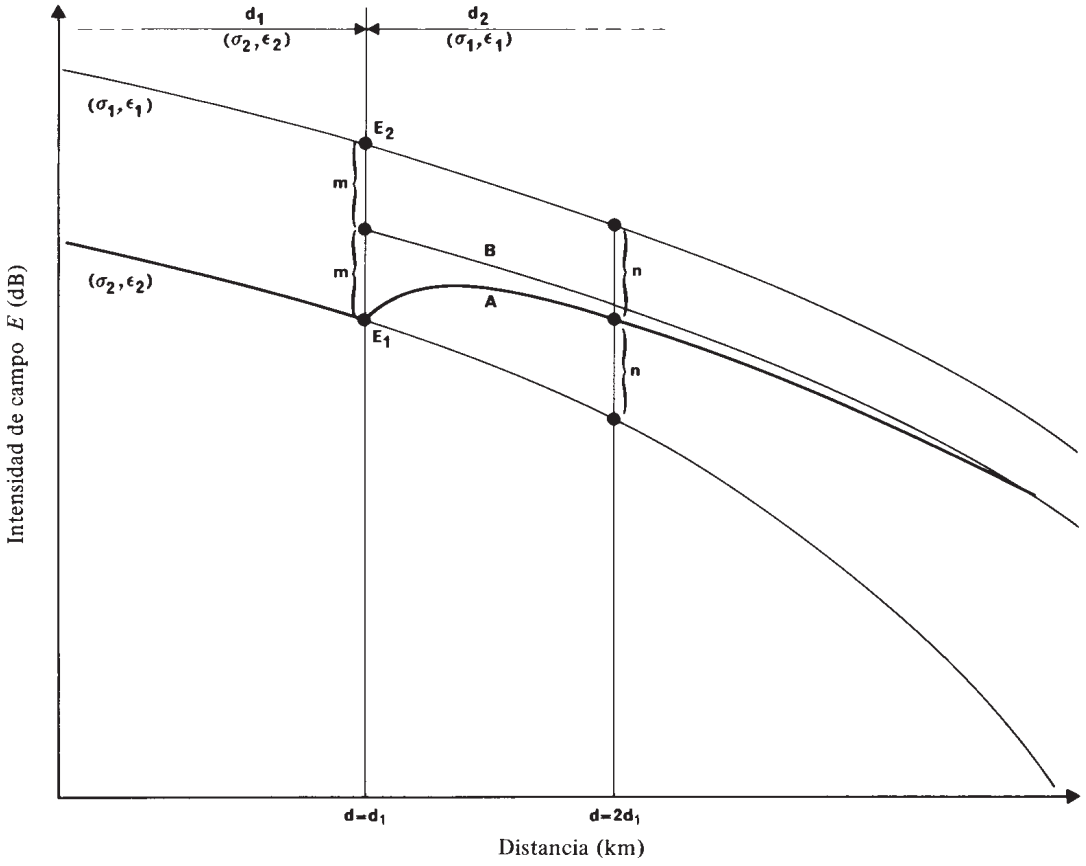
proporciones de curva están desplazadas paralelamente a la curva extrapolada en el extremo de la sección anterior.

La precisión del método gráfico depende de la diferencia de inclinación de las curvas de intensidad de campo y, por lo tanto, en cierto modo, de la frecuencia. Para la banda de ondas kilométricas, la diferencia entre el método descrito en el § 1 y este método aproximado suele ser insignificante, pero para la mayor parte de la banda de ondas hectométricas las diferencias pueden elevarse hasta 3 dB en la mayoría de los casos.

En las Figs. 14 a 50 aparecen curvas de la intensidad de campo en función de la distancia, con las características eléctricas del suelo como parámetro.

FIGURA 13

Comparación de resultados



A: Curva de intensidad de campo calculada
B: Curva asíntota

0368-13

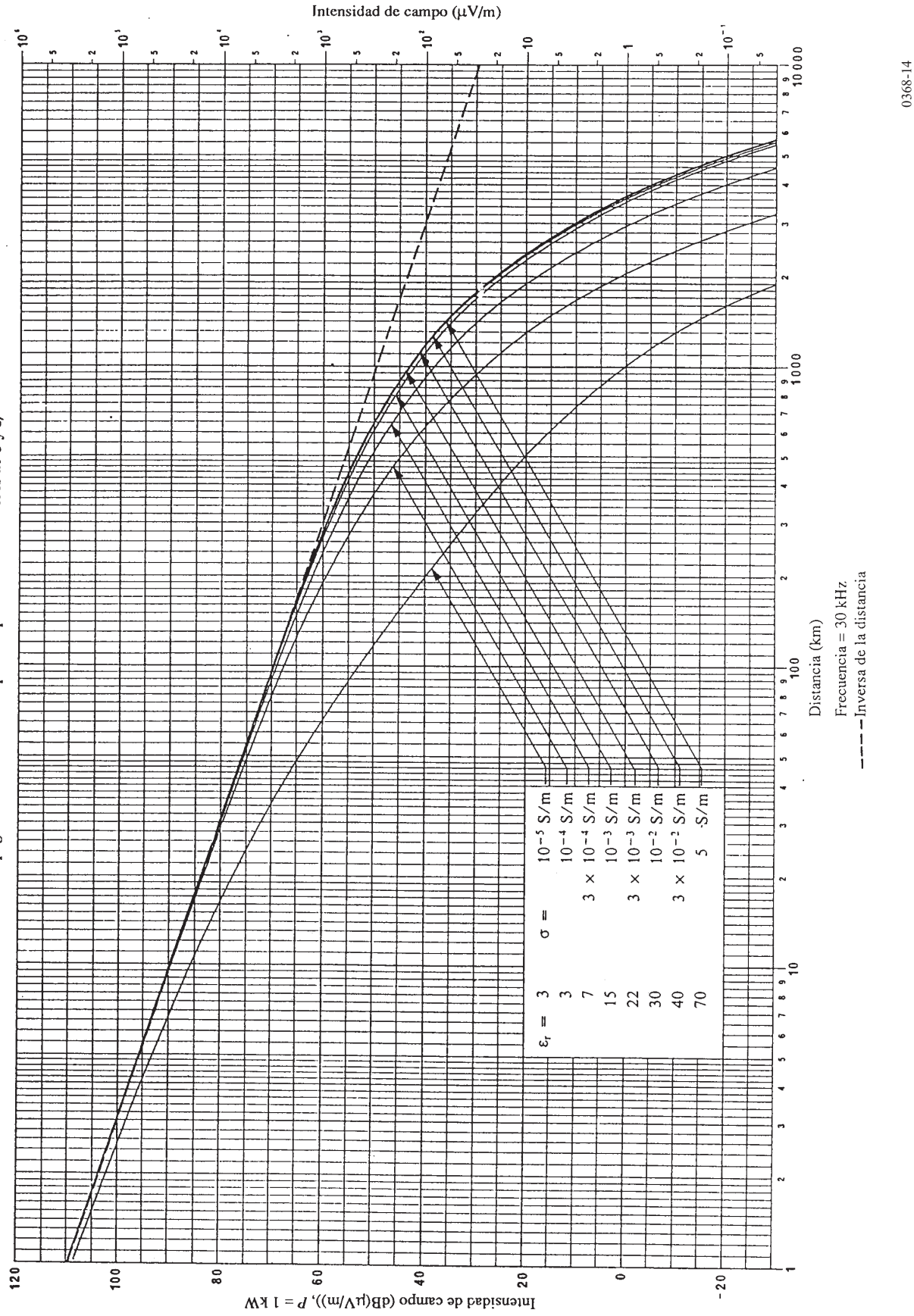


FIGURA 14

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

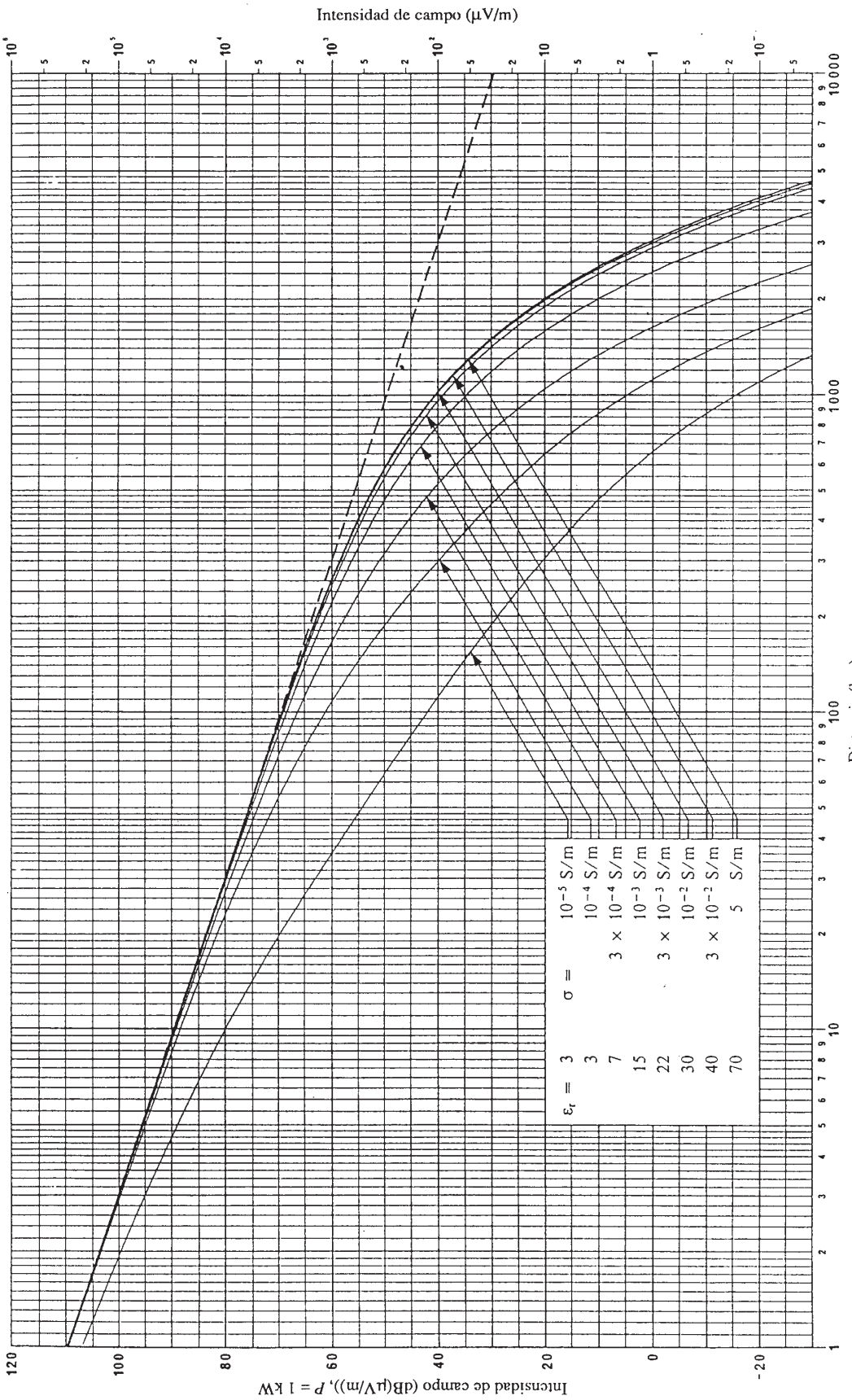


FIGURA 15

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

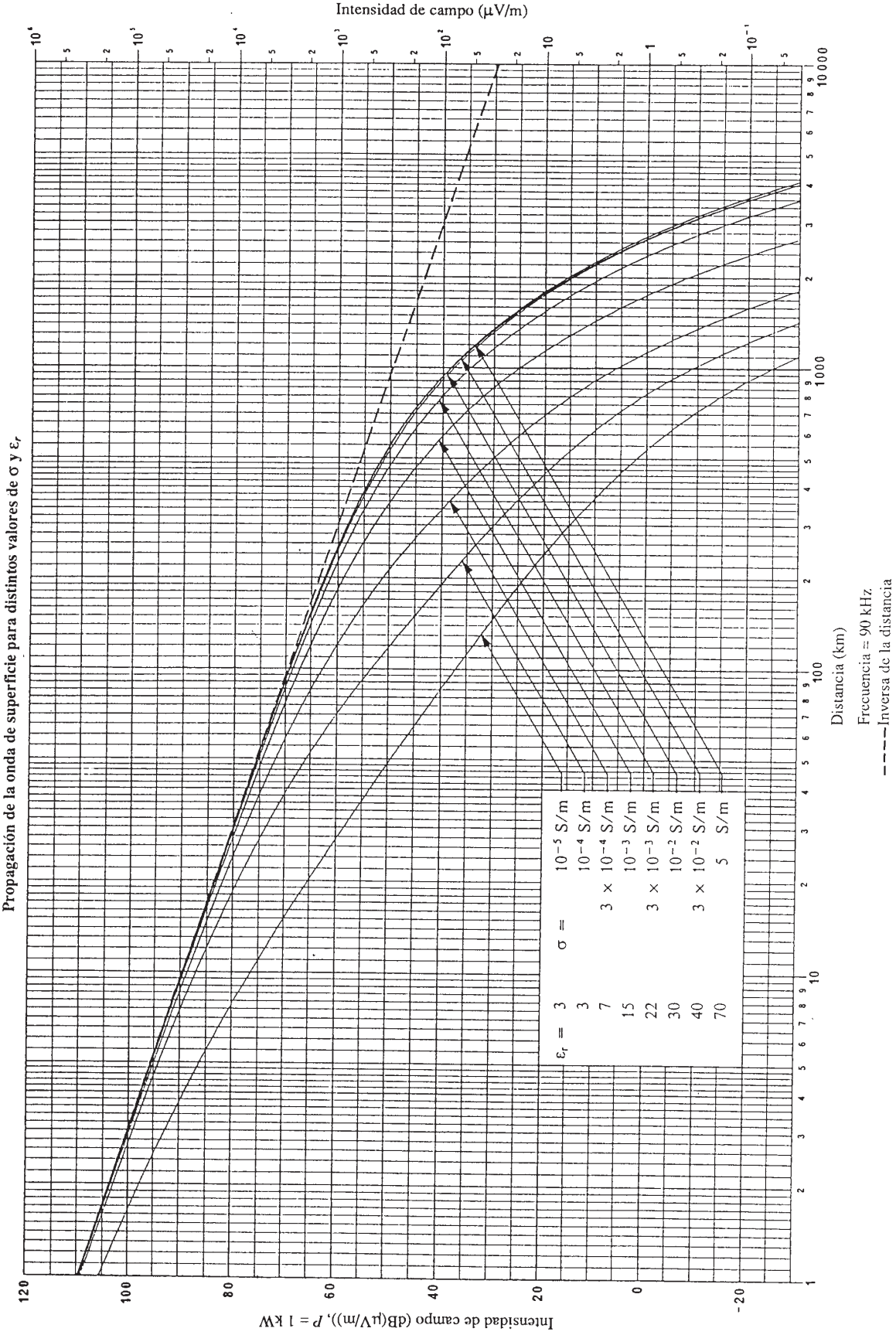


FIGURA 16

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

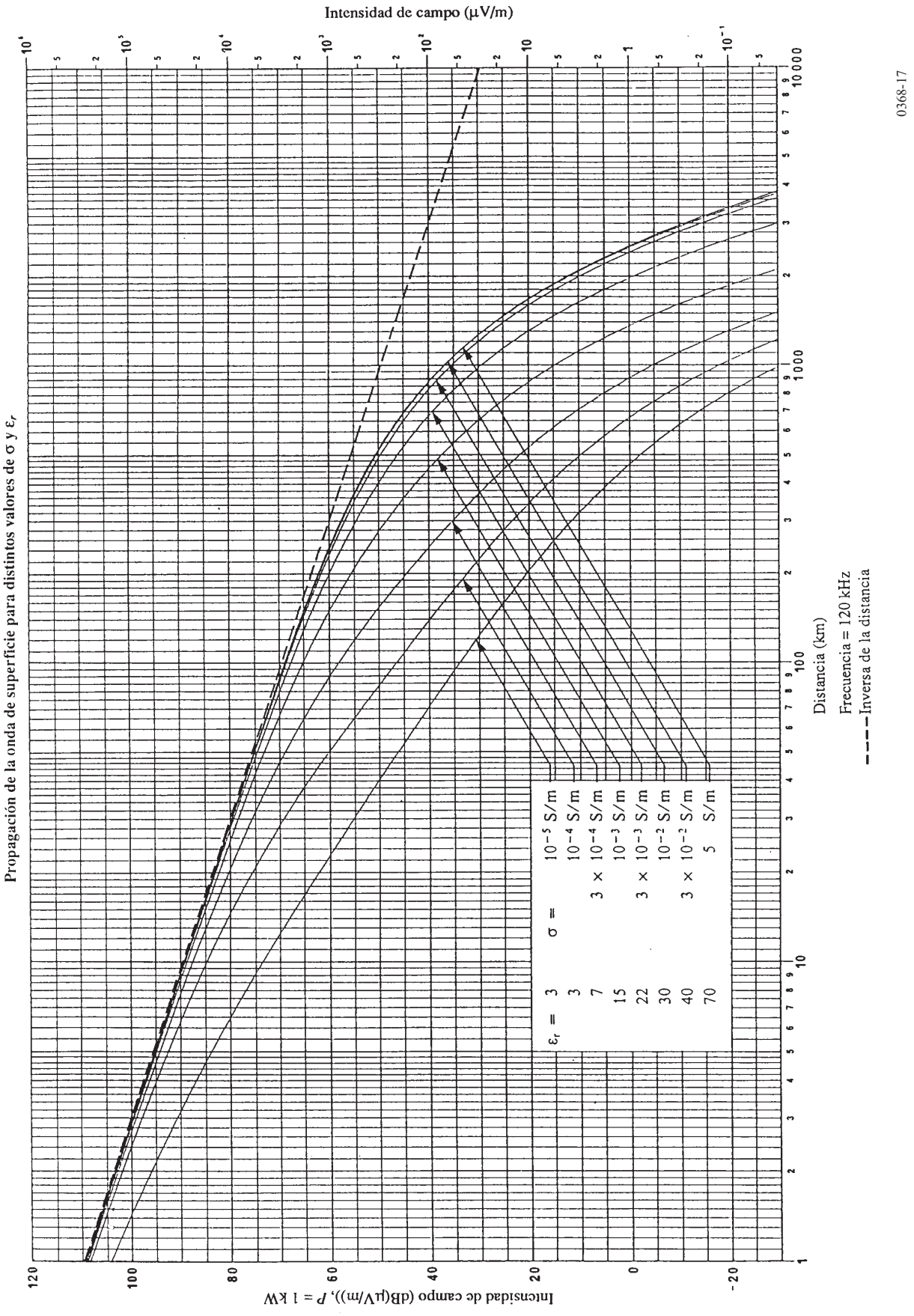


FIGURA 17

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

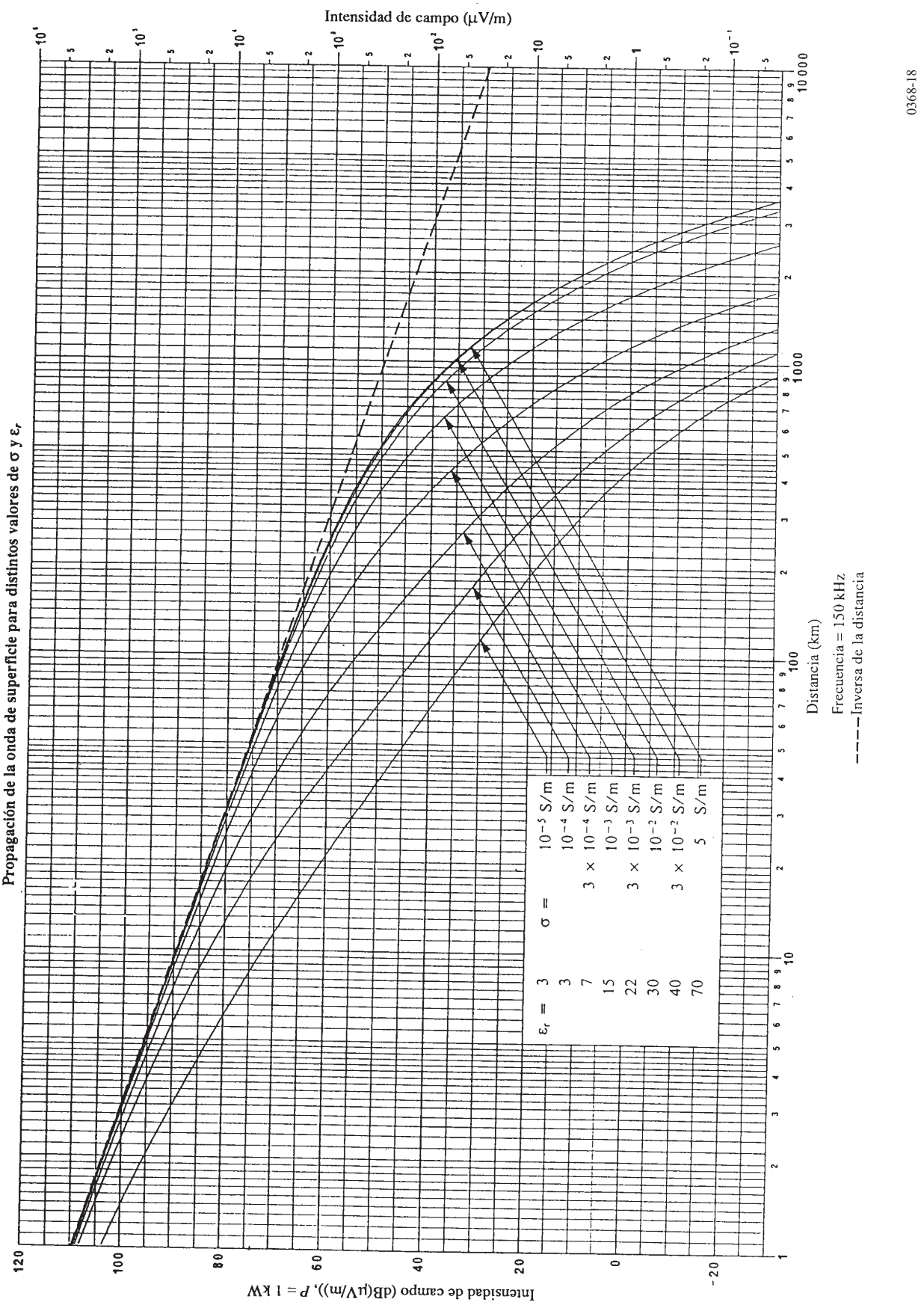


FIGURA 18

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

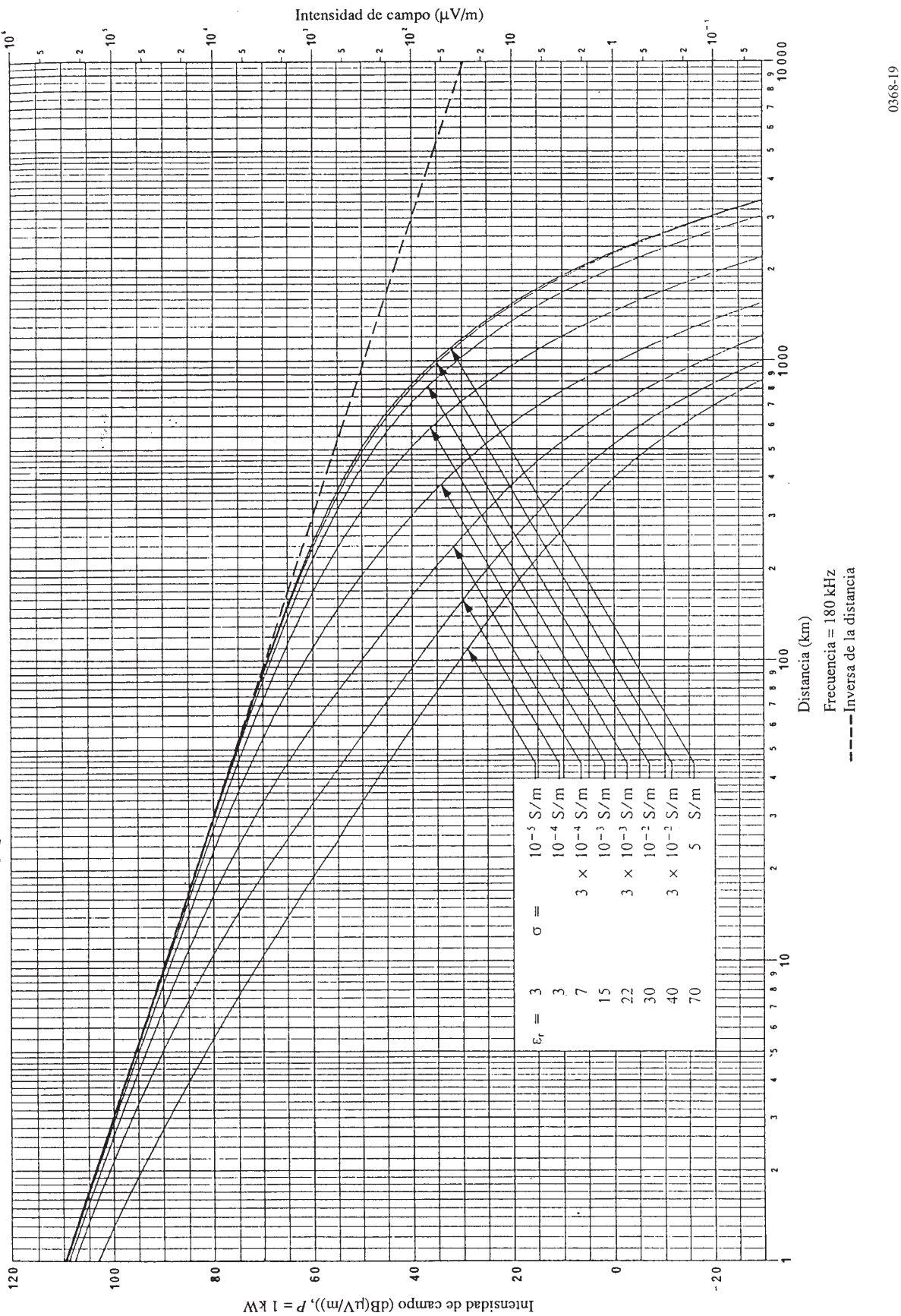


FIGURA 19

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

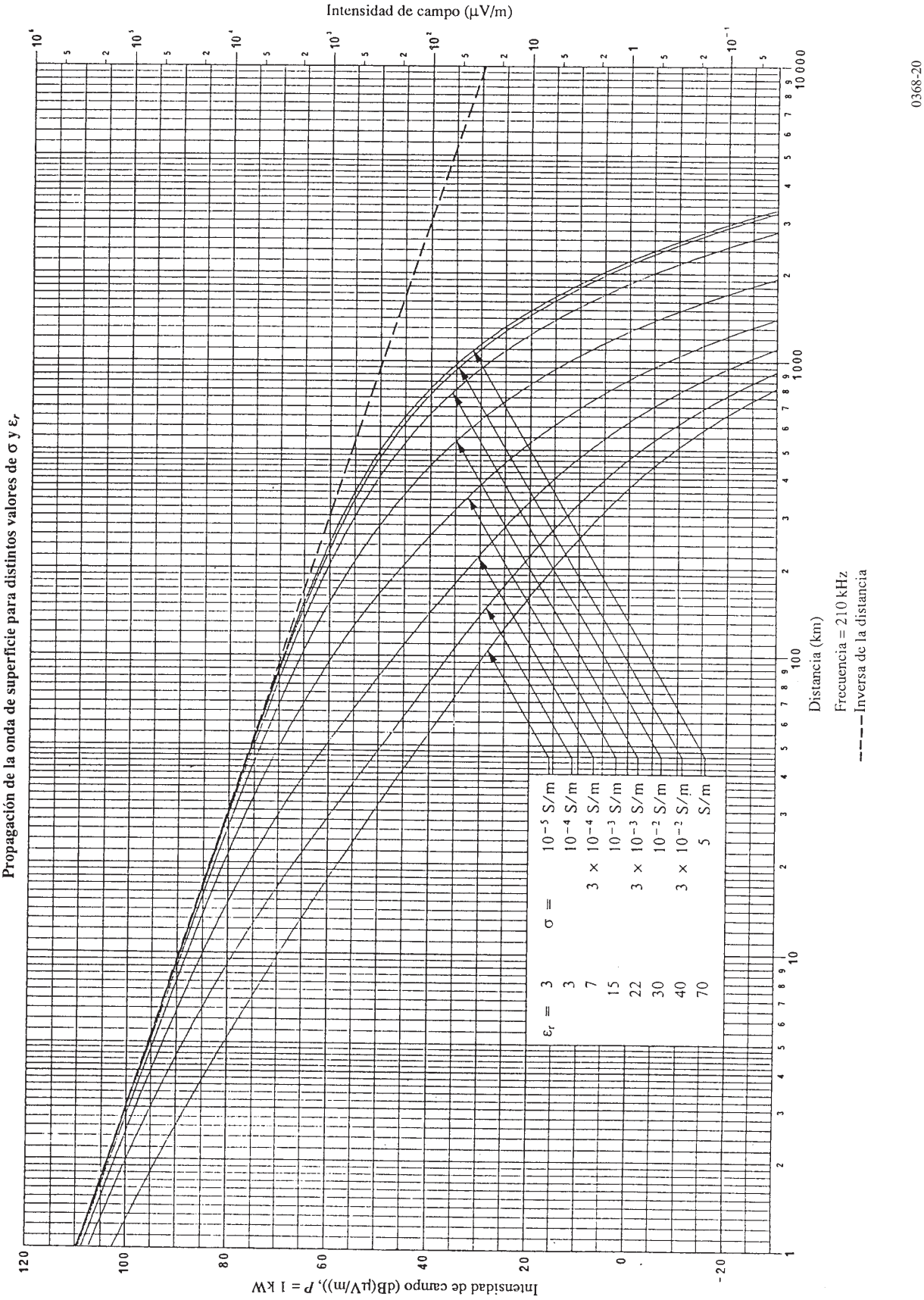


FIGURA 20

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

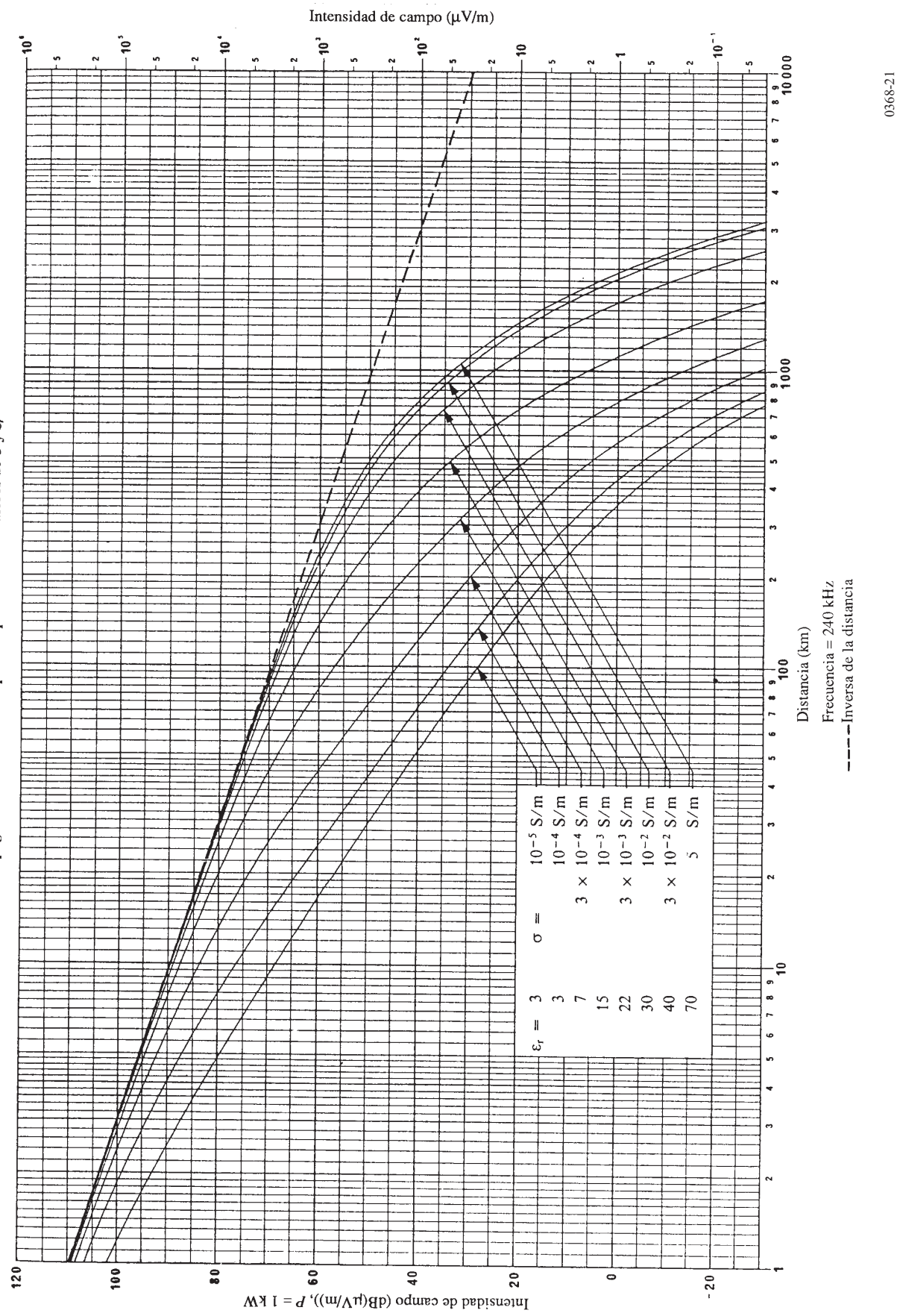


FIGURA 21

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

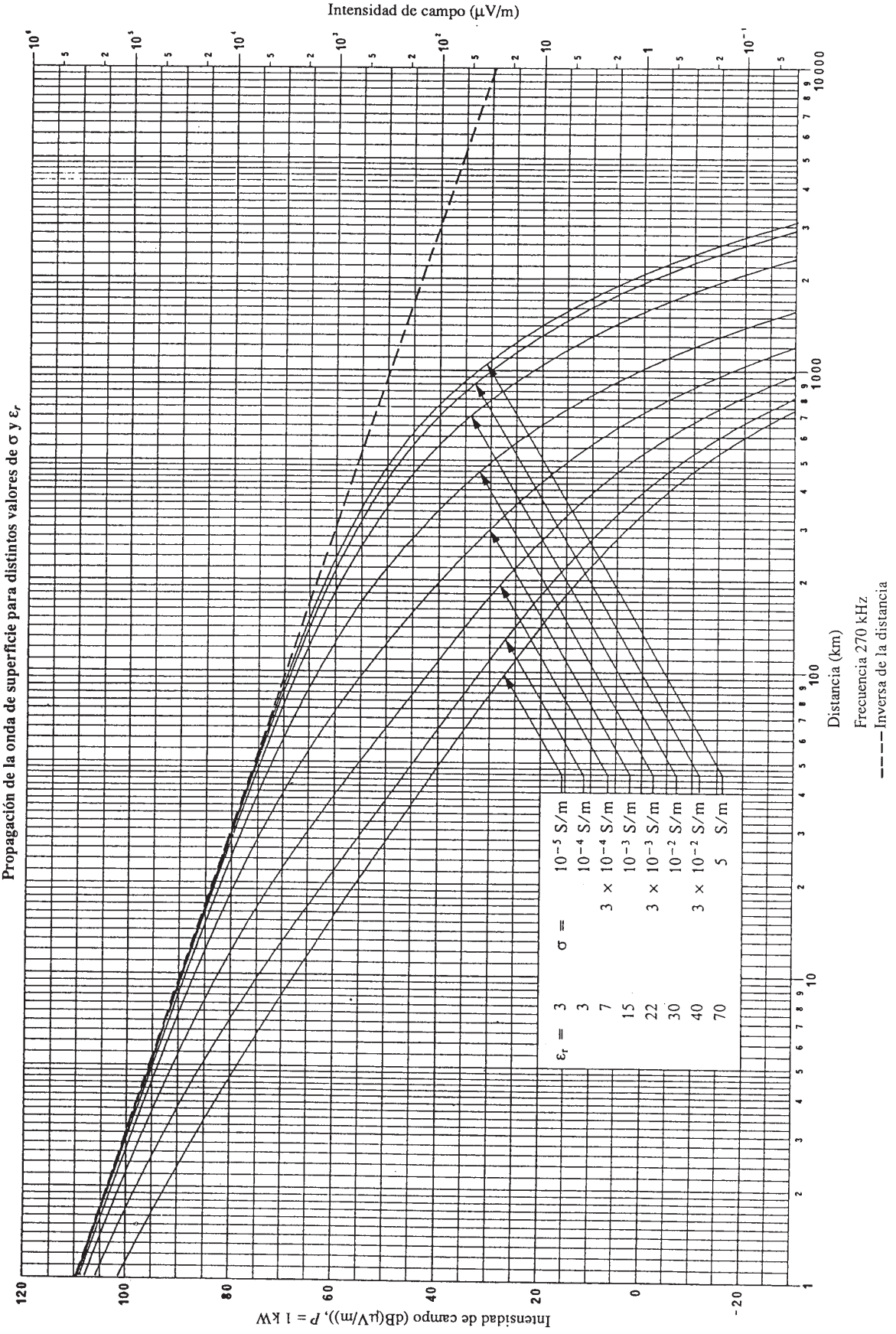


FIGURA 22

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

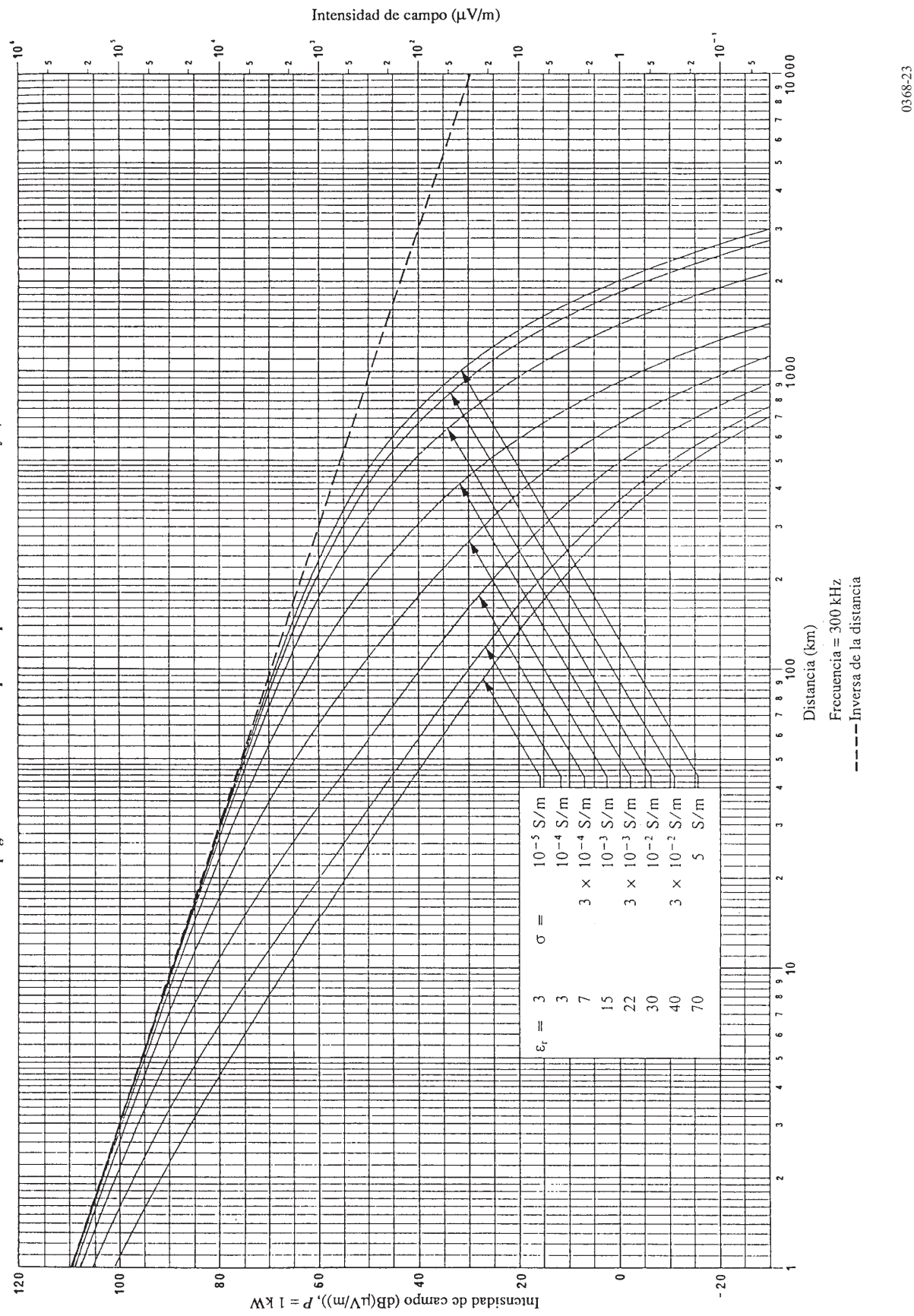


FIGURA 23

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

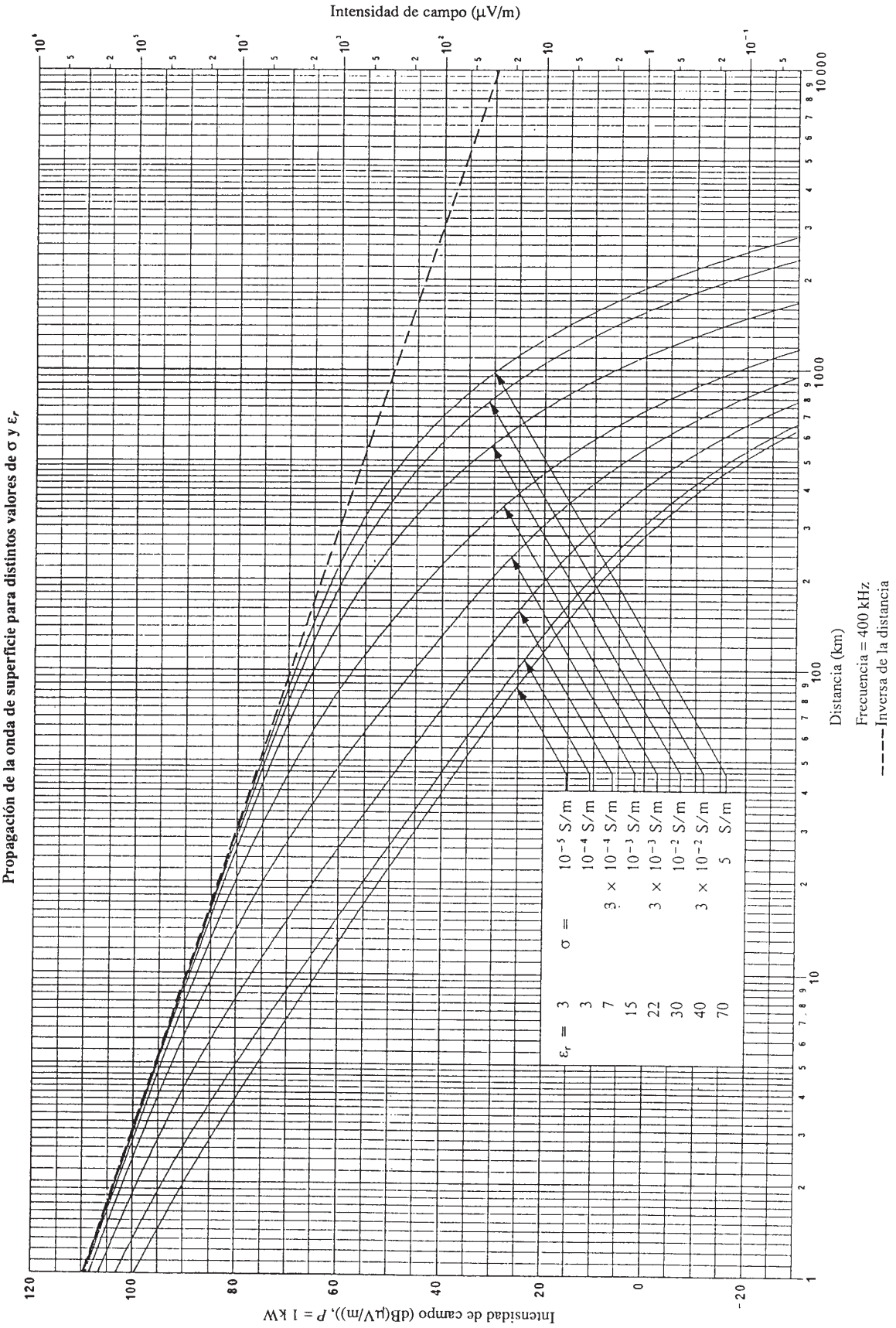


FIGURA 24

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

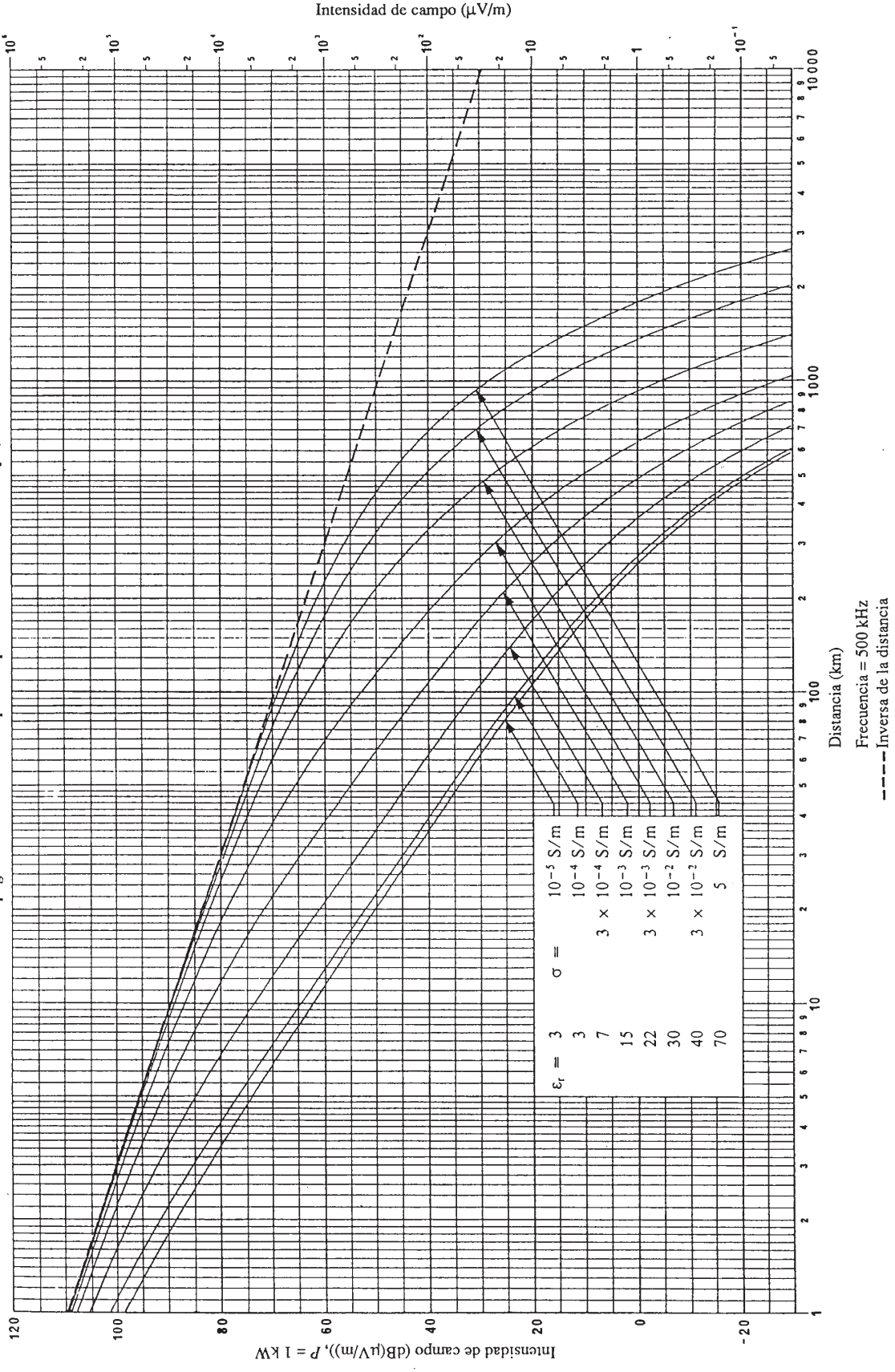


FIGURA 25

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

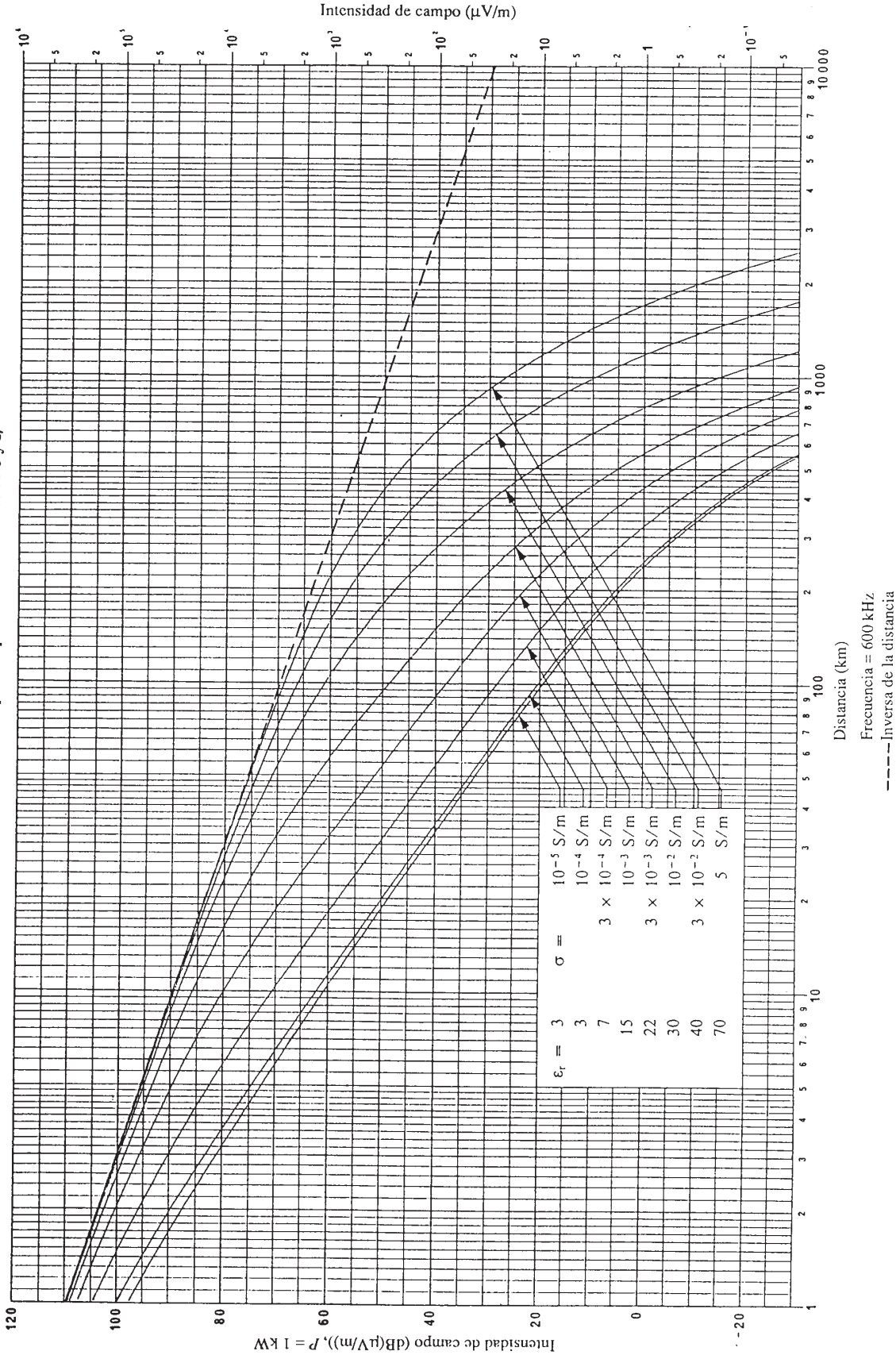


FIGURA 26

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

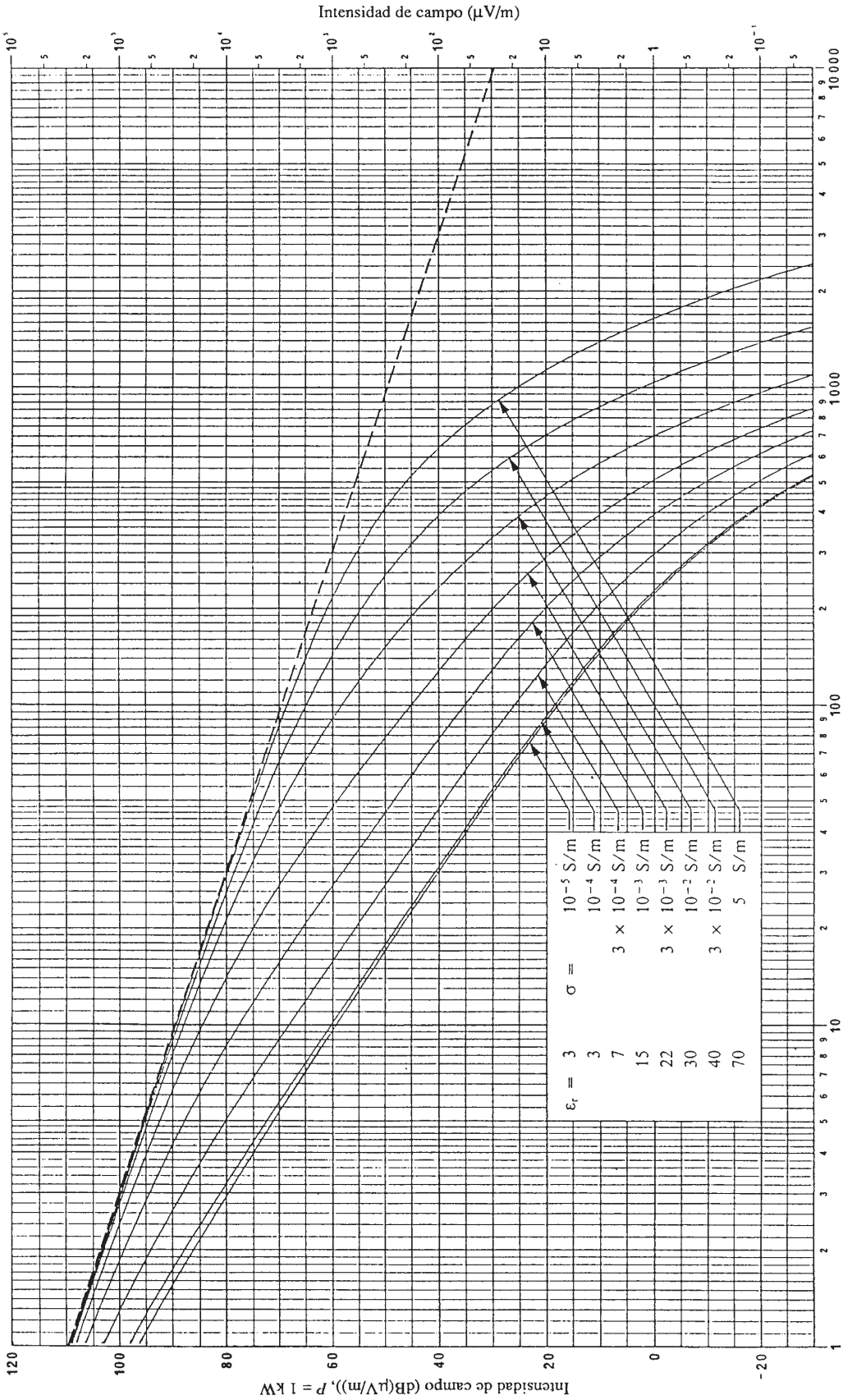


FIGURA 27

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

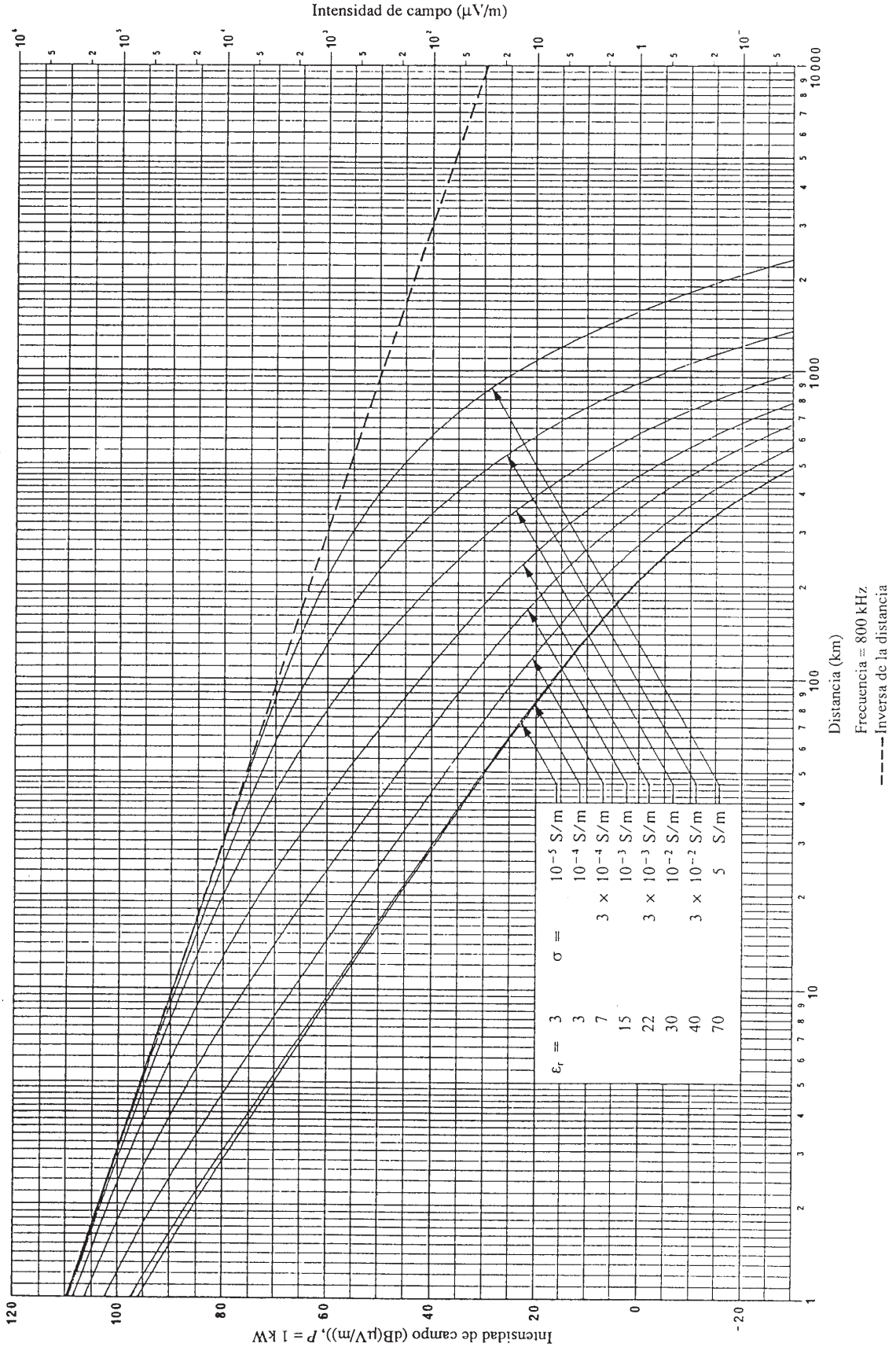


FIGURA 28

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

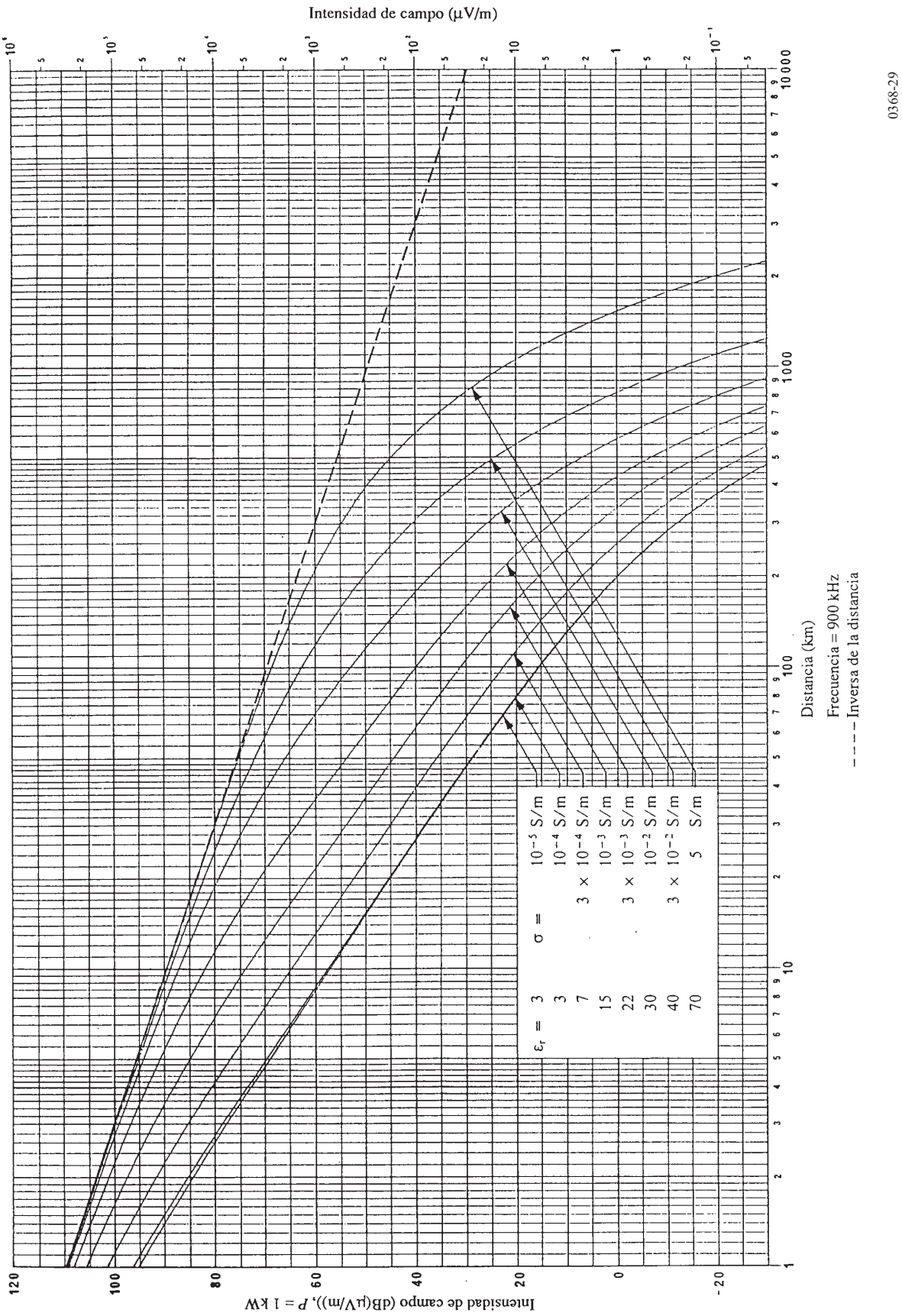


FIGURA 29

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

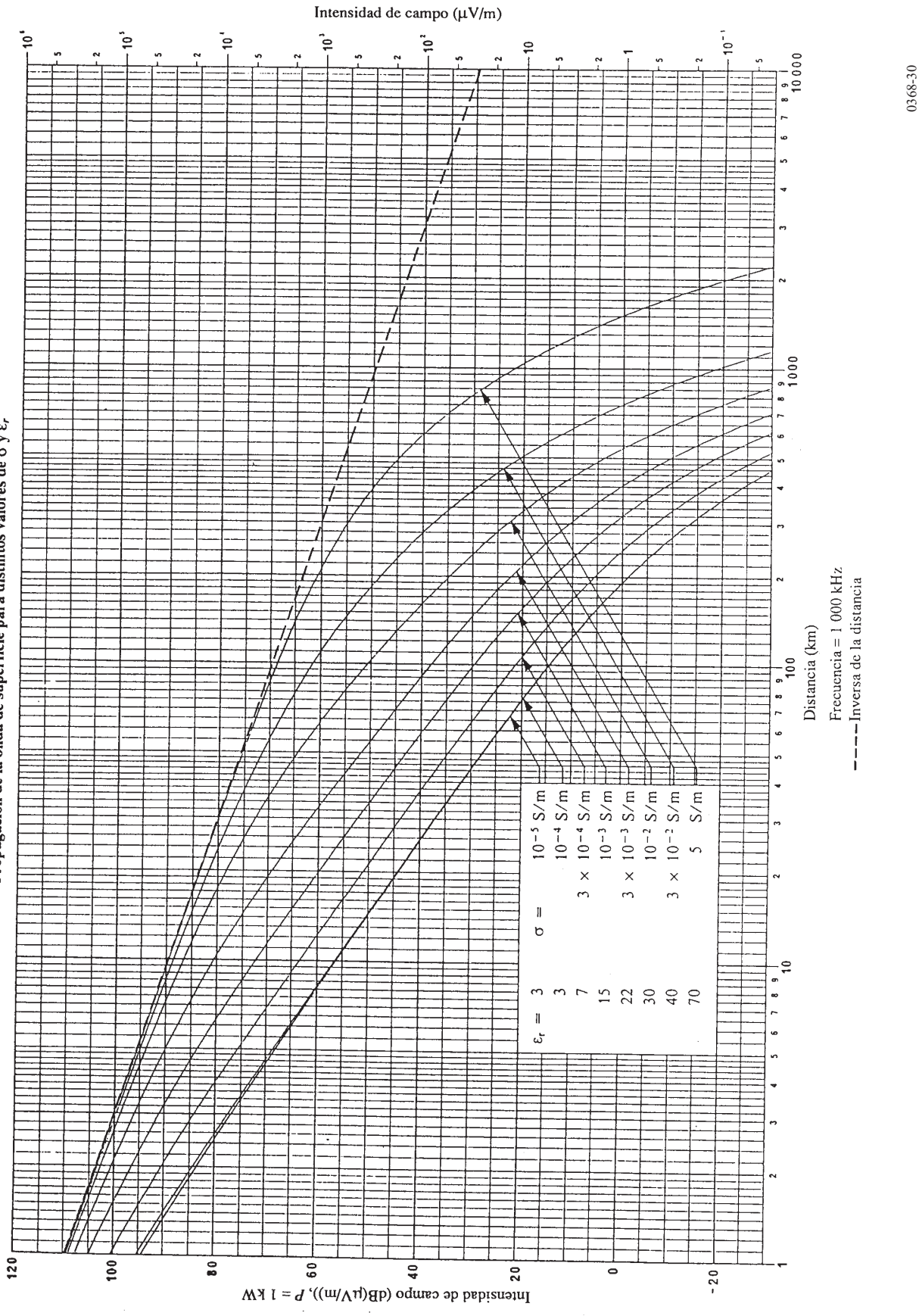


FIGURA 30

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

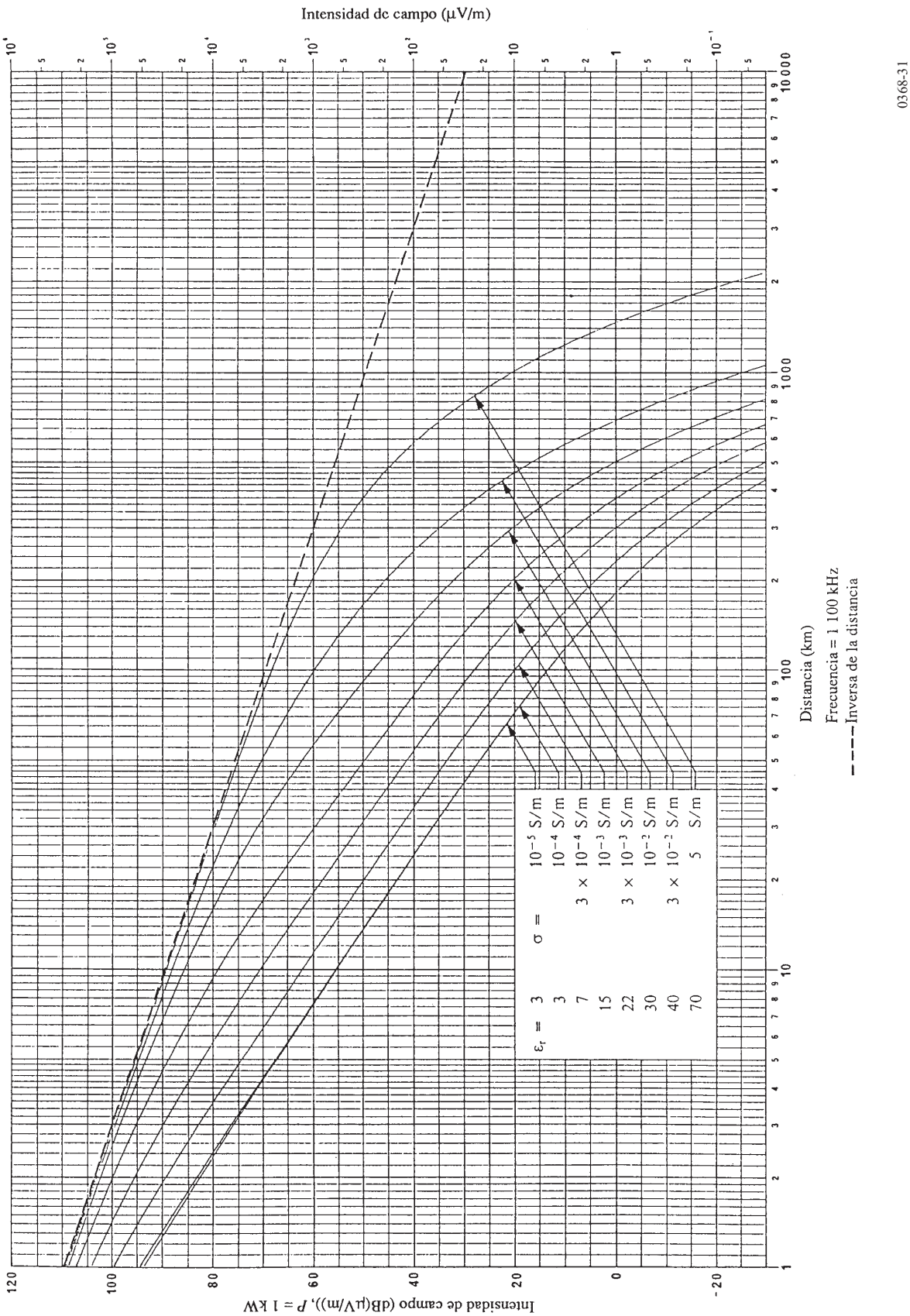


FIGURA 31

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

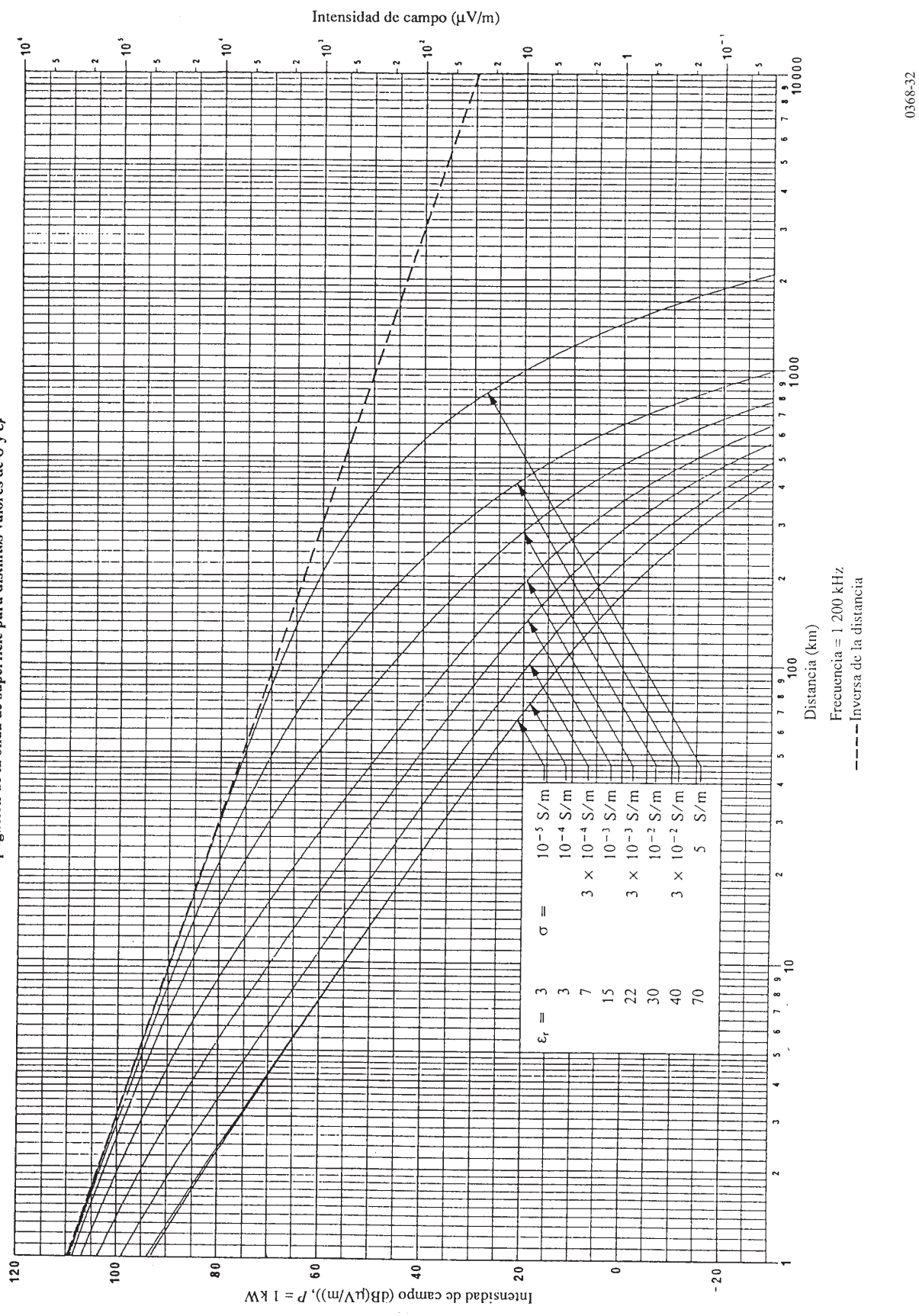


FIGURA 32

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

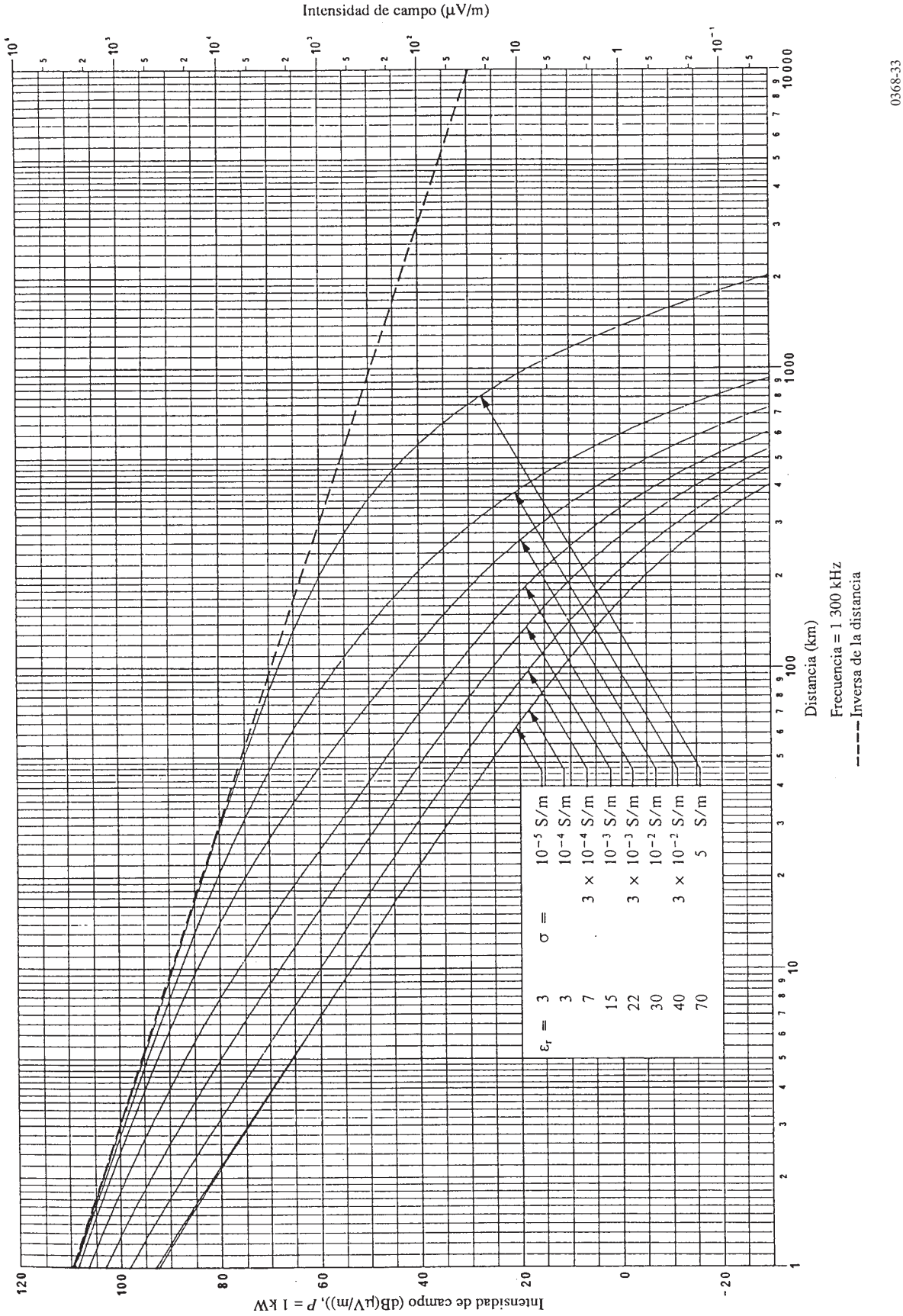


FIGURA 33

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

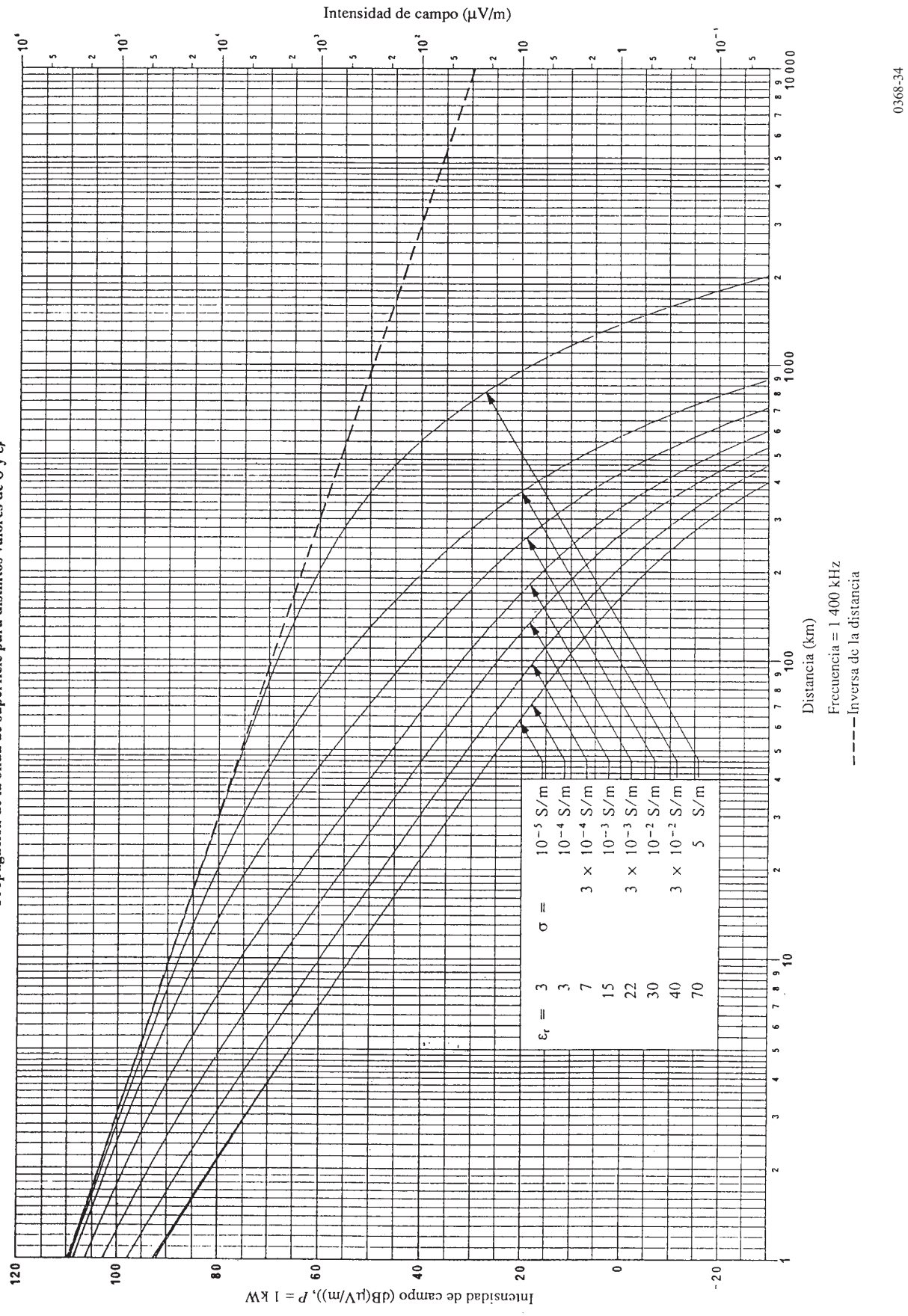


FIGURA 34

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

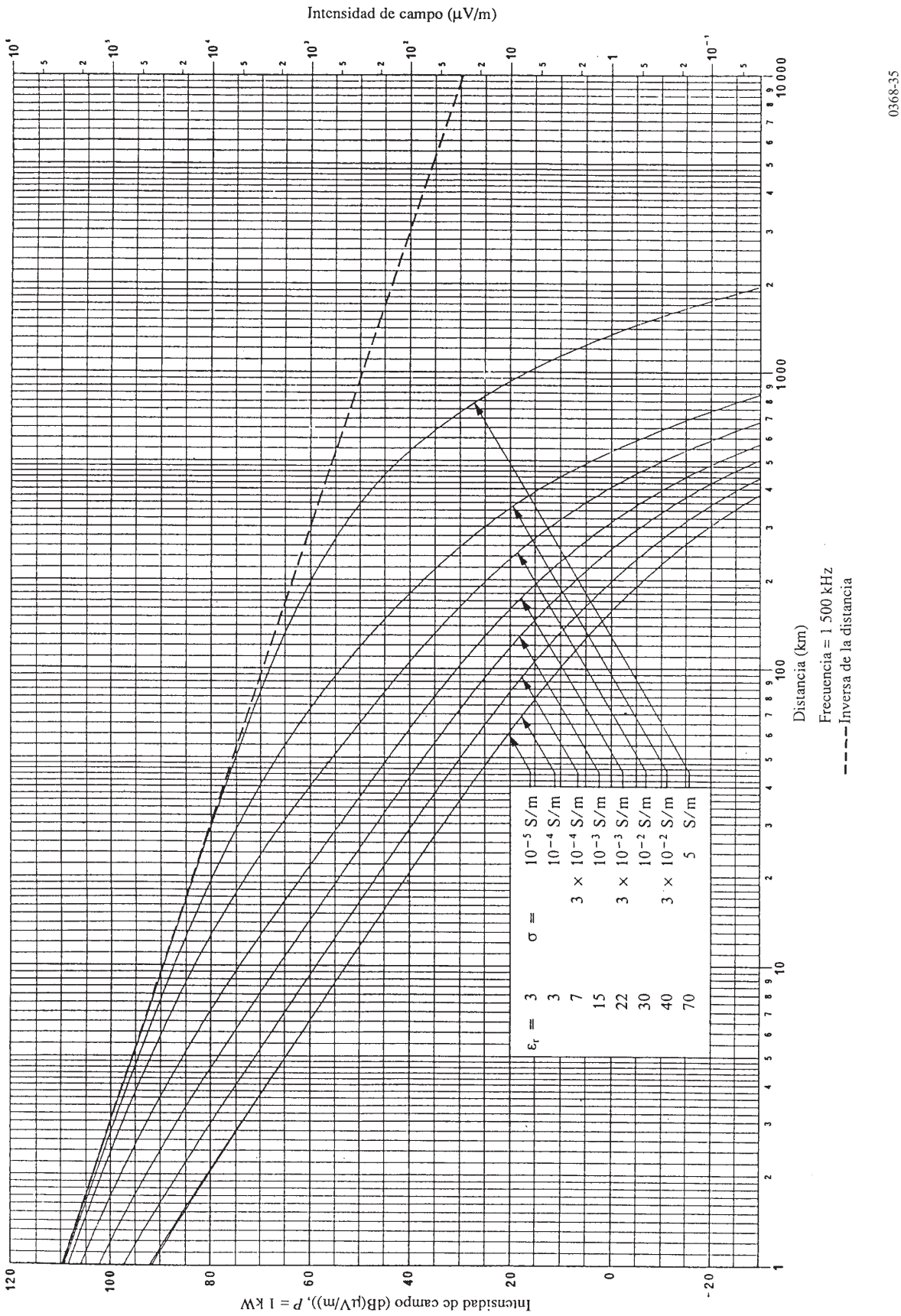


FIGURA 35

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

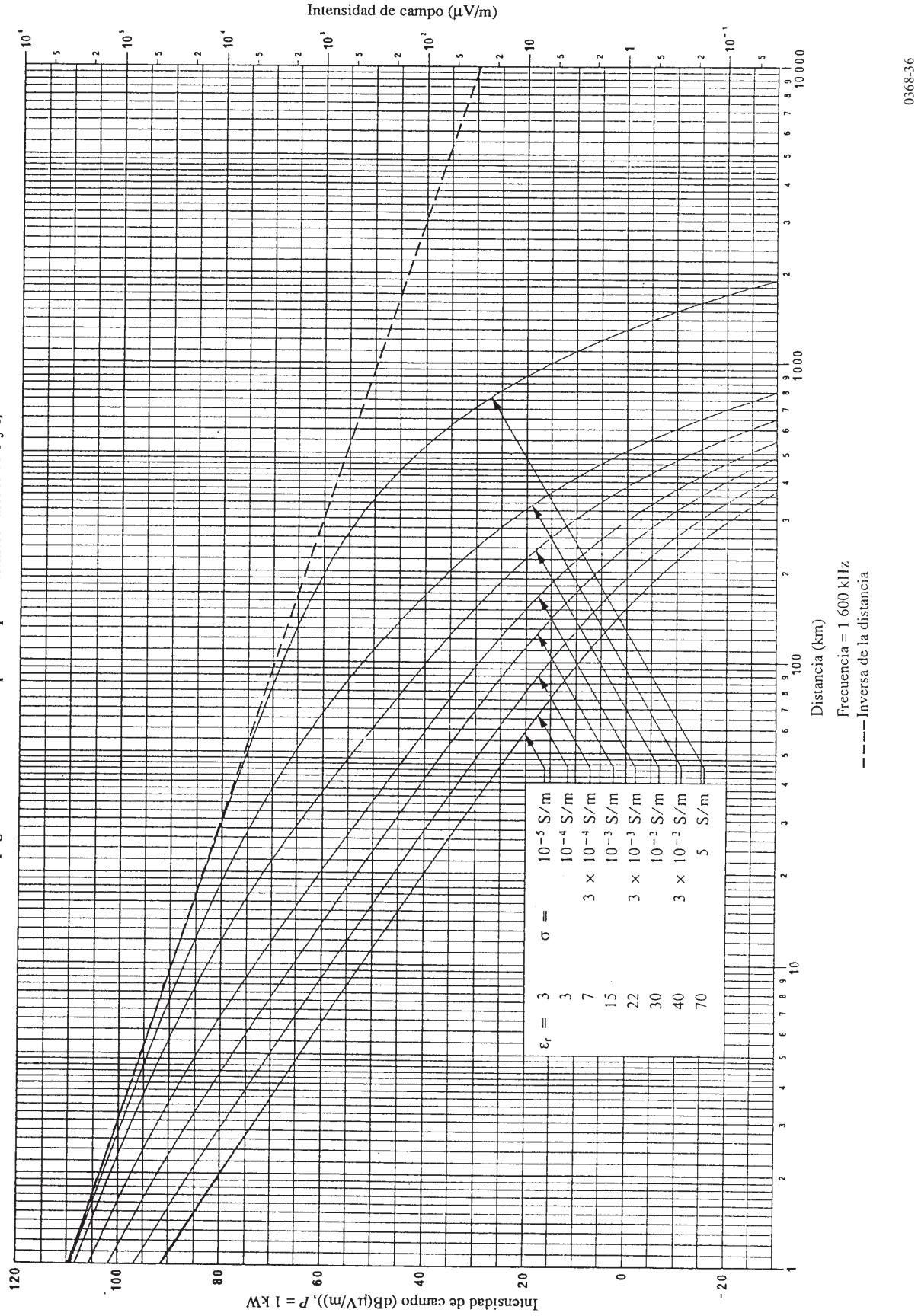


FIGURA 36

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

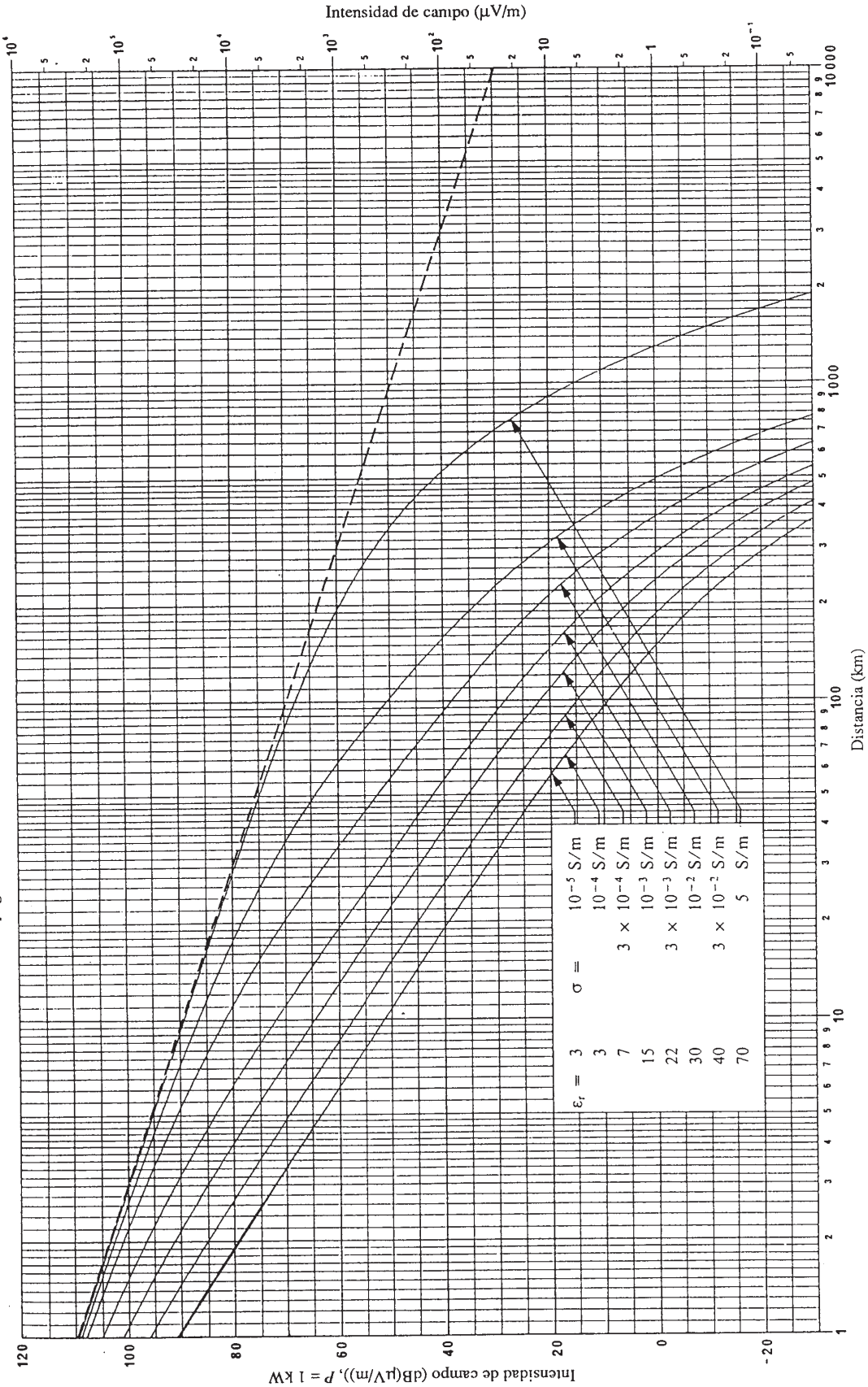


FIGURA 37

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

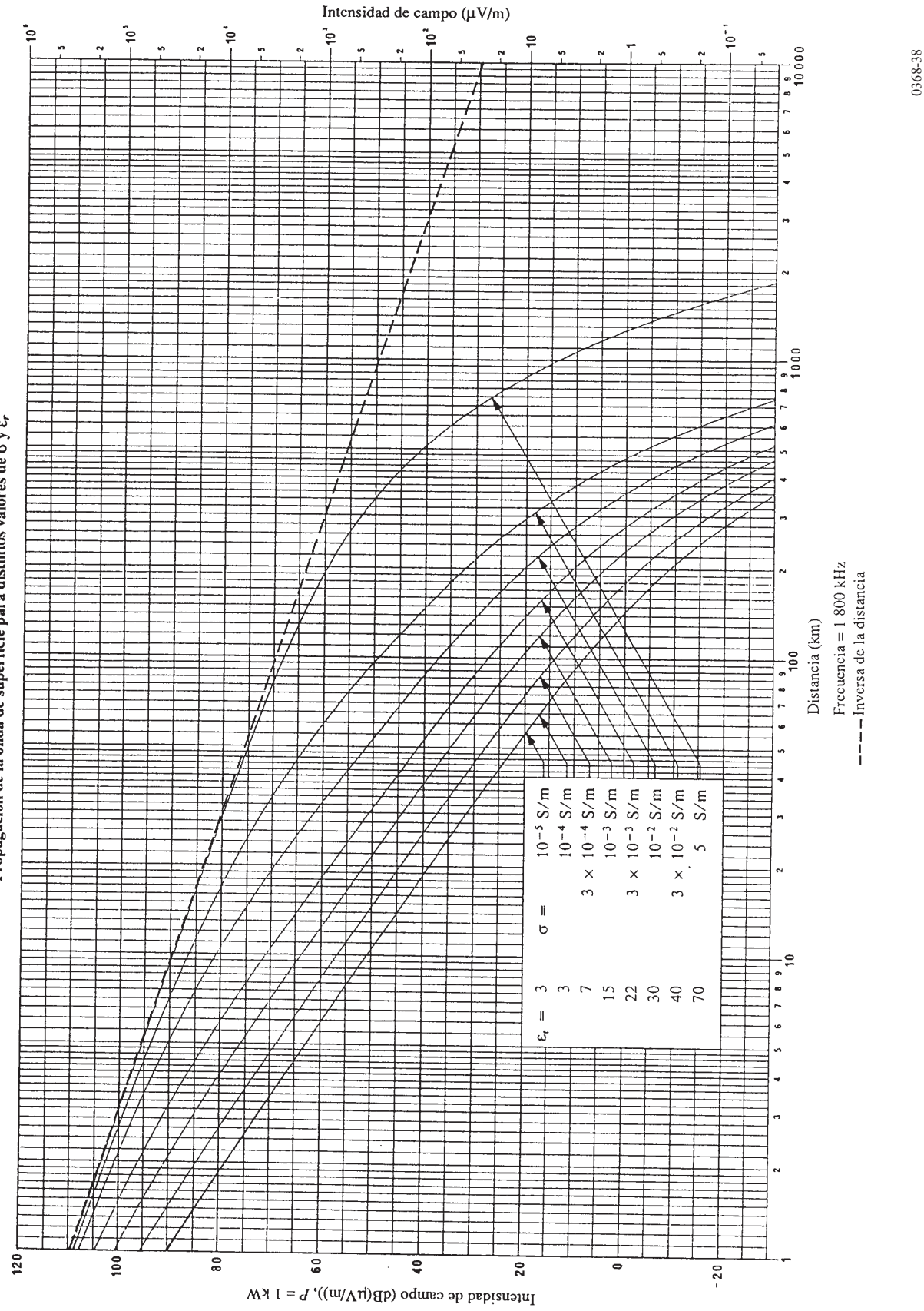


FIGURA 38

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

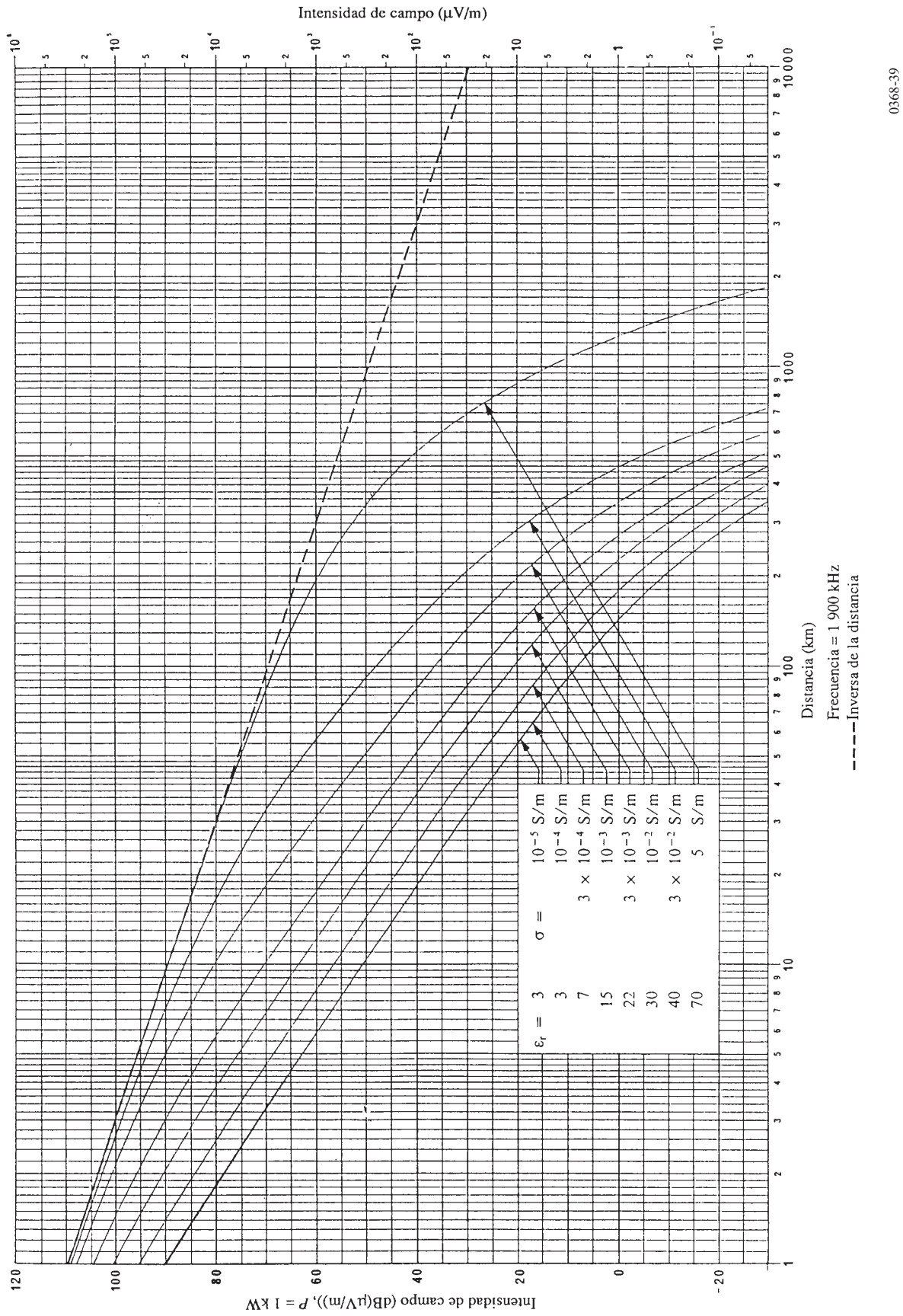


FIGURA 39

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

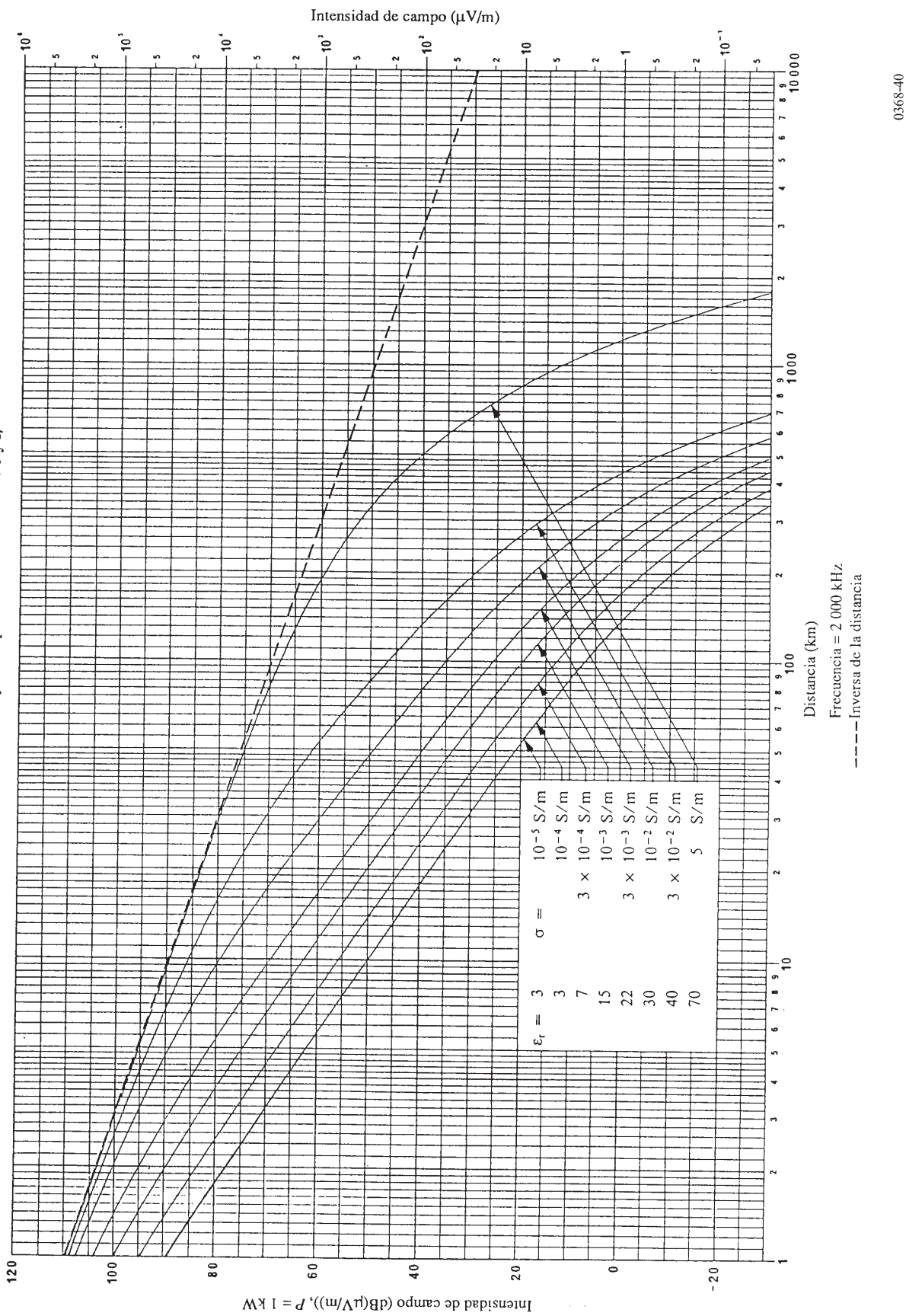


FIGURA 40

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

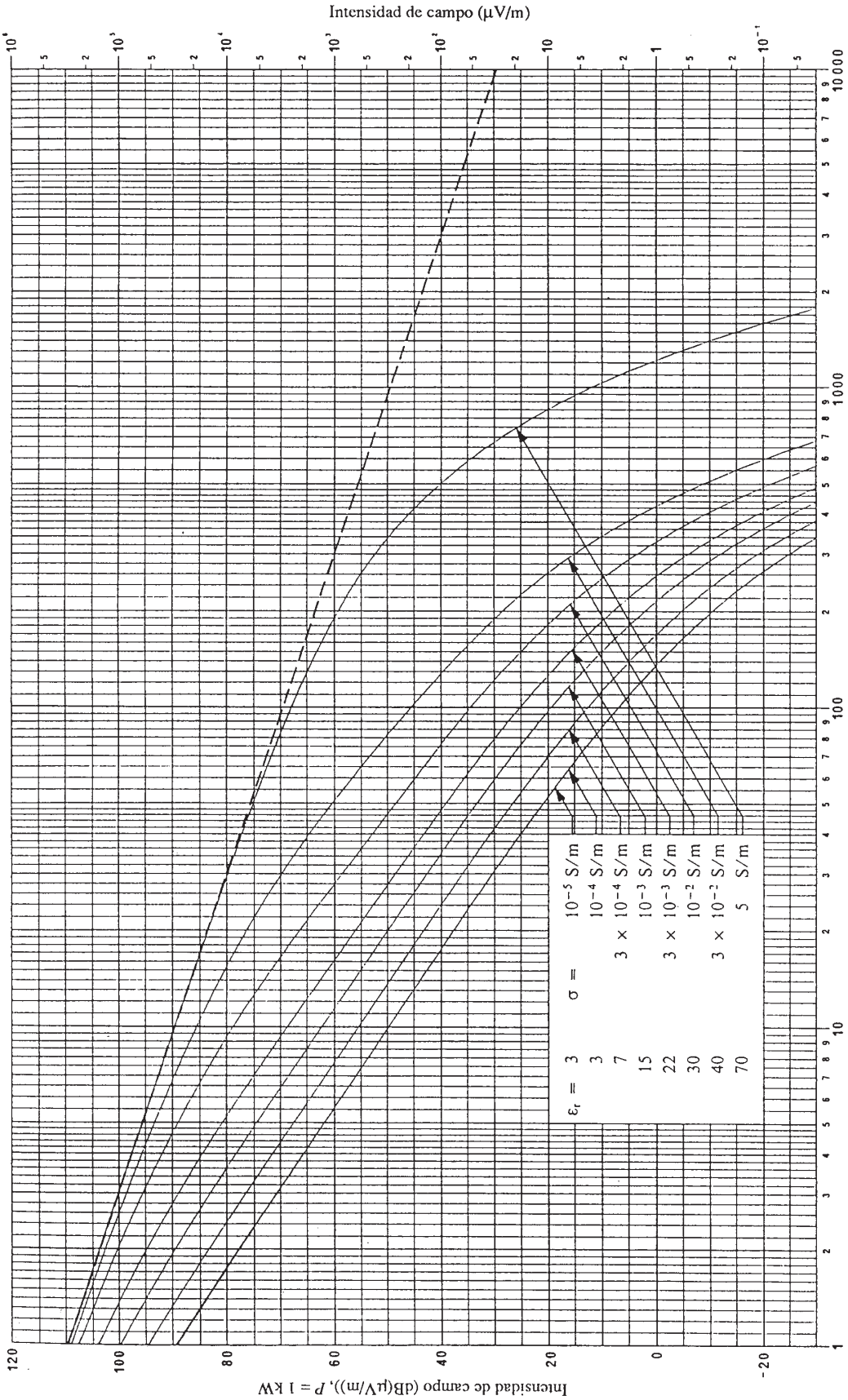


FIGURA 41

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

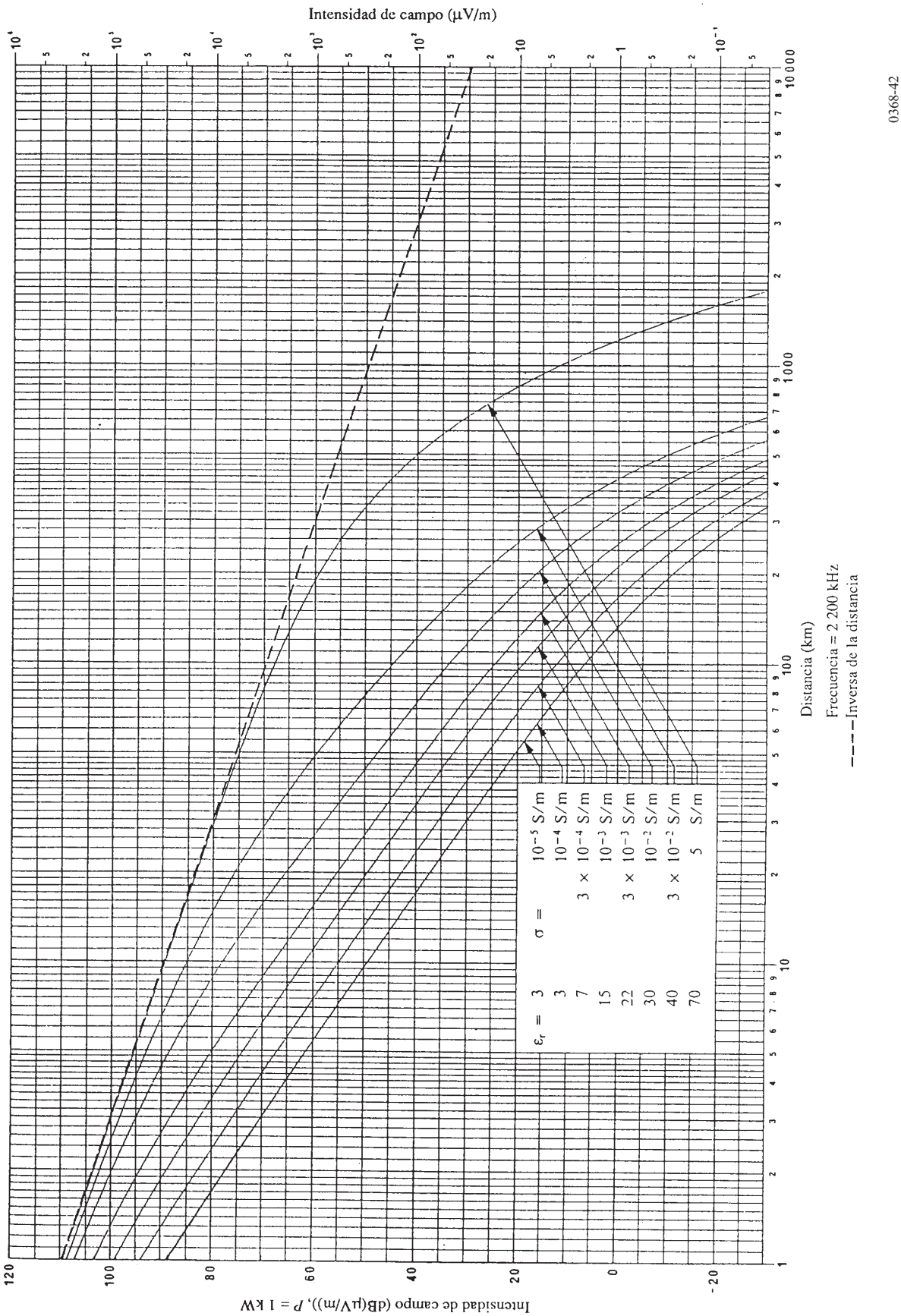


FIGURA 42

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

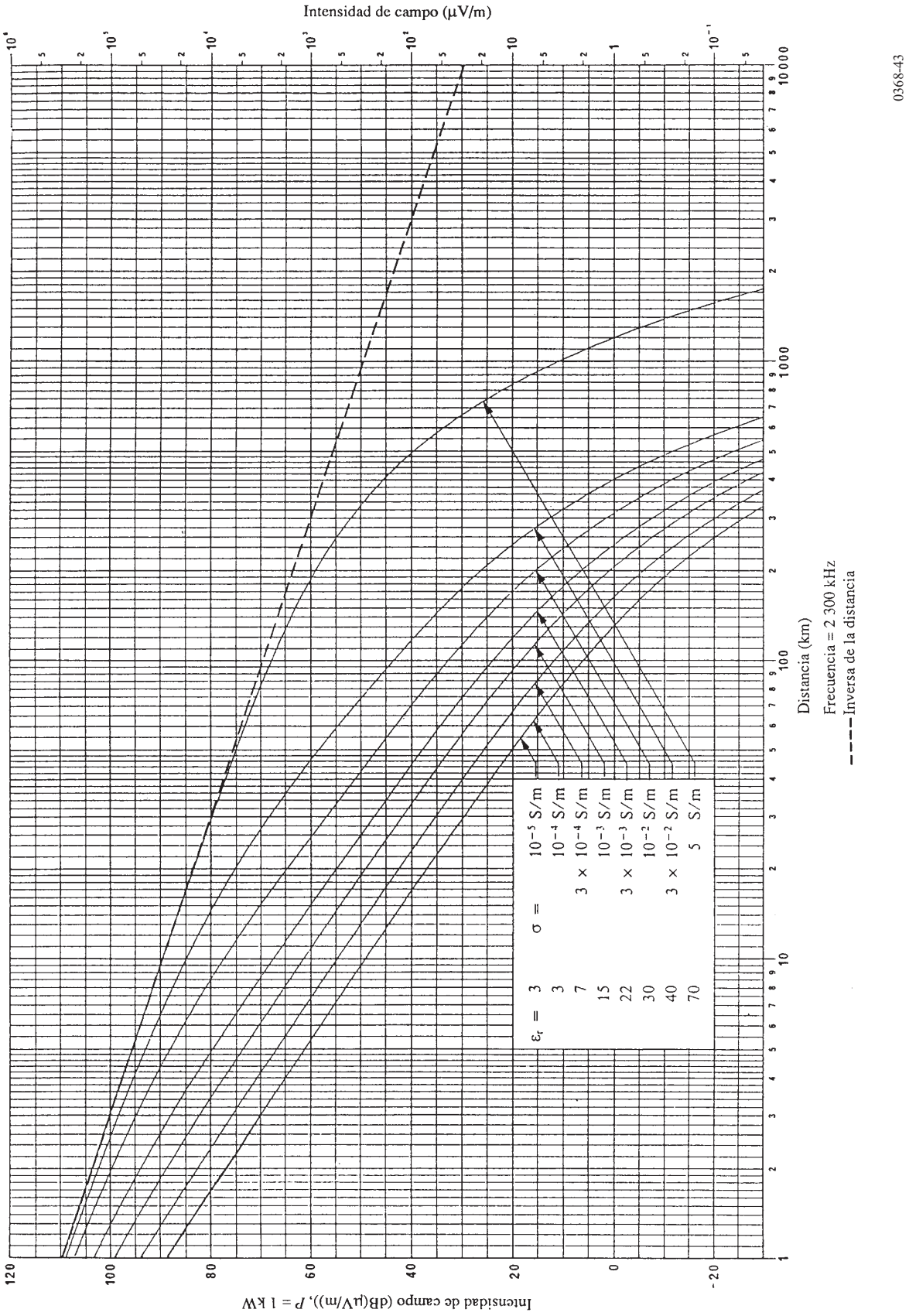


FIGURA 43

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

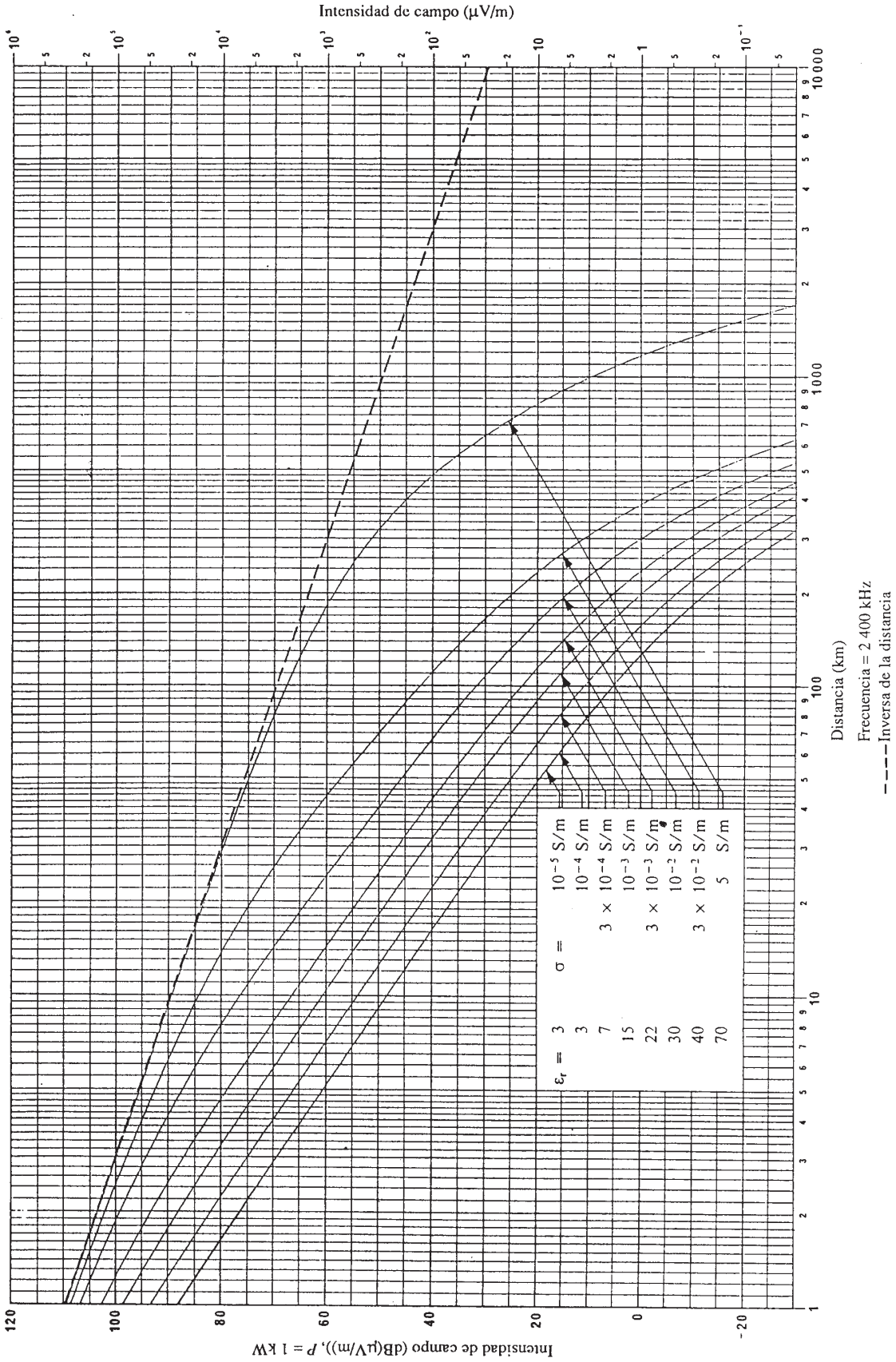


FIGURA 44

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

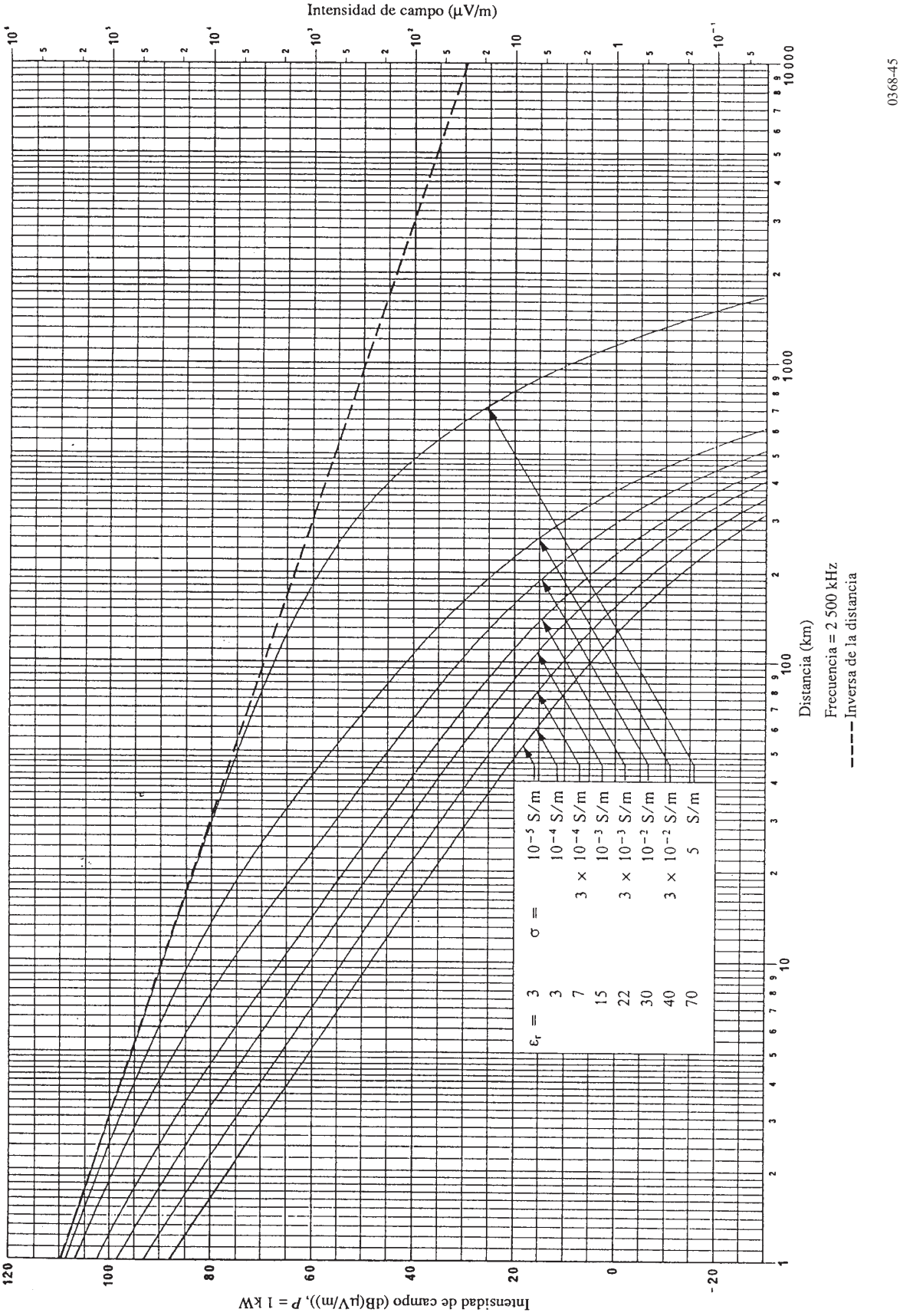


FIGURA 45

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

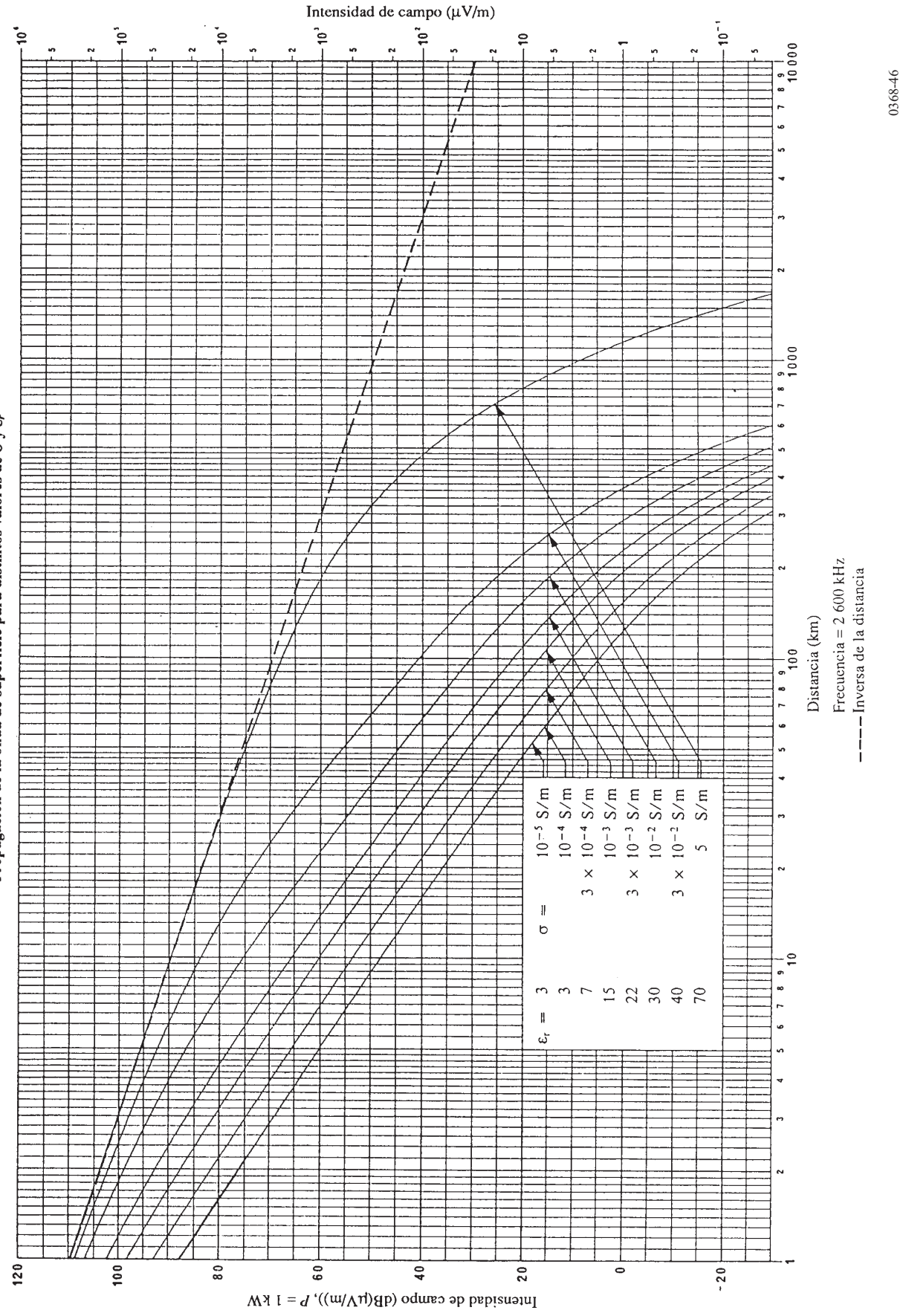


FIGURA 46

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

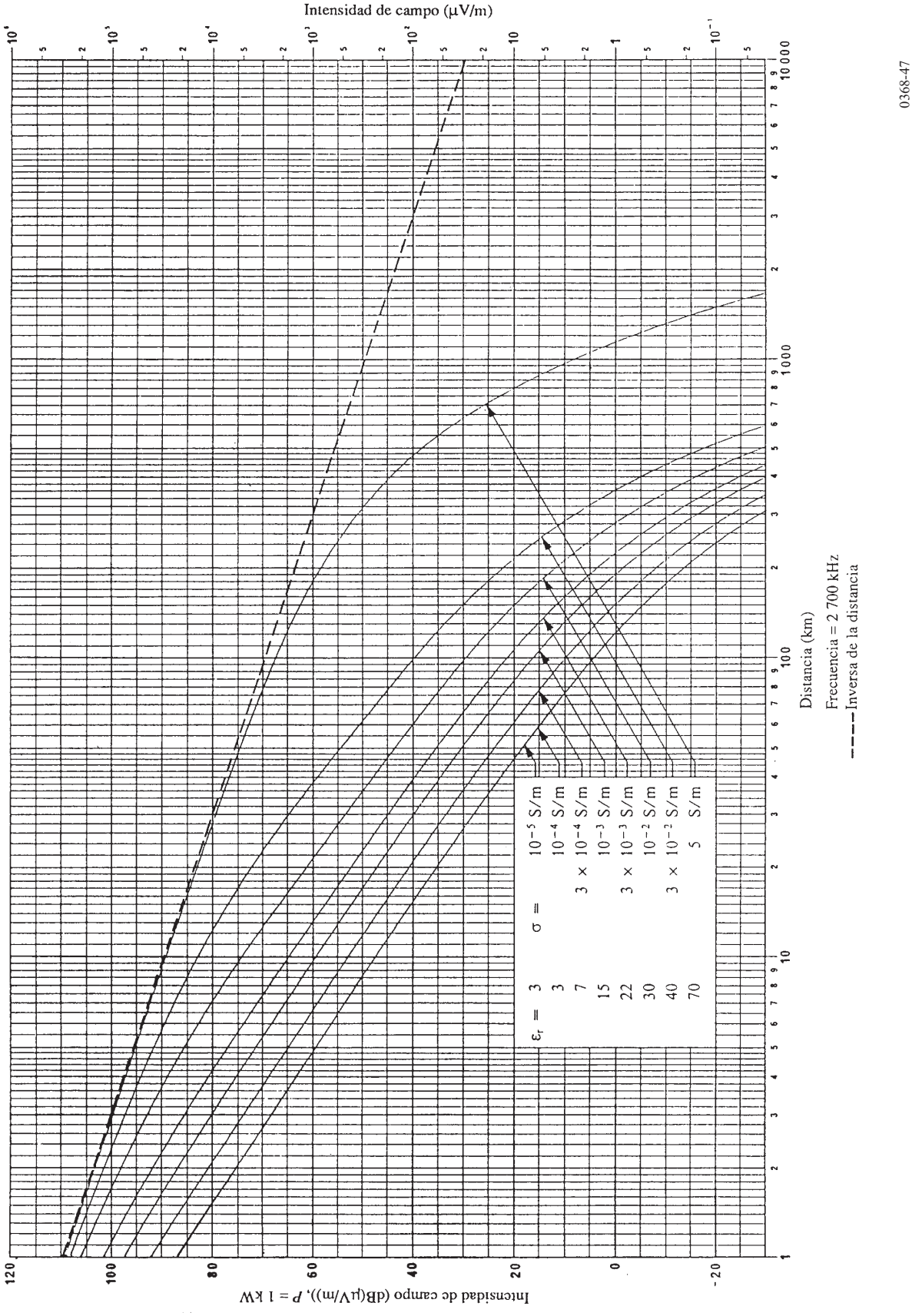


FIGURA 47

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

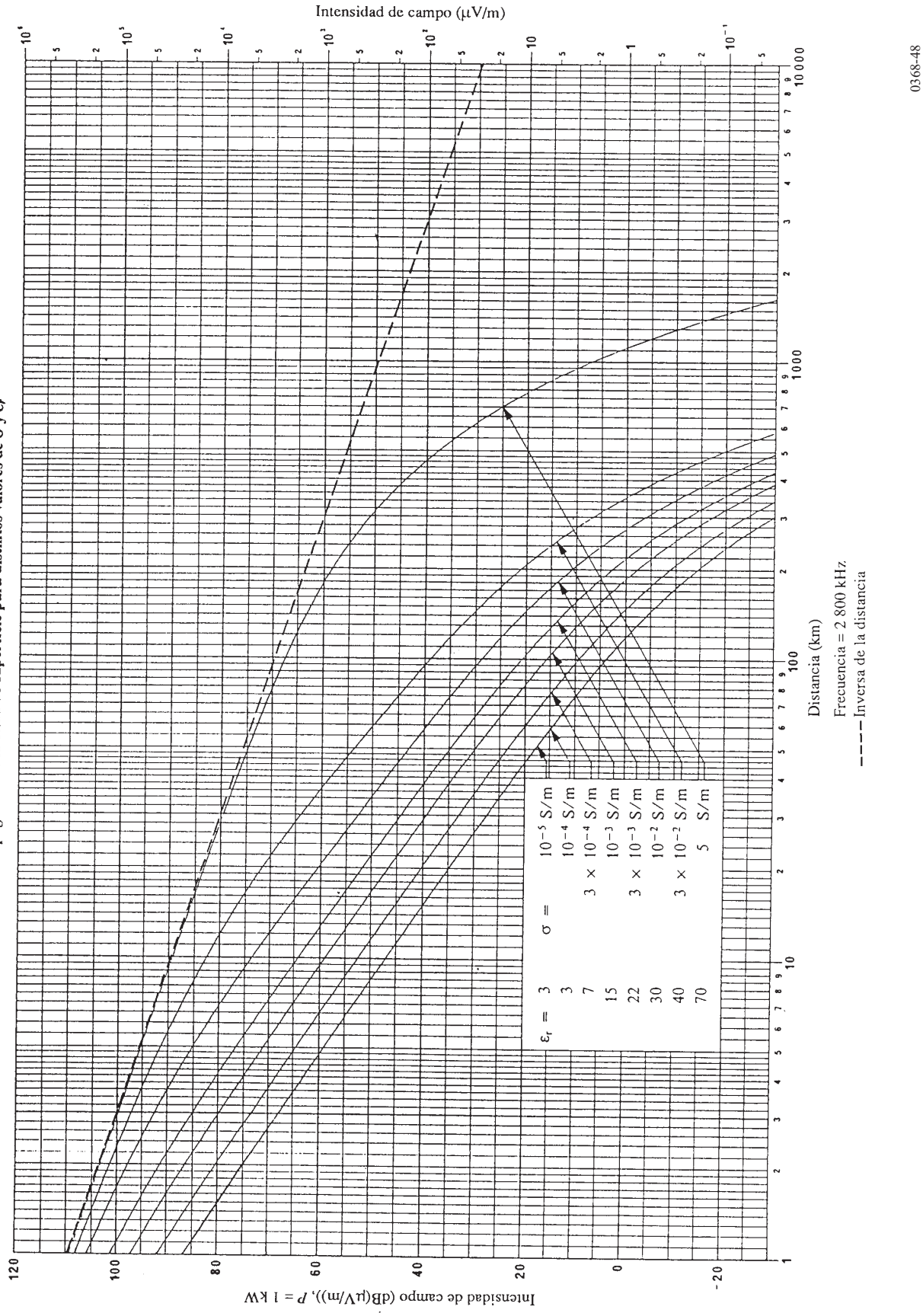


FIGURA 48

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

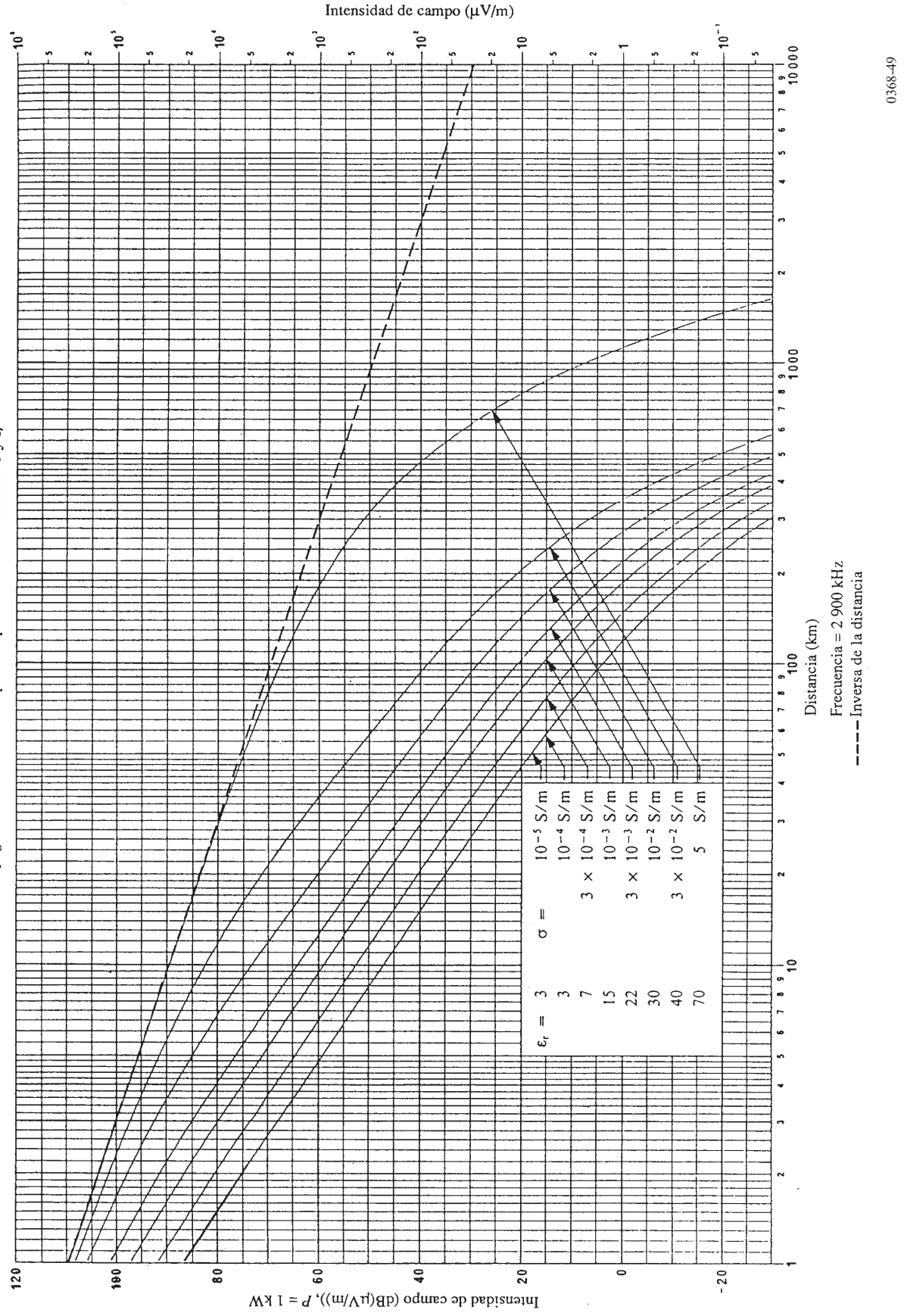


FIGURA 49

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

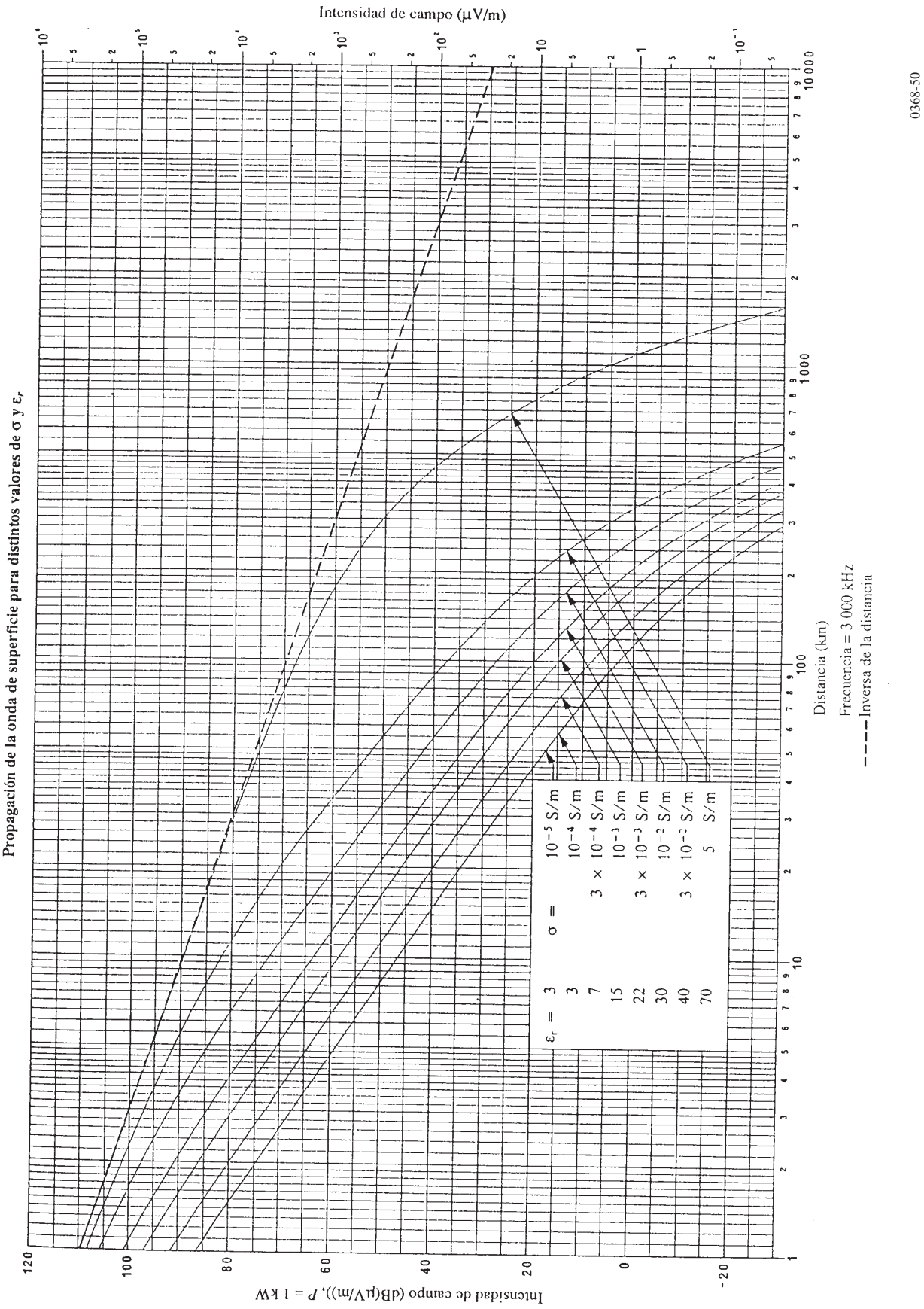


FIGURA 50

Propagación de la onda de superficie para distintos valores de σ y ε_r

Anexo 3

Elaboración de las curvas de propagación

Se ha utilizado el programa de computador GRWAVE para elaborar las curvas de propagación de los Anexos 1 y 2. El programa GRWAVE calcula la intensidad de campo de la onda de superficie en una atmósfera exponencial en función de la frecuencia, las alturas de las antenas y las constantes del terreno; la gama de frecuencias aproximada es 10 kHz-10 GHz.

El programa y la documentación correspondiente pueden obtenerse en las páginas del sitio web del UIT-R relativas a la Comisión de Estudio 3 de Radiocomunicaciones.