



UNIDAD N°: 1

RADIOPROPAGACIÓN



OBJETIVOS

- Modelar un sistema de radio propagación en tierra plana
- Determinar las fórmulas para encontrar los parámetros de propagación
- Realizar los cálculos de acuerdo a las normas internacionales del CCIR de la ITU

2.1 INTRODUCCIÓN



Se propagan desde una **antena transmisora** a una receptora de diversas formas en función de su frecuencia: siguiendo la superficie terrestre, a través de la atmósfera o por reflexiones sobre medios reflectores naturales o artificiales.

- La propagación de las ondas a través de los medios reales puede estudiarse a partir de **las ecuaciones de Maxwell**, analizando las soluciones compatibles con las condiciones de contorno que imponga el medio.
- Tal estudio riguroso es a veces impracticable y en todo caso muy complejo, por lo que para la predicción de pérdidas de propagación se utilizan modelos simplificados basados en la **óptica geométrica**.
- Cuando tales modelos dejan de ser válidos se acude a **expresiones empíricas o curvas de propagación normalizadas** obtenidas a partir de mediciones.

2.1 INTRODUCCIÓN



2.1 INTRODUCCIÓN

Las características de propagación de una onda dependen de:

- La situación del trayecto de propagación respecto a los obstáculos (suelo, colinas, edificios, vegetación)
- Las características eléctricas del terreno (constante dieléctrica, conductividad)
- Las propiedades físicas del medio (intensidad de precipitaciones, absorción por gases y vapores)
- La frecuencia y
- Polarización de la onda.

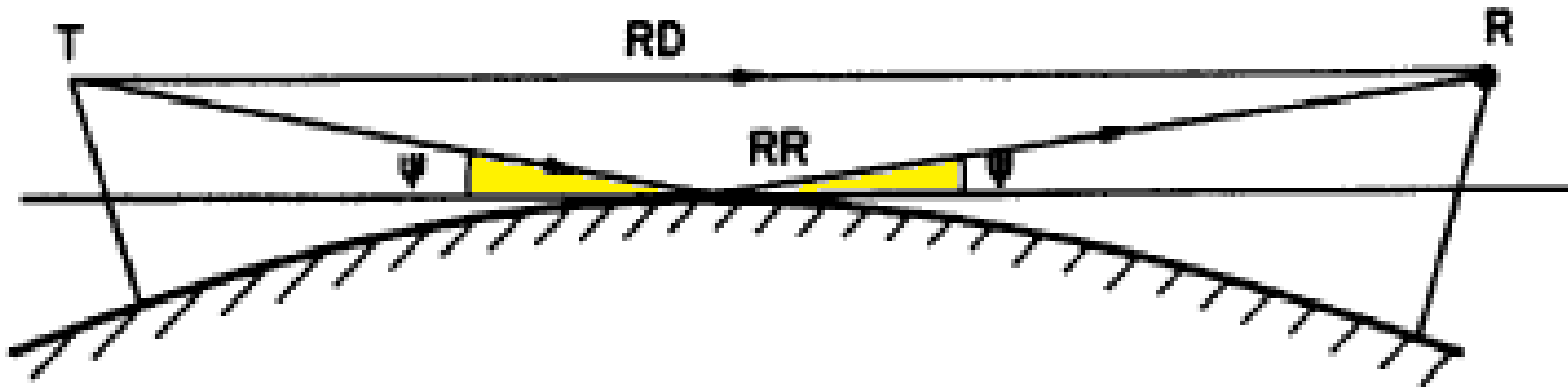
Se estudiarán a continuación los diferentes modos de propagación en función de las características eléctricas del medio y de la frecuencia. Se presentarán métodos básicos de predicción de la pérdida básica de propagación.

2.1 INTRODUCCIÓN



2.1 INTRODUCCIÓN

Cuando el transmisor y el receptor están situados sobre la superficie terrestre y existe visibilidad directa (mutua) entre ambos, se modela la propagación mediante un rayo directo y otro reflejado en el suelo. Dependiendo de la naturaleza del terreno, la frecuencia y la polarización de la onda, puede haber también una componente de onda superficie.



2.2: INFLUENCIA DEL TERRENO



La expresión general del campo recibido, en estas condiciones viene dada mediante la llamada «**ecuación general de la propagación**»:

- El primer término del paréntesis es la componente de onda directa.
- El segundo la onda reflejada en el suelo.
- El tercero la onda superficie.

$$e = e_0 [1 + R \cdot \exp(-j\Delta) + (1 - R) \cdot A \cdot \exp(-j\Delta)]$$

Donde:

e : intensidad de campo en recepción en las condiciones reales.

e_0 : intensidad de campo en condiciones de espacio libre.

Δ : es el ángulo de desfase entre la componente directa y reflejada.

R : el coeficiente de reflexión en el suelo

A : Es un término atenuación de la onda de superficie.

2.2: INFLUENCIA DEL TERRENO



Los términos del paréntesis son complejos, por lo que también lo es el campo recibido “ e ”.

La atenuación en exceso será:

$$L_{ex} = 20 \log \frac{e_0}{|e|} = 20 \log \frac{1}{\left| 1 + \left[R + (1 - R) \cdot A \right] \exp(-j\Delta) \right|}$$

El ángulo Δ es:

$$\Delta = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda}$$

Donde Δl es la diferencia de recorridos entre el rayo reflejado y el rayo directo y λ la longitud de onda.

2.2: INFLUENCIA DEL TERRENO



El coeficiente de reflexión complejo R , se especifica en términos de su módulo y fase

$$R = |R|e^{-j\beta}$$

Tanto R como β son función de la frecuencia, polarización, características eléctricas del suelo y ángulo de incidencia ψ .

Para distancias grandes y alturas de antenas reducidas, el ángulo de incidencia ψ es muy pequeño, en cuyo caso $\beta \simeq \pi$ y $R = -1$.

2.2: INFLUENCIA DEL TERRENO



Como, además, los recorridos de los rayos directo y reflejado son sensiblemente iguales, $\Delta l = \Delta = 0$, por lo que estos rayos se cancelan entre sí, resultando que la componente del campo es la debida a la onda de superficie.

- La propagación por onda de superficie es una modalidad útil cuando las alturas de las antenas son pequeñas en comparación con la longitud de onda, están próximas al suelo y la frecuencia es inferior a unos 10 Mhz.
- Para frecuencias **mayores, en cambio, el factor de atenuación de la onda de superficie se hace muy grande**. Ahora ya no se cancelan las componentes de la onda espacial y entonces adquiere importancia el efecto del rayo reflejado.



Estas propiedades están definidas por los siguientes parámetros.

1.- Constante Dieléctrica ϵ , (permitividad), es la capacidad de un medio para almacenar energía electrostática. Un dieléctrico es un material no conductor, esto es, un aislante. Buenos dieléctricos son el aire, hule, vidrio y mica, por ejemplo. La constante dieléctrica para el vacío es igual a 8.854×10^{-12} farad / metro.



Estas propiedades están definidas por los siguientes parámetros.

2.- Permeabilidad μ , es la medida de la superioridad de un material comparado con el vacío, para servir como trayectoria para líneas de fuerza magnética. Los materiales ferromagnéticos como el hierro, acero, níquel y cobalto poseen altas permeabilidades. Por otro lado, sustancias diamagnéticas como el cobre, latón y bismuto tienen permeabilidades comparables a la del espacio libre. El valor de μ para el vacío es de $4\pi \times 10^{-7}$ henry / metro.



Estas propiedades están definidas por los siguientes parámetros.

3.- Conductividad σ , es la medida de la habilidad de un medio para conducir corriente eléctrica. Todos los metales puros son conductores, teniendo algunos mejor conductividad que otros. La conductividad es el recíproco de la resistividad y se mide en siemens (mhos).

2.3: CARACTERÍSTICAS DEL SUELO.



COEFICIENTE DE REFLEXIÓN.

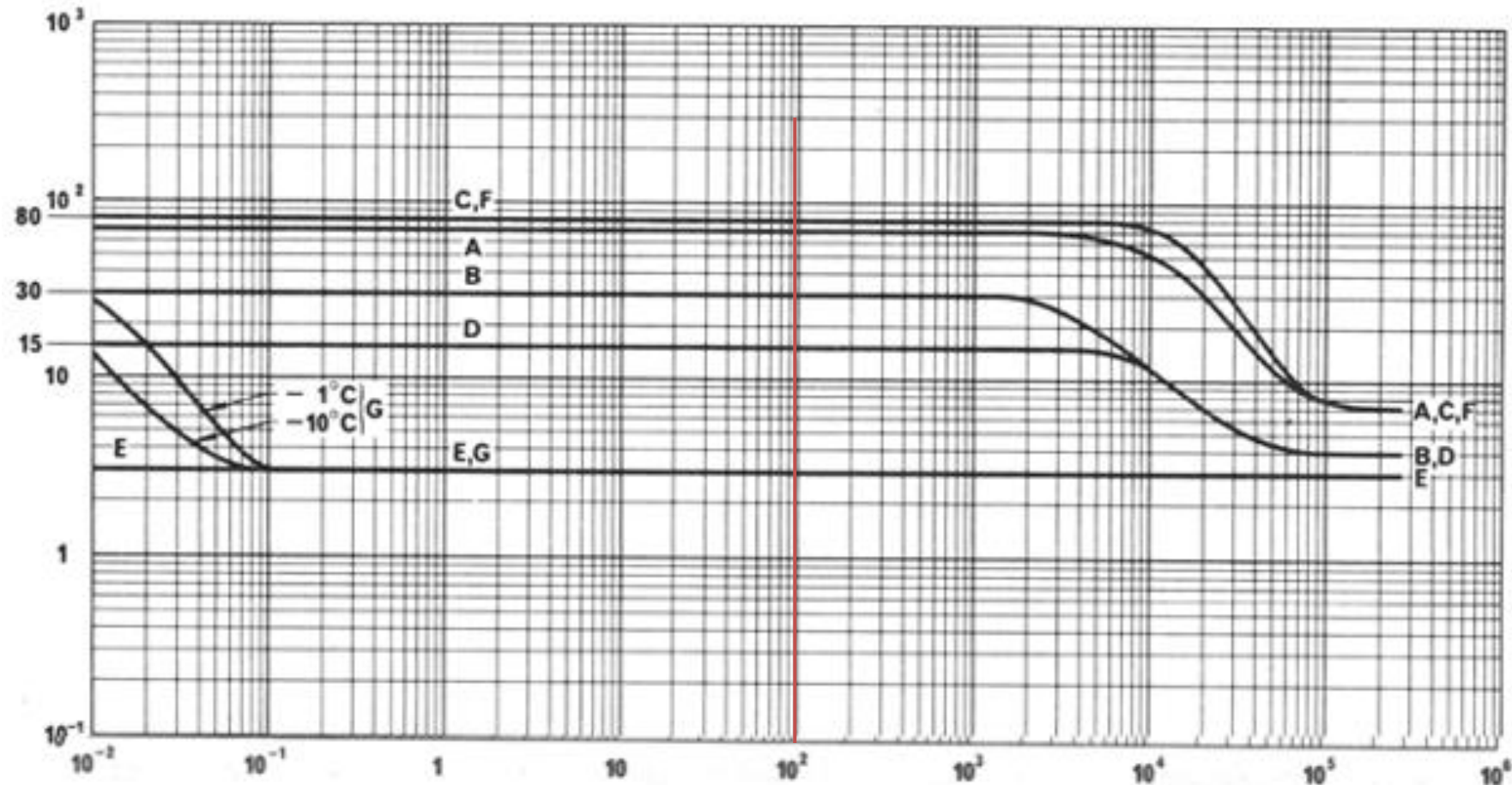
A efectos de propagación se caracteriza el terreno por:

- ϵ_r : constante dieléctrica relativa
- σ : conductividad (mhos/ m).

La Rec. 527 del CCIR facilita ambos parámetros en función de la frecuencia y tipo de terreno. Hay diferentes curvas para diferentes medios

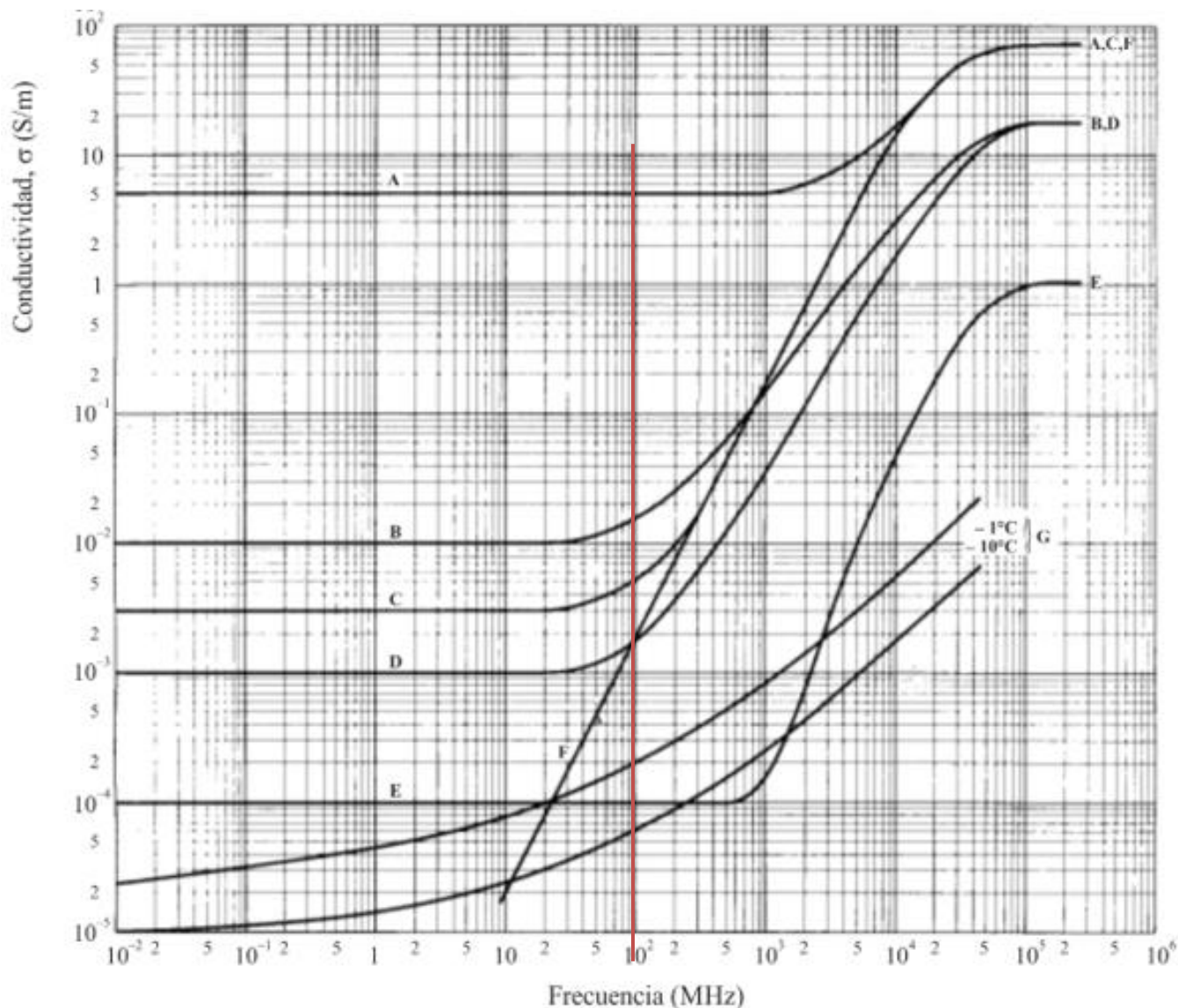
- **A: Agua de mar con salinidad promedio a 20°C**
- **B: Suelo húmedo.**
- **C: Agua dulce a 20°C.**
- **D: Suelo medianamente seco.**
- **E: Suelo muy seco.**
- **F: Agua pura (destilada) a 20°C.**
- **G: Hielo de agua dulce.**

2.3: CARACTERISTICAS DEL SUELO.



Conductividad del terreno en función de la frecuencia. En el eje vertical se indica la constante dieléctrica relativa ϵ_r y en el horizontal, la frecuencia en MHz. (Fuente: Recomendación 527 del CCIR. Recommendations and Reports of the CCIR. XIV Plenary Assembly, Kyoto, 1978).

2.3: CARACTERISTICAS DEL SUELO.



En el eje vertical se indica la conductividad σ , en S/m y en el horizontal, la frecuencia en MHz.

(Fuente: Recomendación 527 del CCIR.

Recommendations

and Reports of the CCIR. XIV Plenary Assembly, Kyoto, 1978).

2.3: CARACTERISTICAS DEL SUELO.



Se define la permitividad compleja del suelo ϵ_0

$$\epsilon_0 = \epsilon_R - j \frac{\sigma}{\omega}$$

A partir de este parámetro, se define la impedancia del suelo como:

Polarización vertical

$$Z = \frac{[\epsilon_0 - \cos^2 \psi]^{\frac{1}{2}}}{\epsilon_0}$$

Polarización horizontal

$$Z = [\epsilon_0 - \cos^2 \psi]^{\frac{1}{2}}$$

2.3: CARACTERISTICAS DEL SUELO.



El coeficiente de reflexión en función de la impedancia del suelo y el ángulo de incidencia es:

$$R = \frac{\text{sen}\psi - Z}{\text{sen}\psi + Z}$$

$$R = \frac{\text{sen}\psi - z}{\text{sen}\psi + z}$$

Polarización vertical

$$R_V = \frac{\varepsilon_0 \text{sen}\psi - \sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2 \psi}}{\varepsilon_0 \text{sen}\psi + \sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2 \psi}}$$

$$R_V = \frac{\varepsilon_0 \text{sen}\psi - \sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2 \psi}}{\varepsilon_0 \text{sen}\psi + \sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2 \psi}}$$

Polarización horizontal

$$R_H = \frac{\text{sen}\psi - \sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2 \psi}}{\text{sen}\psi + \sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2 \psi}}$$

$$R_H = \frac{\text{sen}\psi - \sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2 \psi}}{\text{sen}\psi + \sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2 \psi}}$$

2.3: CARACTERISTICAS DEL SUELO.



Ejemplo.

Calcula el coeficiente de reflexión para el agua del mar y $f = 100$ MHz, con polarización vertical e incidencia casi rasante ($\psi = 2^\circ$).

De las gráficas se obtiene: $\epsilon_r : 70$ y $\sigma : 5$

$$\epsilon_0 = \epsilon_R - j 60 \sigma \lambda = 70 - j 900$$

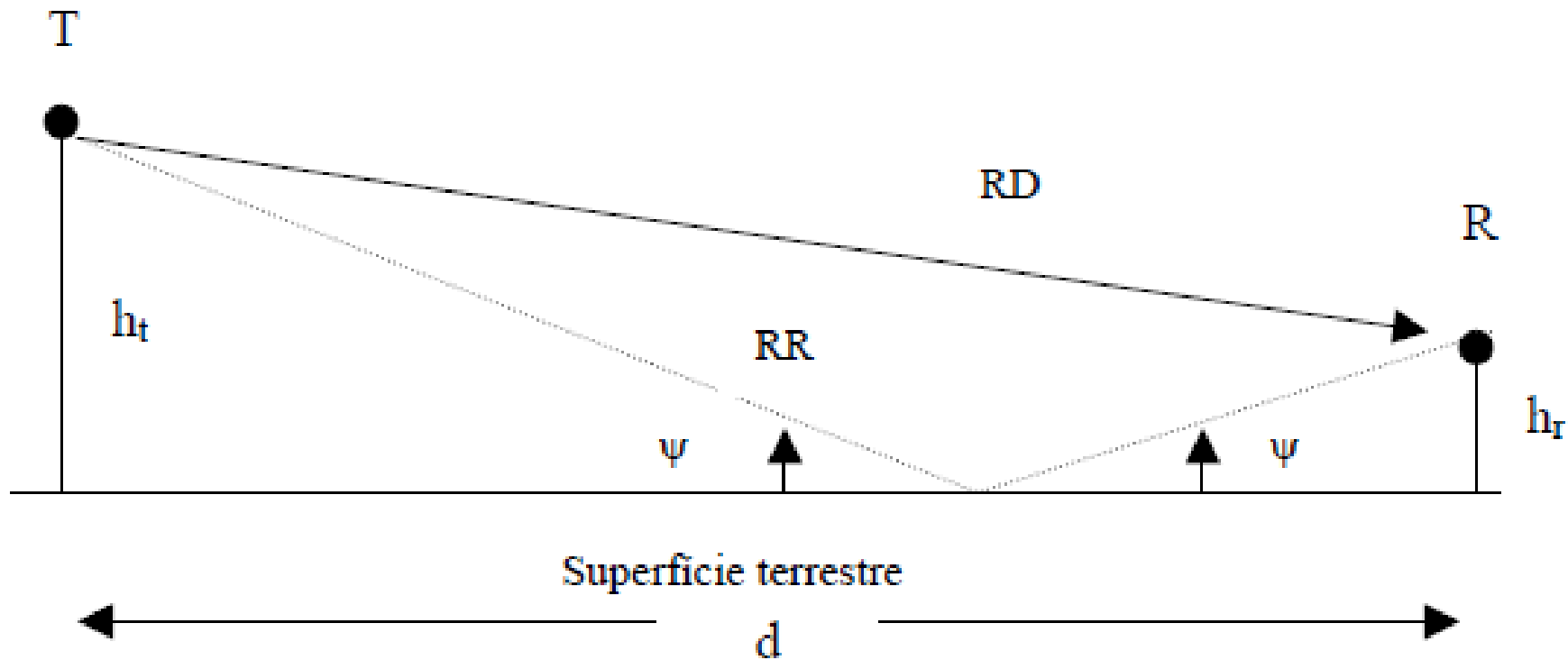
$$z = \frac{[\epsilon_0 - \cos^2 \psi]^{1/2}}{\epsilon_0} = 0,0244 + j 0,0226$$

$$R_v = \frac{\epsilon_0 \sin \psi - \sqrt{\epsilon_0 - \cos^2 \psi}}{\epsilon_0 \sin \psi + \sqrt{\epsilon_0 - \cos^2 \psi}} = 0,392 e^{-j1.5} \rightarrow |R| = 0,392 \quad \beta = 86^\circ$$

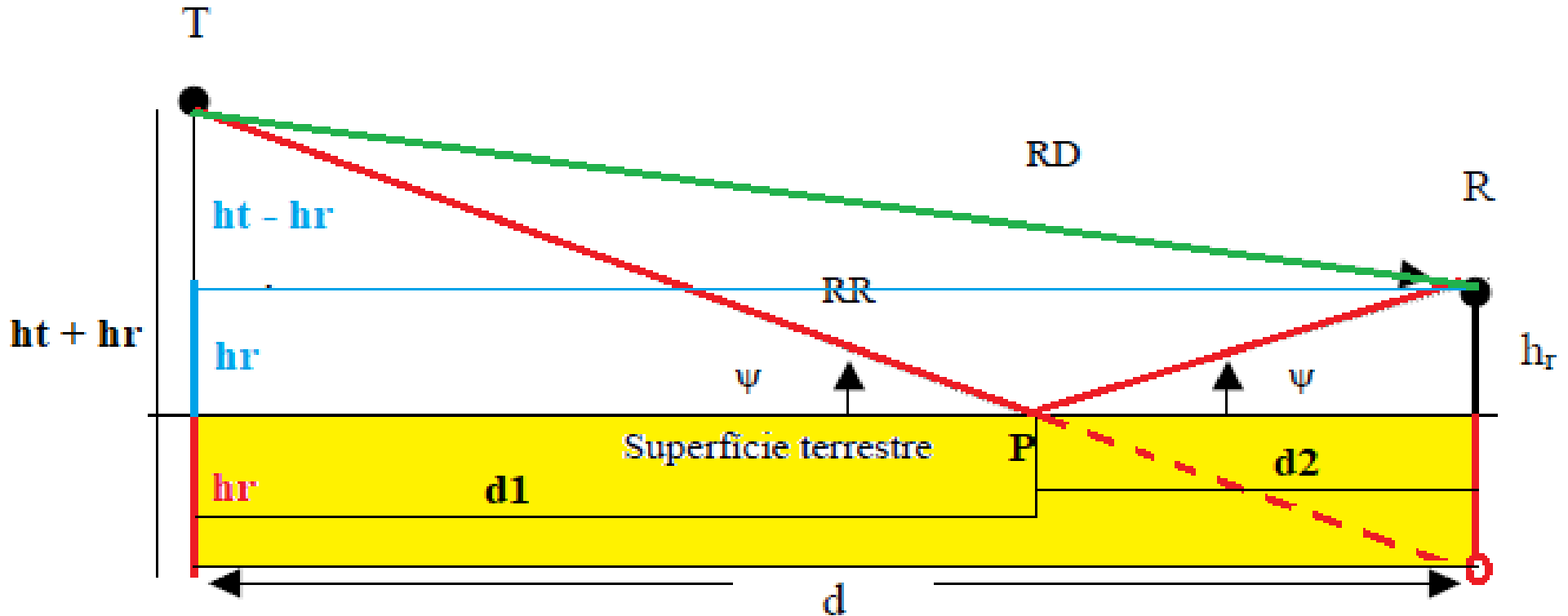
2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



El modelo de Tierra plana, es aplicable a distancias cortas (< 10 Km) para las que puede despreciarse la curvatura terrestre y con terreno liso. *La onda de superficie es preponderante para frecuencias menores a 10Mhz*



2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



Ángulo de incidencia

$$\psi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{h_t + h_r}{d} \right)$$

Punto de reflexión:

$$\frac{d_1}{h_t} = \frac{d}{h_t + h_r} \quad \frac{d_2}{h_r} = \frac{d}{h_t + h_r}$$

2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



Diferencia de trayectos

$$\text{Camino rayo reflejado} = \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2}$$

$$\text{Camino rayo directo} = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2}$$

$$\Delta l = \text{Camino rayo reflejado} - \text{Camino rayo directo}$$

$$= \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2} - \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2} = \frac{2h_t h_r}{d}$$

ya que, si $x \ll 1$	$\sqrt{1 + x^2} = 1 + \frac{x^2}{2}$
----------------------	--------------------------------------

2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



Diferencia de fase:

$$\Delta = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$$

Campo eléctrico:

$$\epsilon = \epsilon_0 \left| 1 + [|R| + A(1 - |R|)]e^{-(\Delta + \beta)} \right|$$

A puede calcularse mediante la fórmula de Bullington, valida para $A < 0.1$

$$A = \frac{-1}{1 + j \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right) (\text{sen} \psi + z)^2}$$

2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



Despreciando la componente de superficie ($A \Rightarrow 0$):

$$\epsilon = \epsilon_o |1 + R e^{-j\Delta}| = \epsilon_o |(1 + |R| e^{-j\beta} e^{-j\Delta})|$$

$$\epsilon = \epsilon_o |(1 + |R| e^{-j(\beta+\Delta)})|$$

$$\epsilon = \epsilon_o [(1 + |R| e^{-j(\beta+\Delta)})(1 + |R| e^{j(\beta+\Delta)})]^{1/2}$$

$$\epsilon = \epsilon_o [(1 + |R| e^{j(\beta+\Delta)} + |R| e^{-j(\beta+\Delta)} + |R|^2 e^{-j(\beta+\Delta)} e^{j(\beta+\Delta)})]^{1/2}$$

2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



$$\epsilon = \epsilon_o \left[\left(1 + |R| (e^{j(\beta+\Delta)} + e^{-j(\beta+\Delta)}) + |R|^2 \right) \right]^{1/2}$$

$$\epsilon = \epsilon_o \left[(1 + 2|R| \cos(\Delta + \beta) + |R|^2) \right]^{1/2}$$

La pérdida básica de propagación es:

$$\ell_b = \frac{\left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2}{[(1 + 2|R| \cos(\Delta + \beta) + |R|^2)]^{1/2}}$$

2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



Normalmente $h_t, h_r \ll d \Rightarrow \psi = 0, |R| = 1, \beta = \pi$

En este caso:

$$\epsilon = \epsilon_o [(1 + 2|R| \cos(\Delta + \beta) + |R|^2)]^{1/2}$$

$$\epsilon = \epsilon_o [(2 + 2 \cos(\Delta + \pi))]^{1/2} = \sqrt{2} \epsilon_o [1 - \cos(\Delta)]^{1/2}$$

$$\epsilon = \sqrt{2} \epsilon_o \left\{ 1 - \left[\cos^2 \left(\frac{\Delta}{2} \right) - \sin^2 \left(\frac{\Delta}{2} \right) \right] \right\}^{1/2} = \sqrt{2} \epsilon_o \left\{ 1 - \left[1 - 2 \sin^2 \left(\frac{\Delta}{2} \right) \right] \right\}^{1/2}$$

$$\epsilon = \sqrt{2} \epsilon_o \left\{ 2 \sin^2 \left(\frac{\Delta}{2} \right) \right\}^{1/2} = 2 \epsilon_o \sin \left(\frac{\Delta}{2} \right) = 2 \epsilon_o \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)$$

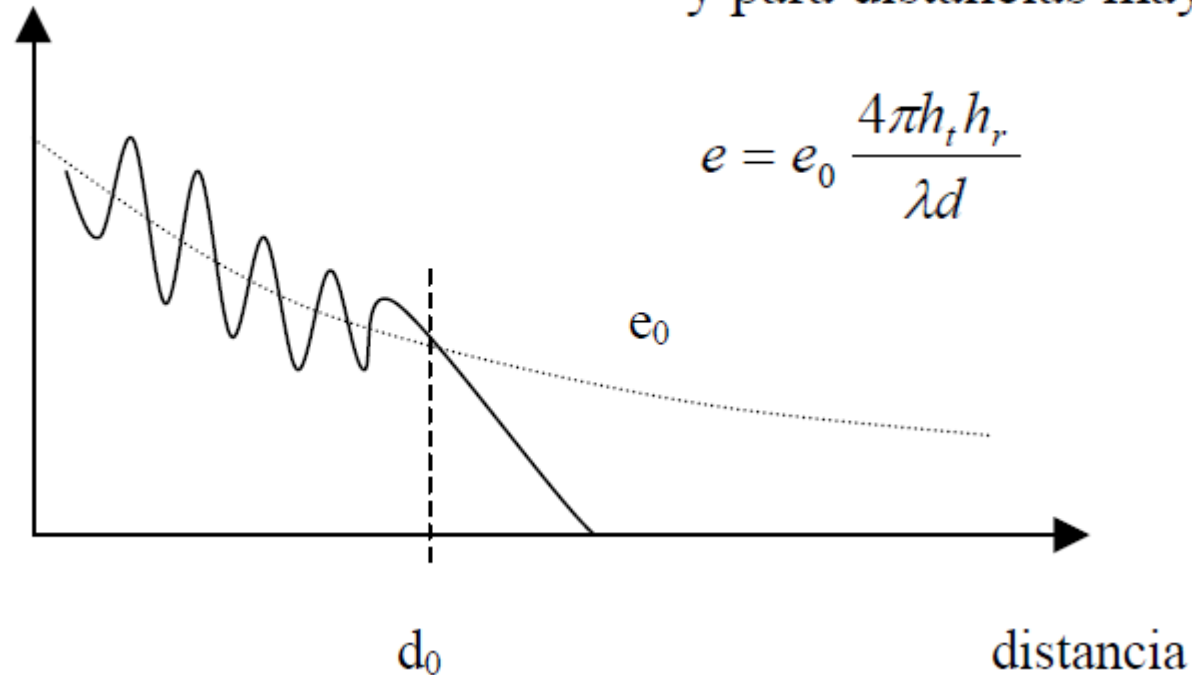
2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



El campo eléctrico oscila alrededor del campo en espacio libre.

Para $d = d_0 = 12 h_t h_r / \lambda$ $e=e_0$

Gráfico



$$e = e_0 \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$$

ya que $\sin(\alpha) \approx \alpha$ para $\alpha \approx 0$

2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



Para tener en cuenta la onda de superficie existe un método alternativo al de incluir A en la fórmula:

$$e = e_0 \frac{4\pi h'_t h'_r}{\lambda d}$$

h'_t, h'_r alturas ficticias de las antenas

donde:

$$h'_t = (h_t^2 + h_0^2)^{1/2}$$

$$h'_r = (h_r^2 + h_0^2)^{1/2}$$

2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



con

$$h_0 = \frac{\lambda}{2\pi} \left[(\epsilon_r - 1)^2 + (60\sigma\lambda)^2 \right]^{1/4} \quad \text{Polarización vertical}$$

$$h_0 = \frac{\lambda}{2\pi} \left[(\epsilon_r + 1)^2 + (60\sigma\lambda)^2 \right]^{1/4} \quad \text{Polarización horizontal}$$

El parámetro h_0 sólo toma valores significativos para $f < 150$ MHz y polarización vertical. Para $f > 150$ MHz y polarización horizontal $h_0 = 0$.

2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



Valores del parámetro h_0 (m)				
Tipo de suelo	Frecuencia (MHz)			
	30	60	100	150
Agua de mar	87	31	14	8
Suelo húmedo	9	4	3	2
Suelo seco	6	3	2	1
Suelo muy seco	3	2	1	0

2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



Si consideramos una antena transmisora de tipo dipolo

$$e\left(\frac{\text{mV}}{\text{m}}\right) = 222 \frac{\sqrt{\text{pra (kW)}}}{d(\text{km})}$$

y sustituyendo $e = e_0 \frac{4\pi h'_t h'_r}{\lambda d}$ nos da:

$$e\left(\frac{\mu\text{V}}{\text{m}}\right) = 88,1 \sqrt{\text{pra (W)}} \frac{h'_t(\text{m}) h'_r(\text{m})}{\lambda(\text{m}) d^2(\text{km})}$$

$$E(\text{dBu}) = \text{PRA}(\text{dBW}) + 20\log(h'_t h'_r) + 20\log(f) - 40\log(d) - 10.64$$

2.4.- MODELO DE DE TIERRA PLANA



la pérdida básica l_b

$$l_b = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{e_0}{e} \right)^2 = \frac{d^4}{(h'_t h'_r)^2}$$

$$L_B = 120 + 40 \log d(\text{km}) - 20 \log (h'_t h'_r)$$

Pérdida proporcional a d^4 e independiente de la f .



GRACIAS