



3

Propagación de ondas en medio natural





Influencia del medio en la propagación

- El *suelo*, la *troposfera* y la *ionosfera* son responsables de que el modelo ideal de propagación en espacio libre, descrito por la ecuación de Friis, no sea correcto en la mayoría de los casos reales.
- La *orografía del suelo* y sus características morfológicas, que condicionan sus propiedades eléctricas, afectan notablemente a la propagación de las ondas electromagnéticas.
- Por ejemplo, a bajas frecuencias (por debajo de MF), la Tierra se comporta como un buen conductor, excitándose una onda de superficie que se adapta a la orografía del terreno transportando los campos electromagnéticos mucha más allá de la zona de visibilidad directa.
- A más alta frecuencia, la atenuación de ese mecanismo es muy alta y es necesario elevar las altura de las antenas respecto al suelo.
- En este caso, la comunicación se establece, normalmente, como suma de una “onda directa” y una “onda reflejada” en el suelo, que interfieren entre sí.





Influencia del medio en la propagación

- La ***troposfera*** y la concentración no uniforme de gases que posee, que típicamente es mayor a menor altura, produce, asimismo, una curvatura de los rayos debido al cambio de índice de refracción del medio con la altura.
- Por otra parte, en las ***bandas de microondas*** se produce una atenuación adicional en las moléculas de los gases que constituyen la atmósfera. Además, el agua en forma de vapor de agua o de hidrometeoros como lluvia, niebla, nieve, etc., produce atenuaciones adicionales y cierta despolarización.
- Finalmente, ***la presencia de la ionosfera***, capa de la atmósfera entre unos 60 y 400 Km., “refleja” las ondas de frecuencias bajas (VLF y LF), “refracta” las frecuencias de MF y HF y “despolariza” la onda en las bandas de VHF y UHF.
- ***De lo dicho anteriormente, la evaluación de la potencia recibida ya no puede realizarse empleando únicamente la fórmula de Friis. Esta fórmula debe corregirse introduciendo en ella diversos factores de atenuación correspondientes a cada uno de los fenómenos de propagación.***
- Estos factores presentan, además, una dificultad añadida puesto que el entorno es, al menos, *parcialmente desconocido y además varía con el tiempo y con el espacio.*





Influencia del medio en la propagación

- De ellos se obtiene, generalmente, un valor medio y una desviación típica, lo que permite valorar la potencia y/o el campo recibido de “modo estadístico”.
- En los modelos que se presentan seguidamente se estudia la fenomenología de los diversos mecanismos, dando una buena estimación de los valores medios.
- Los modelos más realistas que contemplan las variaciones temporales responden a modelos estadísticos obtenidos a partir de medidas de campo.
- En el modelo de propagación en el espacio libre, donde las antenas se suponían aisladas y situadas en el vacío, la densidad de potencia incidente sobre la antena receptora es

$$\langle S \rangle = \frac{P_t G_t}{4 \pi d^2}$$

- El campo incidente sobre la antena receptora se puede escribir en función de la densidad de potencia y, despejando, podemos obtener el campo eléctrico en dicha posición

$$\langle S \rangle = \frac{|E|^2}{240 \pi} \Rightarrow |E| = \frac{\sqrt{60 P_t G_t}}{d}$$





Influencia del medio en la propagación

- Cuando nos encontramos en una situación de espacio real, el campo incidente no es exactamente el que señala la expresión anterior. Hay que modificarlo con un factor que va a depender del entorno, que se denomina “**factor de atenuación de campo**”, F_e .

$$|E| = \frac{\sqrt{60 P_t G_t}}{d} F_e$$

- Para el cálculo de la potencia recibida, en condiciones de espacio libre se aplicaba la fórmula de Friis. En condiciones de propagación en un entorno real hay que incluir un “**factor de potencia**”, F_p , que multiplica a la potencia recibida, obtenida a partir de la fórmula de Friis.
- Este factor de potencia, F_p , es el módulo al cuadrado del factor de campo, F_e , resultando

$$\langle S \rangle = \frac{P_t G_t}{4 \pi d^2} F_p \Rightarrow F_p = |F_e|^2$$





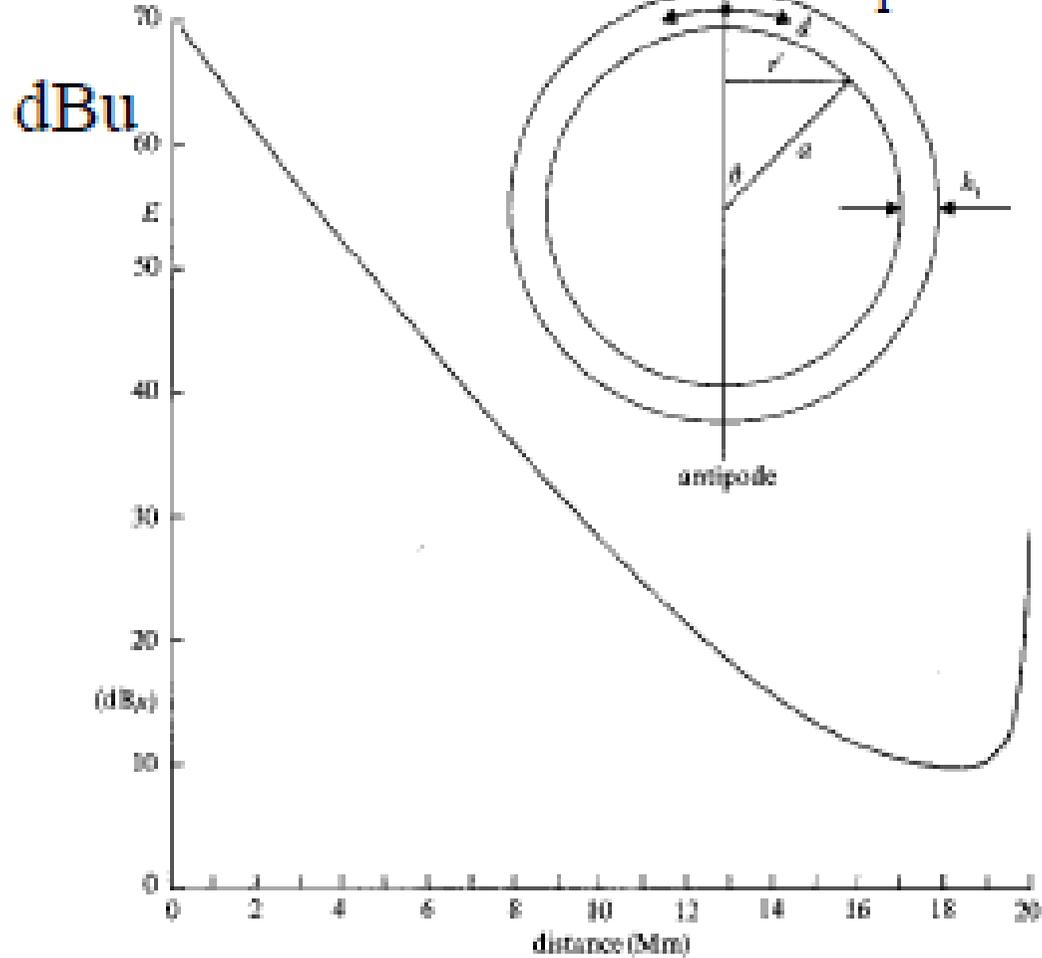
Mecanismos de propagación

- La banda de frecuencia de trabajo va a definir los mecanismos de propagación de ondas que hay que considerar a la hora de analizar un canal de radio.
- Del mismo modo, van a diferir las aplicaciones a las que se puede dar servicio en cada una de las bandas.
- En *la banda de muy bajas frecuencias VLF (3 kHz -30 kHz)*, tanto el “suelo” como la “ionosfera” se comportan como buenos conductores. La distancia que separa el suelo de la ionosfera (entre 60 y 100 km), es comparable con la longitud de onda de dicha banda (100 km – 10 km).
- La propagación de ondas se puede modelar como *una guía esférica con pérdidas*.
- Las *aplicaciones* para las que se emplea este mecanismo de propagación son *comunicaciones a larga distancia* (navales y submarinas) o aquellas que deseen *cobertura global* (telegrafía naval, ayuda a la navegación,...).
- Las *antenas* que se utilizan son verticales, eléctricamente cortas, aunque de dimensiones físicas muy grandes.





$$20 \log(E/(\mu\text{V}/\text{m}))$$



Variación del campo eléctrico con la distancia para VLF

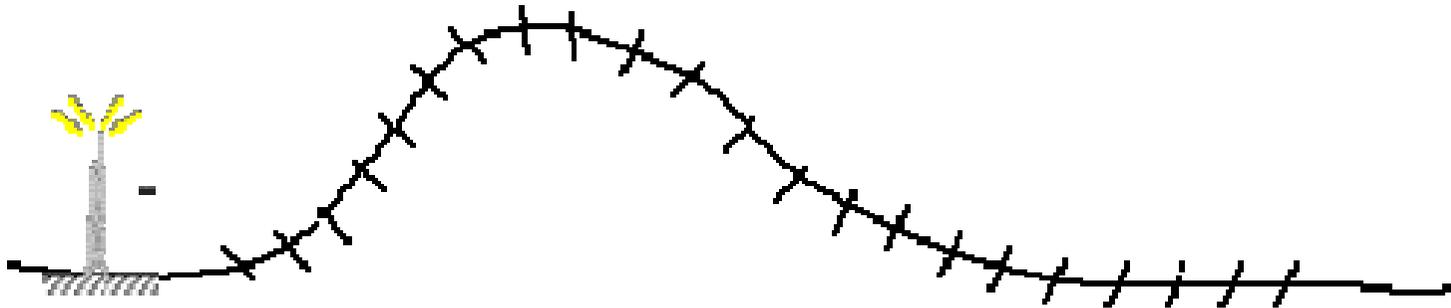




Mecanismos de propagación

- A las **frecuencias de LF** (30 kHz – 300 kHz) y **MF** (300 kHz – 3 MHz), se produce la propagación mediante onda de tierra u onda de superficie. Esta onda se propaga en la discontinuidad tierra-aire debido a las corrientes inducidas en la Tierra.
- Este modo sólo propaga la polarización vertical, ya que la polarización horizontal se atenúa muy rápidamente debido al carácter conductor de la superficie de la tierra en estas frecuencias.
- El **alcance** que se obtiene varía con la frecuencia, la potencia transmitida y el tipo de suelo. En **LF** se pueden conseguir alcances de hasta 2.000 km, en **MF** de hasta unos 300 km, mientras que ya en frecuencias más altas, como **HF**, apenas se llega a los 50 km.
- Las **aplicaciones** más importantes son los sistemas de comunicaciones navales y los sistemas de radiodifusión.
- Las **antenas** que se utilizan habitualmente son monopolos verticales con alturas entre 50 y 200 m que radian con polarización vertical.





Propagación por onda de tierra

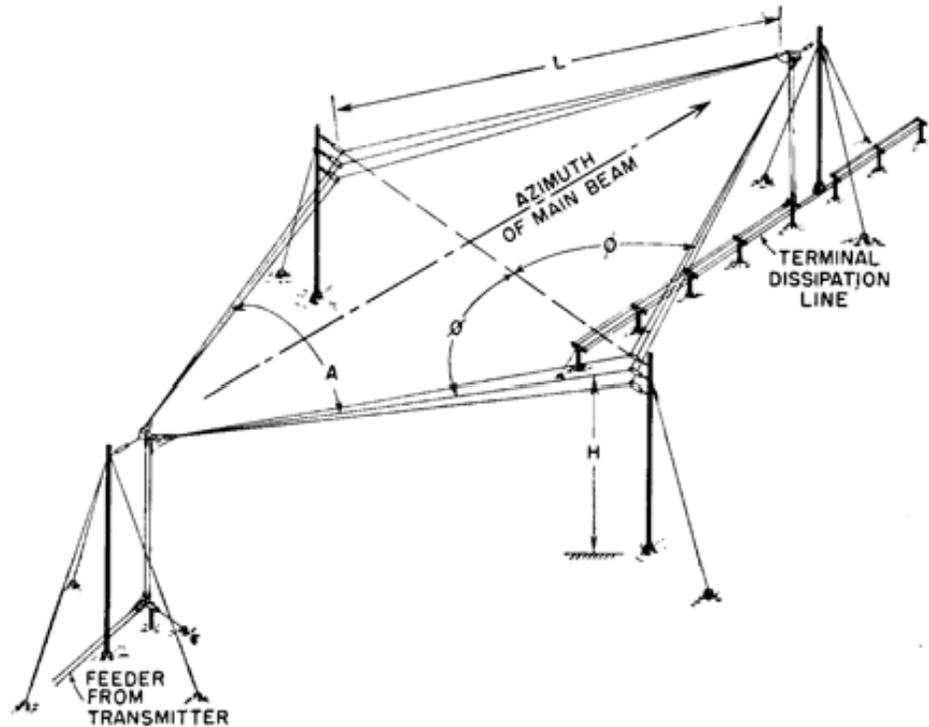
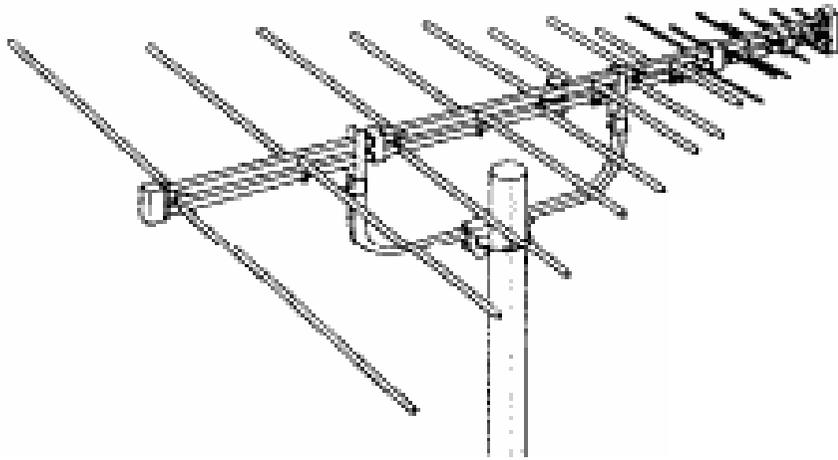


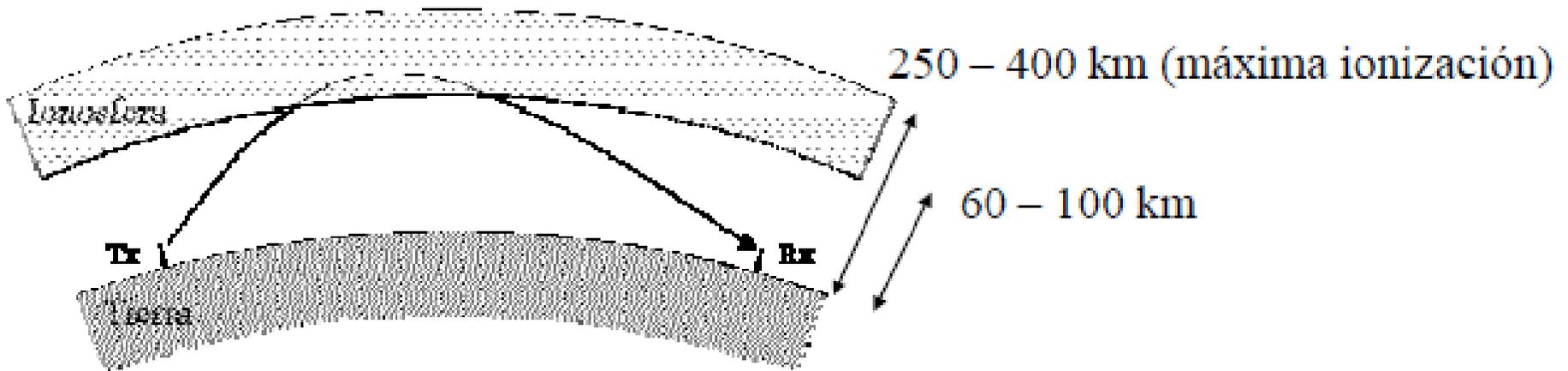


Mecanismos de propagación

- En las **bandas de MF** (300 kHz – 3 MHz) y **HF** (3 MHz – 30 MHz), la **ionosfera** “refleja” las ondas radioeléctricas haciendo que éstas retornen a tierra. Este mecanismo se denomina *reflexión ionosférica* (en realidad refracción).
- Los primeros enlaces radio transoceánicos existentes sugerían ya la existencia de esta capa ionizada en la atmósfera que reflejaba las ondas enviadas al espacio. En dichos enlaces estas ondas llegaban al mar y se reflejaban de nuevo, y, de este modo, en varios saltos, se conseguía cruzar el océano.
- El **alcance** que se consigue para un solo salto depende de la frecuencia, de la hora del día y de la dirección de apuntamiento de la antena. En **MF**, durante la noche, es de hasta unos 2.000 km, mientras que en **HF** se pueden alcanzar hasta los 4.000 tanto de día como de noche.
- Este mecanismo lo utilizan los radioaficionados, en comunicaciones navales y, antes de existir los satélites, era el medio más utilizado para comunicaciones de voz, punto a punto y largas distancias.
- Se utilizan **antenas** elevadas con polarizaciones horizontales y verticales como abanicos logperiódicos, antenas rómbicas, etc...







Propagación por onda ionosférica

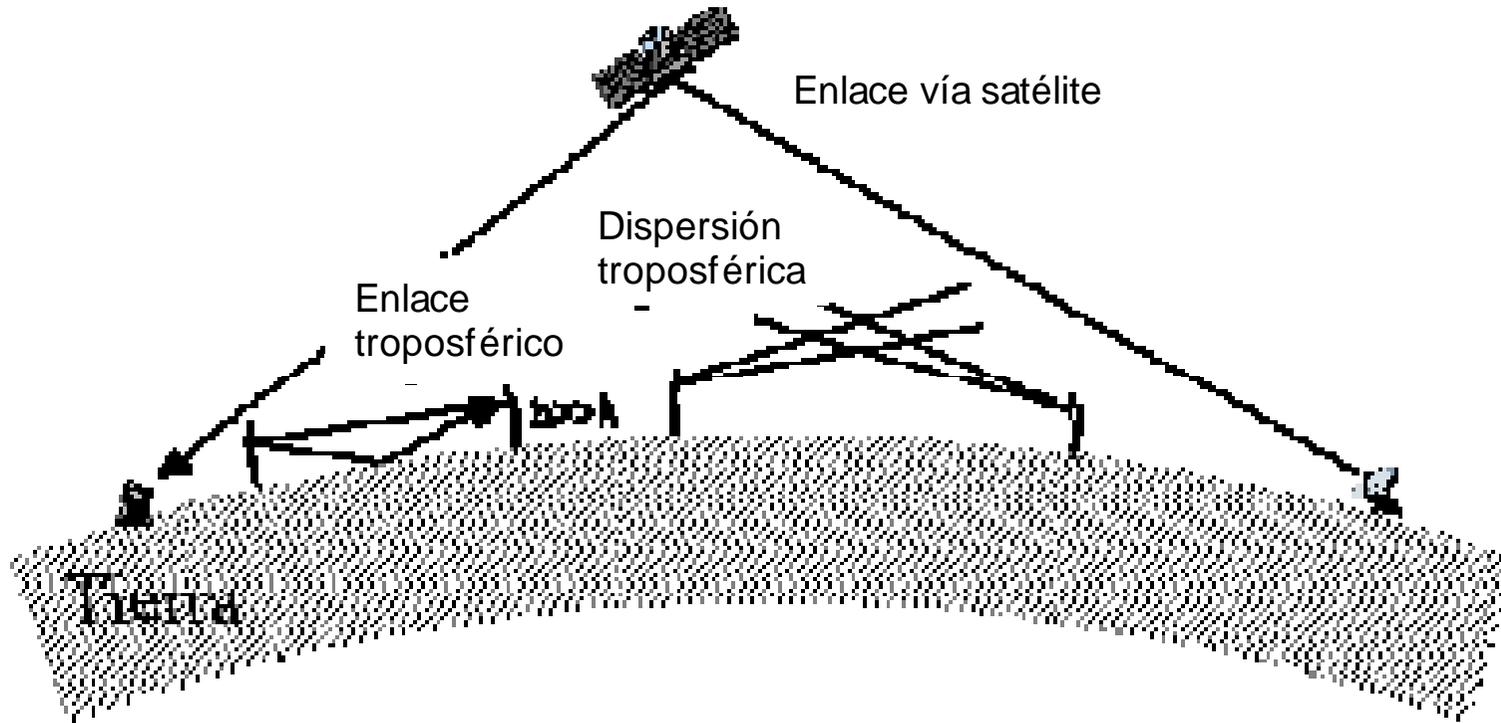




Mecanismos de propagación

- Para las **frecuencias de VHF** (30 MHz – 300 MHz) y **superiores**, el mecanismo de propagación es el **de onda de espacio**.
- En estas frecuencias la ionosfera se hace totalmente transparente y los mecanismos de propagación se ven afectados por la influencia del suelo (mediante *reflexiones* o *difracciones*) y por la troposfera (mediante la *refracción*, *atenuación* y *dispersión*).
- El **alcance** es muy variable: en **VHF** y **UHF** la difracción permite alcances algo más allá del horizonte visible, mientras que, a frecuencias superiores, los radioenlaces punto a punto necesitan visión directa, por lo que la distancia se reduce a algunas decenas de km. (el valor depende de la frecuencia y de las alturas de las antenas).
- En comunicaciones vía satélite se puede llegar hasta los 36.000 km (geoestacionarios) y en aplicaciones de observación de espacio profundo hasta millones de km. La propagación por onda de espacio es el mecanismo que se utiliza en la mayoría de los sistemas de comunicaciones (radiodifusión de FM, TV, telefonía móvil, radioenlaces fijos, comunicaciones satelitales, radar,...)
- **Las antenas** que se emplean son elevadas y directivas (yagis, bocinas, arrays, reflectores,...)





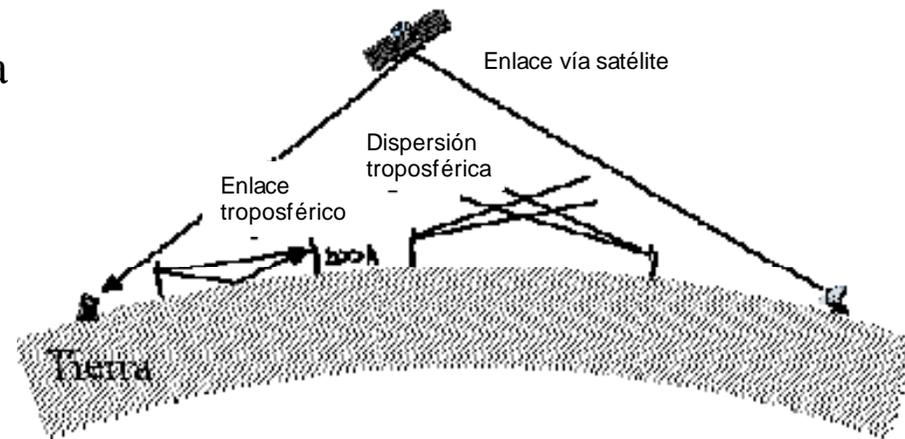
Mecanismos de propagación
por onda del espacio





Mecanismos de propagación

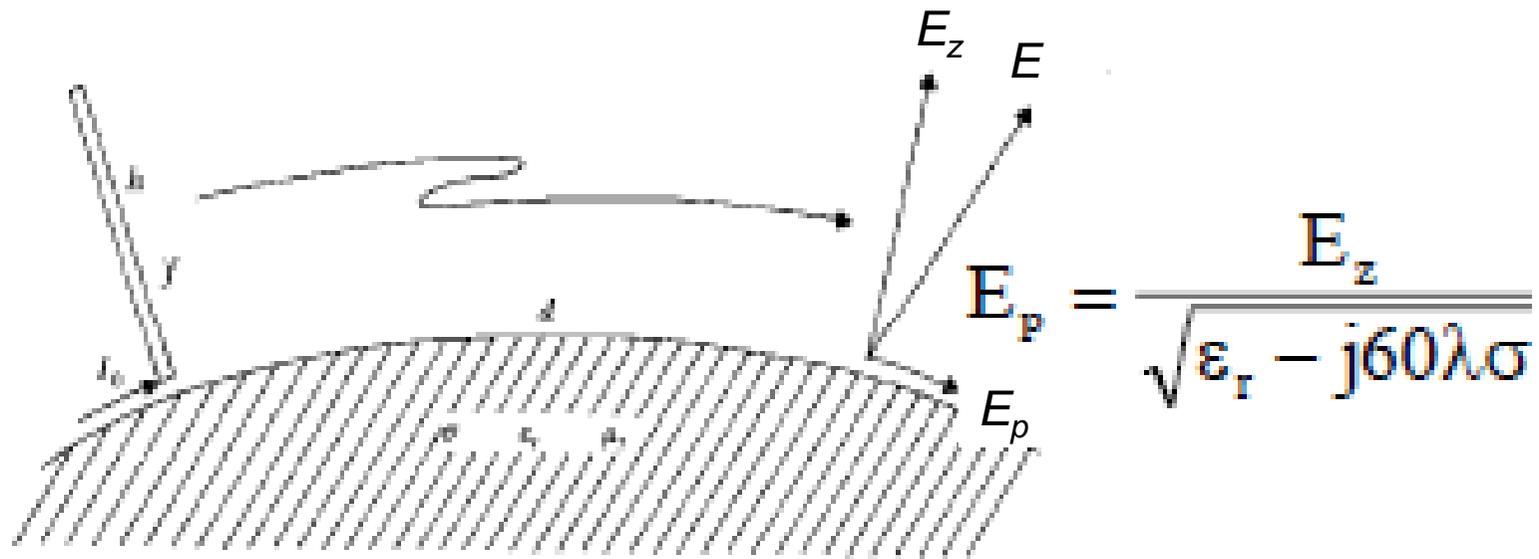
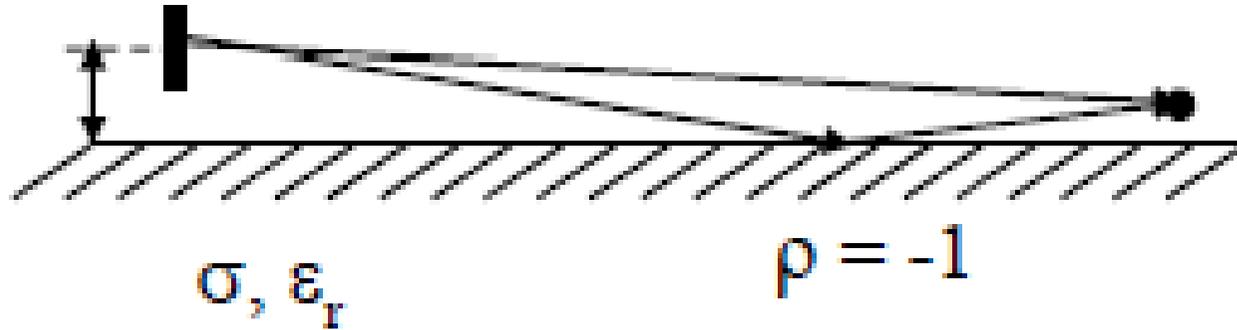
- Es preciso mencionar que, en los enlaces vía satélite, el nivel de señal recibido es muy bajo, por lo que es importante elegir frecuencias de trabajo suficientemente altas para que la ionosfera sea transparente
- Por último, hay un mecanismo de propagación, denominado *dispersión troposférica*, que aprovecha el fenómeno de dispersión de la onda electromagnética debida a las irregularidades dieléctricas de la troposfera asociadas a variaciones de densidad y temperatura de gas.
- Con este mecanismo se consiguen alcances bastante mayores que los obtenidos con visión directa, pero su poca estabilidad y la necesidad de muy altas potencias transmitidas lo ha dejado prácticamente en desuso, aunque sigue siendo utilizado por los llamados “radares transhorizonte.”





- En general estos modelos suponen una tierra lisa y de características eléctricas uniformes, lo que implica *utilizar una longitud de onda mucho mayor que las posibles discontinuidades.*
- Además se supone que, tanto la antena transmisora como la receptora, se encuentran muy próximas a la superficie terrestre, de modo que:
 - Una *onda de superficie* se propaga en la discontinuidad tierra-aire. La componente vertical se propaga sobre la superficie sin apenas pérdidas, mientras que la componente horizontal se atenúa por el efecto de la conductividad del suelo. La atenuación por absorción es tanto mayor cuanto menor sea la conductividad. Además de la atenuación por absorción se produce una atenuación por la dispersión de la energía.
 - La *onda de espacio*, compuesta por el rayo directo y el rayo reflejado en el suelo, se anula a nivel de suelo, ya que el coeficiente de reflexión en el suelo es -1 y los caminos de ambos rayos son prácticamente iguales







Características del suelo

La caracterización correcta del suelo (permitividad / conductividad), es esencial para una correcta predicción de la propagación mediante onda de superficie.

En función de estos valores y de la frecuencia de trabajo, predominarán las corrientes de desplazamiento o de conducción y el suelo se asemejará más a un dieléctrico o a un conductor.

<u>Tipo de suelo</u>	ϵ_r	σ (mS/m)
Agua de mar	80	4000
Agua dulce	80	5
Tierra húmeda	15-30	5-20
Suelo rocoso	7	1-5
Tierra seca	4	1-10

Para el cálculo del alcance mediante este mecanismo de propagación se emplea un modelo aproximado de **tierra plana**, válido para distancias cortas, y un modelo de **tierra esférica** para distancias largas. A continuación veremos ambos modelos.





Modelo de Tierra Plana (distancias cortas)

- Este modelo simple supone una *propagación de espacio libre* afectada por un factor de atenuación de campo eléctrico F_e .
- Las antenas que se utilizan son monopolos sobre tierra, la cual se modela mediante un plano conductor. Para este modelo y a efectos prácticos, basta conocer la directividad de las antenas que dependerá, lógicamente, de su longitud.

- Monopolo corto (longitudes $\ll \lambda$) sobre tierra, $D_0 = 3$ (4.77 dBi)
- Monopolo de longitud $\lambda/4$ sobre tierra $D_0 = 3.28$ (5.16 dBi)

$$|E| = \frac{\sqrt{60P_t G_t}}{d} F_e$$

$$F_e = \frac{2 + 0,3p}{2 + p + 0,6p^2}$$

$p = \text{distancia numérica}$

$$p \approx \frac{\pi d}{60\lambda^2 \sigma}$$

Si $p \gg$

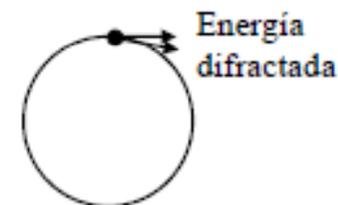
$$F_e = 1/2p$$

$$E \Rightarrow \frac{1}{d^2}$$

La validez del modelo de Tierra Plana (sobre Tierra Seca) se extiende hasta:

$$d_{\max} (\text{Km}) = 100/\sqrt[3]{f(\text{MHz})}$$

distancia a partir de la que la difracción asociada a la curvatura de la Tierra cobra importancia.





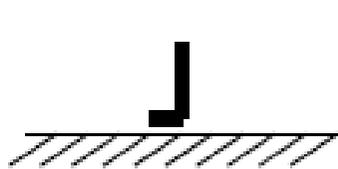
Modelo de Tierra Esférica (distancias largas)

• Para distancias mayores es necesario contar con los fenómenos asociados a la difracción que produce la curvatura de la Tierra. Para ello la UIT-R proporciona gráficas que modelan la intensidad de campo producida por una antena transmisora, de tipo “monopolo corto” con potencia radiada de 1 kW., en función de la frecuencia, la distancia y el tipo de terreno.

• Para otro tipo de antena y otra potencia el valor del campo es:

$$E = E_{carta} \sqrt{\frac{1}{3} P_t (\text{kW}) G_t} = E_{carta} \sqrt{\frac{\text{PIRE (kW)}}{\text{PIRE monopolo 1kW}}}$$

$$\text{PIRE} = P_t \cdot G_t = P_{rad} \cdot D_t$$



≡



$$D_{monopolo} = 2 D_{dipolo}$$

$$G_t = 2 D_{dipolo} \eta_{rad \text{ monopolo}}$$

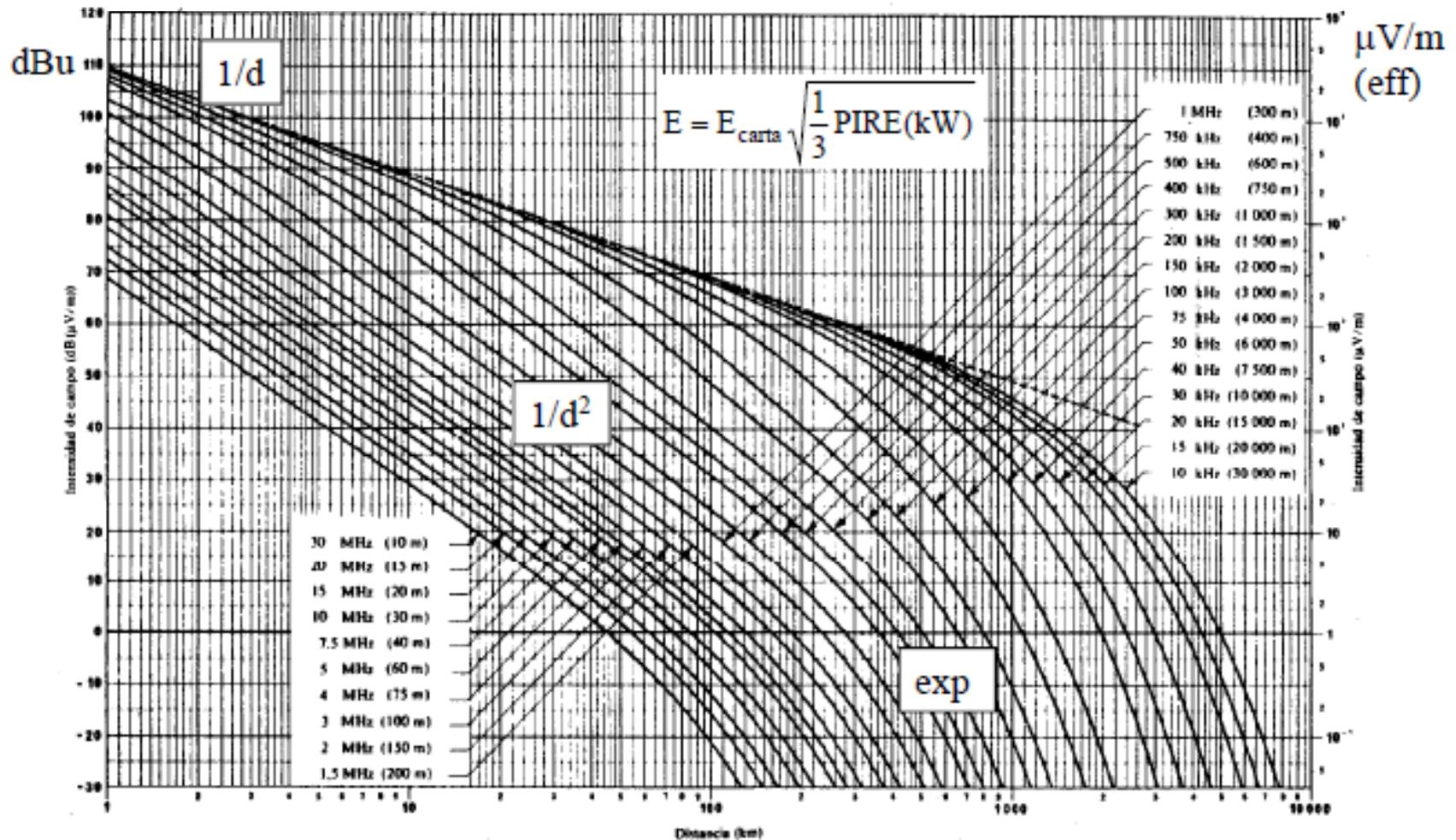
$$D_{dipolo \text{ corto}} = 1.5$$

$$D_{dipolo \lambda/2} = 1.64$$





Modelo de Tierra Esférica

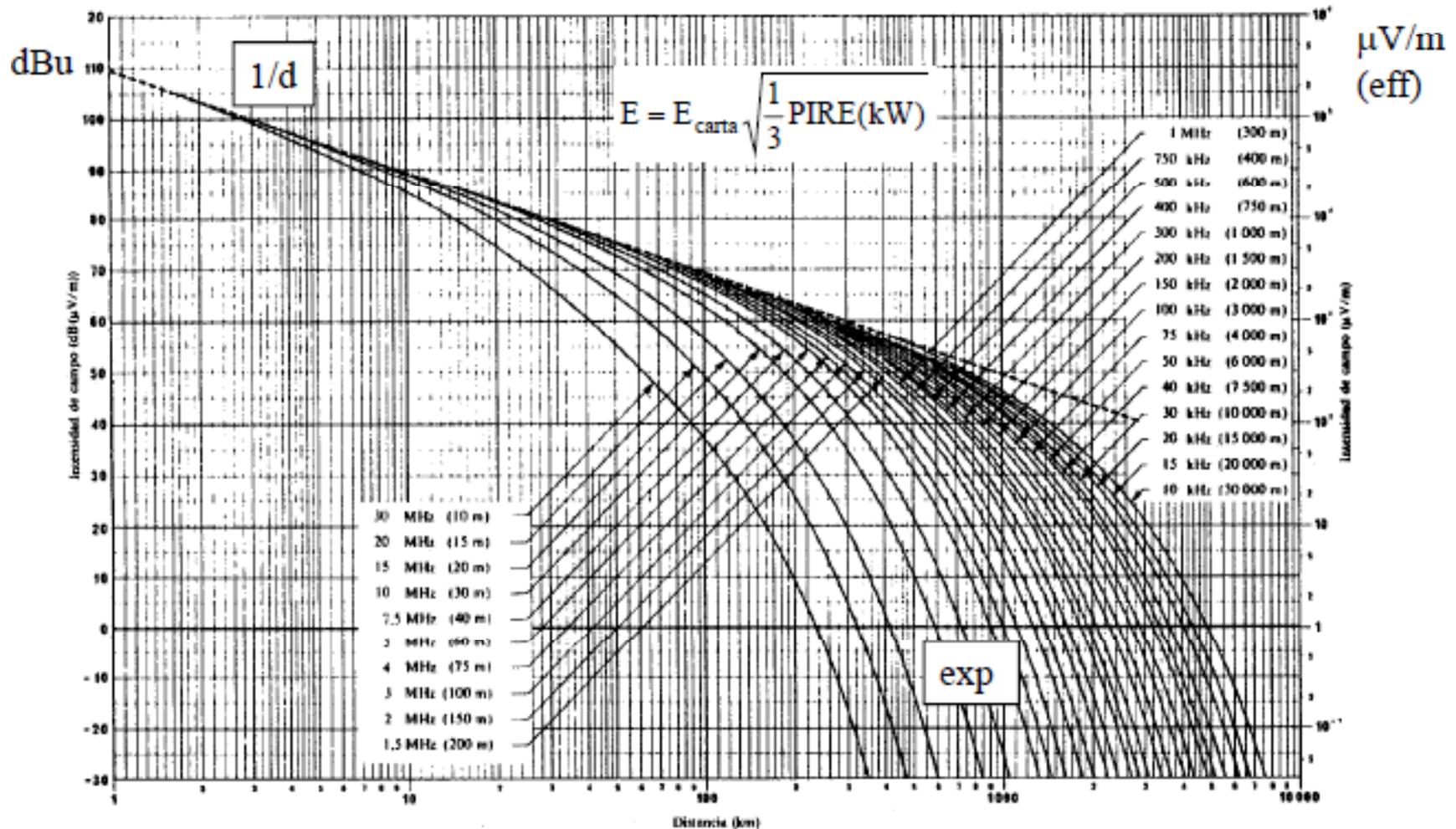


Intensidad de la onda de tierra seca (UIT-R) Pt=1 kw





Modelo de Tierra Esférica



Intensidad de la onda de superficie sobre mar (UIT-R) Pt=1 kw





Modelo de Tierra Esférica

- Las conclusiones principales que se obtienen para la propagación por onda de superficie, tras examinar los gráficos anteriores son:

• Mientras la antena transmisora sea “eléctricamente corta” (monopolo corto), la amplitud de los campos no depende de la altura real de la antena.

• En regiones próximas a la antena el campo decae como **1/d**

• En regiones intermedias, el campo decrece como **1/d²**

• A grandes distancias de la antena transmisora, donde la curvatura de la Tierra se hace importante, el campo decrece de **forma exponencial**

• El alcance depende del tipo de terreno, siendo mayor en zonas húmedas que secas

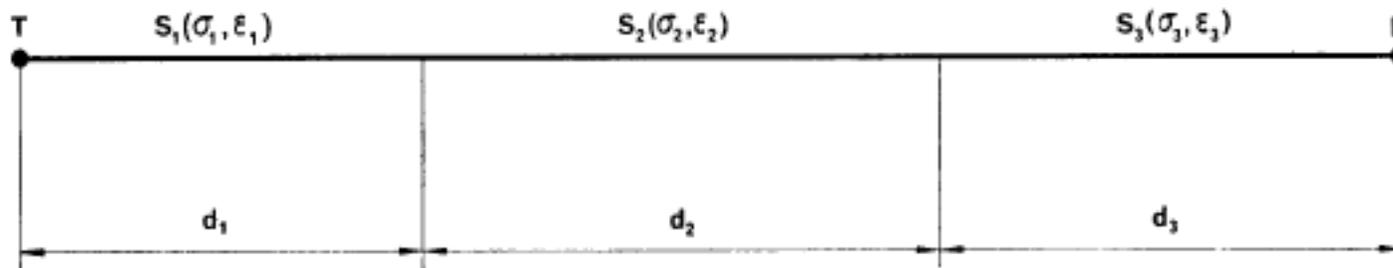
• El alcance, para una sensibilidad dada, es menor cuanto mayor es la frecuencia. Por encima de MF el alcance sobre tierra es muy reducido.





Modelo de Tierra Esférica

- Como las curvas anteriores son sólo aplicables a un tipo de terreno dado, surge la cuestión de cómo evaluar el campo cuando el trayecto de propagación discurre a través de suelos de diferentes características.
- La recomendación UIT R-P.368 contiene un procedimiento aplicable a este caso, que exponemos para una situación en la cual el trayecto atraviesa tres tipos de suelos.



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

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

La intensidad de campo requerida viene dada por $\frac{1}{2} [E_R + E_T]$.





Propagación por onda ionosférica

La ionosfera es la región de las capas altas de la atmósfera (60- 400 Km de altura) que debido a su ionización, refleja las señales radioeléctricas hasta unos 30 MHz.

La ionización, presencia de electrones libres, se produce fundamentalmente por las radiaciones solares en las bandas de ultravioletas y rayos X. También contribuye a la misma otros fenómenos como los rayos cósmicos y los meteoritos.

- La densidad de electrones varía así según la hora del día y la estación del año. La radiación también varía siguiendo el ciclo de las manchas solares (≈ 11 años).

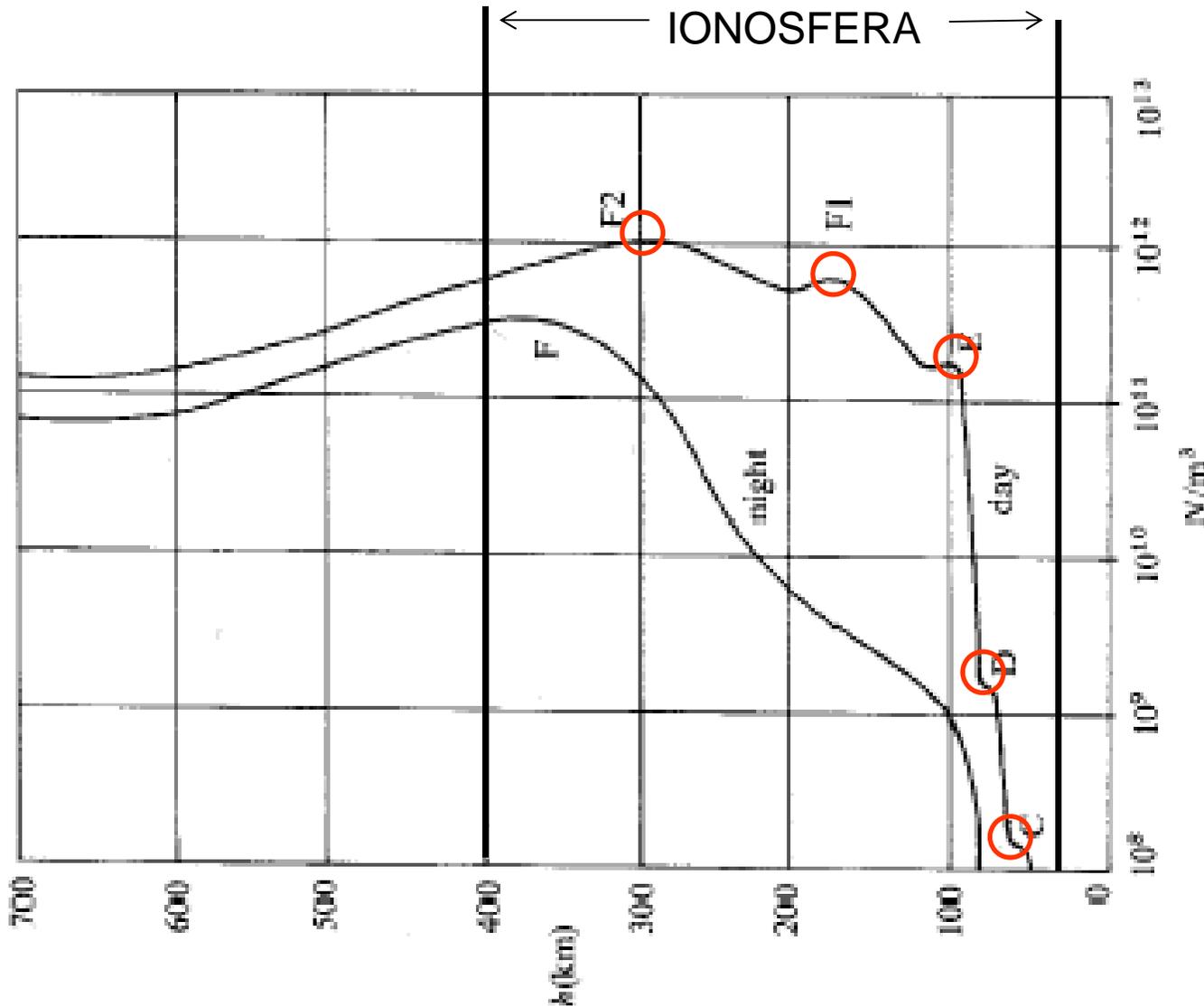
La densidad de electrones varía con la altura y presenta determinados máximos relativos, llamados capas.

- En las zonas más altas la densidad de átomos y moléculas es baja. La energía de radiación exterior es grande pero hay pocos átomos disponibles para ionizar.
- Al descender, las radiaciones ionizan los gases y su energía se absorbe gradualmente.
- En las zonas más bajas los electrones e iones desaparecen puesto que la recombinación predomina sobre la ionización al ser mayor la densidad de partículas.
- Por otra parte, a partir de los 100 km de altura, la composición de la atmósfera varía ya que los gases se estratifican. Como cada gas (N_2 , O_2 , O, N) absorbe la radiación a partir de un cierto nivel energético, la densidad de ionización varía con la altura, presentando los distintos máximos locales (capas)





Capas ionosféricas



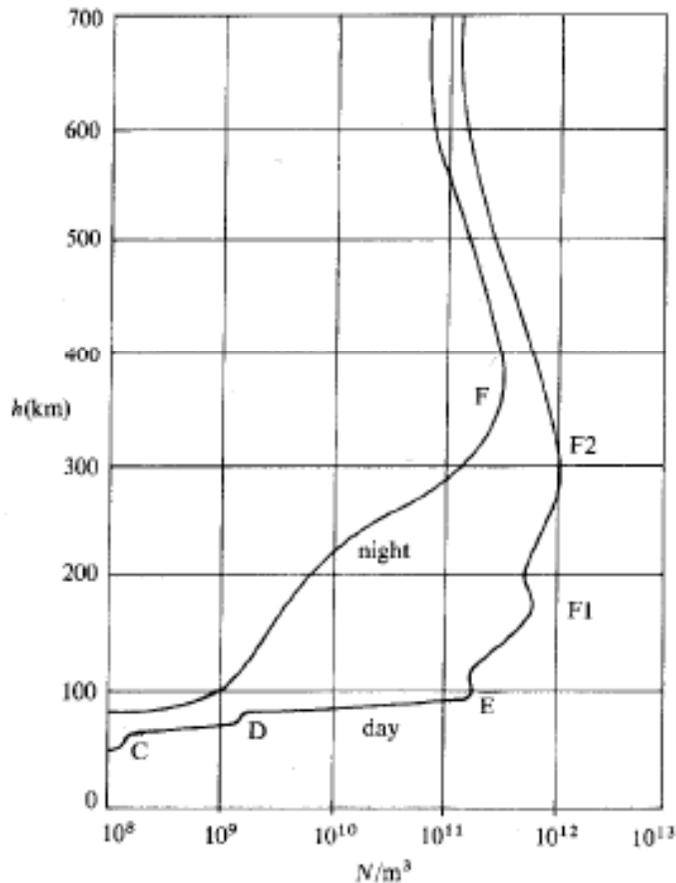
Las capas vienen determinadas por los "máximos relativos" de la densidad de electrones libres con la altura, en el modelo diurno





Propagación por onda ionosférica

Capas ionosféricas



Densidad de electrones libres con la altura

- La **primera capa es la D**. Es una zona de baja densidad electrónica comparada con la molecular, que se produce entre los 60 y los 90 km. Esta capa decrece rápidamente tras la puesta de sol, y su efecto más importante es la atenuación en la banda MF. (Las señales en esta banda durante el día llegan a la Tierra muy debilitadas).

- **La capa E** está localizada entre 90 y 130 km. Aparece fundamentalmente de día y muy tenuemente por la noche reflejando las frecuencias de MF. En determinadas situaciones, y de día, aparece una capa E esporádica, situada entre 90 y 150 km, haciendo que la atenuación sea mayor.

- La capa más importante, donde se produce fundamentalmente la reflexión ionosférica es la **capa F**. Se extiende desde los 150 km hasta los 400 km, y de día se desdobra en dos capas, la **F1** y la **F2**.



**Modelo de Plasma Simple**

La corriente equivalente en el plasma de densidad N elec/m³ es: $\vec{J} = -Ne\vec{v} = \frac{Ne^2}{m(\nu + j\omega)} \vec{E}$

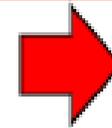
En definitiva el plasma presenta una permitividad ϵ_{eq} y una conductividad σ_{eq} :

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon_0\vec{E} = j\omega\epsilon_0 \left(1 + \frac{Ne^2}{j\omega\epsilon_0 m(\nu + j\omega)} \right) \vec{E} = j\omega\epsilon_c \vec{E} \equiv \sigma_{eq} \vec{E} + j\omega\epsilon_{eq} \vec{E}$$

$$\epsilon_c = \left(\epsilon_{eq} - j \frac{\sigma_{eq}}{\omega} \right) = \epsilon_0 \left(1 + \frac{Ne^2}{j\omega\epsilon_0 m(\nu + j\omega)} \right)$$

$$\epsilon_{eq} = \epsilon_0 \left(1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m(\nu^2 + \omega^2)} \right) = \epsilon_0 \epsilon_{req}$$

$$\sigma_{eq} = \frac{Ne^2\nu}{m(\nu^2 + \omega^2)}$$

 $\omega \gg \nu$ 

$$\begin{aligned} \epsilon_{req} &\approx 1 - 80.8 \frac{N}{f^2} \\ \eta &= \sqrt{\epsilon_{req}} \\ \sigma_{eq} &\approx 2.82 \cdot 10^{-8} \frac{N\nu}{\omega^2} \end{aligned}$$

Los valores de permitividad relativa y conductividad equivalente obtenidos permiten analizar la propagación en un medio ideal con dichos parámetros.

ν = frecuencia de colisiones





Modelo de Plasma Simple

Para frecuencias de MF y HF, donde se cumple que $\sigma_{eq}/\omega\epsilon_{eq} \ll 1$ (plasma de bajas pérdidas), la onda se propaga con una constante de fase β y una constante de atenuación α :

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_c} \begin{cases} \alpha \approx 60\pi \frac{\sigma}{\sqrt{\epsilon_{req}}} \Rightarrow \alpha \approx 1,16 \cdot 10^{-3} \frac{N\sigma}{f^2} \text{ dB/km} \\ \beta \approx \beta_0 \sqrt{\epsilon_{req}} \end{cases}$$

En las expresiones anteriores se observa:

- La atenuación es inversamente proporcional a la frecuencia al cuadrado (por ejemplo a 3 MHz es 9 veces menor que a 1 MHz)
- La atenuación depende de la densidad de electrones y el número de choques (de día la densidad de electrones es mayor que de noche. Ver figuras siguientes). El número de choques es especialmente alto en la capa D porque la densidad de gases es mucho mayor, lo que conlleva atenuaciones diurnas en esta capa elevadas.
- El medio es dispersivo, como pone de manifiesto la expresión de la constante de propagación β (ya que ϵ_{req} depende de la frecuencia). De hecho, un plasma con una densidad de electrones N posee una frecuencia de corte (frecuencia por debajo de la cual la onda no se propaga) igual a :

$$\epsilon_{req} = 0 = 1 - 80,8 \frac{N}{f_c^2} \Rightarrow f_c \approx 9\sqrt{N}$$

Medio dispersivo:

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{n} > c$$

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = c \cdot n < c$$





Ionogramas

Para incidencia vertical se define la ALTURA VIRTUAL (h_v) como:

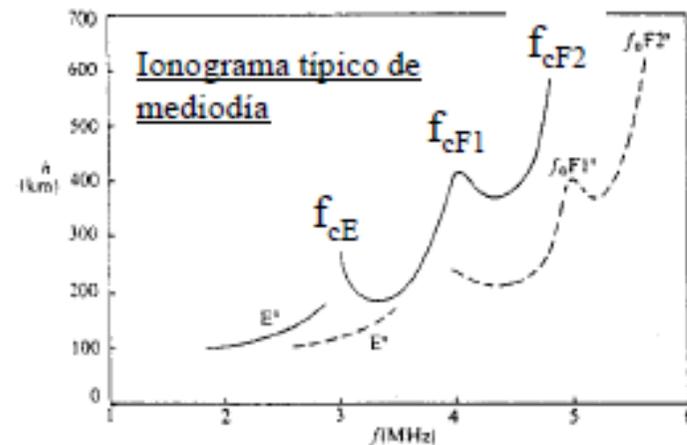
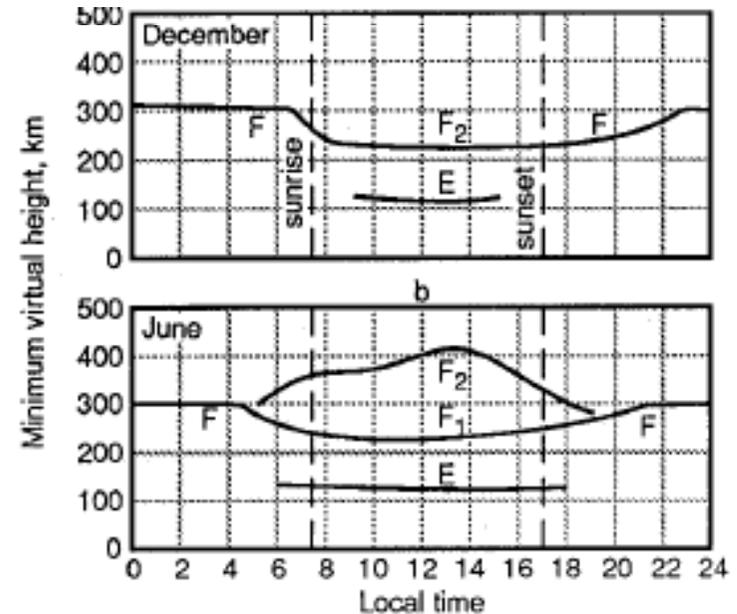
La del punto ideal en que se produciría la reflexión para el mismo tiempo de propagación, si la velocidad fuese constante e igual a la de la luz en el vacío

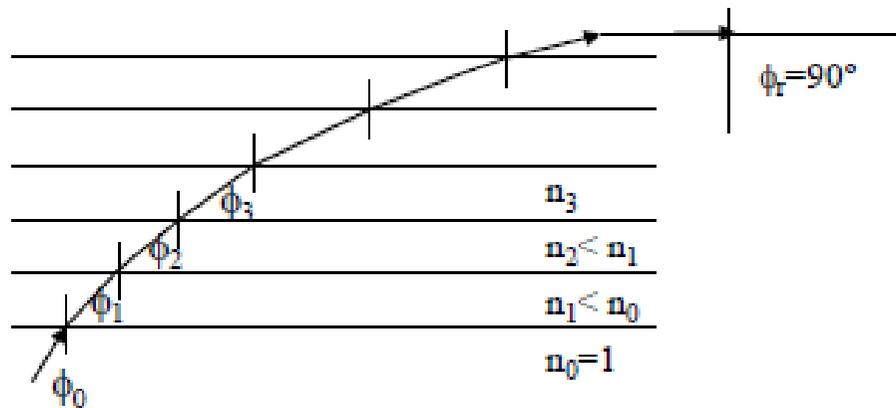
- Se mide utilizando radares pulsados (sondas radioeléctricas) de frecuencia (f) variable, que miden el tiempo de propagación (τ), de ida y vuelta, de emisiones verticales.

$$h_v(f) = \frac{\tau(f)c}{2}$$

Un IONOGRAMA representa la variación de la altura virtual con la frecuencia.

- Los desdoblamientos (aparición del rayo extraordinario X) son causados por la anisotropía que imprime el campo magnético terrestre a la ionosfera.





Modelo de refracción ionosférica

$$n = \sqrt{1 - 80,8 \frac{N(h)}{f^2}}$$

n disminuye con h

Un rayo incidente se curva hacia Tierra de acuerdo con la Ley de Snell:

$$n_0 \text{sen}(\phi_0) = n_1 \text{sen}(\phi_1) = \dots = n_i \text{sen}(\phi_i)$$

Se alcanza una trayectoria horizontal (retorno a Tierra) cuando $\phi_i = \phi_r = 90^\circ$:

$$n_r = \text{sen} \phi_0$$

En el caso de una incidencia vertical $\phi_0 = 0^\circ$:

$$n_r = \sqrt{1 - 80,8 \frac{N}{f^2}} = 0$$

de modo que existirá una “reflexión total” dentro de cada capa para aquellas frecuencias que sean inferiores, en orden creciente, a las frecuencias críticas (frecuencias de corte) de cada una

$$f_c = \sqrt{80,8 N_{\text{max}}} \approx 9 \sqrt{N_{\text{max}}}$$

$$f_{cE} \leq f_{cF1} \leq f_{cF2}$$





Refracción ionosférica. Máxima Frecuencia Utilizable (MUF)

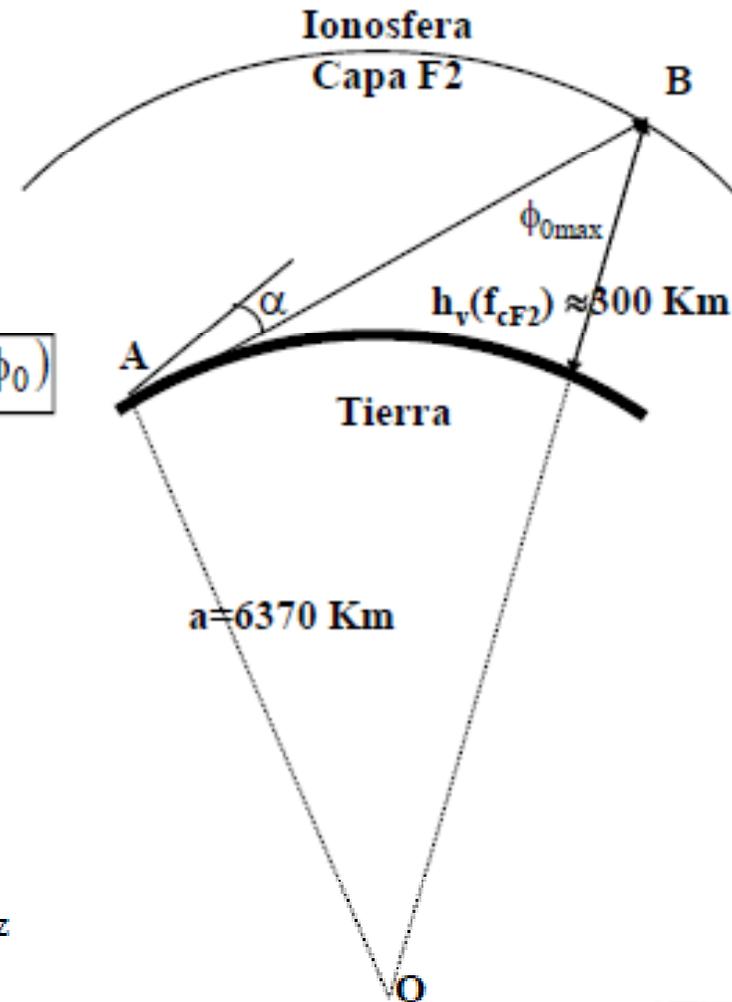
- Cuando la incidencia no es vertical la frecuencia máxima que retorna de cada capa i depende del ángulo de incidencia ϕ_0 :

$$n_{ri} = \text{sen}(\phi_0) \quad \text{sen}(\phi_0) = \sqrt{1 - 80,8 \frac{N_{i,max}}{f_{i,max}^2}}$$

$$f_{i,max}^2 = \frac{80,8 \cdot N_{i,max}}{1 - \text{sen}^2 \phi_0} = \frac{f_{ci}^2}{\text{cos}^2 \phi_0} \Rightarrow \boxed{MUF_i = f_{i,max} = f_{ci} \text{sec}(\phi_0)}$$

- Como el máximo ángulo de incidencia en la ionosfera (ϕ_{0max}) se obtiene para una elevación $\alpha=0^\circ$ en Tierra (A), la frecuencia más elevada que retorna a Tierra, corresponde a la capa F2. En el límite, la máxima frecuencia que retorna a tierra, que es por la noche, está en torno a :

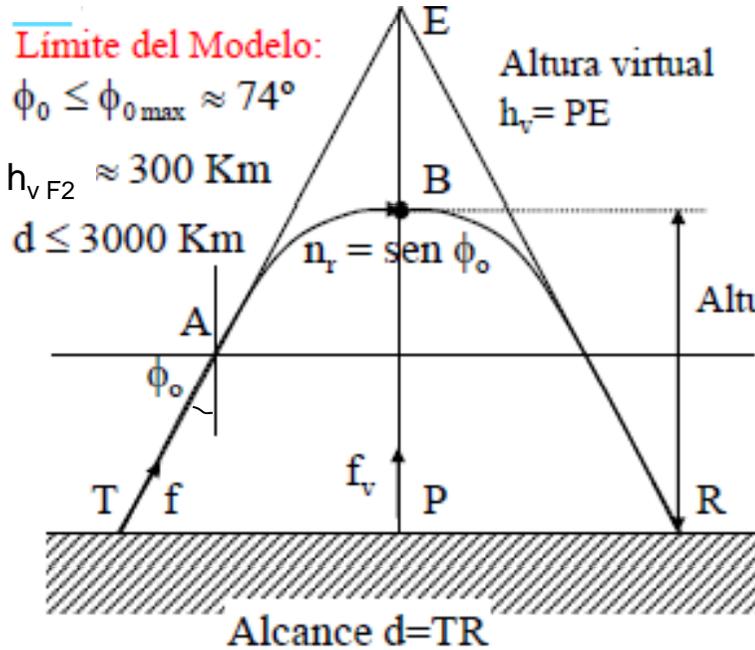
$$MUF_{F2} = f_{c,F2} \text{sec}(\phi_{0max}) = f_{c,F2} \frac{a + h_v}{\sqrt{(a + h_v)^2 - a^2}} \approx 4f_{c,F2} \approx 30 \text{ MHz}$$





Modelo de propagación ionosférica para Tierra Plana

Cálculo de alcances aproximados



- Ley de la Secante
 - La altura virtual h_v de una emisión a frecuencia f y ángulo de incidencia ϕ_0 es la misma que le corresponde a la frecuencia f_v en incidencia vertical, si se cumple:

$$f = f_v \sec(\phi_0)$$

$$h_v(f, \phi_0) \equiv h_{v \text{ ionograma}}(f / \sec \phi_0)$$

- Máxima Frecuencia Utilizable (MUF)

$$MUF_i(\phi_0) = f_{ci} \sec(\phi_0)$$

$$MUF_i(d) = f_{ci} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2h_v}\right)^2}$$

Modelo de Tierra Plana

- Frecuencia óptima de trabajo (OWF)

$$OWF_i(d) = 0,85 \cdot MUF_i(d)$$

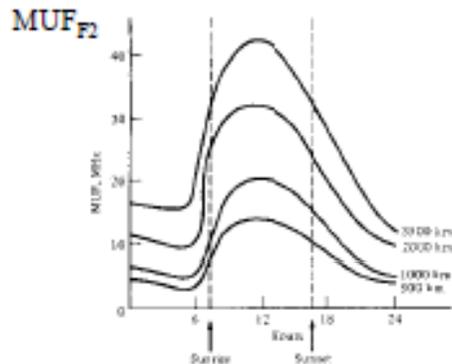


Figure 6.43 Maximum usable frequency (MUF) for a distance for different skip distances. MUF is lower in the summer.

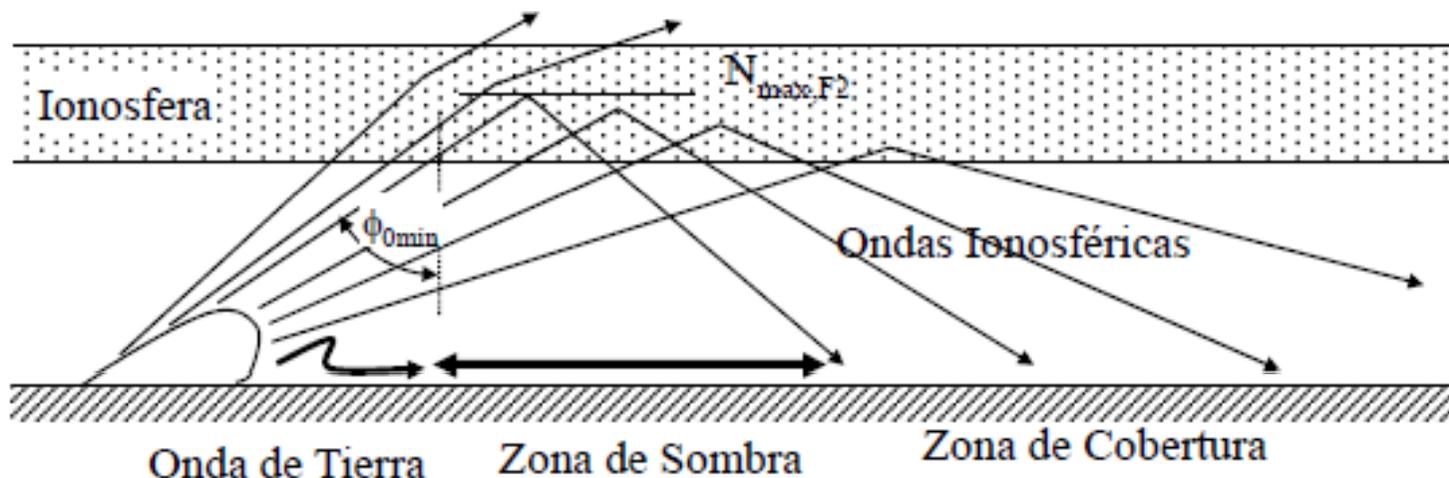




Radiodifusión de onda corta

- Para radiodifusión a distancias medias se utilizan frecuencias inferiores a la frecuencia crítica de la capa F2 asegurando el retorno sobre toda la zona de cobertura.
- Para conseguir cobertura a gran distancia es necesario utilizar frecuencias más altas que las anteriores, próximas a la MUF_{F2} . En este caso aparece una zona de sombra, sin señal, entorno al transmisor.
 - El límite de la zona de sombra se obtiene a partir de la h_v de la capa F2 y del ángulo ϕ_{0min} , obtenido a su vez de:

$$f_{emision} = f_{cF2} \sec \phi_{0min}$$





Interferencias por onda ionosférica

- Las señales de LF y MF se propagan tanto por onda de tierra como por onda ionosférica.
 - De día la onda ionosférica se atenúa mucho por la presencia de la capa D (α_t del orden de 50 dB o superiores en MF).
 - Por la noche, cuando la capa D desaparece, las señales reflejadas en la capa E (a unos 100 km de altura) retornan a tierra con suficiente potencia como para producir interferencias, dando lugar a fenómenos de "fading" y a obtener alcances mucho mayores que con onda de Tierra. (responsable en muchos casos de interferencias sobre otras estaciones locales que funcionan a la misma o parecida frecuencia).

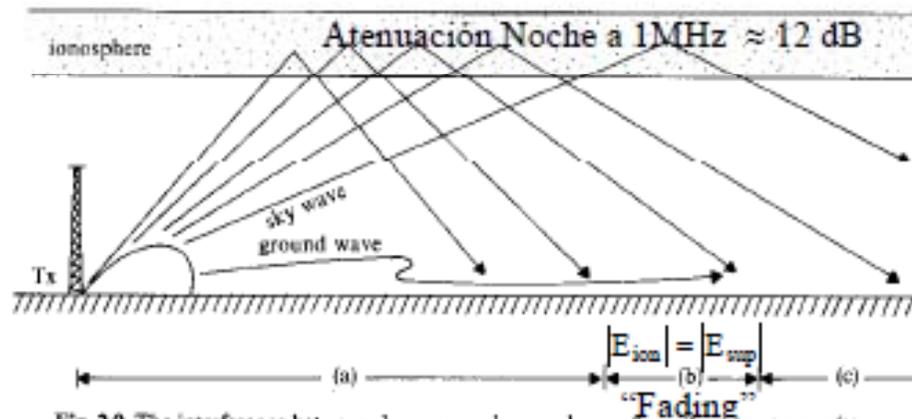


Fig. 2.9 The interference between sky wave and ground wave from the same transmitter. The reception is principally that of ground wave in zone (a) and of sky wave in zone (c), but the two modes produce interference in zone (b). A flat earth model is used for illustration.

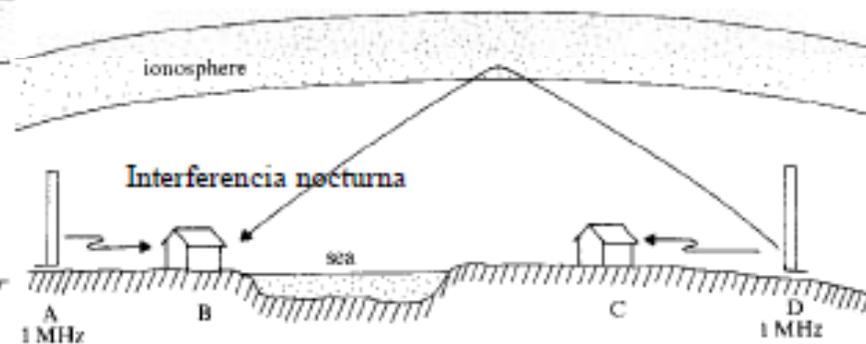


Fig. 2.10 Night-time interference from the sky wave produced by a non-synchronized transmitter (D) operating at the same frequency as the wanted transmitter (A) but broadcasting a different program.





Reflexión

Este mecanismo de propagación es el utilizado a frecuencias por encima de VHF donde no existe propagación por onda de superficie ni propagación ionosférica.

En este apartado se estudiarán los fenómenos debidos a la presencia del suelo, *reflexión*, *difracción*, junto con los fenómenos debidos a la presencia de la troposfera: *atenuación* y *refracción*

Efecto del suelo



En la mayoría de los casos, sobre todo en las bandas de microondas, se requiere enlace visual entre antenas con lo que se limita el alcance a la línea del horizonte.





Coefficientes de reflexión de la Tierra

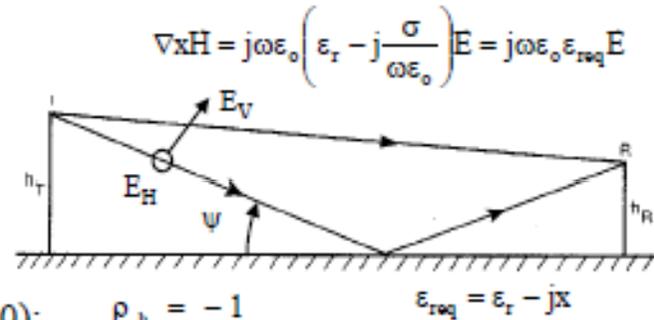
Dependen del *tipo de suelo*, del *ángulo de incidencia* y de la *polarización* de la onda. Cuando la distancia entre la antenas es muy grande comparada con la altura de las mismas, situación habitual, el ángulo de incidencia ψ tiende a cero. (Tierra plana). Cuando no se puede hacer aproximación por tierra plana (reflexiones en suelos irregulares y rugosos), se aplican factores de corrección que dependen de la *altura eléctrica de los mismos y del ángulo de incidencia de la onda*. (Coeficiente reflexión <1)

Los coeficientes de reflexión se obtienen considerando una incidencia oblicua sobre un dieléctrico plano con pérdidas (ϵ_r, σ) que simula la Tierra.

Polarización Horizontal.

$$\rho_h = \frac{\text{sen } \psi - \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \psi}}{\text{sen } \psi + \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \psi}}$$

$$x = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} = 60\lambda\sigma$$



- En ángulos próximos a la incidencia rasante ($\psi \rightarrow 0$): $\rho_h = -1$
- Para otros ángulos, la fase permanece prácticamente fija a valores cercanos a 180° .
- El módulo se altera sobre todo para altas frecuencias o bajas conductividades

Polarización Vertical.

$$\rho_v = \frac{(\epsilon_r - jx) \text{sen } \psi - \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \psi}}{(\epsilon_r - jx) \text{sen } \psi + \sqrt{(\epsilon_r - jx) - \cos^2 \psi}}$$

- Para incidencia rasante ($\psi \rightarrow 0$): $\rho_v = -1$
- Para ángulos mayores cambia muy deprisa tanto la fase como el módulo.
- Para cada frecuencia aparece un pseudo-ángulo de Brewster.

Reflexión

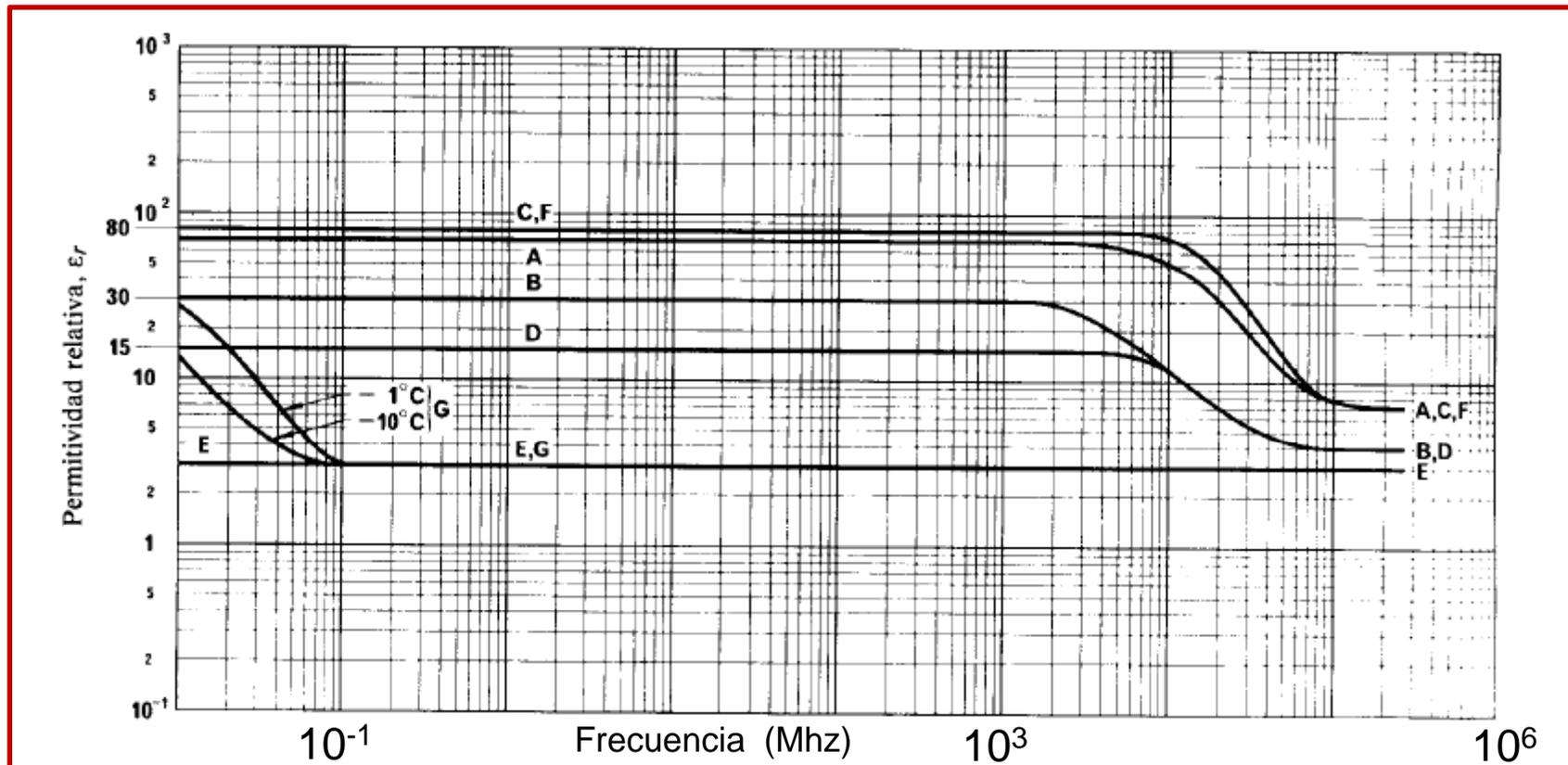
Para $f > 100\text{MHz}$ son válidas las gráficas de esta frecuencia.





Coeficientes de reflexión de la Tierra

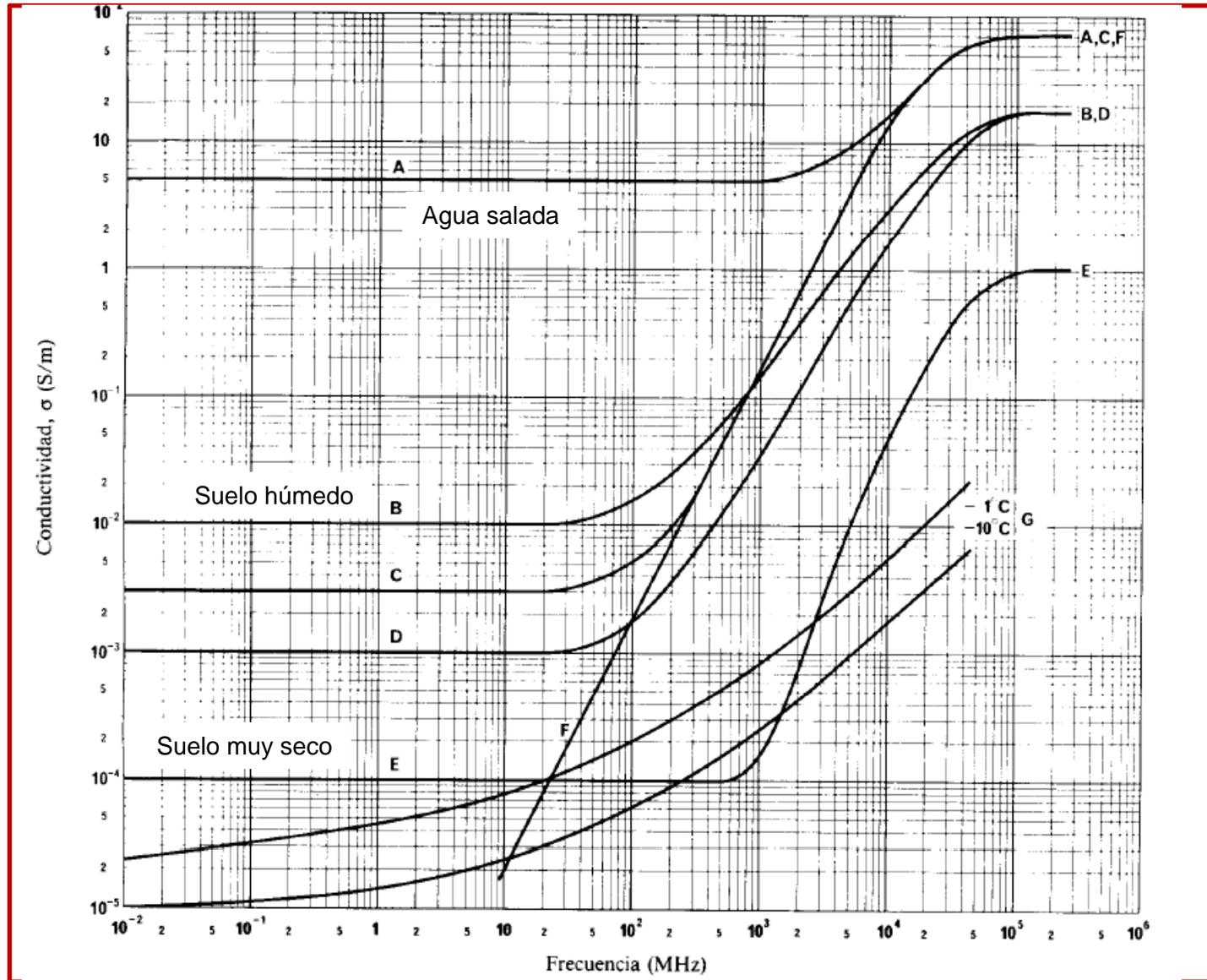
Reflexión





Coeficientes de reflexión de la Tierra

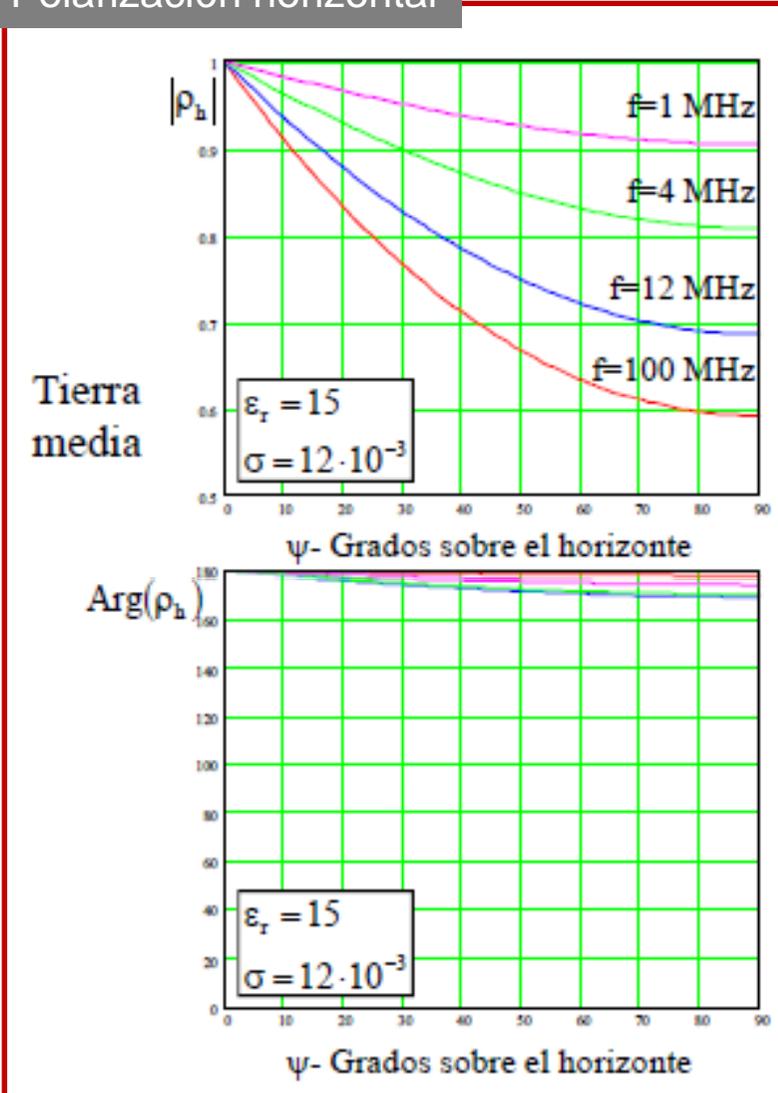
Reflexión



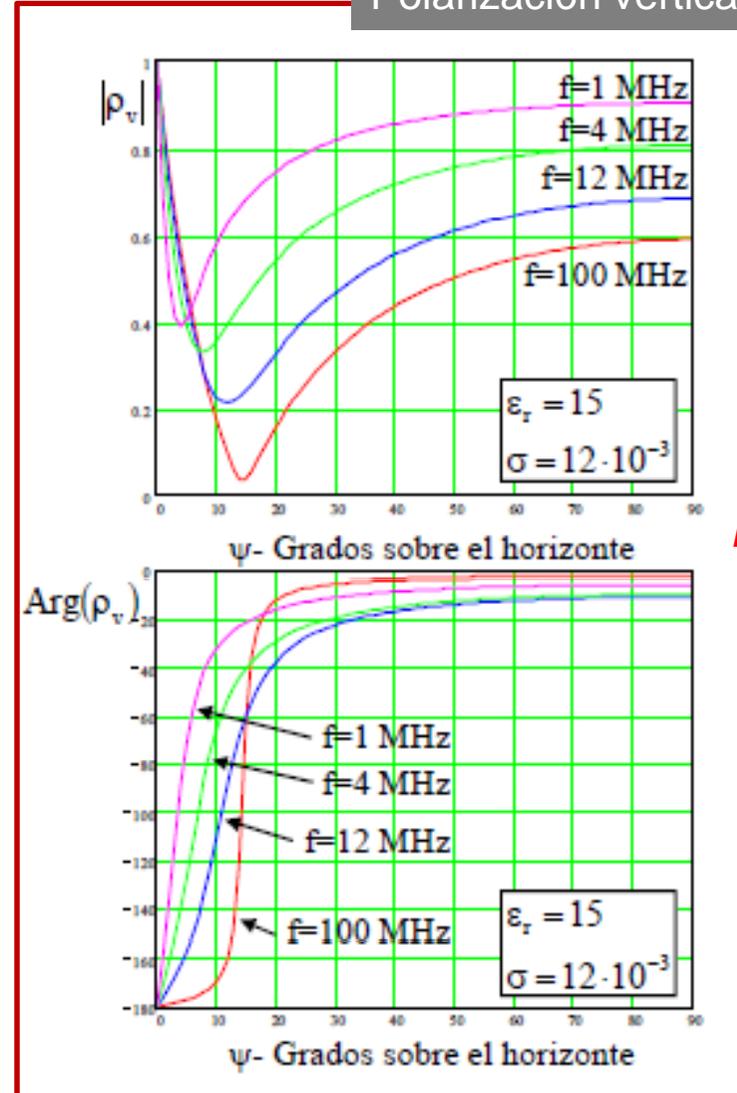


Coeficientes de reflexión de la Tierra

Polarización horizontal



Polarización vertical



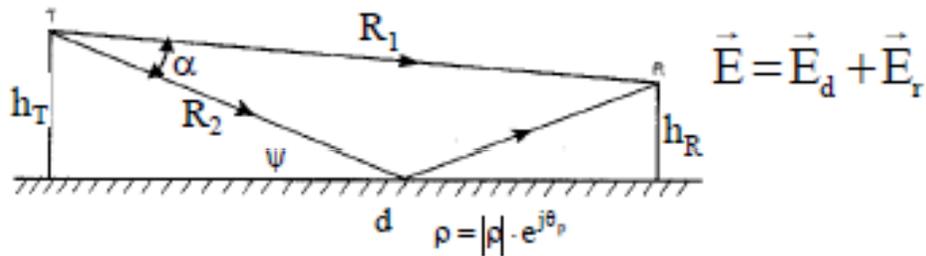
Reflexión





Radioenlaces con modelo de Tierra Plana

Cuando la distancia es del orden de unas decenas de kilómetros, la Tierra se puede modelar en muchas ocasiones como una superficie plana ($d \gg h_T, h_R \Rightarrow \psi \rightarrow 0, \rho \rightarrow -1$) A gran distancia, también ocurre normalmente que $\alpha \ll BW_{-3dB}$, con lo que $|E_d| = |E_r|$:



Reflexión

$$E = E_d \left(1 + |\rho| e^{j\theta_p} e^{-j\Delta\phi} \right) = E_d \left(1 - e^{-j\Delta\phi} \right) \quad \text{donde: } \Delta\phi = k_o(R_2 - R_1)$$

con $\rho = -1$

$$R_1 = \sqrt{d^2 + (h_T - h_R)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{d^2 + (h_T + h_R)^2}$$

$$R_2 - R_1 \approx \frac{2h_T h_R}{d}$$

$$E = 2|E_d| \text{sen} \frac{\Delta\phi}{2} = 2|E_d| \text{sen} \left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d} \right)$$





Radioenlaces con modelo de Tierra Plana

Reflexión

Fórmula de Friis para Tierra plana

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot G_T \cdot G_R \cdot \boxed{4 \operatorname{sen}^2\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right)}$$

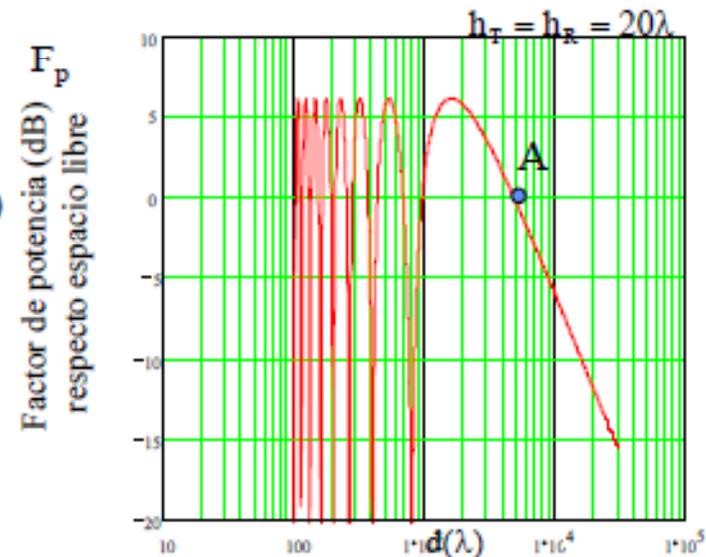
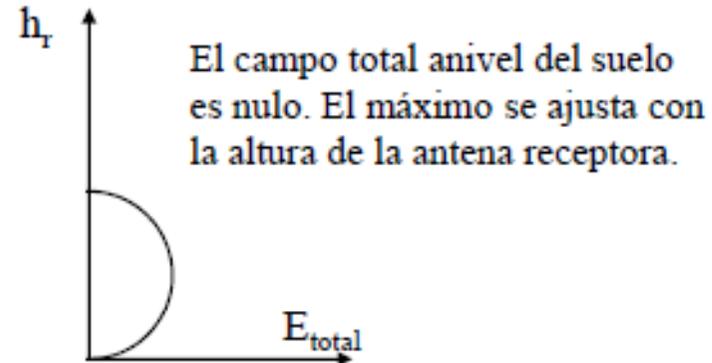
F_p

A gran distancia, más allá del punto A,
cuando se cumple: $\frac{2\pi h_T \cdot h_R}{\lambda d} \ll \frac{\pi}{2}$

$$\frac{P_R}{P_T} \approx \frac{(h_T h_R)^2}{d^4} G_T G_R \quad (\text{independiente de la frecuencia})$$

- Para reducir pérdidas conviene trabajar con alturas lo más altas posibles.
- La potencia decrece como $1/d^4$
- A veces surgen problemas de fading (se aplica diversidad espacial en altura)

Variación del campo en altura





Difracción por obstáculos. Elipsoides de Fresnel

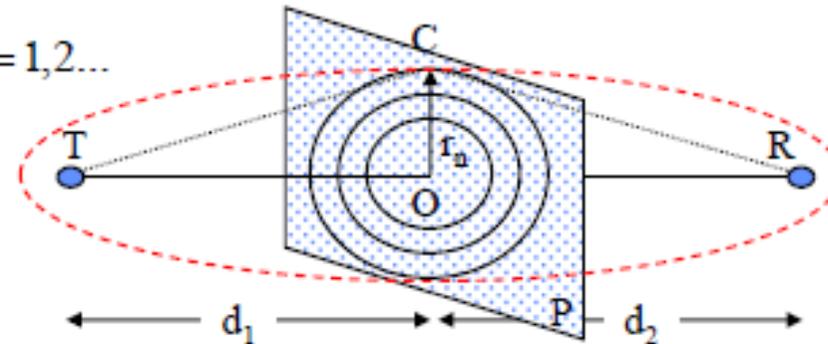
Difracción

Las ondas electromagnéticas cuando inciden sobre obstáculos se difractan.

- En el análisis de la difracción hay que tener en cuenta el volumen que ocupa la onda.
- Para ello se definen los elipsoides de Fresnel con aquellos puntos C del espacio que cumplen:
- Las intersecciones de estos elipsoides con un plano P (situado sobre el obstáculo) definen las llamadas Zonas de Fresnel, cuyos radios r_n valen:

$$TC + CR = TOR + n\lambda/2 \quad n = 1, 2, \dots$$

$$r_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad \text{cuando } d_1, d_2 \gg r_n$$



- Aplicando el Principio de Huygens, el campo sobre la antena receptora puede obtenerse como la superposición de los campos provenientes de las fuentes secundarias elementales situadas en un plano P, llegando cada contribución con una fase proporcional al camino TCR recorrido.
- El campo total en R coincide en primera aproximación con la contribución de las fuentes de la primera zona de Fresnel.

Por ello cuando se libera la zona de Fresnel, $\frac{h}{r_1} = -1$, el efecto de la difracción es despreciable. Del mismo modo, en cuanto se oculta la primera zona de Fresnel, $\frac{h}{r_1} = +1$, el campo recibido está atenuado en más de 16 dB con respecto al del espacio libre r_1

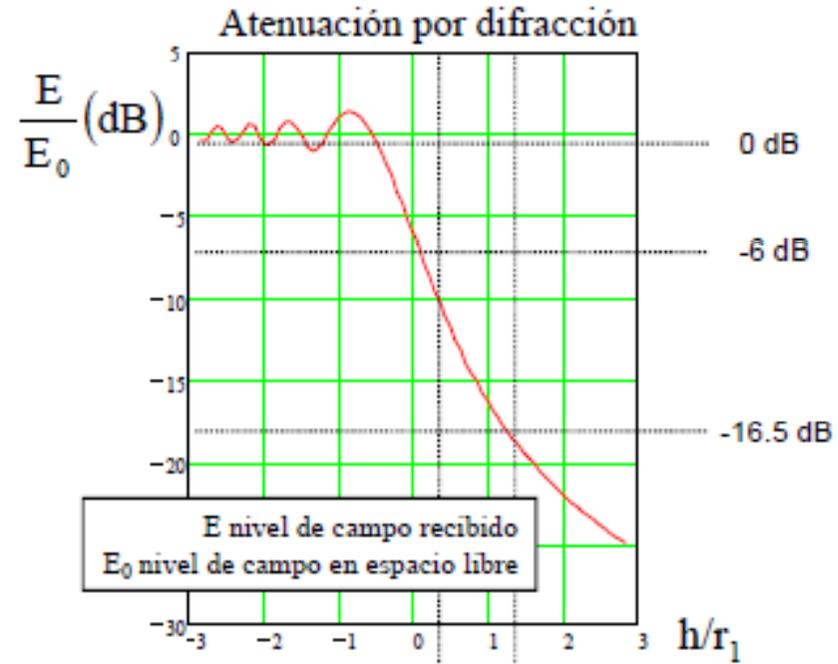
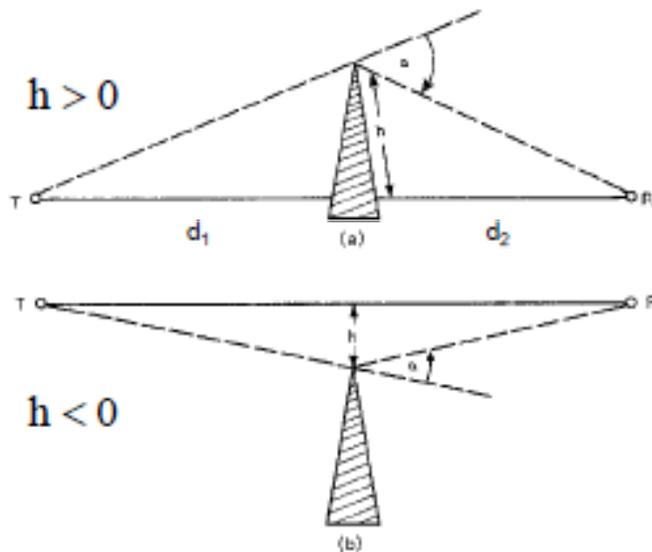




Difracción sobre obstáculos del terreno

Difracción

- Las pérdidas de Difracción por los obstáculos montañosos del terreno se modelan con la solución analítica de la difracción producida por una cuña.



Como se ve, si el obstáculo no penetra dentro de la primera zona de Fresnel el efecto de la difracción es despreciable.

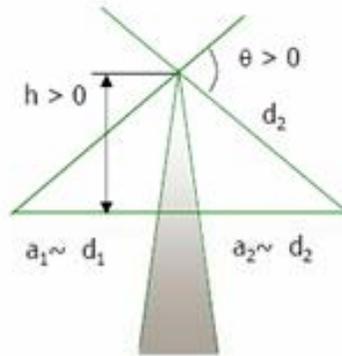
También existen gráficas y fórmulas para el cálculo de la atenuación por difracción por obstáculos redondeados y por la propia esfericidad de la Tierra (supuesta lisa)





Difracción sobre obstáculos del terreno

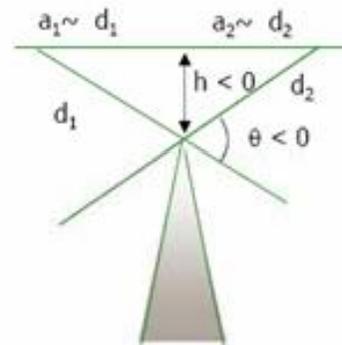
Difracción



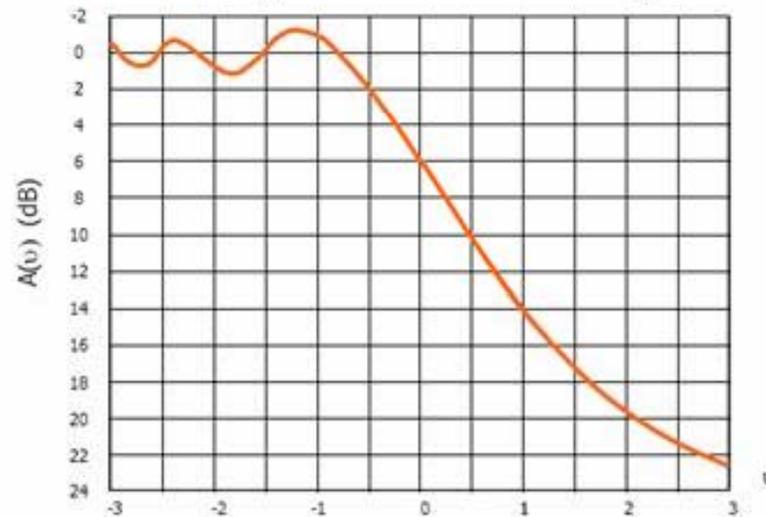
$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

h : altura de la cima sobre la línea que une los extremos. Si queda debajo $h < 0$.
 d_1, d_2 : distancias de los extremos a la arista

Todo en las mismas unidades



$$A(v) = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right); \text{ para } v > -0.7$$



$$L(v) = \begin{cases} -20 \log(0.5 - 0.62v) & -0.8 < v < 0 \\ -20 \log(0.5 \exp(-0.95v)) & 0 < v < 1 \\ -20 \log(0.4 - \{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2\}^{1/2}) & 1 < v < 2.4 \\ -20 \log(0.225/v) & v > 2.4 \end{cases}$$



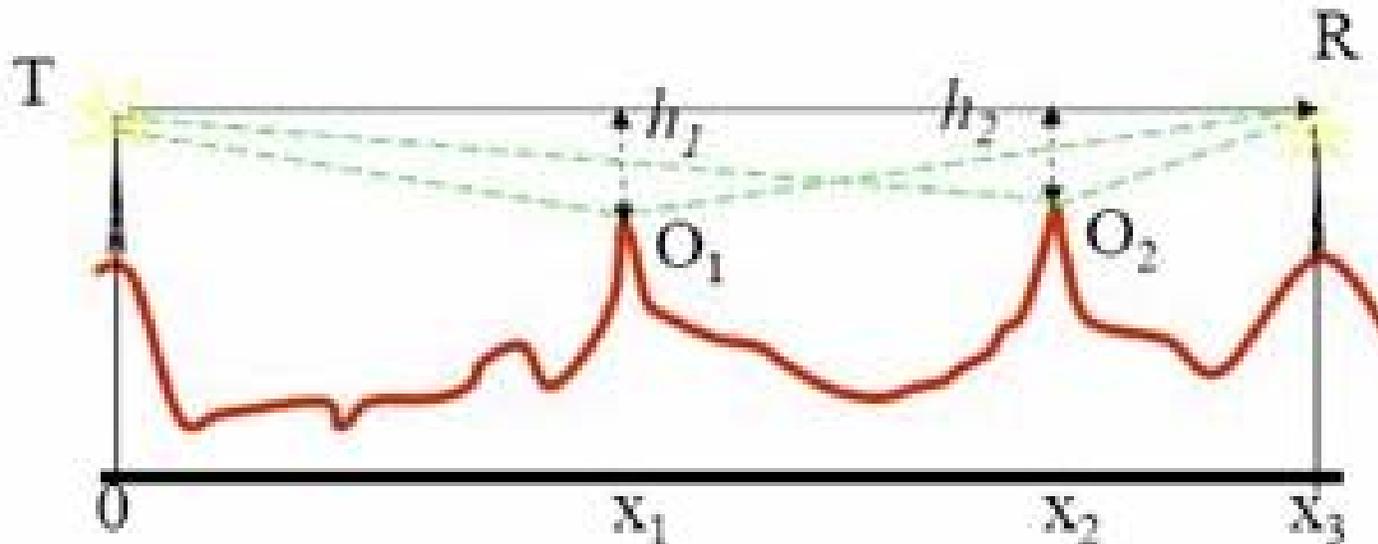


Difracción sobre obstáculos del terreno

Difracción

Se aplica el método cuando el rayo TR no corta a ningún obstáculo, pero existe despejamiento insuficiente en ambos, esto es, para cada obstáculo se cumple que

$$-0,7 \leq v \leq 0$$



$$L_D = L_D(TO_1R) + L_D(TO_2R) = L_D(v_1) + L_D(v_2)$$





Difracción sobre obstáculos del terreno

Difracción

Cuando los obstáculos son redondeados la atenuación por filo se corrige añadiendo otros factores de pérdidas que tienen en cuenta el ángulo de visión, los radios de redondeo, las distancias del obstáculo a transmisor y receptor...

Para el caso de la difracción producida por la curvatura de la Tierra, existen fórmulas y gráficas semiempíricas que, a partir de la distancia entre antenas y la altura de cada antena, calculan las pérdidas respecto al espacio libre.

Del mismo modo, en un ambiente real, como el que puede darse en comunicaciones móviles, el suelo y los edificios producen reflexiones y difracciones múltiples.

Existen modelos físicos que consideran una estructura dada de edificios y modelos estadísticos basados en medidas para predecir el campo recibido por el móvil en cada punto.

Hoy en día hay datos estadísticos muy completos que permiten planificar entornos complejos en ambientes urbanos.





Efecto de la troposfera: atenuación

Atenuación

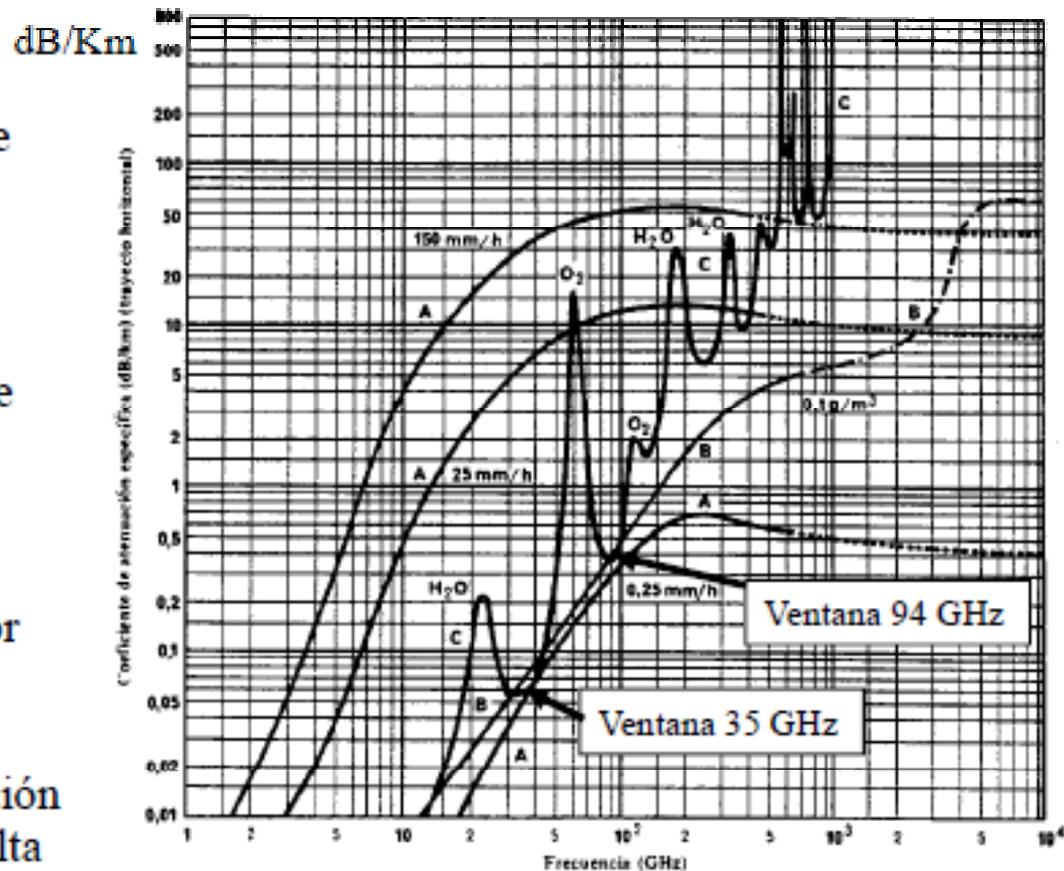
La atmósfera apenas introduce ninguna atenuación por debajo de los 3 GHz.

Por encima de 3 GHz aparece:

- Atenuación por lluvia.
- Atenuación por niebla (mm e infrarrojos).
- Atenuación por resonancias moleculares.

Las curvas del UIT-R dan el valor de atenuación para trayectos horizontales próximos a tierra.

Aplicaciones de picos de atenuación (60 GHz): comunicaciones con alta reutilización de frecuencias y distancias cortas y comunicaciones militares seguras.



- A- Atenuación específica de la lluvia
- B- Atenuación específica de la niebla
- C- Atenuación por los componentes gaseosos



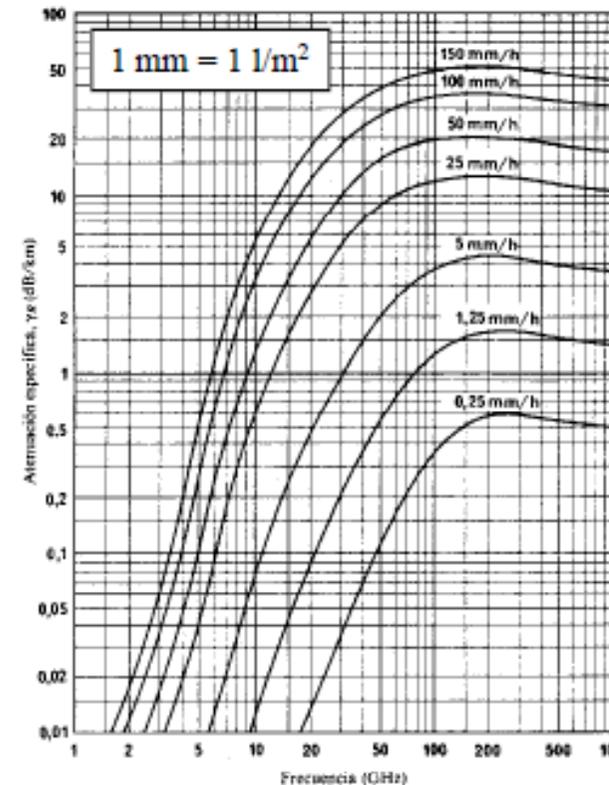


Efecto de la troposfera: atenuación por lluvia

Atenuación

Depende del tamaño de las gotas y de su deformación al caer, pero sobre todo de la cantidad global de agua en el aire. Debido a la dificultad de medir los anteriores parámetros se expresa la atenuación en función de la intensidad de lluvia (I) medida en mm/h.

- Varía con la frecuencia hasta unos 100 GHz.
- Depende algo de la polarización (H-V). La gráfica adjunta es un valor medio,
- Se produce por:
 - » La disipación por efecto Joule debido al comportamiento del agua como dieléctrico imperfecto.
 - » La dispersión de la energía en direcciones diferentes a la de propagación.
- Se aproxima como: $\gamma_R \text{ (dB / Km)} = K \cdot I^\alpha$



Frecuencia (GHz)	K_H	K_V	α_H	α_V
1	0,0000387	0,0000352	0,912	0,880
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
30	0,187	0,167	1,021	1,000
40	0,350	0,310	0,939	0,929





Efecto de la troposfera: refracción

Refracción

P = presión
 P_{agua} = humedad
 T = temperatura

Varían con la altura...

Índice de Refracción. $n = \sqrt{\epsilon_r}$

- El índice es muy próximo a la unidad, aunque existe una pequeña diferencia que depende de las condiciones atmosféricas:

$$n \approx 1 + \frac{77,6}{T} \left(P + \frac{4810 P_{\text{agua}}}{T} \right) 10^{-6}$$

Atmósfera estándar \rightarrow $n(0) \approx 1,000289$
 $n(1 \text{ Km}) \approx 1,000250$

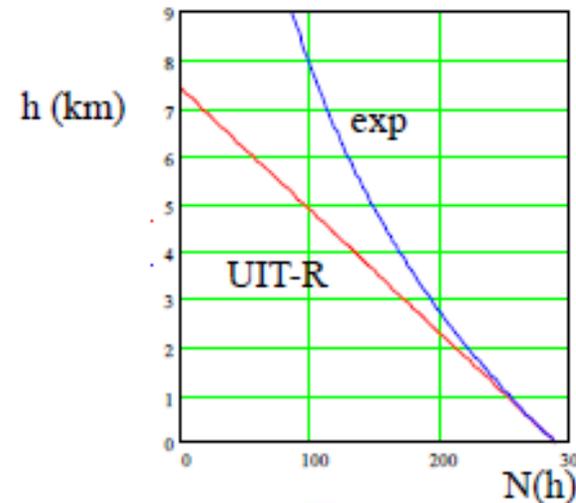
- Por comodidad se maneja el COINDICE, definido con tres cifras enteras: $N = (n - 1) 10^6$
- Se considera una ATMOSFERA STANDARD (para zonas templadas), definida como un valor medio de las propiedades de la troposfera. Existen varios modelos, donde h (en km) mide la altura sobre el nivel del mar:

» Modelo Lineal (UIT-R):

$$N(h) = 289 - 39h \quad \text{unidades N}$$

» Modelo Exponencial :

$$N(h) = 289 \exp(-0,135h) \quad \text{unidades N}$$





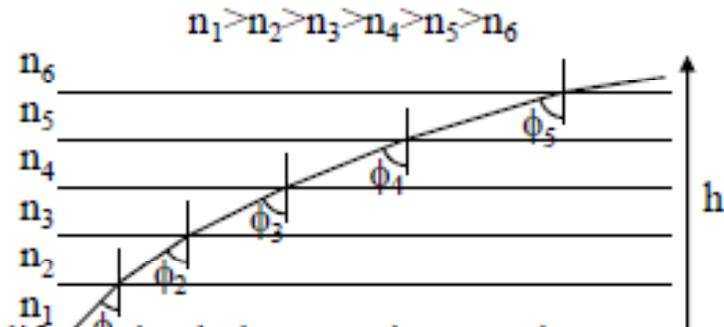
Efecto de la troposfera: refracción

Refracción

• Curvatura del Rayo.

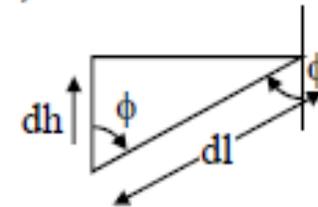
- La variación del índice de refracción con la altura genera una curvatura de los rayos definida por la Ley de Snell.

$$n_1 \text{sen}(\phi_1) = n_2 \text{sen}(\phi_2) = \dots = n_i \text{sen}(\phi_i) = \text{cte}$$



- El radio de curvatura (r) del rayo se obtiene diferenciando la expresión anterior y expresando el resultado en función del diferencial de longitud (dl)

$$\left. \begin{aligned} dn \cdot \text{sen}(\phi) + n \cos(\phi)d\phi &= 0 \\ \cos(\phi) &= \frac{dh}{dl} \end{aligned} \right\} \Rightarrow r = \frac{dl}{d\phi} \Rightarrow \frac{1}{r} = \frac{d\phi}{dl} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \text{sen}(\phi)$$



- Puesto que las antenas se encuentran habitualmente a alturas semejantes y para una atmósfera estándar el radio de curvatura toma el valor de:

$$\frac{1}{r} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \text{sen}(\phi) \Big|_{\substack{\phi \approx 90^\circ \\ n(h) \approx 1}} \approx -\frac{dn}{dh} = -\frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6} \xrightarrow{\text{Atmosfera Standard}} \frac{1}{r} \approx 39 \cdot 10^{-6} \Rightarrow r \approx \frac{10^6}{39} = 25640 \text{ km}$$





Efecto de la troposfera: refracción

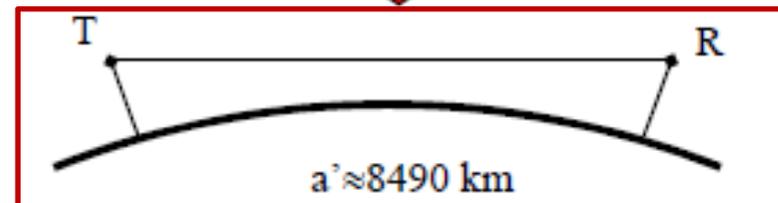
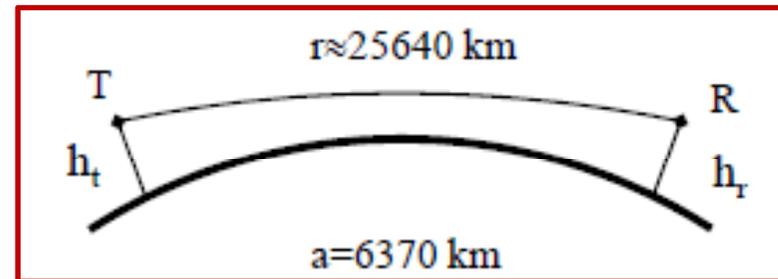
Refracción

- Radio Equivalente de la Tierra

– Un procedimiento muy extendido en el diseño de radioenlaces consiste en tener en cuenta el efecto de la refracción troposférica modificando el radio de la Tierra (a) y suponiendo una trayectoria recta para el rayo, manteniendo la curvatura relativa entre rayo y Tierra.

– El nuevo radio a' se calcula como:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{r} - \frac{1}{r} \approx \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} \approx \left(157 + \frac{dN}{dh}\right) \cdot 10^{-6}$$



Atmósfera estándar:

$$\left. \begin{array}{l} a = 6370 \text{ km} \\ n \approx 1 \\ \text{sen}(\phi) \approx 1 \\ \left. \frac{dN}{dh} \right|_{\text{Nivel Mar}} \approx -39 \end{array} \right\} \Rightarrow a' = Ka \approx \frac{4}{3}a \approx 8490 \text{ km}$$

Alcance visible: $d = \sqrt{(a'+h_t)^2 - a'^2} \approx \sqrt{2a'h_t}$

Modelo Tierra curva. Alcance: $d = 4,1(\sqrt{h_t(m)} + \sqrt{h_r(m)})$



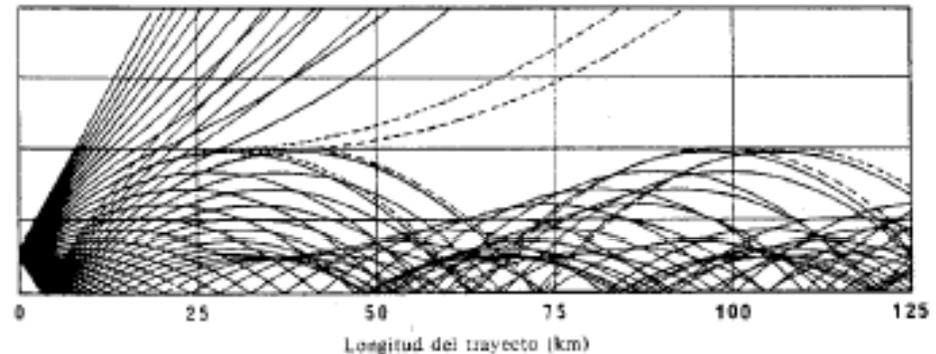


Efecto de la troposfera: refracción

Refracción

- Cuando la derivada del coíndice es inferior a -157 (1/km), la curvatura del rayo es superior a la de la Tierra dando lugar a propagación por CONDUCTO SUPERFICIAL.

- Estas situaciones suelen darse en el verano cuando la tierra y sobre todo el mar se recalientan haciendo que a ciertas horas la pendiente de temperatura sea muy superior a la estándar



- Estos conductos se forman a través de reflexiones múltiples sucesivas sobre la tierra o el mar.
 - El conducto provoca transmisiones guiadas de baja atenuación y grandes alcances.
 - Por las dimensiones de los conductos (algunos metros hasta centenas de metros en situaciones excepcionales) afecta primordialmente a las bandas de VHF y superiores.
- También existen conductos por inversiones térmicas a altura más elevada
- En cualquier caso, son de aparición esporádica por lo que no son útiles para un canal de comunicaciones pero si pueden ser responsables de fuertes interferencias por sobrealcances anormales.

