

Capítulo 3: Propagación en Comunicaciones Móviles

Propagación en Comunicaciones Móviles

1. Caracterización del fenómeno de propagación
2. Atenuación: modelos
3. Desvanecimiento por sombra
4. Desvanecimiento multitrayecto. Diversidad. Distorsión.

1. Caracterización del fenómeno de propagación

Caracterización

- Señal transmitida
- Señal recibida
- Relación entre ambas: **propagación:**
 1. Nivel (amplitud o potencia): atenuación
 2. Forma: distorsión

Atenuación

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{tt} - L_{tr} - L_b \quad (\text{dB})$$

$$P_r = \text{PIRE} + G_r - L_{tr} - L_b \quad (\text{dB})$$

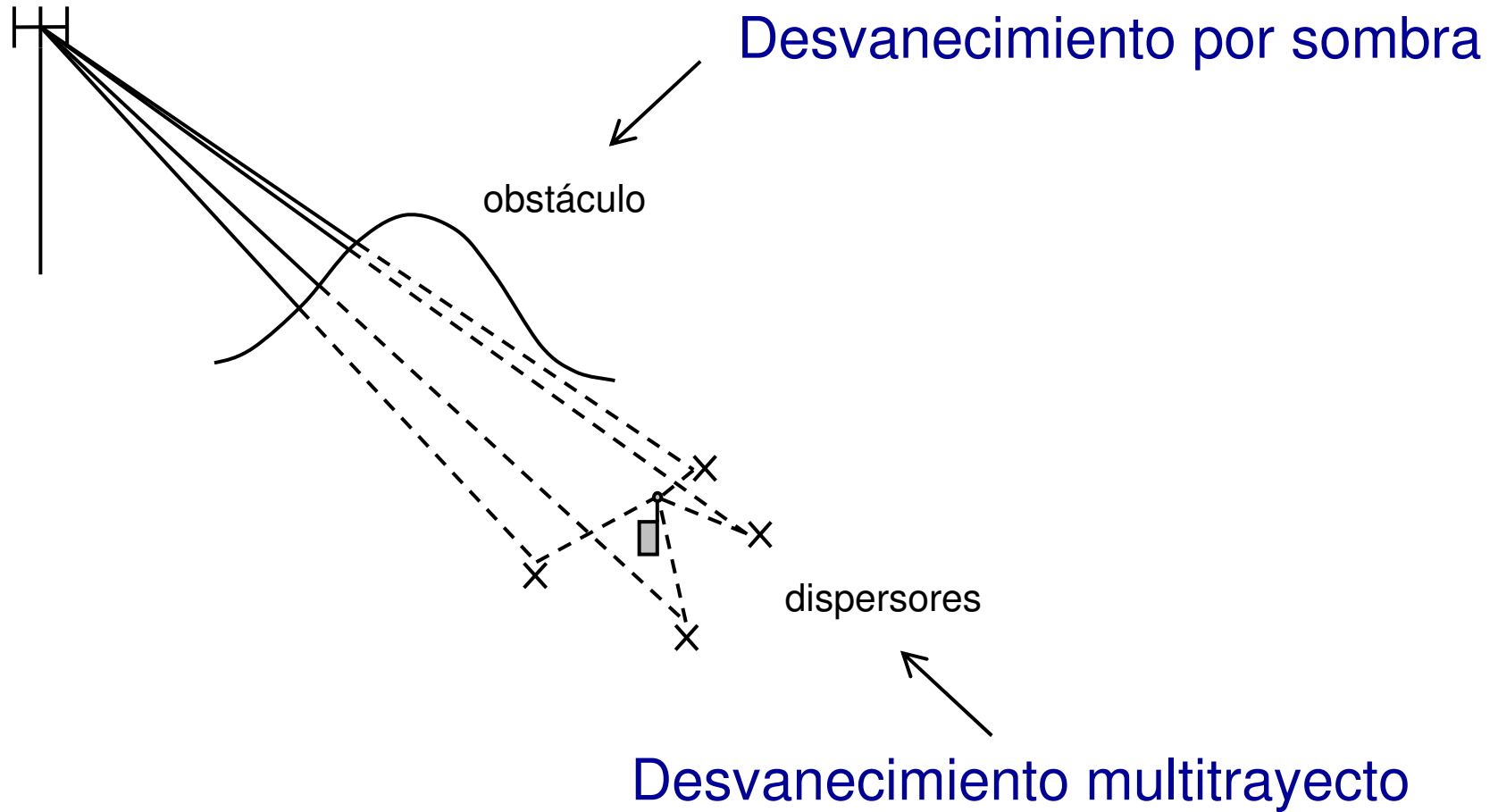
$$L_b = L_{bf} + L_{ex} \quad (\text{dB})$$



Atenuación

- Modelos:
 - Analíticos
 - Semiempíricos
 - Empíricos
- Caracterización estadística:
 - Desvanecimiento por sombra
 - Desvanecimiento multitrayecto

Desvanecimiento



Desvanecimiento

- El desvanecimiento por sombra es **lento**: varía despacio con la posición del móvil (\approx varios m).
- El efecto de multitrayecto es **rápido**: varía deprisa (\approx fracción de λ : varios cm) con la posición del móvil.
- La atenuación por **sombra** de un obstáculo puede ser **determinista** o **desvanecimiento** (o parte de cada), según que el modelo tenga en cuenta o no el efecto de ese obstáculo.
- Las variaciones de atenuación por **multitrayecto** son siempre **desvanecimiento**, ya que no pueden calcularse de forma determinista, debido a su carácter rápido.

Distorsión

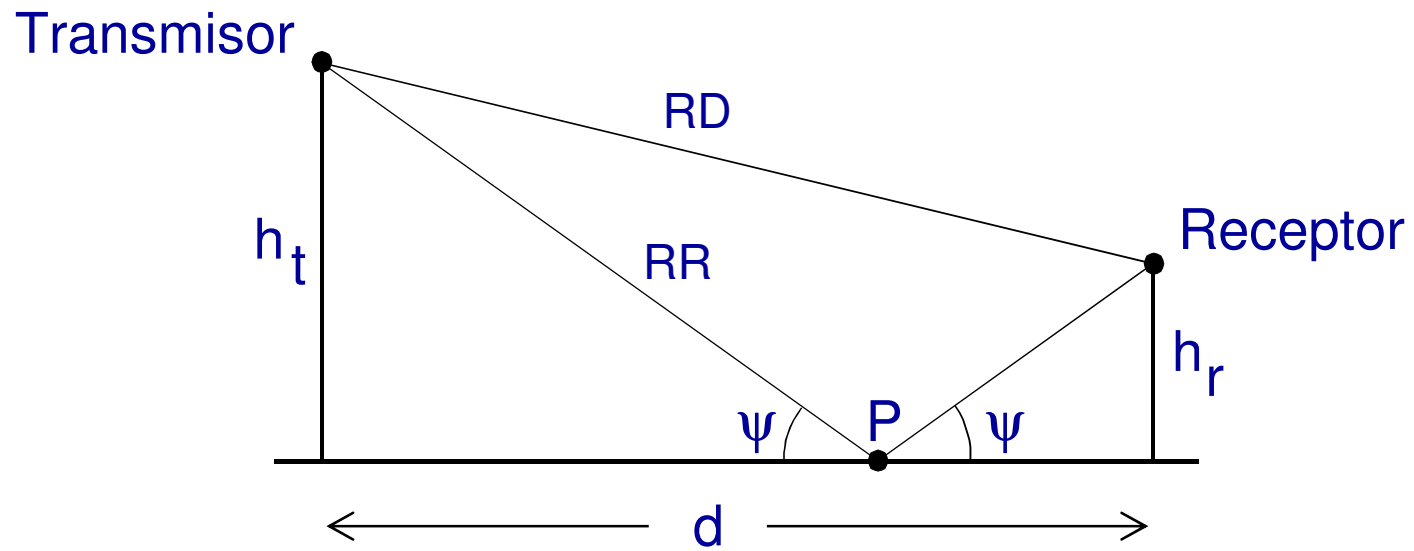
- La propagación multitrayecto, además de producir desvanecimiento, puede introducir distorsión **lineal** en la señal:
 - Dispersión temporal
 - Dispersión en frecuencia
- La importancia de estos efectos depende del tipo de canal de propagación y de las **características de la señal.**

2. Modelos de cálculo de la atenuación

Modelos

- Analíticos
 - Tierra plana
 - Rec. P.526 del UIT-R
- Empíricos
 - Okumura-Hata
 - Ajustable tipo Hata
 - Modelos para interiores
- Semiempíricos
 - COST-231
 - Xia
 - Modelos para microcélulas

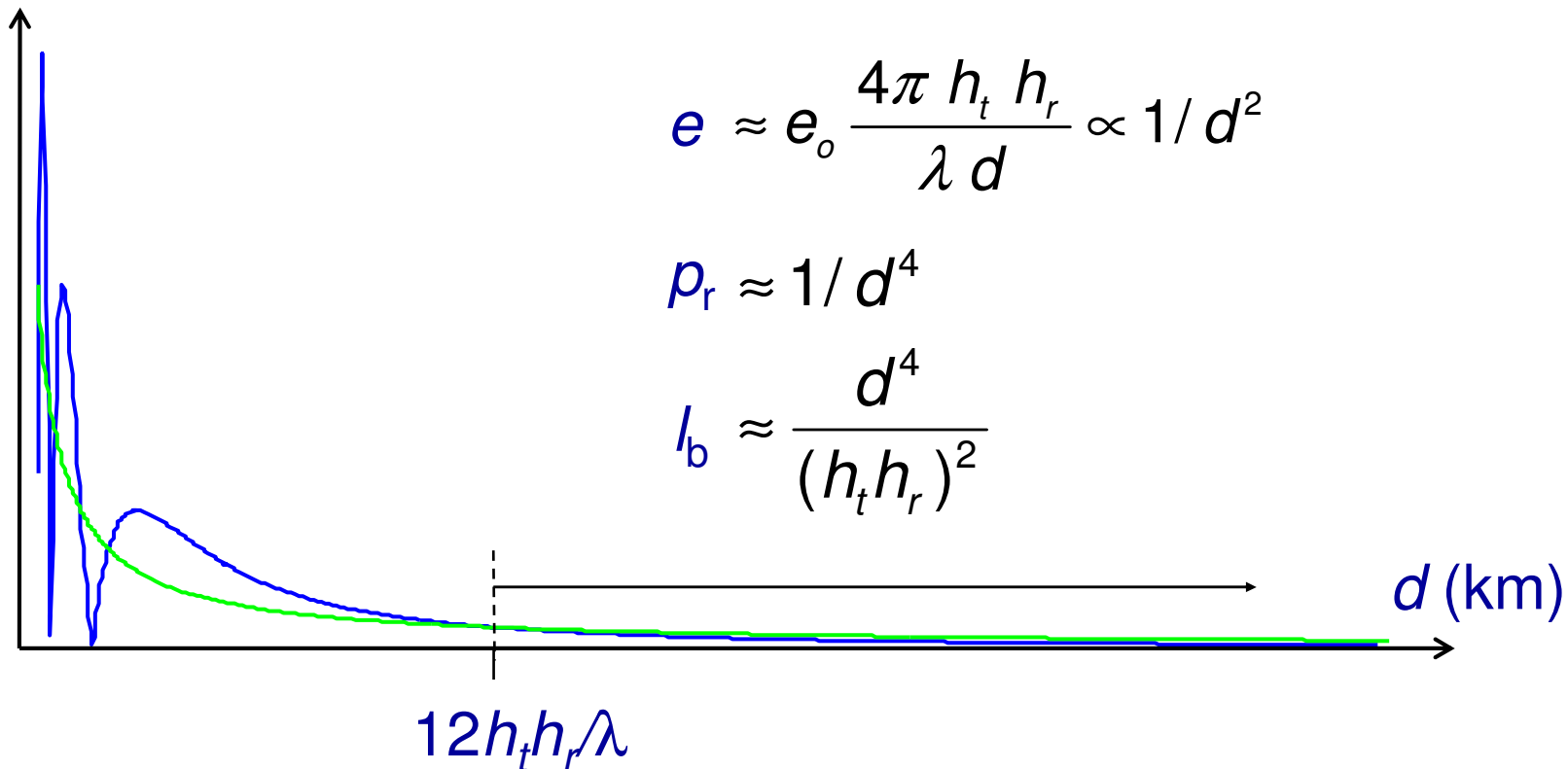
Modelo de Tierra plana



Modelo de Tierra plana

Campo
(V/m)

— e
— e_0 (espacio libre)

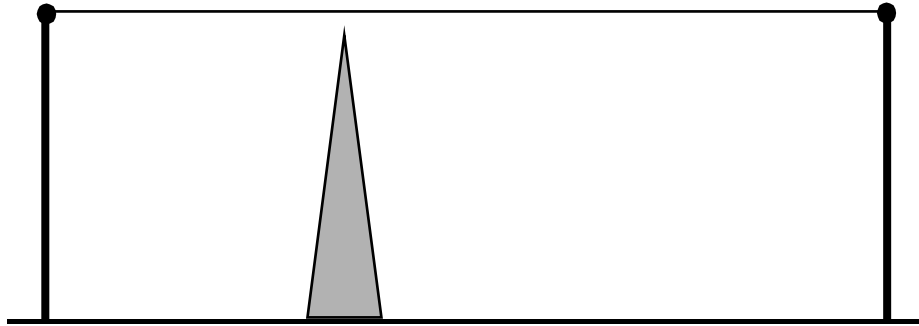


Ejemplo: $h_t = 10$ m, $h_r = 1,5$ m, $\lambda = 1/3$ m ($f = 900$ MHz): $12h_t h_r / \lambda = 0,5$ km

Difracción

Transmisor

Receptor



Obstáculo “próximo” al rayo:

Afecta a la propagación:

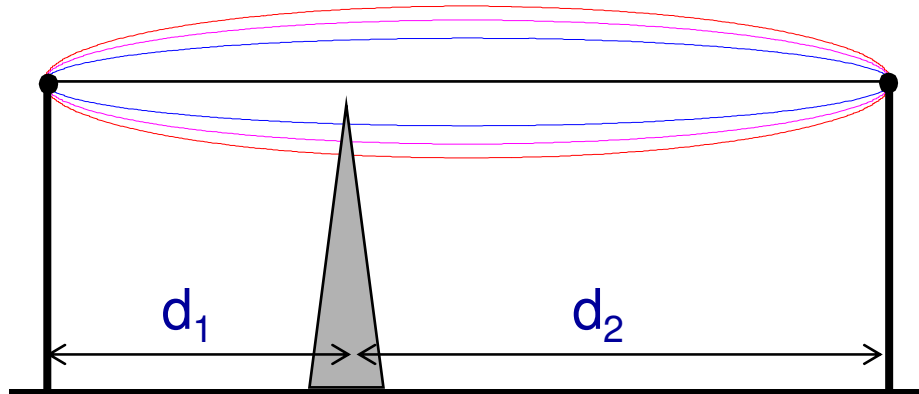
Modifica el nivel de señal en recepción: **difracción**.

¿Cómo se cuantifica esto?

Zonas de Fresnel

Transmisor

Receptor



— 1ª zona

— 2ª zona

— 3ª zona

...

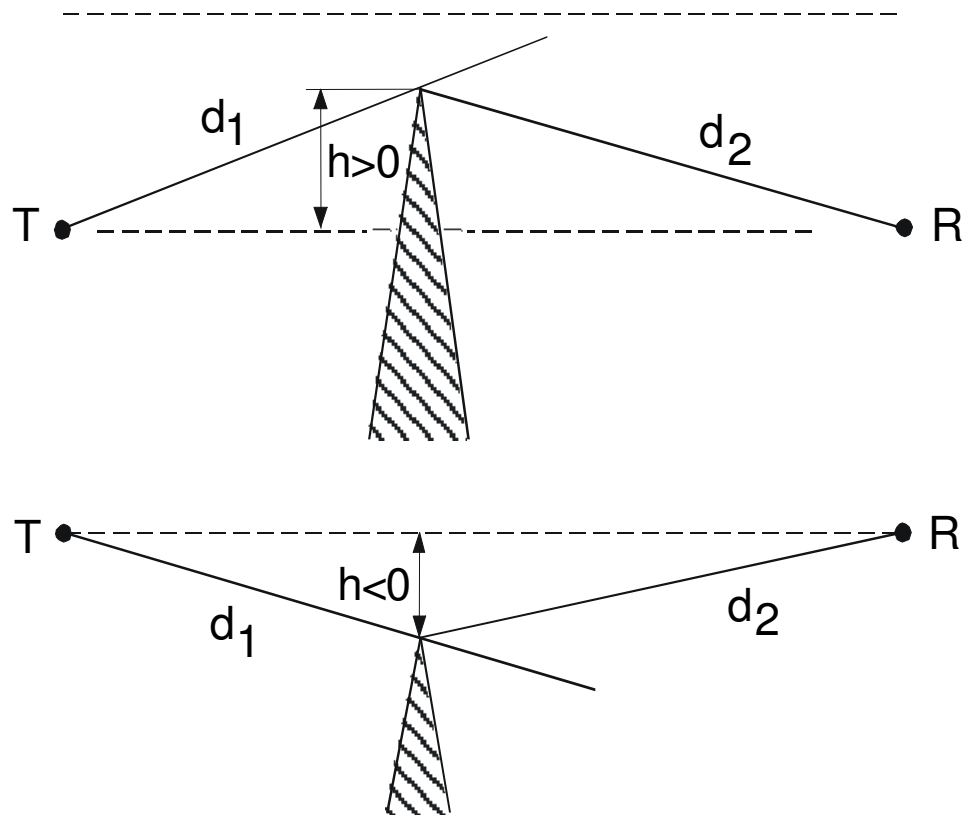
Zonas de Fresnel:
$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d}}$$

Determinan diferentes contribuciones al campo total

La más importante es la primera:
$$R_1(m) = 548 \sqrt{\frac{d_1(km)d_2(km)}{f(MHz) \cdot d(km)}}$$

Rec. P.526 del UIT-R

Difracción por obstáculo agudo aislado



Rec. P.526 del UIT-R

Difracción por obstáculo agudo aislado

Despejamiento normalizado

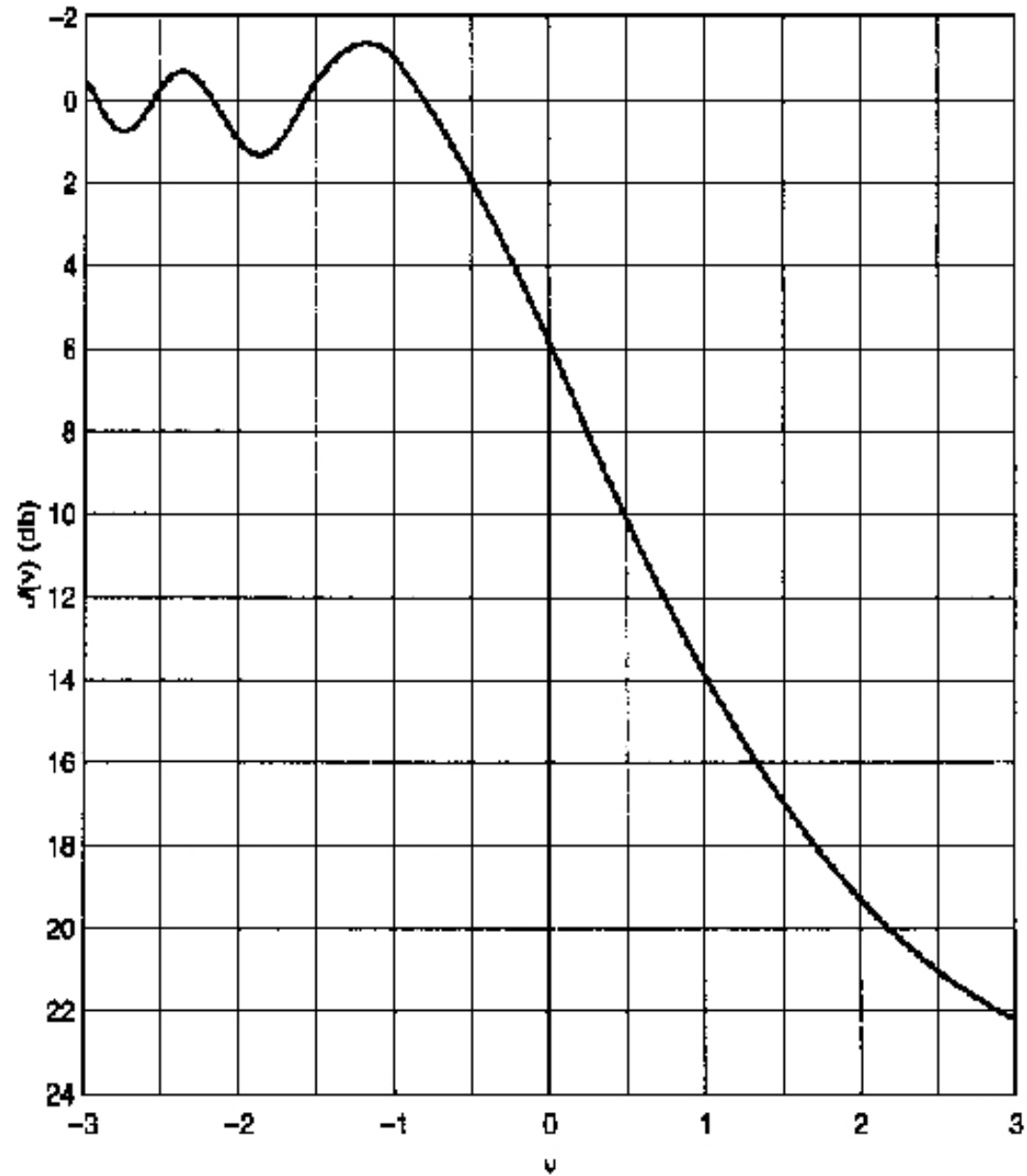
$$v = \sqrt{2} \frac{h}{R_1} = 2,58 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{f \cdot d}{d_1 d_2}} \cdot h$$

Pérdida por difracción (atenuación en exceso): para $v > -0,78$:

$$L_D(v) = 6,9 + 20 \log\left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1\right)$$

Rec. P.526 del UIT-R

Difracción
por obstáculo
agudo aislado



Rec. P.526 del UIT-R

Generalizaciones respecto al caso de obstáculo agudo aislado:

- Difracción por obstáculo redondeado aislado
Se aplica una corrección respecto al caso de obstáculo agudo.
- Difracción por varios obstáculos:
Se calculan las atenuaciones por separado y se aplica un término de corrección.

Modelo de Okumura-Hata

Pérdida básica de referencia (medio urbano)

$$L_b = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_t \\ - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log h_t) \log d$$

Variables, unidades y validez:

Frecuencia f (MHz): $150 \leq f \leq 1500$ MHz.

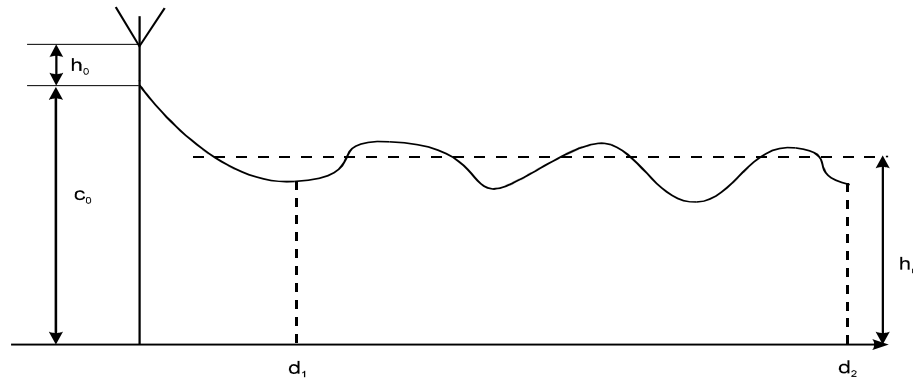
Altura de la base h_t (m): $30 \leq h_t \leq 200$ m.

Altura del móvil h_m (m): $1 \leq h_m \leq 10$ m.

Distancia d (km): $1 \leq d \leq 20$ km.

Modelo de Okumura-Hata

Altura Efectiva de Antena



$$h_t = h_0 + c_0 - h_{\text{media}}$$

$$d_1 = d/4 \quad d_2 = d \quad \text{para } 1 < d \leq 8 \text{ km.}$$

$$d_1 = 3 \quad d_2 = d \quad \text{para } 8 < d \leq 15 \text{ km.}$$

$$d_1 = 3 \quad d_2 = 15 \quad \text{para } d > 15 \text{ km.}$$

Modelo de Okumura-Hata

Corrección por altura del móvil

$$a(h_m) = 0 \text{ para } h_m = 1,5 \text{ m}$$

Ciudad media-pequeña

$$a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7) h_m - (1,56 \log f - 0,8)$$

Ciudad grande

$$a(h_m) = 8,29 (\log 1,54 h_m)^2 - 1,1 \quad f \leq 200 \text{ MHz}$$

$$a(h_m) = 3,2 (\log 11,75 h_m)^2 - 4,97 \quad f \geq 400 \text{ MHz}$$

Corrección por zona de recepción

Zona Suburbana

$$L_{b_s} = L_b - 2 \cdot [\log (f / 28)]^2 - 5,4$$

Zona Rural

$$L_{b_r} = L_b - 4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94$$

Modelo de Okumura-Hata

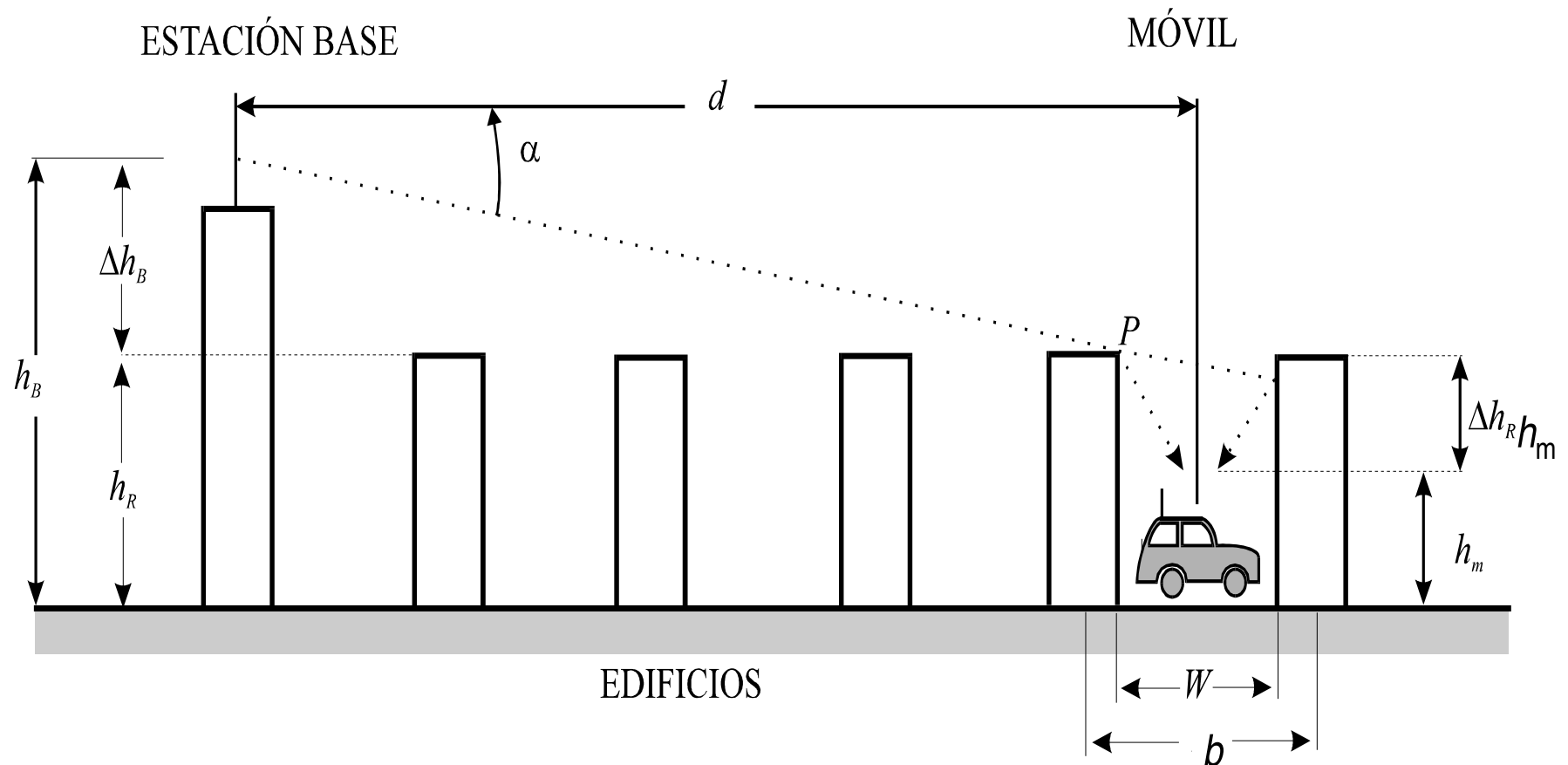
Extensión a $1500 \leq f \leq 2000$ MHz (Hata-COST 231)

$$L_b = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_t - a(h_m) + \\ + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d + c_m$$

$$c_m = \begin{cases} 0 \text{ dB para ciudad tipo medio} \\ 3 \text{ dB para grandes centros metropolitanos} \end{cases}$$

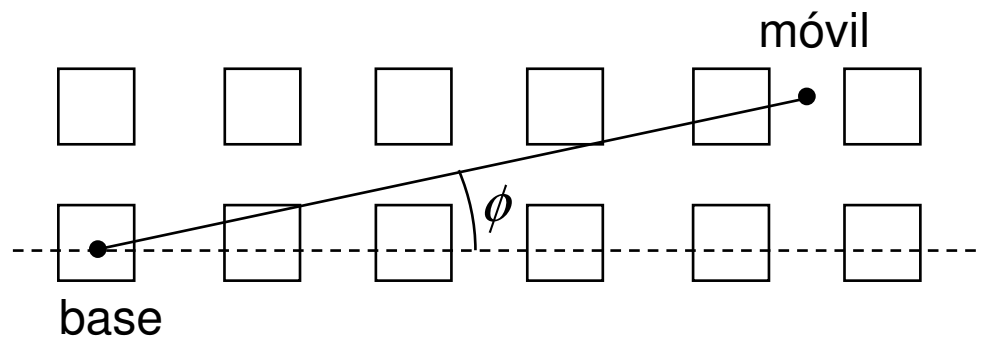
Modelo COST-231

- Basado en modelos teóricos y medidas en ciudades europeas.
- Aplicable a macrocélulas urbanas ($\Delta h_B > 0$)
- Aplicable con menor aproximación a microcélulas ($\Delta h_B < 0$).



Modelo COST-231

- Altura de antena de base h_B : $4 \leq h_B \leq 50$ m.
- Altura del móvil h_m : $1 \leq h_m \leq 3$ m.
- Distancia d : $0,002 \leq d \leq 5$ km.
- Frecuencia f : $800 \leq f \leq 2000$ MHz
- Separación entre edificios b : $20 \leq b \leq 50$ m.
- Anchura de calles w
- Altura edificios h_R
- Ángulo rayo-calle (en planta) ϕ $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$



Modelo COST-231

1. Trayectos con línea de vista (LOS)

$$L_b = 42,6 + 26\log d(\text{km}) + 20\log f(\text{MHz})$$

Modelo COST-231

2. Trayectos sin línea de vista (NLOS)

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd}$$

- L_0 : Pérdida en condiciones de espacio libre

$$L_0 = 32,45 + 20\log f(\text{MHz}) + 20\log d(\text{km})$$

- L_{rts} : Pérdida difracción tejado-calle

L_{ori} : Pérdida por orientación de la calle

$$\Delta h_R = h_R - h_m$$

$$L_{rts} = -16,9 - 10\log w + 10\log f(\text{MHz}) + 20\log \Delta h_R + L_{ori}$$

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,3571\phi(^{\circ}) & \phi \leq 35^{\circ} \\ 2,5 + 0,075(\phi(^{\circ}) - 35) & 35 \leq \phi < 55^{\circ} \\ 4 - 0,114(\phi(^{\circ}) - 55) & 55 \leq \phi < 90^{\circ} \end{cases}$$

Modelo COST-231

- L_{msd} : Pérdidas por difracción multipantalla

L_{bsh} : ganancia por altura de la base

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d(\text{km}) + k_f \cdot \log f(\text{MHz}) - 9 \log b$$

$$\Delta h_B = h_B - h_R$$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_B)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \Delta h_B \geq 0 \\ 54 - 0,8 |\Delta h_B| & \Delta h_B < 0 \quad d \geq 0,5 \\ 54 - 1,6 |\Delta h_B| \cdot d(\text{km}) & \Delta h_B < 0 \quad d < 0,5 \end{cases}$$

Modelo COST-231

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \cdot \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{Zonas Suburbanas y} \\ & \text{Ciudades de tamaño medio} \\ -4 + 1,5 \cdot \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{Grandes centros metropolitanos} \end{cases}$$

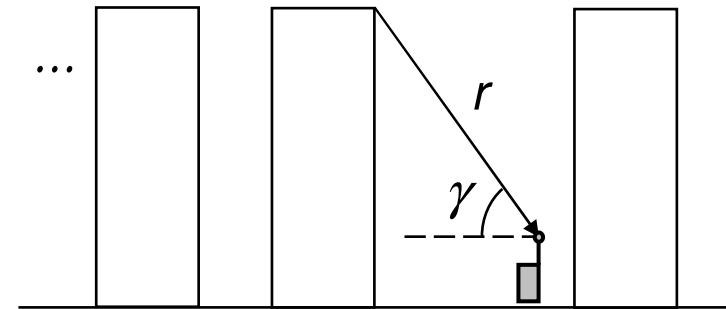
$$k_d = \begin{cases} 18 & \Delta h_B \geq 0 \\ 18 - 15 |\Delta h_B| / h_R & \Delta h_B < 0 \end{cases}$$

Si $L_0 + L_{rts} + L_{msd} < L_0$, se toma $L_b = L_0$.

Modelo de Xia

- Similar a COST-231
- Se obtiene L_b como suma de tres términos: $L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd}$
- Se distinguen tres situaciones:
 1. $h_B \gg h_R$
 2. $h_B \approx h_R$
 3. $h_B < h_R$

| | |
|---------------------------------|----------------|
| Altura de antena de base | h_B (m) |
| Distancia | d (km) |
| Frecuencia | f (MHz) |
| Separación entre edificios | b (m) |
| Anchura de calles | w (m) |
| Altura de edificios | h_R (m) |
| Distancia último edificio-móvil | r (m) |
| Ángulo último edificio-móvil | γ (rad) |



Modelo de Xia

1. $h_B \gg h_R$

$$L_b = 73,54 + 21 \log f - 18 \log \Delta h_B - 9 \log b + 10 \log r + 20 \log(\gamma(2\pi + \gamma)) + 38 \log d$$

$$\Delta h_B = h_B - h_R$$

2. $h_B \approx h_R$

$$L_b = 61,67 + 30 \log f - 20 \log b + 10 \log r + 20 \log(\gamma(2\pi + \gamma)) + 40 \log d$$

3. $h_B < h_R$

$$L_b = 36,9 + 40 \log f - 20 \log b + 10 \log r + 10 \log r' + \\ + 20 \log(\beta(2\pi + \beta)) + 20 \log(\gamma(2\pi + \gamma)) + 40 \log d$$

$$\Delta' h_B = h_R - h_B \quad (\text{m})$$

$$r' = \sqrt{w^2 + (\Delta' h_B)^2} \quad (\text{m})$$

$$\beta = \text{arctag} \frac{\Delta' h_B}{w} \quad (\text{rad})$$

Teoría Geométrica de la Difracción (GTD)

- Método analítico.
- Combina ideas de óptica geométrica (reflexión, refracción) con efectos de difracción.
- Constituye una aproximación a las ecuaciones de Maxwell.
- Se basa en **trazado de rayos**.
- Considera rayos directo, reflejado y difractados, con múltiples combinaciones de reflexión y difracción (en la práctica se suelen limitar a 2 ó 3)
- Requiere **mapas muy precisos**, lo cual limita su aplicación.

Modelos para microcélulas

- Alturas de antenas de estación base reducidas
- Pequeña cobertura
- Influye la topografía urbana
- Dos tipos de escenarios de propagación:
 - Con visión directa: LOS
 - Sin visión directa: NLOS

Modelos para microcélulas: LOS

- Hay un punto de transición (*turning point*) a la distancia

$$d_{tp} \approx \frac{4h_t h_m}{\lambda}$$

- Atenuación de propagación:

$$L_1(d) = L_0 + 10 n_1 \log d \quad (d \leq d_{tp})$$

$$L_2(d) = L_0 + 10 (n_1 - n_2) \log d_{tp} + 10 n_2 \log d \quad (d > d_{tp})$$

- Modelo de la Universidad de Lund:

$$l(d) = k[l_1^4(d) + l_2^4(d)]^{1/4}$$

$$k = (4\pi/\lambda)^2$$

$$l_1(d) = d^{n_1}$$

$$l_2(d) = d_{tp}^{-n_2 + n_1} \cdot d^{n_2}$$

Modelos para microcélulas: LOS

- Valores típicos para $f = 1800$ MHz.

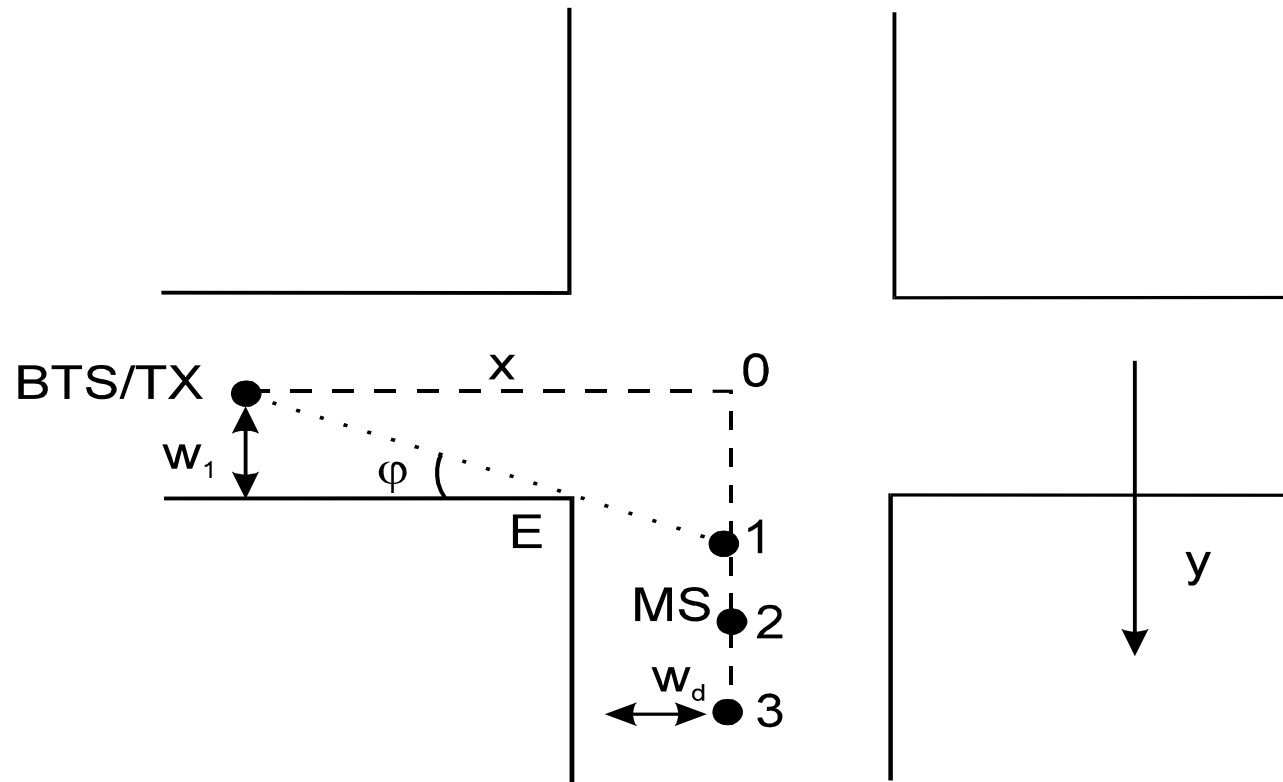
$$10\log k = 33 \text{ dB}$$

$$n_1 = 2,13$$

$$n_2 = 4,35$$

$$d_{tp} = 254 \text{ m}$$

Modelos para microcélulas: NLOS



Modelos para microcélulas: NLOS

Atenuación de propagación

$$L_b = L(x) + L(y)$$

$L(x)$ se calcula con el modelo LOS.

$$L(y) = [u(y_1) - u(y_2)] f(y_2) \frac{\log y - \log y_1}{\log y_2 - \log y_1} + u(y_2) f(y)$$

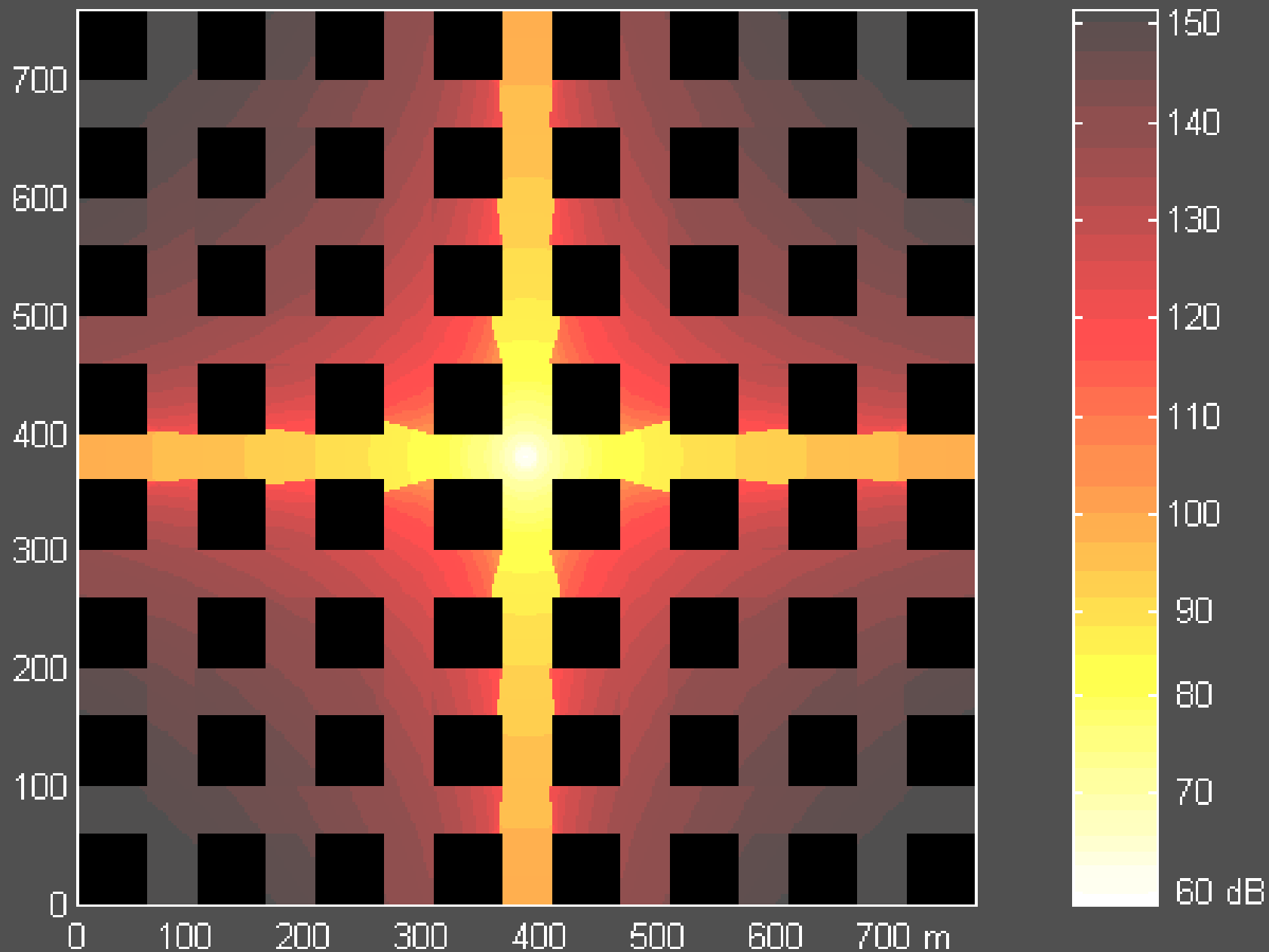
$$f(y) = 10 \log \left(\frac{y}{y_0} \right)^n$$

$$y_0 = 8,92 \varphi \text{ (rad)} + 1,7$$

$$y_1 = 10,7 \varphi \text{ (rad)} + 0,22 w_d \text{ (m)} + 2,99$$

$$y_2 = 0,62 w_d \text{ (m)} + 4,9$$

$$n = 2,75 - 1,13 \exp(-23,4 \cdot \varphi \text{ (rad)})$$



Modelo tipo Hata con coeficientes ajustables

Se basa en ajustar coeficientes a partir de medidas:

$$L_b = K_{1,i} + K_2 \cdot \log d + K_3 \cdot \log h_{eff} + K_4 \cdot L_{\text{Difracción}} + K_5 \cdot \log h_{eff} \cdot \log d + K_6 \cdot h_m$$

Es un modelo similar al de Hata, salvo que

- Los coeficientes pueden tomar otros valores.
- El término constante $K_{1,i}$ es distinto para cada tipo de terreno o *clutter*, i .
- Se puede incluir un término de difracción, para tener en cuenta de forma más detallada el perfil.
- El ajuste se suele hacer para una banda de frecuencias fija, por lo que no hay término dependiente de la frecuencia.

Se ajustan más o menos coeficientes en función de las medidas disponibles. Por ejemplo:

- Ajustar todos
- Ajustar sólo $K_{1,i}$ y fijar el resto según el modelo de Hata.

El ajuste se hace minimizando el error cuadrático medio.

Modelos para interiores

Modelo basado en suelos y paredes atravesados

$$L=L_o + 10 \cdot n \cdot \log d + \sum_{k=1}^I k_{fi} L_{fi} + \sum_{j=1}^J k_{wj} L_{wj}$$

- d : Distancia
 L_o : Pérdidas para $d = 1$ m.
 L_{fi} : Factor de pérdidas para suelo tipo i
 k_{fi} : Número de suelos tipo i atravesados
 L_{wj} : Factor de pérdidas para pared tipo j
 k_{wj} : Número de paredes tipo j atravesadas
 n : Exponente de la variación con la distancia
 I : Número de suelos
 J : Número de paredes

Modelos para interiores

Modelo basado en línea de regresión

$$L(\text{dB}) = L_o + 10 n \log d$$

L_o y n dependen del tipo de entorno y de la frecuencia

| Trayecto | $L_o(\text{dB})$ | n | Origen del Modelo |
|----------|------------------|-----|-------------------|
| LOS | 35,8 | 1,7 | UIT-Finlandia |
| NLOS | 16,0 | 5,5 | |
| LOS | 22,5 | 2,9 | UNIV. LUND |
| NLOS | 8,0 | 4,1 | |
| LOS | 21,2 | 1,5 | UNIV. BRISTOL |
| NLOS | 23,6 | 3,2 | |

Pérdidas por penetración

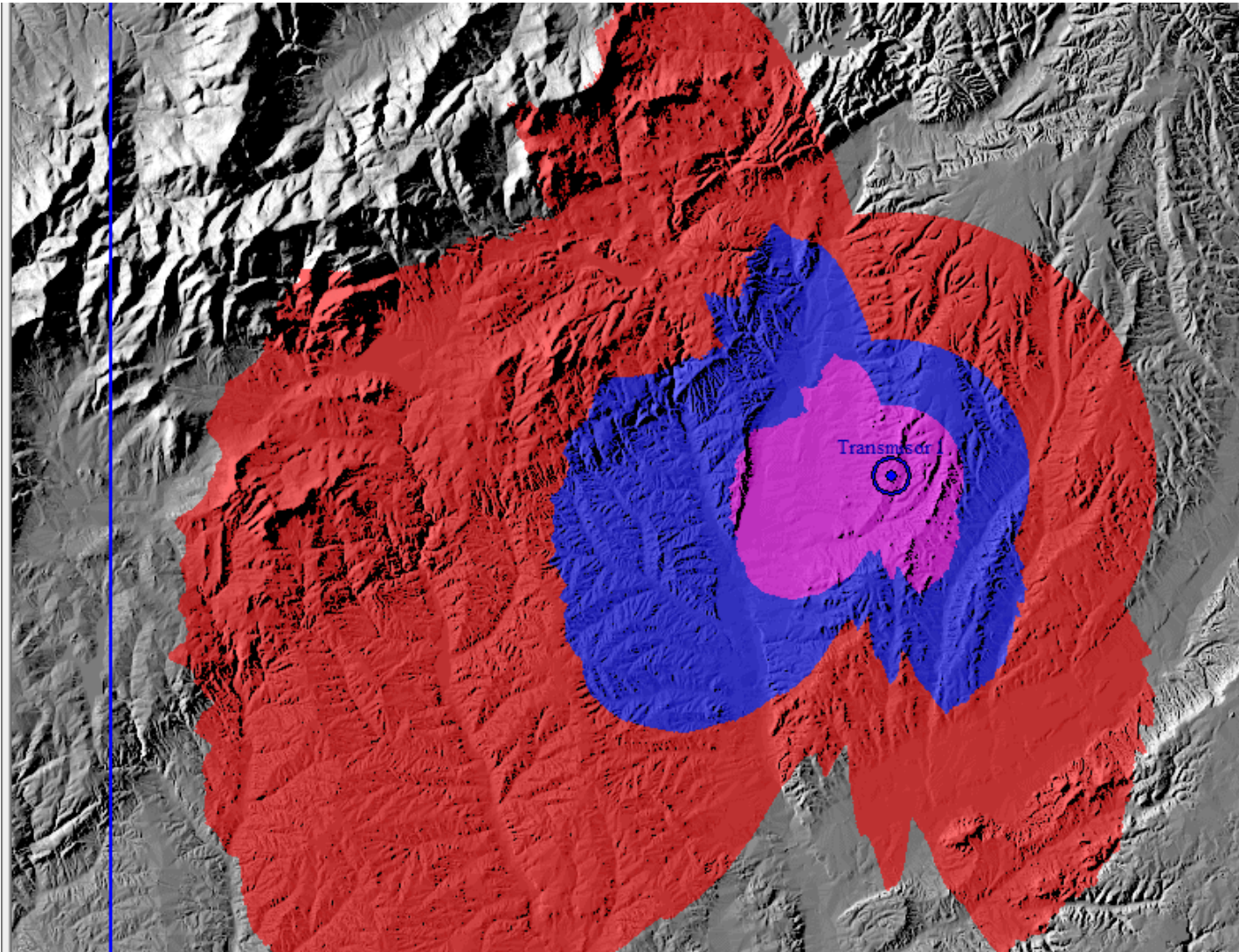
La cobertura en interiores desde estaciones base situadas en exteriores se suele evaluar calculando la atenuación como suma (dB) de dos términos:

- Pérdida de propagación entre la base y la pared exterior del edificio (usando un modelo para exteriores).
- Pérdida por penetración en interiores, en torno a 15–20 dB.

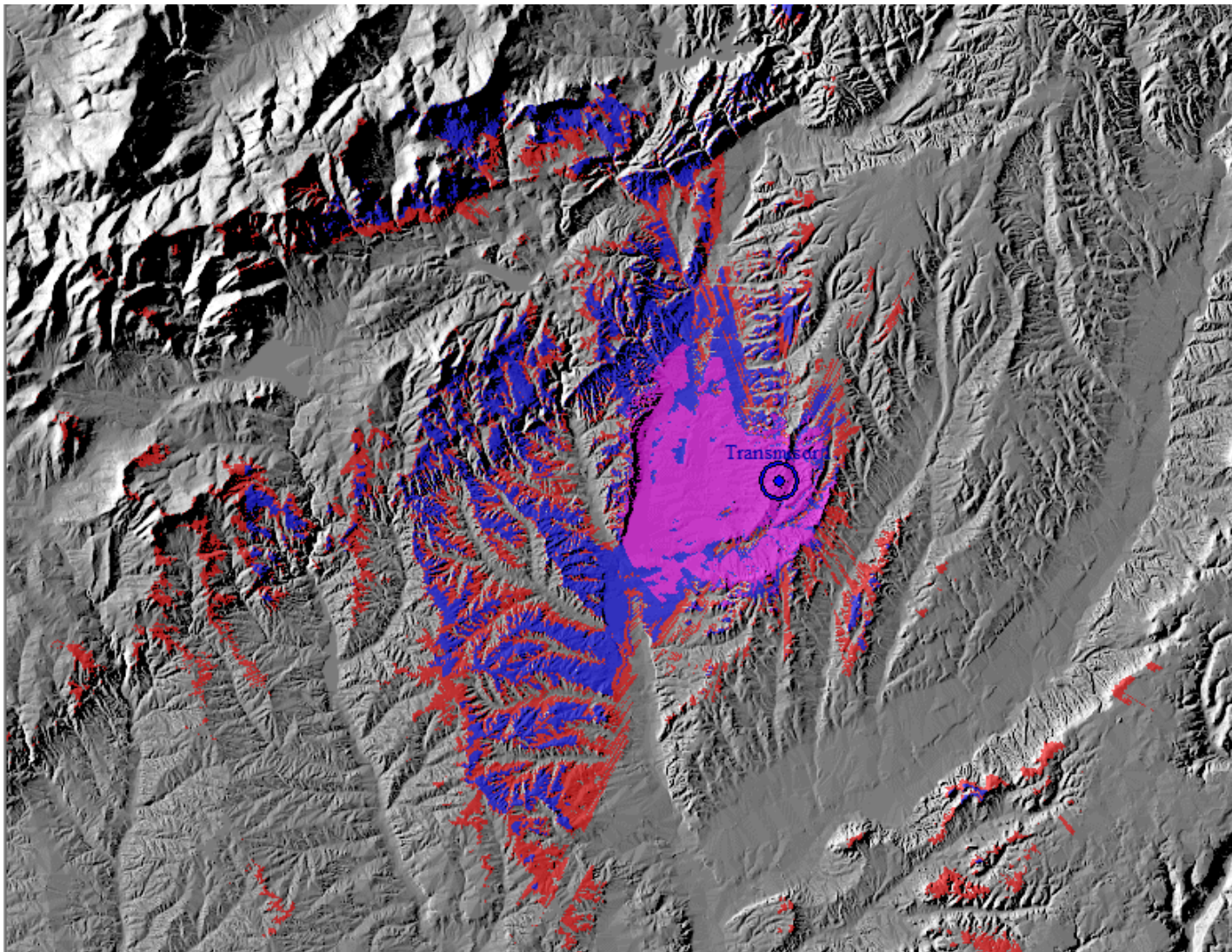
Herramientas de planificación

- Mapas:
 - Altimetría.
 - Visualización: calles, carreteras, etc.
 - Morfografía: uso del terreno (*clutter*).
 - Administrativo: provincias, municipios.
 - Demografía
- Sistema de gestión geográfica:
 - Elementos de la red: emplazamientos, estaciones base, ...
 - Resultados: mapas de cobertura, de interferencia, ...
- Algoritmos:
 - Cálculos de atenuación
 - Cálculos de tráfico
 - Asignación de frecuencias
 - Simulación (capacidad).

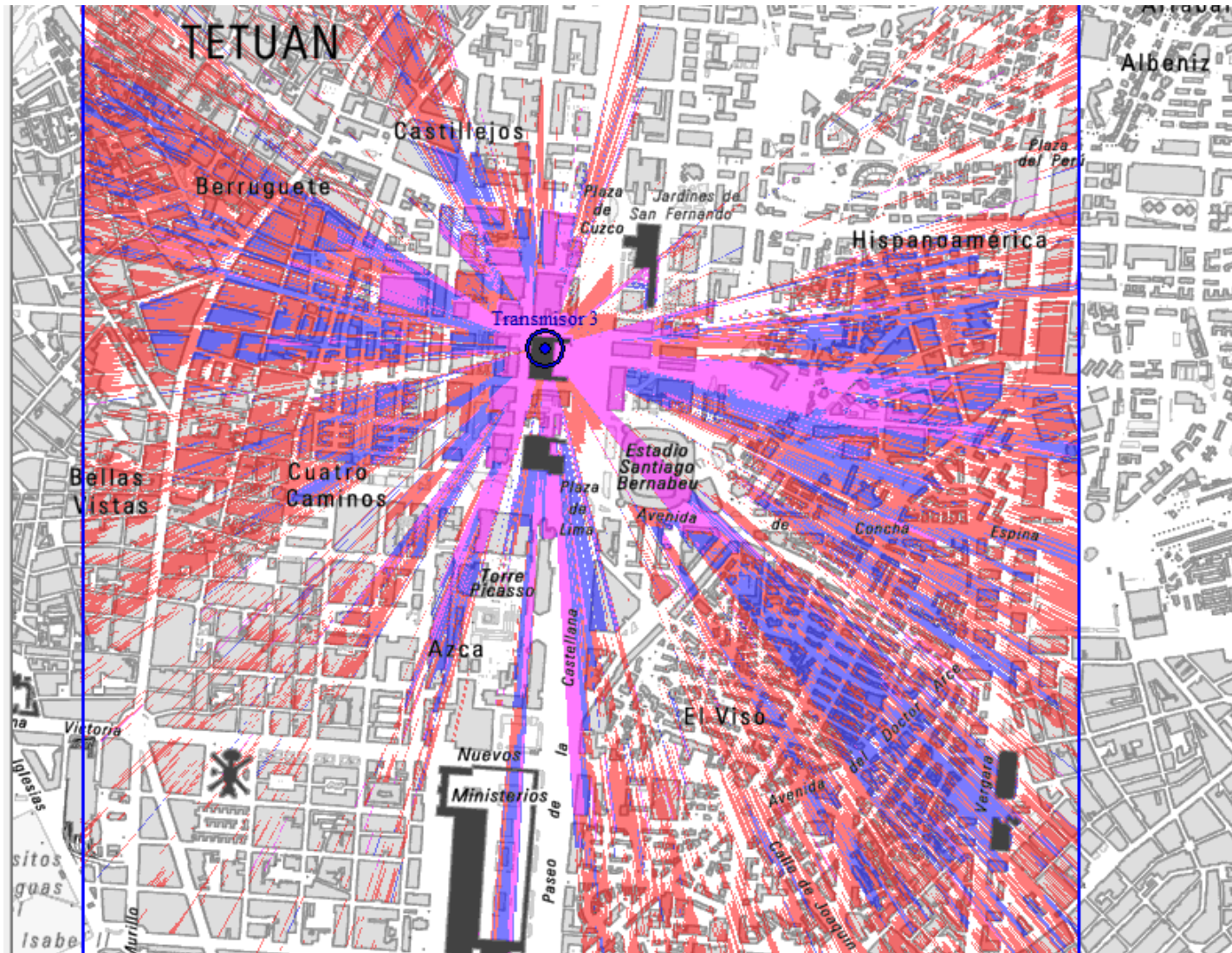
Ejemplo: Hata, rural, 100 m



Ejemplo: Rec. P.526, rural, 100 m

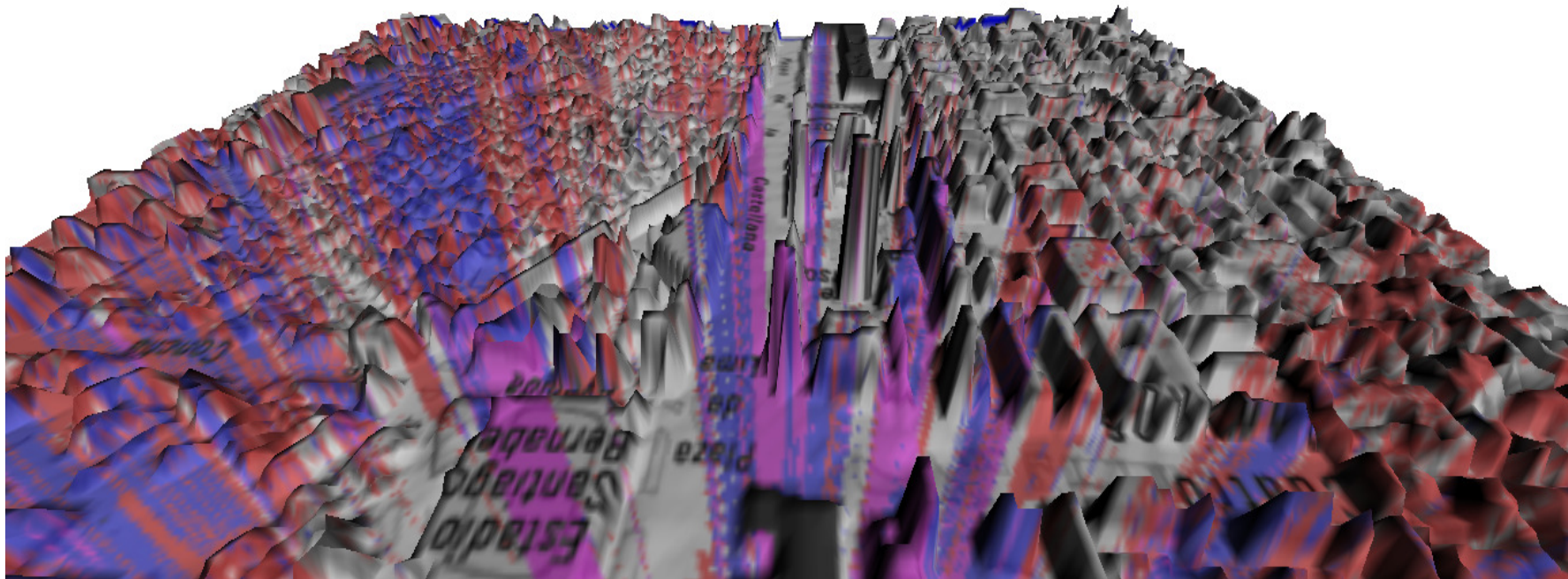


Ejemplo: Xia, urbano, 4 m (edificios)



Ejemplo: Xia, urbano, 4 m (edificios)

Vista en 3D desde la estación base hacia el sur



Comparación de modelos

| Modelo | Tipo | Entorno | Mapa | Usado |
|----------------------|--------------|------------|---------------------|-------|
| Tierra plana | Analítico | Rural | – | * |
| UIT-R P.526 | Analítico | Rural | 100 m | * * |
| Hata | Empírico | Urbano | 20 m | * * |
| | | Rural | 200 m | * * |
| Ajustable tipo Hata | Empírico | Urbano | 20 m | * * * |
| | | Rural | 200 m | * * * |
| COST 231, Xia | Semiempírico | Urbano | 2 m, edificios | * * |
| GTD | Analítico | Urbano | 1 m, edificios | * |
| Microcélulas | Semiempírico | Urbano | 4 m, edificios | * * |
| Interiores simple | Empírico | Interiores | – | * * |
| Interiores detallado | Empírico | Interiores | 1 m, 3D, materiales | * |

3. Desvanecimiento por sombra

Caracterización

- Término aleatorio en la atenuación de propagación.
- Está causado por aspectos no tenidos en cuenta por el modelo de propagación (sombra de obstáculos).
- Teórica y experimentalmente se deduce que tiene una distribución gaussiana en dB (log-normal en unidades naturales), con media (mediana) nula.

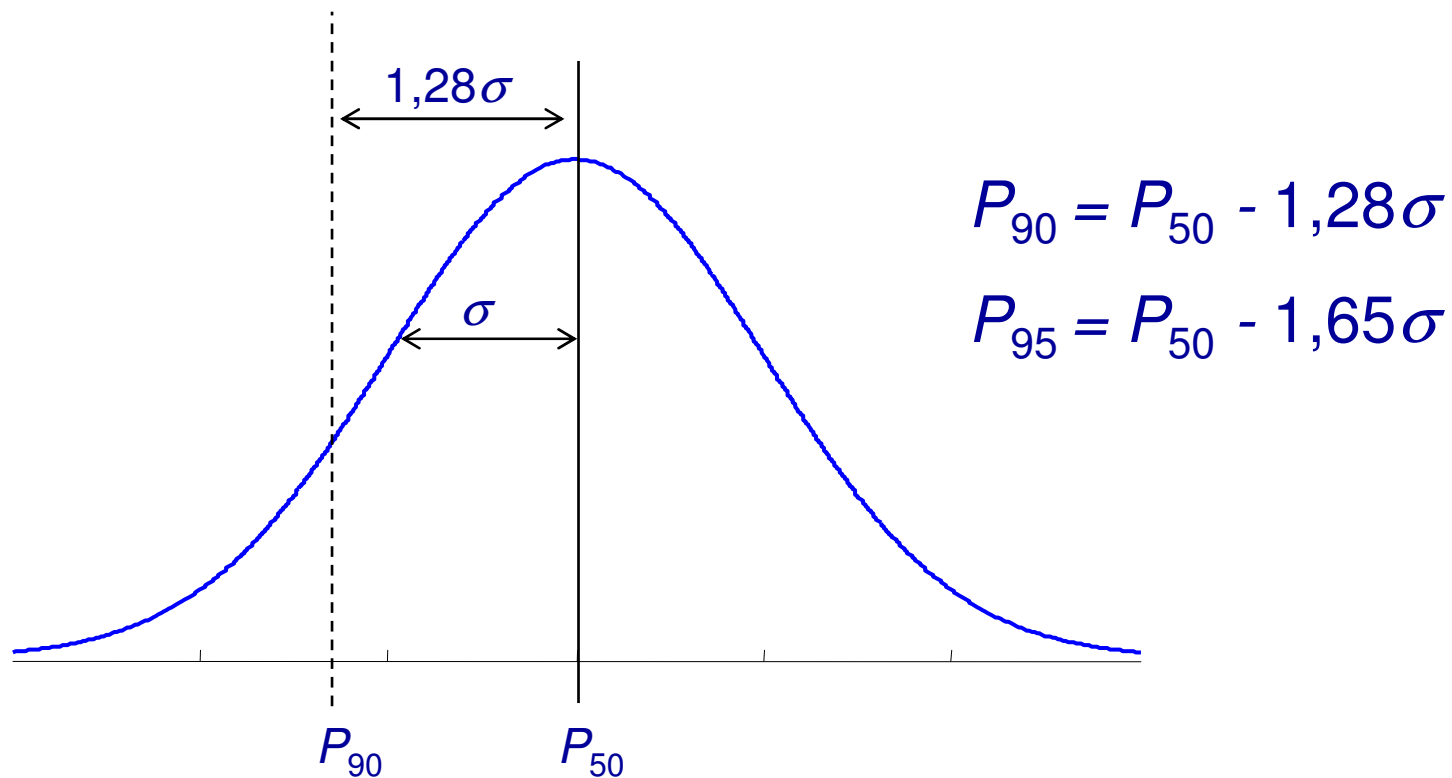
$$L_{b\text{real}} = L_{b\text{modelo}} + D \quad (\text{dB})$$

$$f(D) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{D}{\sigma_L}\right)^2\right]$$

- La forma de la distribución es la misma para potencia, campo o tensión expresados en dB (dBm, dBu, dBμ).

Caracterización

- P_{real} es la potencia real de la señal (variable aleatoria)
- P_x se define como: $\Pr(P_{\text{real}} > P_x) = x\%$
- El valor predicho por el modelo es P_{50}



Caracterización

- La potencia real será inferior a la predicha por el modelo con probabilidad 50%.
- Por tanto, en el borde (perímetro) de la célula, sólo habrá cobertura en el 50% de las ubicaciones. Esta probabilidad es mayor en el interior de la célula, según se reduce la distancia a la base.

- Ejemplo:

$$P_t = 33 \text{ dBm}, S = -102 \text{ dBm}, G_t = 0 \text{ dB}, G_r = 17 \text{ dB}, L_{tr} = 2 \text{ dB}:$$

$$S = P_t + G_t + G_r - L_b - L_{tr}$$

$$L_b = P_t + G_t + G_r - L_{tr} - S = 150 \text{ dB}.$$

En el borde de la zona delimitada por la condición $L_b \leq 150 \text{ dB}$, la probabilidad de cobertura será el 50%.

Caracterización

- Para aumentar el porcentaje de cobertura es necesario añadir un **margen** de seguridad, M , llamado “margen de desvanecimiento por sombra” o “margen log-normal”.
- Usualmente se especifica un objetivo del 90% en el borde (porcentaje perimetral): margen de $1,28\sigma$.
- El porcentaje de cobertura global (porcentaje zonal) es mayor que en el borde.
- El valor de la desviación típica σ depende del entorno y del modelo de cálculo utilizado para la pérdida de propagación.
- Los valores usuales para σ están entre 6 y 12 dB. Es habitual considerar $\sigma = 8$ dB. El margen para el 90% es entonces 10,3 dB.
- En el ejemplo, para un porcentaje del 90% en el borde de la zona de cobertura,

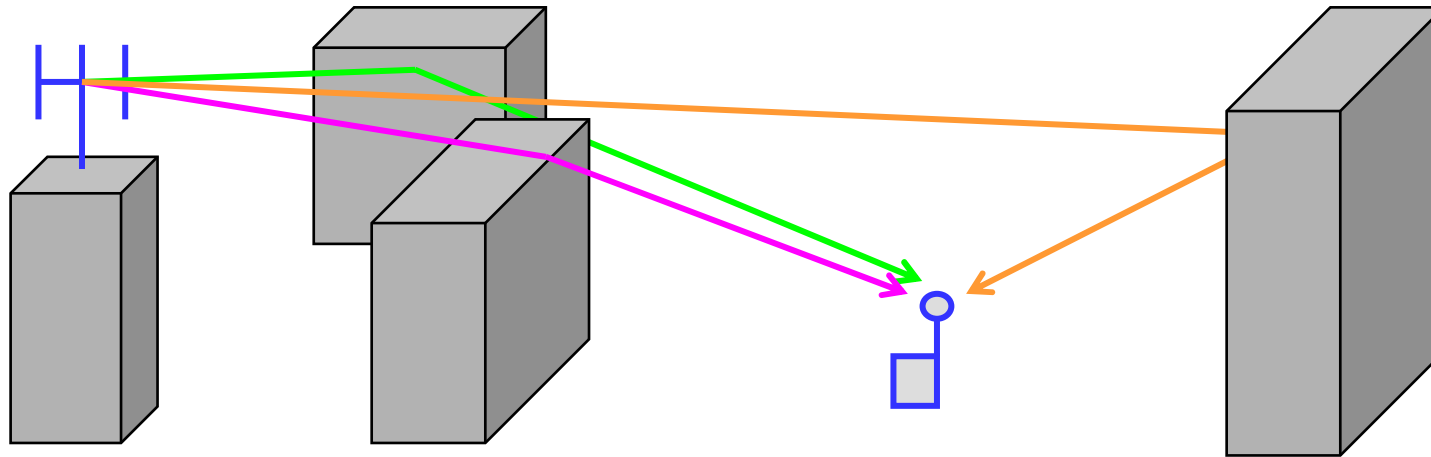
$$L_b = P_t + G_t + G_r - L_{tr} - S - M = 140 \text{ dB.}$$

4. Desvanecimiento multitrayecto. Diversidad. Distorsión

Multitrayecto

- La señal se propaga por múltiples caminos.
- Ventaja: se amplía la cobertura.
- Inconvenientes:
 - Interferencia destructiva: desvanecimiento
 - Selectividad en frecuencia: posible distorsión (lineal)
 - Selectividad en tiempo: posible distorsión (lineal)

Multitrayecto

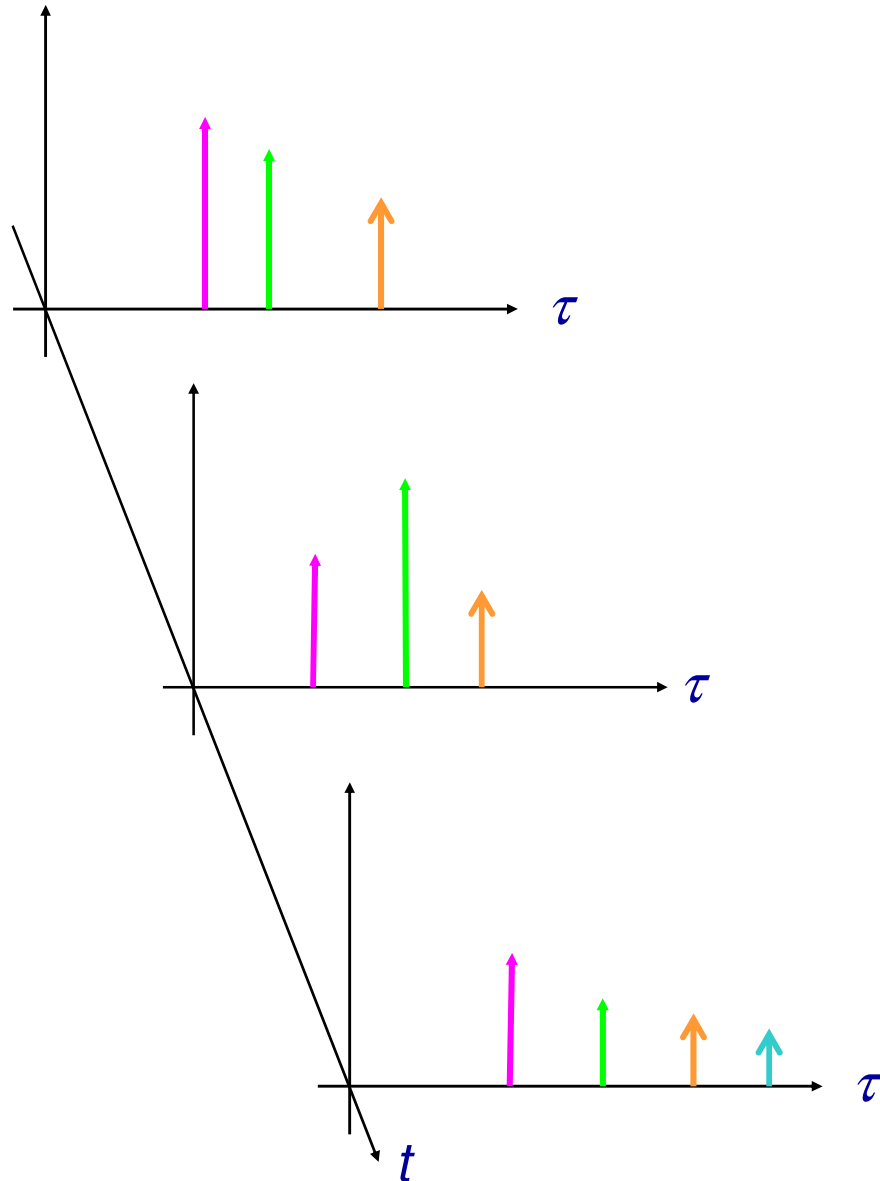


Parámetros de las componentes:

- Amplitud
- Retardo
- Desplazamiento Doppler
- Desfase



Caracterización del canal



Sistema lineal **variante**:

$$h(t, \tau)$$

Respuesta del canal en el instante t a un impulso transmitido τ segundos antes

Caracterización del canal

Señal recibida $r(t)$ en función de señal transmitida $s(t)$:

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t - \tau) h(t, \tau) d\tau$$

Respuesta al impulso variante en el tiempo: $h(t, \tau)$.

Función de transferencia variante en el tiempo: $T(t, f) = \mathcal{F}_{\tau} [h(t, \tau)]$

Función desplazamiento Doppler - retardo: $S(\nu, \tau) = \mathcal{F}_t [h(t, \tau)]$

Función de transferencia - desplazamiento Doppler: $H(\nu, f) = \mathcal{F}_t [\mathcal{F}_{\tau} [h(t, \tau)]]$

Caracterización del canal

Efectos del canal multitrayecto:

- Variación aleatoria de $h(t, \tau) \Rightarrow$ **desvanecimiento**.
 - El desvanecimiento es sensible a la **frecuencia**: afecta de manera distinta a señales transmitidas en frecuencias diferentes.
 - Es también variante en el **tiempo**: afecta de manera distinta a señales transmitidas en instantes diferentes.
- Las mencionadas dependencias en tiempo y en frecuencia pueden introducir **distorsión** (lineal) en la señal:
 1. si la respuesta del canal varía dentro del ancho de banda de la señal; o
 2. si la respuesta del canal varía a lo largo de la duración de la señal:

En general, si $h(t, \tau) \neq \alpha \cdot \delta(\tau)$ puede haber distorsión:

1. τ : dispersión temporal $\leftrightarrow f$: selectividad (variación) en frecuencia
2. t : variación temporal $\leftrightarrow \nu$: dispersión en frecuencia (Doppler)

Multitrayecto: desvanecimiento

- En función de las diferencias de distancia y cambios de fase, las réplicas recibidas interfieren de forma constructiva o destructiva.
- Variación **aleatoria** del nivel recibido, con la siguiente distribución:
 - Cuando se transmite una senoide, o una señal de banda “estrecha”:
 - Si no hay línea de vista (NLOS): distribución Rayleigh para magnitudes lineales (tensión, campo); exponencial para magnitudes cuadráticas (potencia). Pueden producirse desvanecimientos de hasta 30-40 dB.
 - Si hay línea de vista (LOS): distribución Rice para magnitudes lineales. Los desvanecimientos son menos profundos.
 - Cuando se transmite una señal de banda “ancha”:

Las componentes en frecuencia de la señal sufren atenuaciones diferentes: **“diversificación”** en frecuencia: la distribución es más suave, con desvanecimientos menos profundos (pero la señal se distorsiona).
- Las variaciones son **rápidas** (basta desplazamiento del orden de λ).
- Al ser rápidas, estas variaciones afectan (y se tratan) de forma distinta que el desvanecimiento por sombra.

Multitrayecto: desvanecimiento

- Distribuciones Rayleigh (tensión: v) y exponencial (potencia: p)

$$f(v) = \frac{v}{b} \exp\left[-\frac{v^2}{2b}\right]$$

Rayleigh

$$f(p) = \frac{1}{b} \exp\left[-\frac{p}{b}\right]$$

Exponencial

$b = E[v^2]/2 = E[p]$: potencia media

- Distribución Rice (tensión: v):

$$f(v) = \frac{v}{b} \exp\left[-\frac{v^2 + c^2}{2b}\right] I_0\left(\frac{cv}{b}\right)$$

Rice

b = potencia media de la componente aleatoria

c^2 = potencia de la componente determinista

$I_0(\cdot)$: función de Bessel modificada de primera especie y de orden 0

Multitrayecto: desvanecimiento

- Hay que distinguir entre:
 - E_B/N_0 **instantánea**
 - E_B/N_0 **media**, respecto a variaciones (rápidas) producidas por el canal multitrayecto.
- En planificación radio se trabaja habitualmente con magnitudes promediadas respecto a las variaciones por multitrayecto.
- Al hablar de “nivel recibido” (o “ E_B/N_0 ”), usualmente **nos referimos a la media** respecto a variaciones por multitrayecto.
- La calidad viene dada por una tasa de error (BER, BLER, ...). Por su propia naturaleza, es una media respecto a multitrayecto:

$$G = E[g] = \int_0^{\infty} g(\gamma)f(\gamma)d\gamma$$

γ : E_B/N_0 instantánea, con fdp f
 g : tasa de error en función de γ
 G : tasa de error media

- El nivel recibido (medio) necesario para lograr una cierta calidad se denomina **sensibilidad**.

Multitrayecto: desvanecimiento

- **Variabilidad en la E_B/N_0 instantánea \Rightarrow peor calidad** (para una misma E_B/N_0 media).

Es decir, cuanto más ancha sea f , mayor tasa de error media G .

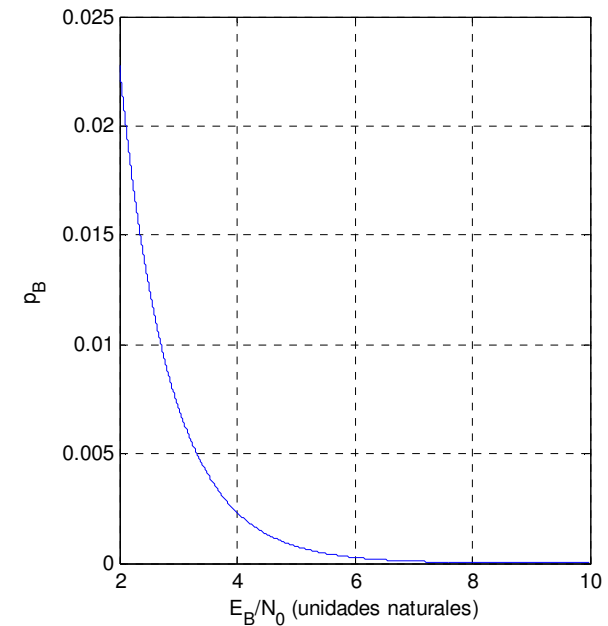
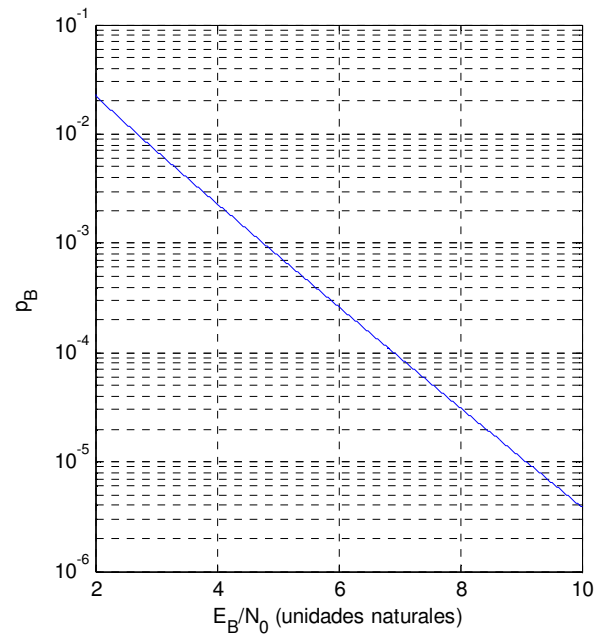
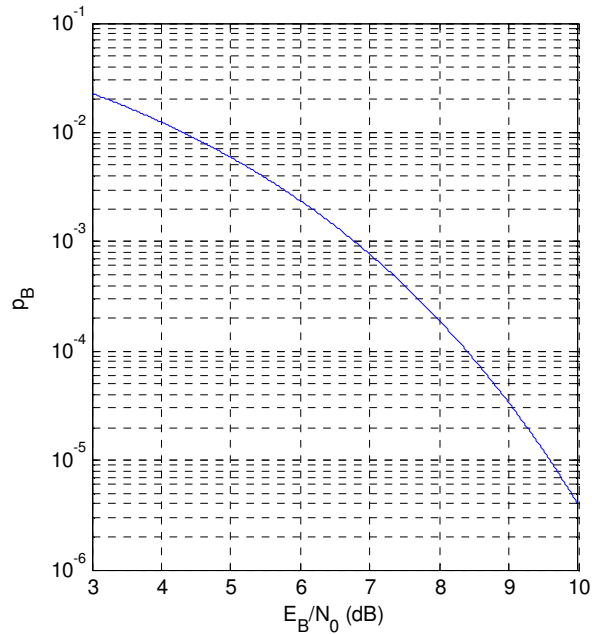
El motivo es que la función g es cóncava.

- Para compensar la degradación es necesario **incrementar** la sensibilidad, o la E_B/N_0 (media) requerida. Se define así la sensibilidad (o E_B/N_0) **dinámica**; por contraposición a la **estática**, que es la correspondiente a un canal sin desvanecimiento.
- En la planificación se utiliza la sensibilidad (o la E_B/N_0) dinámica. Así, el valor considerado **incluye el efecto del multitrayecto**.
- En función del tipo de canal la sensibilidad (o la E_B/N_0) dinámica será distinta: mayor cuanto más varíe el canal.

Multitrayecto: desvanecimiento

Ejemplo de degradación: BER, BPSK, sin codificar, receptor ideal

BER en canal estático (AWGN)

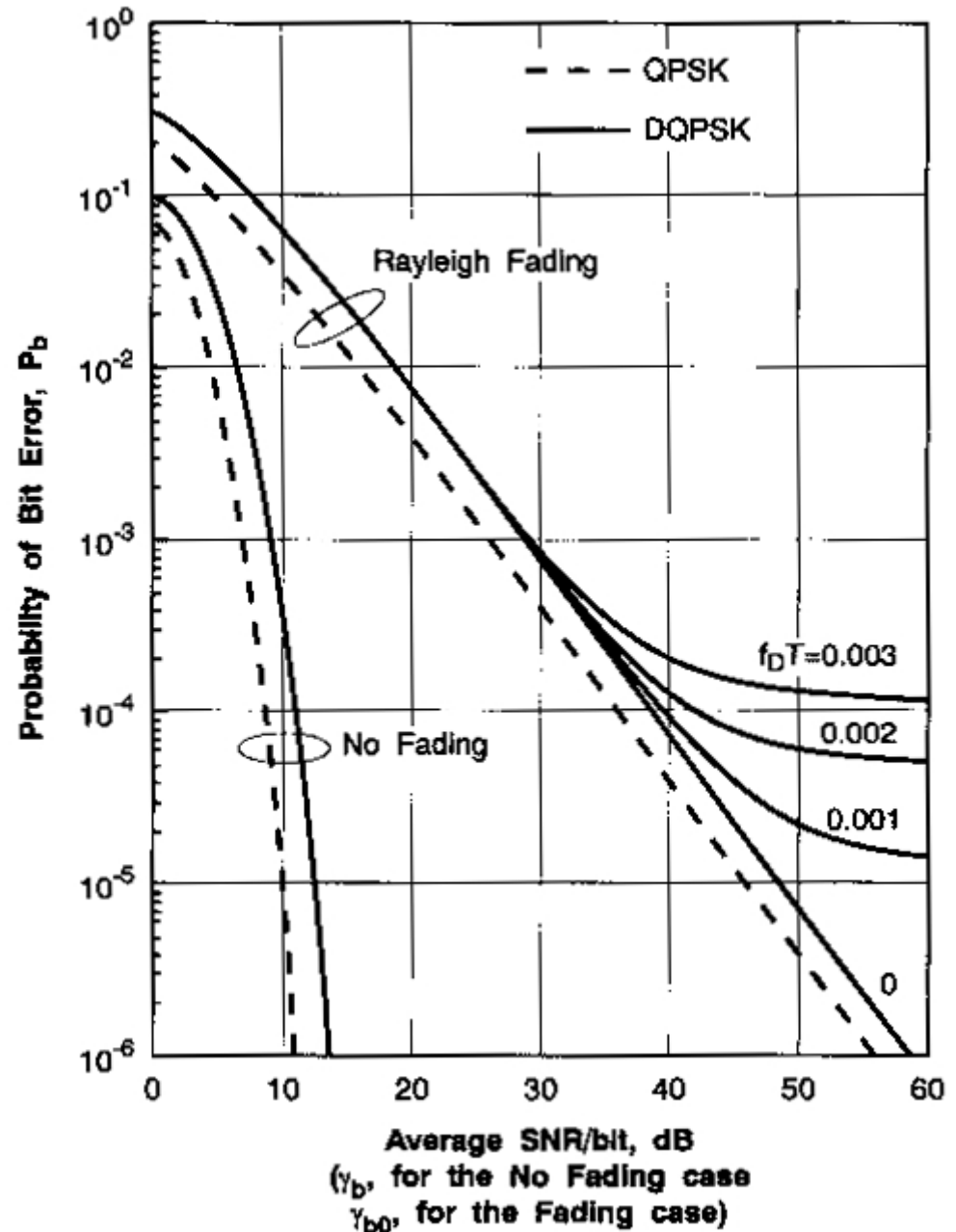


Multitrayecto: desvanecimiento

Ejemplo de degradación

BER (media) en canal Rayleigh en función de la E_B/N_0 (media), comparada con canal sin desvanecimiento

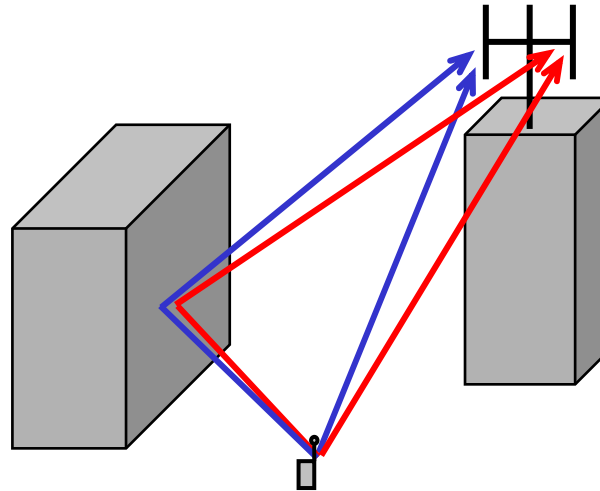
La degradación en este caso es la distancia horizontal entre las curvas correspondientes a canales con y sin desvanecimiento.



Multitrayecto: desvanecimiento

- La degradación producida por el desvanecimiento puede contrarrestarse por medio de:
 - codificación de canal con entrelazado
 - control de potencia rápido / adaptación al enlace rápida
 - diversidad de recepción (de antena, de polarización)
 - diversificación multitrayecto, con SS.

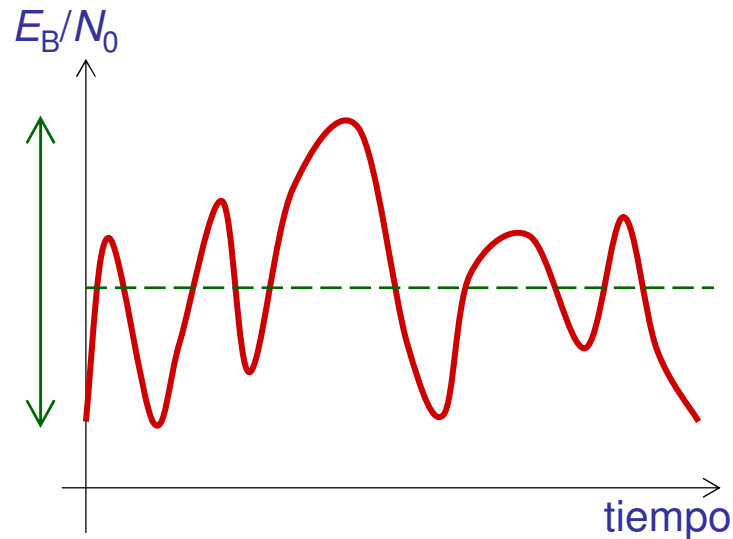
Diversidad de recepción



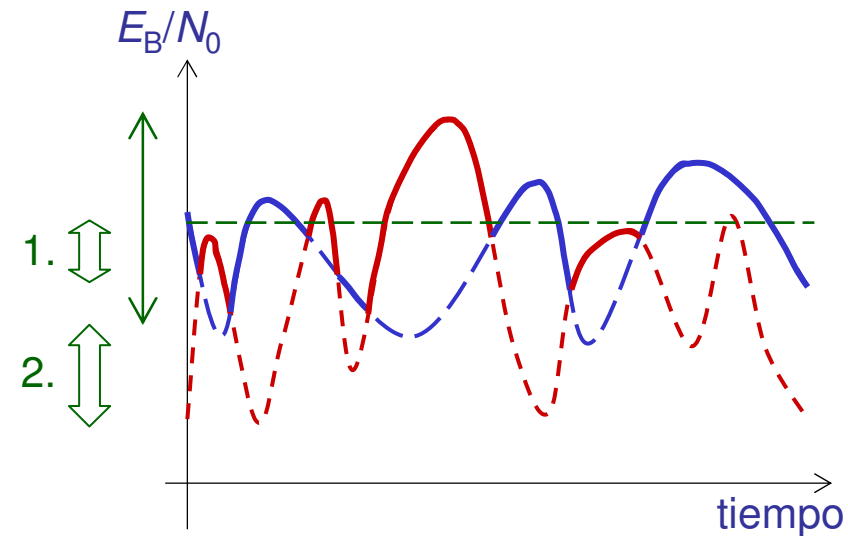
- Se recibe la señal en varias antenas suficientemente “separadas”, de forma que los desvanecimientos sean **estadísticamente independientes**.
- Tipos: selección / combinación
- Formas: espacio / polarización
- **Ganancia por diversidad**: reducción de la E_B/N_0 media necesaria (referida a una antena) al usar diversidad. Se debe a dos efectos:
 1. Sube la media
 2. Se reduce la variación

Diversidad de recepción: selección

Sin diversidad



Diversidad por selección, 2 señales



Desvanecimientos independientes



1. Sube la media
2. Se reduce la variación



Menor E_B/N_0 media requerida

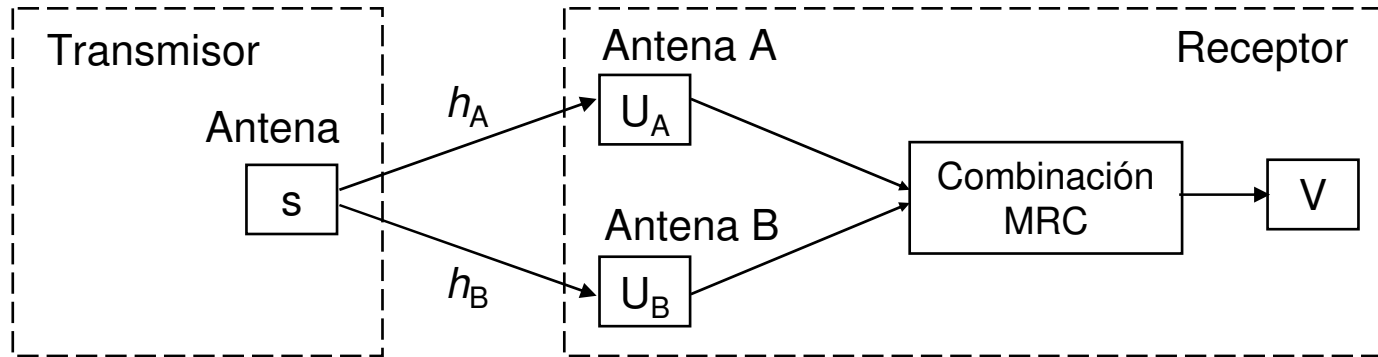
Diversidad de recepción: combinación

- En vez de seleccionar la señal más potente entre las N disponibles, se combinan todas esas señales.
- Cada señal r_i , $i = 1, \dots, N$ se recibe por medio de un receptor convencional (filtro adaptado): variable de decisión U_i .
- La combinación se aplica sobre las variables de decisión individuales U_1, \dots, U_N . El método óptimo (*Maximum Ratio Combining*, MRC) se basa en:
 1. Poner en fase las señales (para evitar suma destructiva)
 2. Dar a cada señal un peso proporcional a su amplitud (las señales débiles son menos “fiables”)

Llamando h_1, \dots, h_N a las amplitudes complejas de recepción, la combinación se expresa como $U = h_1^* U_1 + \dots + h_N^* U_N$.

- El principio de funcionamiento es análogo al del filtro adaptado.
- El proceso de combinación exige estimar h_1, \dots, h_N . Se utilizan para ello símbolos piloto.
- La SINR (o E_B/N_0) instantánea de la señal combinada resulta ser la suma de las individuales: $\text{SINR} = \text{SINR}_1 + \dots + \text{SINR}_N$.

Combinación MRC



s : símbolo transmitido en el intervalo de símbolo considerado

h_A, h_B : atenuación y fase de los canales de propagación A y B

U_A, U_B : variables de decisión en los receptores A y B

V : variable de decisión combinada

k : incluye el efecto del modulador (símbolo \rightarrow forma de onda transmitida) y del demodulador (forma de onda transmitida \rightarrow variable de decisión)

$$U_A = k h_A s$$

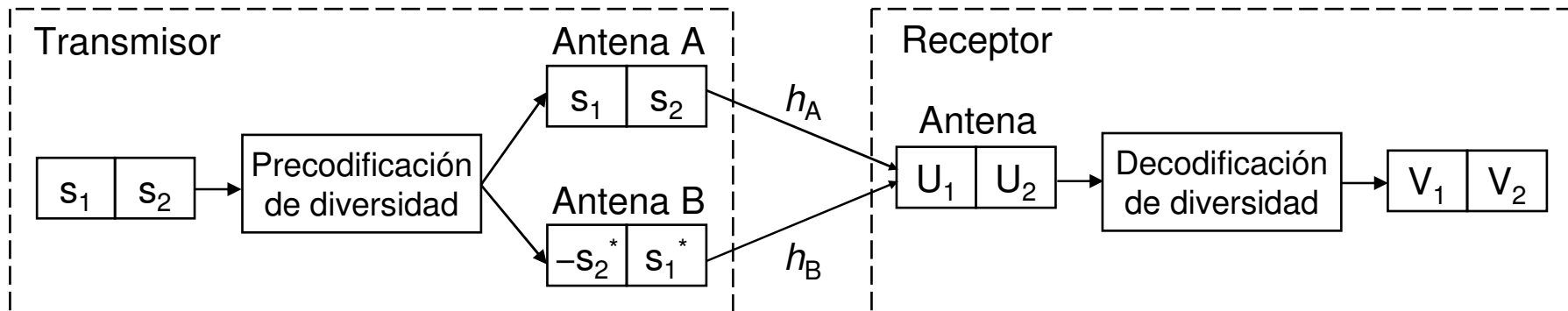
$$U_B = k h_B s$$

$$V = h_A^* U_A + h_B^* U_B = k h_A^* h_A s + k h_B^* h_B s = k (|h_A|^2 + |h_B|^2) s$$

Diversidad de transmisión

- Se emplea sobre todo en sentido descendente, usando las dos o más antenas que suele tener la base para diversidad de recepción en sentido ascendente.
- Ventajas similares a las de diversidad de recepción.
- Métodos:
 1. Con realimentación (o “en bucle cerrado”):
 - Similar a MRC en recepción, sólo que los pesos de la combinación lineal se aplican en transmisión: precodificación espacial. (Los pesos ideales siguen siendo h_A^* , h_B^*).
 - Ello requiere realimentación por parte del receptor de los pesos estimados.
 - A veces se ajustan sólo las fases: menos ganancia.
 2. Sin realimentación (método de Alamouti):
 - Consigue el mismo efecto que MRC en recepción aplicando una precodificación fija en el transmisor.
 - No necesita realimentación, al ser la precodificación fija.
 - Requiere que el canal no varíe entre dos símbolos consecutivos.

Diversidad de transmisión sin realimentación (método de Alamouti)



s_1, s_2 : símbolos transmitidos en dos intervalos consecutivos

h_A, h_B : atenuación y fase de los canales de propagación A y B

U_1, U_2 : variables de decisión originales

V_1, V_2 : variables de decisión tras decodificación de diversidad

k : incluye el efecto del modulador (símbolo \rightarrow forma de onda transmitida) y del demodulador (forma de onda transmitida \rightarrow variable de decisión)

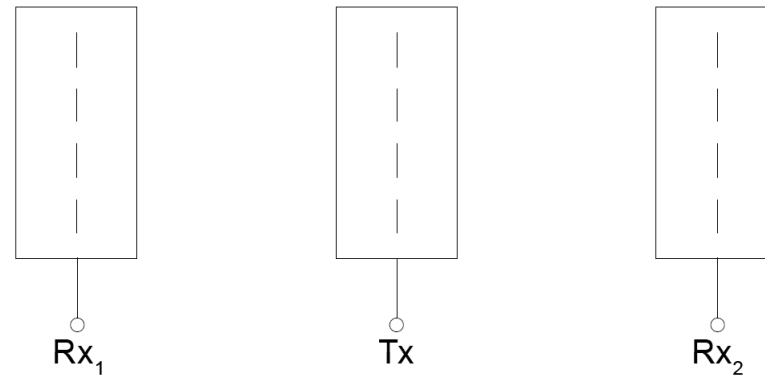
$$U_1 = kh_A s_1 - kh_B s_2^* \quad V_1 = h_A^* U_1 + h_B U_2^* = k(h_A^* h_A s_1 - h_A^* h_B s_2^* + h_A^* h_B s_2^* + h_B^* h_B s_1) = k(|h_A|^2 + |h_B|^2) s_1$$

$$U_2 = kh_A s_2 + kh_B s_1^* \quad V_2 = -h_B U_1^* + h_A U_2 = k(-h_A^* h_B s_1^* + h_B^* h_B s_2 + h_A^* h_A s_2 - h_A^* h_B s_1^*) = k(|h_A|^2 + |h_B|^2) s_2$$

Separación mínima para diversidad

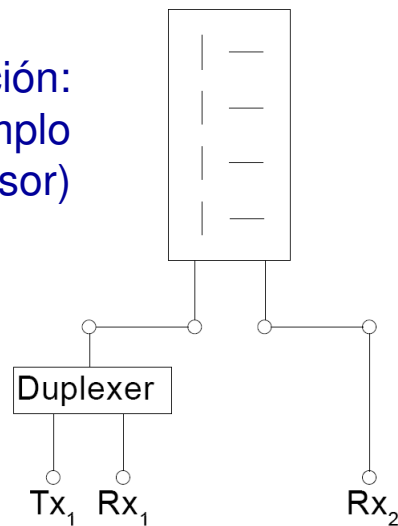
- La ganancia por diversidad se basa en que los desvanecimientos en los diferentes canales sean **estadísticamente independientes**.
- Ello requiere que los canales estén **físicamente separados**:
 - Espacialmente: se requiere una separación horizontal mínima entre antenas del orden de:
 - En el móvil: $\sim \lambda/2$
 - En una base macrocelular (antenas en emplazamientos elevados): $\sim 10\lambda$
 - En una base microcelular (antenas por debajo del nivel de los tejados o azoteas): caso comprendido entre los anteriores.
 - Por polarización: válido para 2 antenas. Se emplean polarizaciones ortogonales: horizontal/vertical (poco usado) o $\pm 45^\circ$ (más usual).

Antenas para diversidad

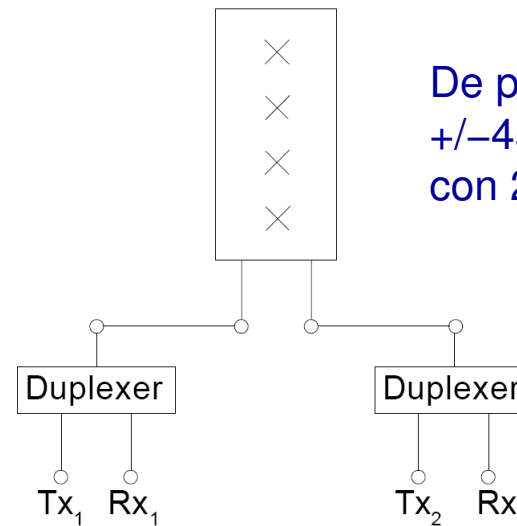


Espacial
(ejemplo
sin duplexer)

De polarización:
vert./hor. (ejemplo
con 1 transmisor)

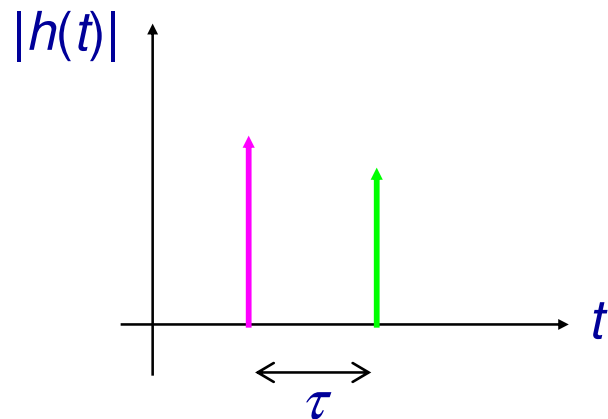


De polarización:
 $\pm 45^\circ$ (ejemplo
con 2 transmisores)

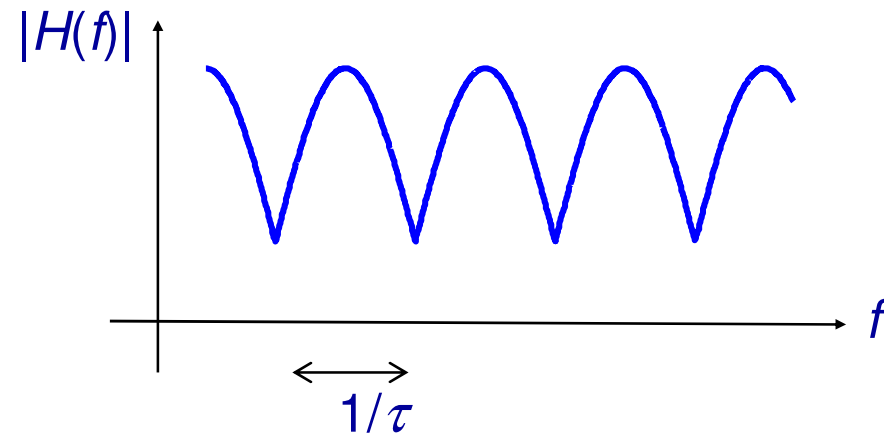


Dispersión temporal: dos rayos

Respuesta al impulso



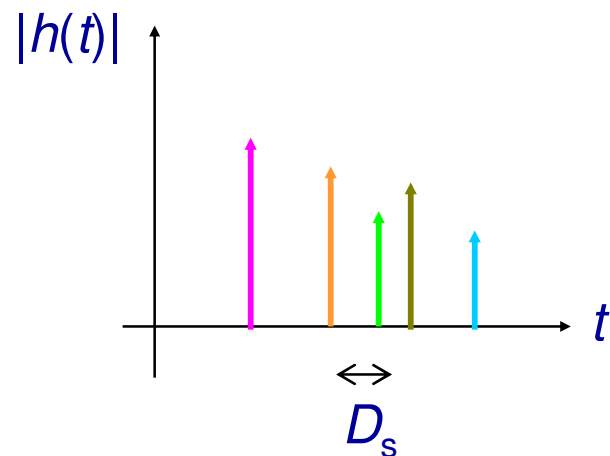
Función de transferencia



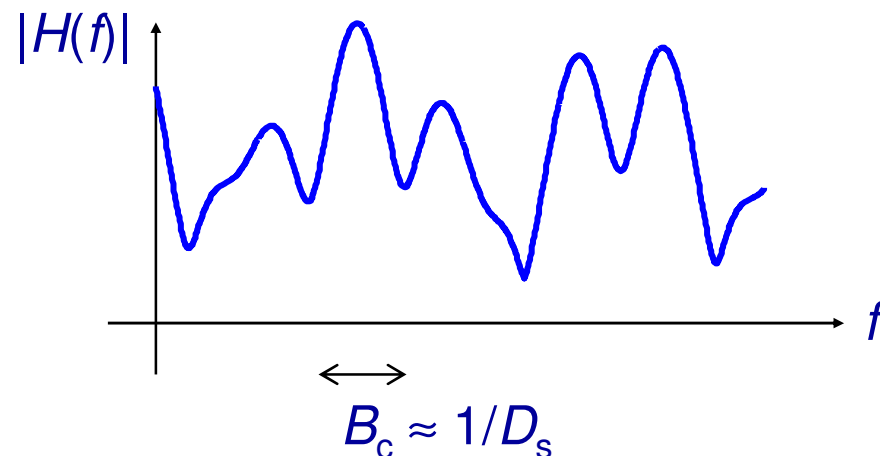
- Respuesta en frecuencia periódica
- Separación entre mínimos: $1/\tau$
- Profundidad de desvanecimiento: según relación de amplitudes

Dispersión temporal: varios rayos

Respuesta al impulso



Función de transferencia



- Se puede definir la **dispersión del retardo** D_s como el valor rms de la diferencia de retardos de los rayos respecto al retardo medio, ponderada por la amplitud relativa de cada rayo.
- El **ancho de banda de coherencia** B_c indica en qué intervalo de frecuencias el canal varía significativamente.

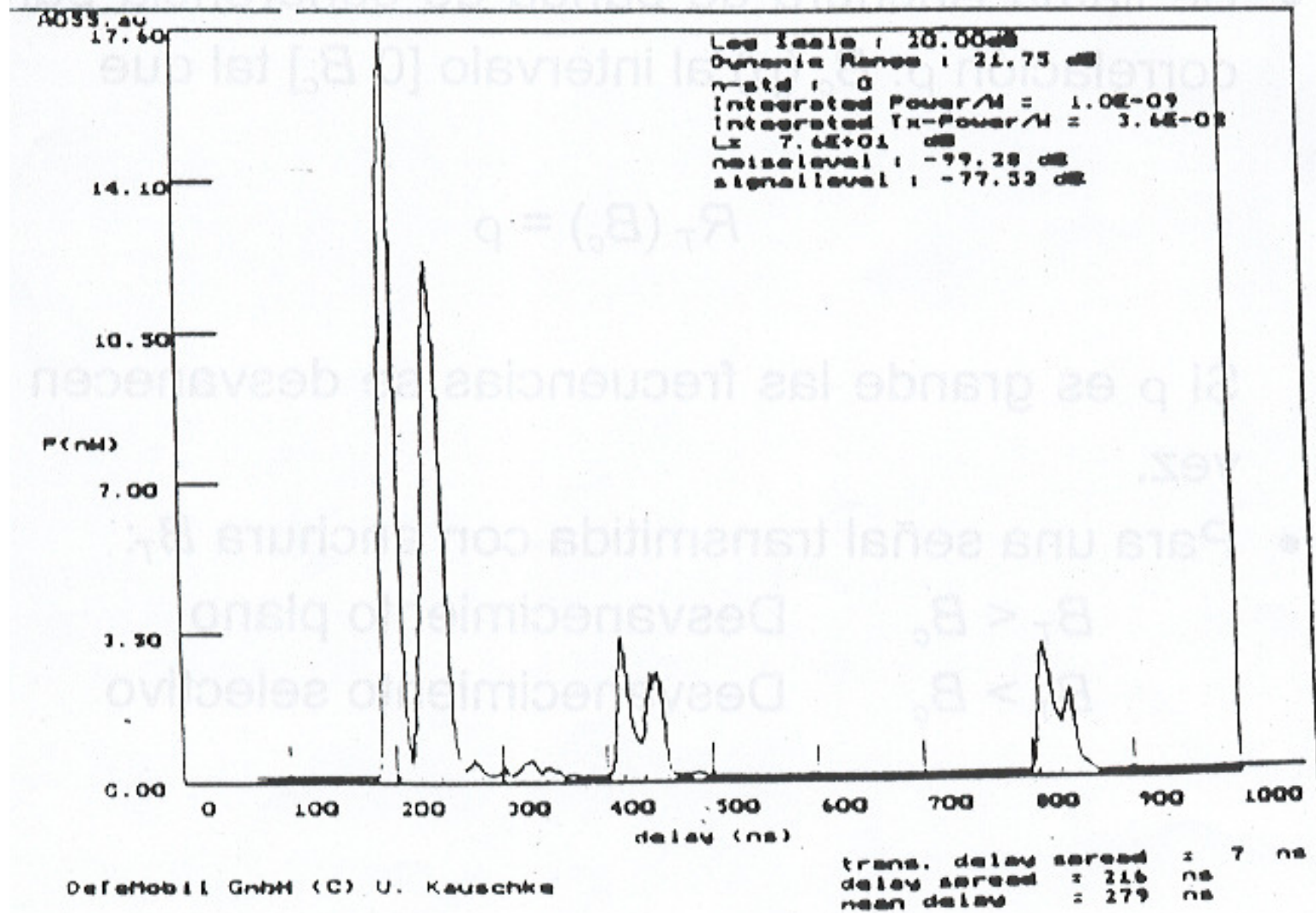
Dispersión temporal: canal aleatorio

- Variación aleatoria de: número de rayos y parámetros de cada uno (amplitud, fase, retardo, frecuencia Doppler).
- Se define el **perfil potencia-retardo** $P(\tau)$ como la potencia media (en sentido estadístico) instantánea (para cada retardo) recibida cuando se transmite un pulso muy estrecho de energía unidad.
- Modelo usual: exponencial: $P(t) = A \cdot \exp(-t/\tau_m)$, $t \geq 0$.
- Se define la **dispersión del retardo** D_s como

$$D_s = \frac{\int_0^{\infty} (\tau - \tau_m)^2 P(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P(\tau) d\tau}, \quad \tau_m = \frac{\int_0^{\infty} \tau P(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P(\tau) d\tau}$$

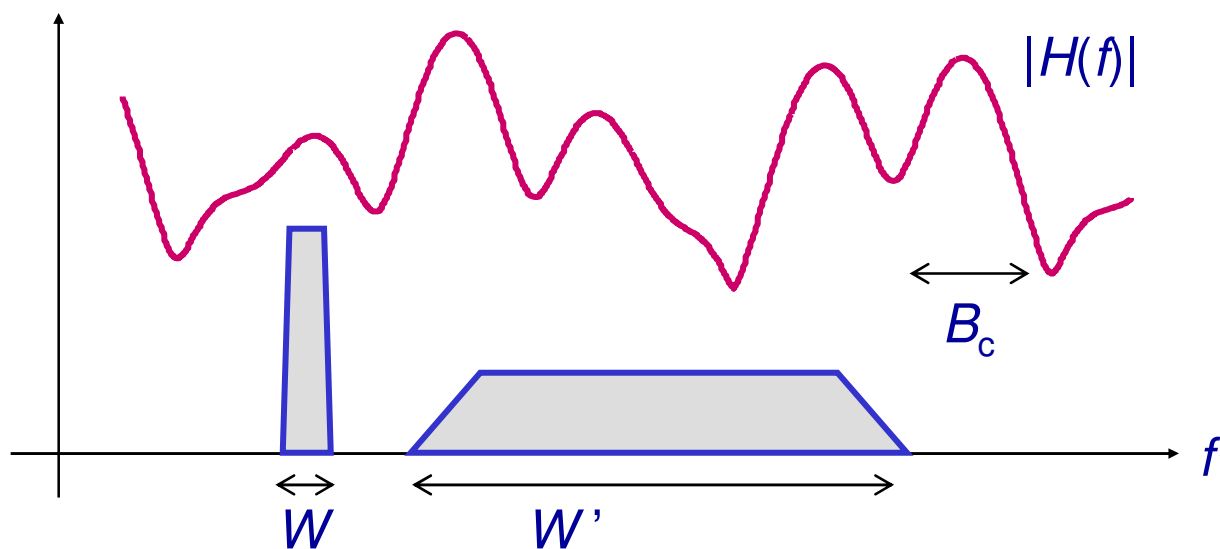
- El **ancho de banda de coherencia** B_c indica en qué intervalo de frecuencias el canal varía significativamente. $B_c \approx 1/D_s$.

Perfil potencia-retardo



Selectividad en frecuencia

- La **dispersión temporal** produce **selectividad en frecuencia**.
- El canal, con ancho de banda de coherencia B_c , se comporta como selectivo en frecuencia para una señal, de ancho de banda W , si $B_c \approx < W$.



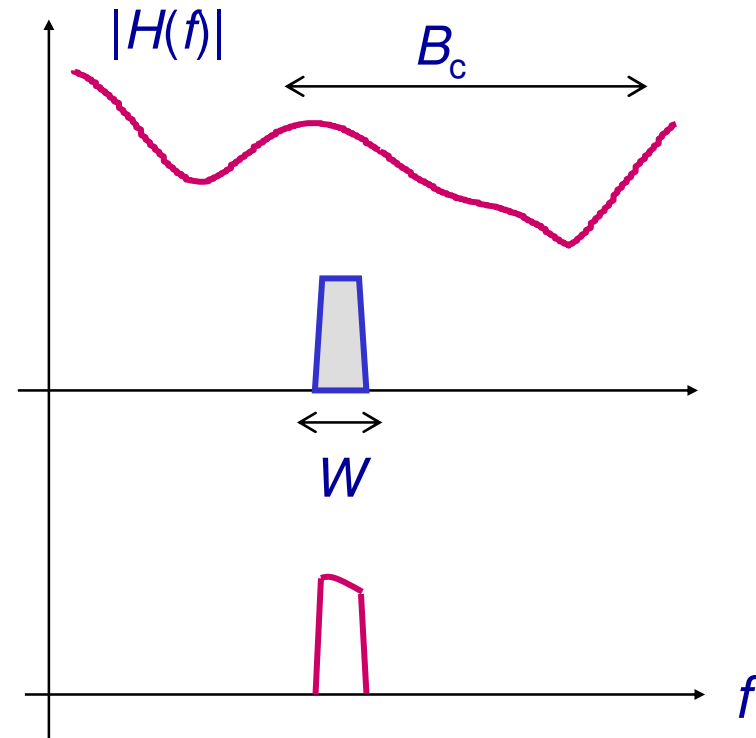
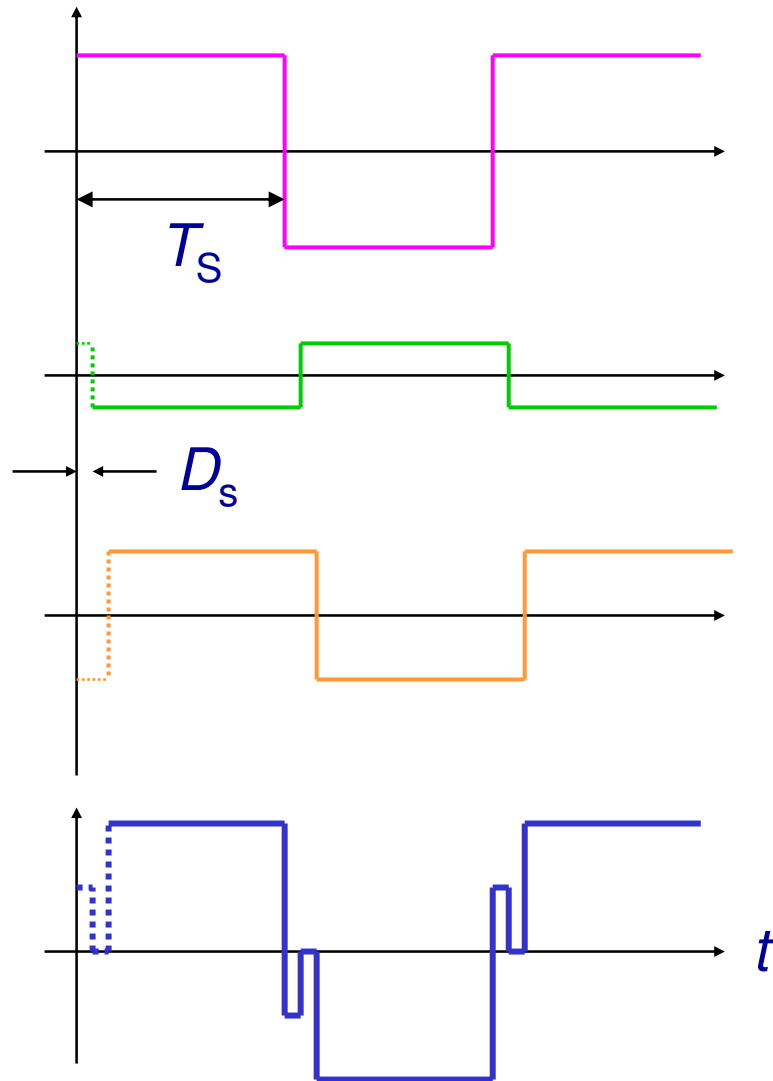
Interferencia entre símbolos

- La selectividad en frecuencia dentro de la señal
 - (+) reduce la variabilidad (desvanecimiento) del nivel recibido .
 - (–) distorsiona la señal, y puede producir interferencia entre símbolos.

$$B_c < W \quad \longleftrightarrow \quad D_s > T_s$$
$$W \approx 1/T_s$$
$$B_c \approx 1/D_s$$

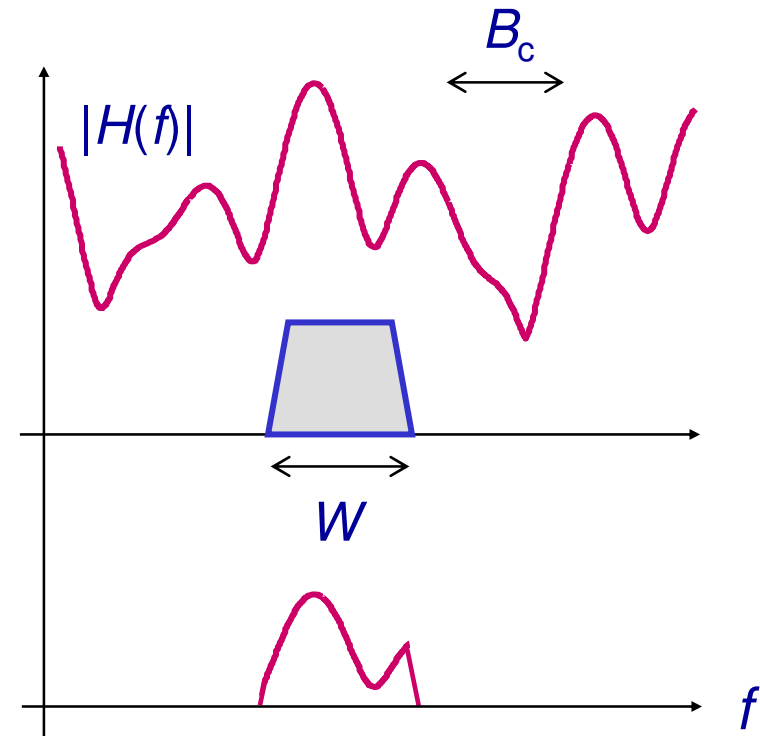
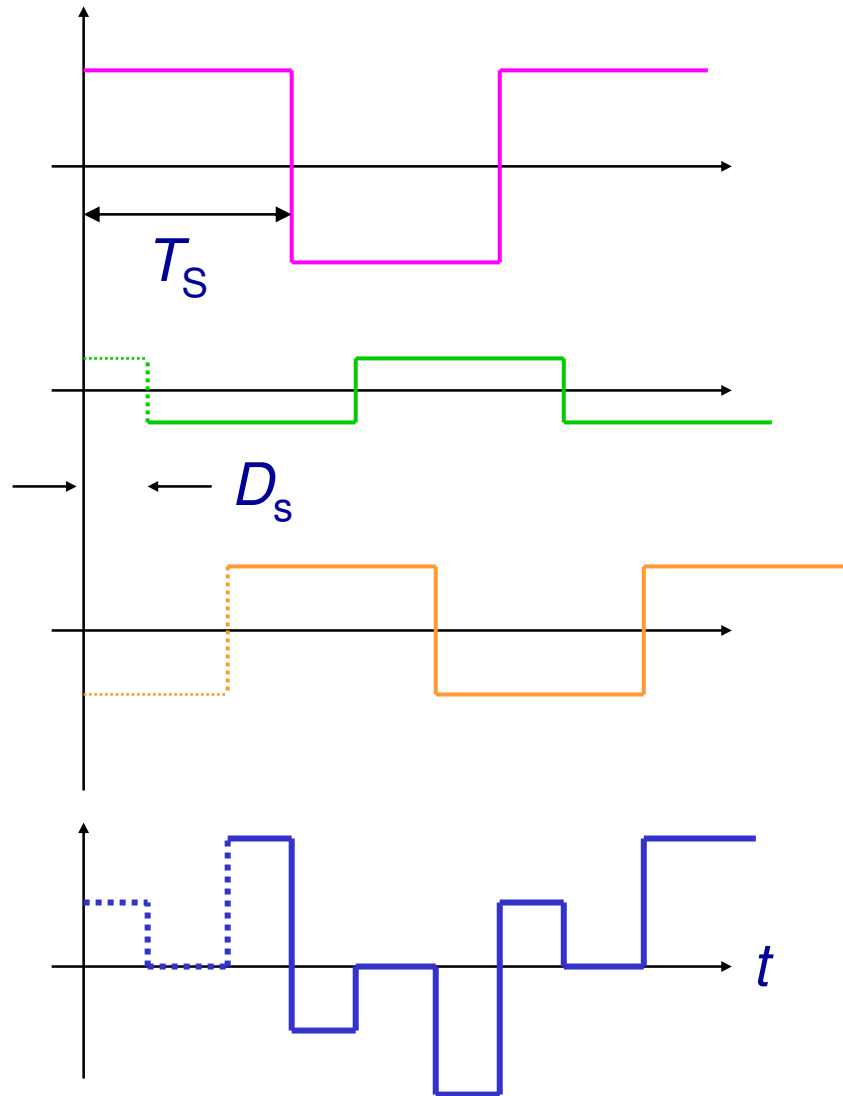
- La interferencia entre símbolos debe compensarse con:
 - Ecualesadores
 - Espectro ensanchado.

Interferencia entre símbolos



Poca ISI
Poca selectividad en frecuencia

Interferencia entre símbolos



Mucha ISI
Mucha selectividad en frecuencia

Ancho de banda de coherencia

- Valores típicos:
 - Entorno de interiores: $D_s = 30 - 300 \text{ ns}$, $B_c = 3 - 30 \text{ MHz}$.
 - Entorno urbano: $D_s = 300 \text{ ns} - 3 \mu\text{s}$, $B_c = 300 \text{ kHz} - 3 \text{ MHz}$.
 - Entorno rural: $D_s = 1 - 10 \mu\text{s}$, $B_c = 100 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz}$.
- Ejemplos:
 - Señal GSM, 200 kHz
 - Señal UMTS, 5 MHz.

Espectro de señal GSM recibida

Mar 18 17:09:34

REF -20.0 dBm
10dB/

ATT 10dB

A_avg
Smpl

B_blnk
Norm

Avg A

AVG A

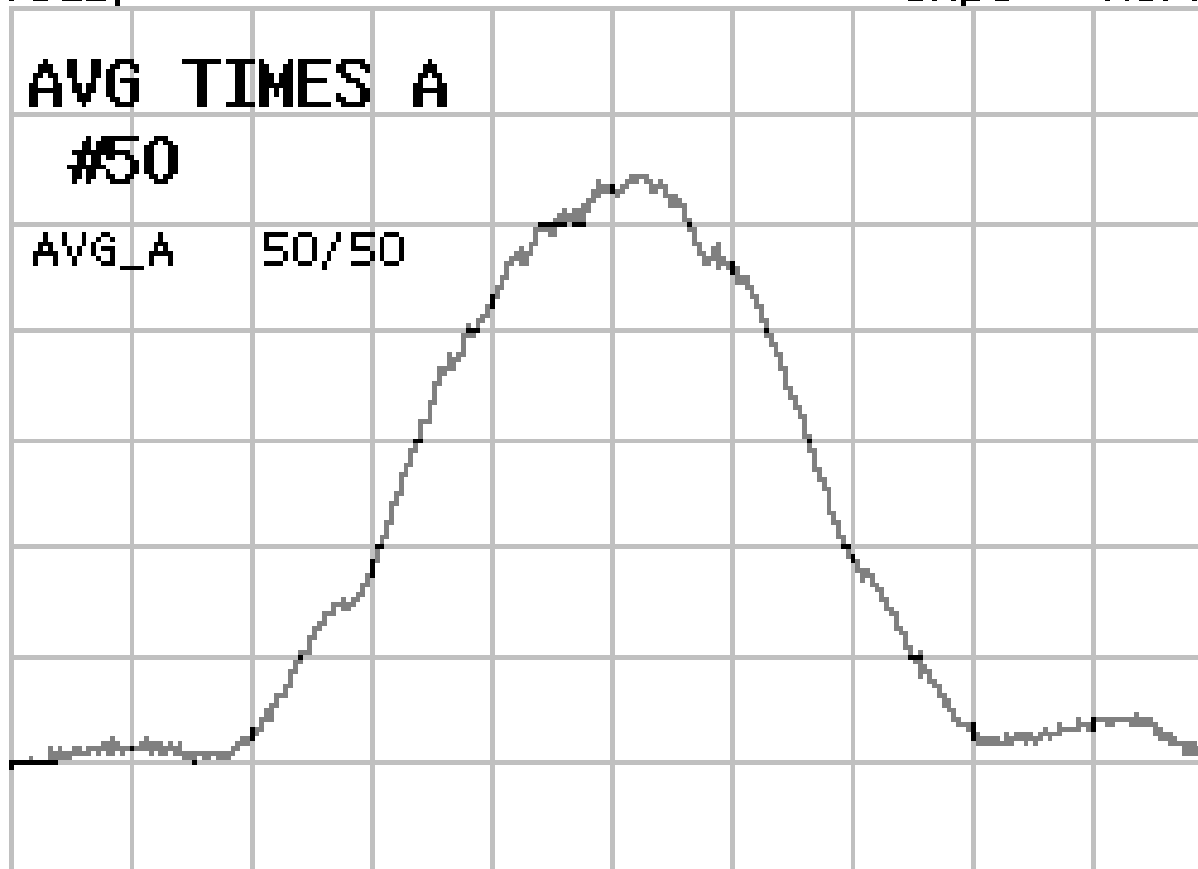
ON / OFF

AVG A

PSE / CONT

AVG A

CONT / SGL



CENTER 946.200 MHz SPAN 1.000 MHz
*RBW 30 kHz *VBW 10 kHz SWP 50 ms

Espectro de señal GSM recibida

Mar 18 17:10:49

REF -20.0 dBm
10dB/

ATT 10dB

A_avg
Smpl

B_blnk
Norm

Avg A

AVG A

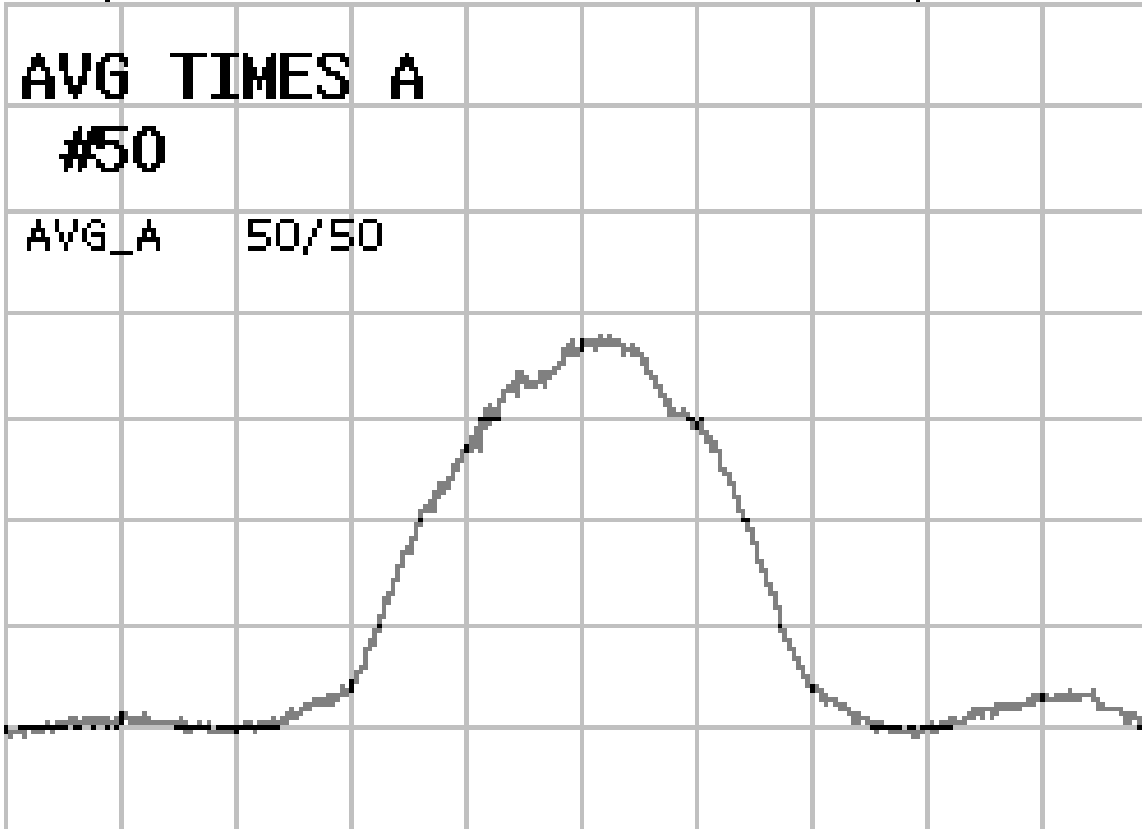
ON /OFF

AVG A

PSE /CONT

AVG A

CONT /SGL



CENTER 946.200 MHz SPAN 1.000 MHz
*RBW 30 kHz *VBW 10 kHz SWP 50 ms

Espectro de señal UMTS recibida

Mar 18 17:02:15

Abort

REF -54.9 dBm
5dB/

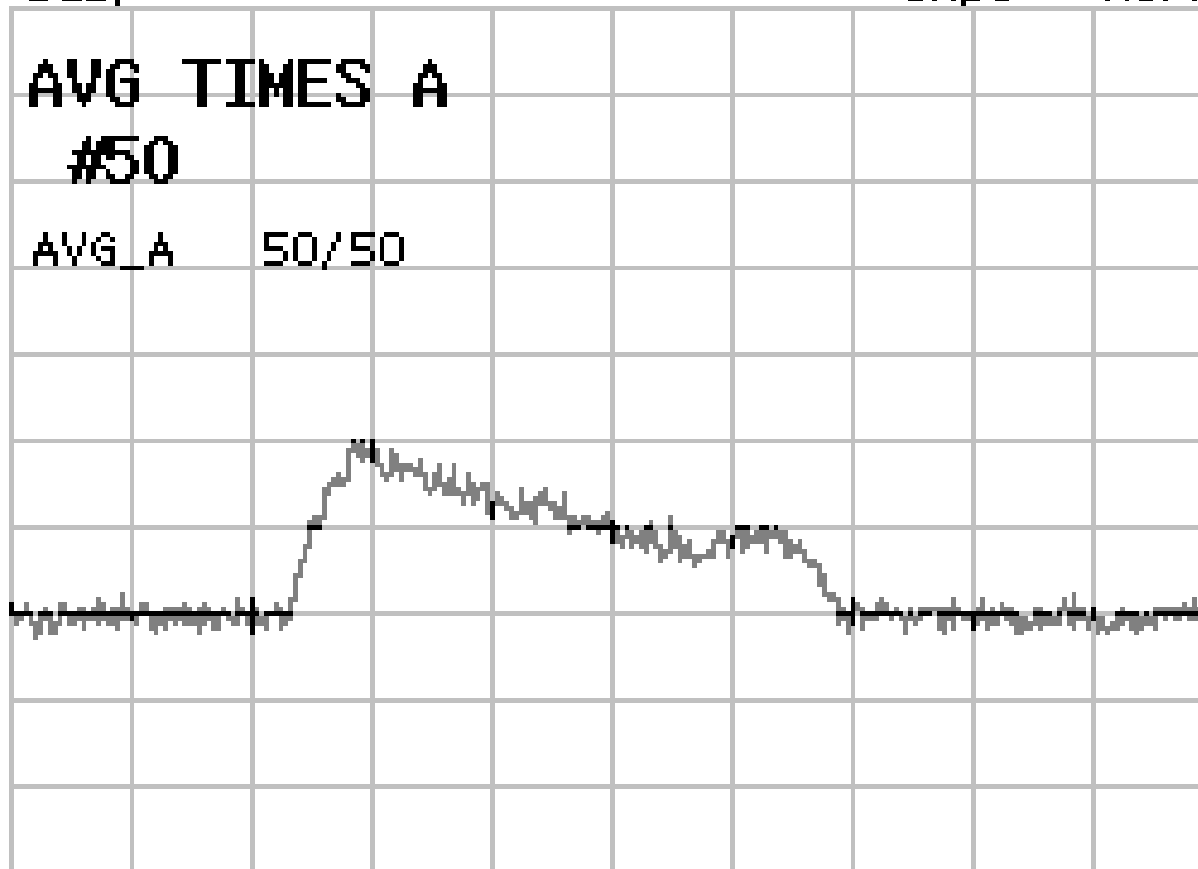
ATT 10dB

A_avg

B_blnk

Smpl

Norm



CENTER 2.14800 GHz

SPAN 10.00 MHz

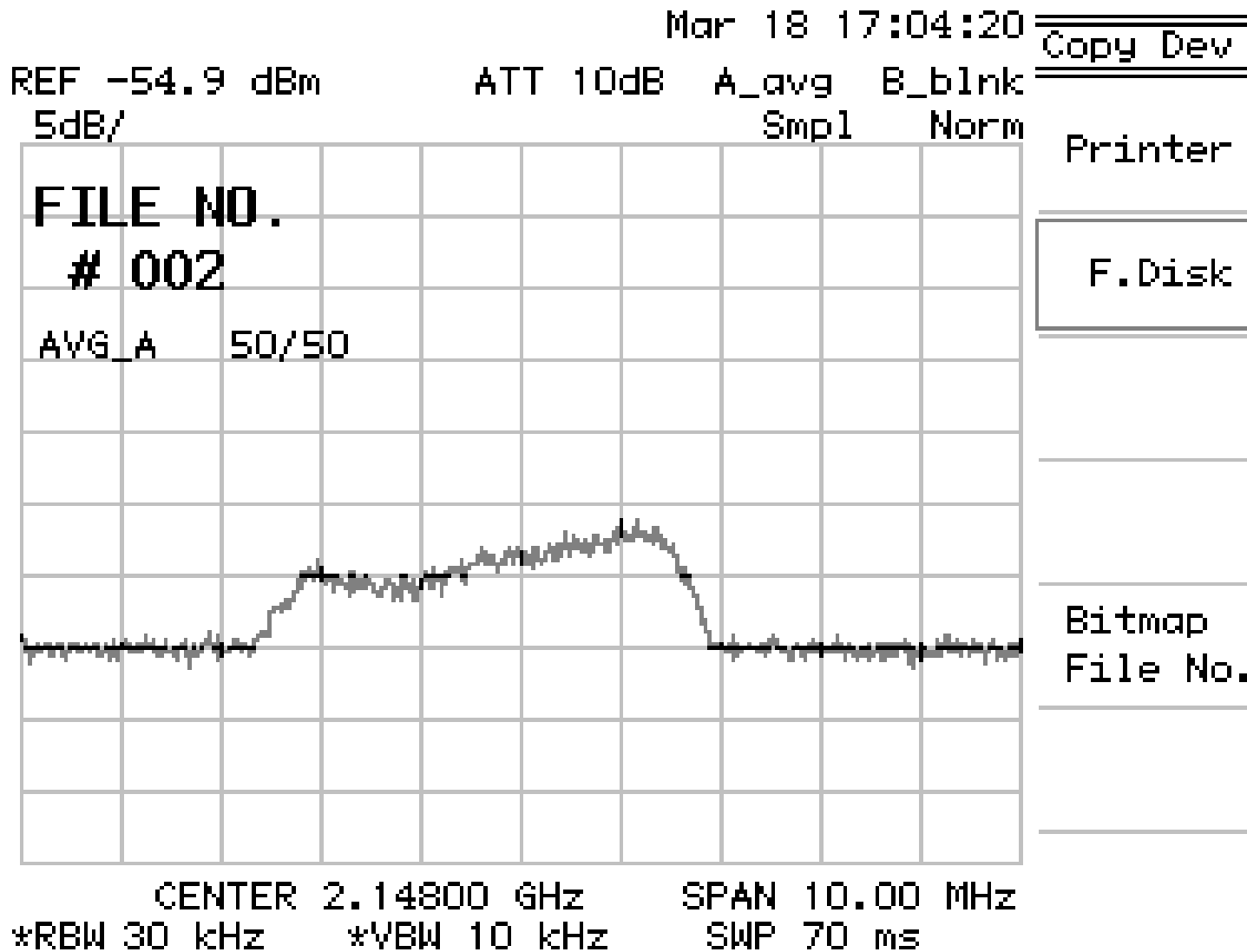
Abort

*RBW 30 kHz

*VBW 10 kHz

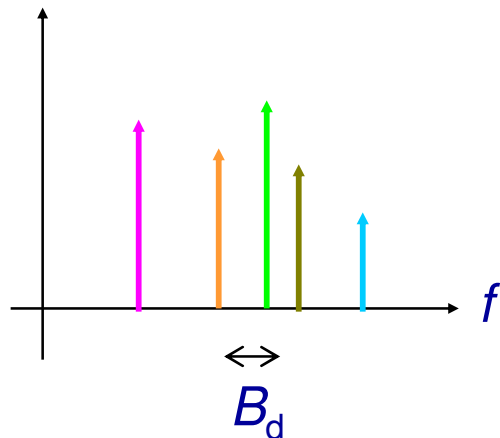
SWP 70 ms

Espectro de señal UMTS recibida

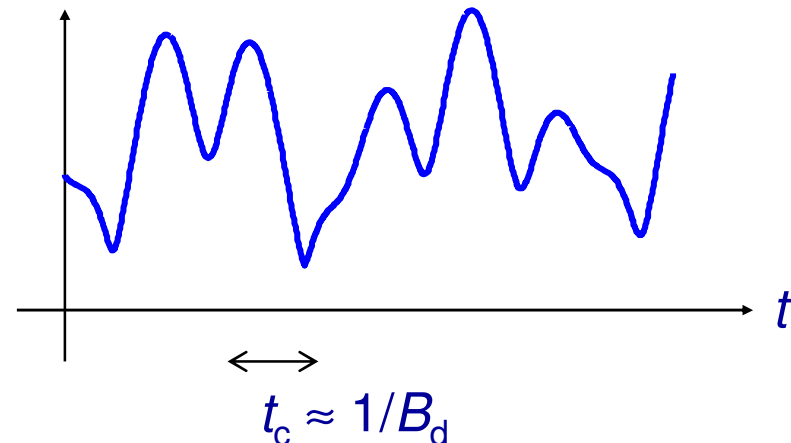


Variación temporal: varios rayos

Respuesta a una senoide



Variación temporal



- Se puede definir la **dispersión Doppler** B_d como una medida de la separación típica de las frecuencias recibidas (por desplazamiento Doppler).
- El **tiempo de coherencia** t_c indica en qué intervalo de tiempo el canal varía significativamente. Es del orden del tiempo que tarda el móvil en recorrer $\lambda/2$.

Variación temporal: canal aleatorio

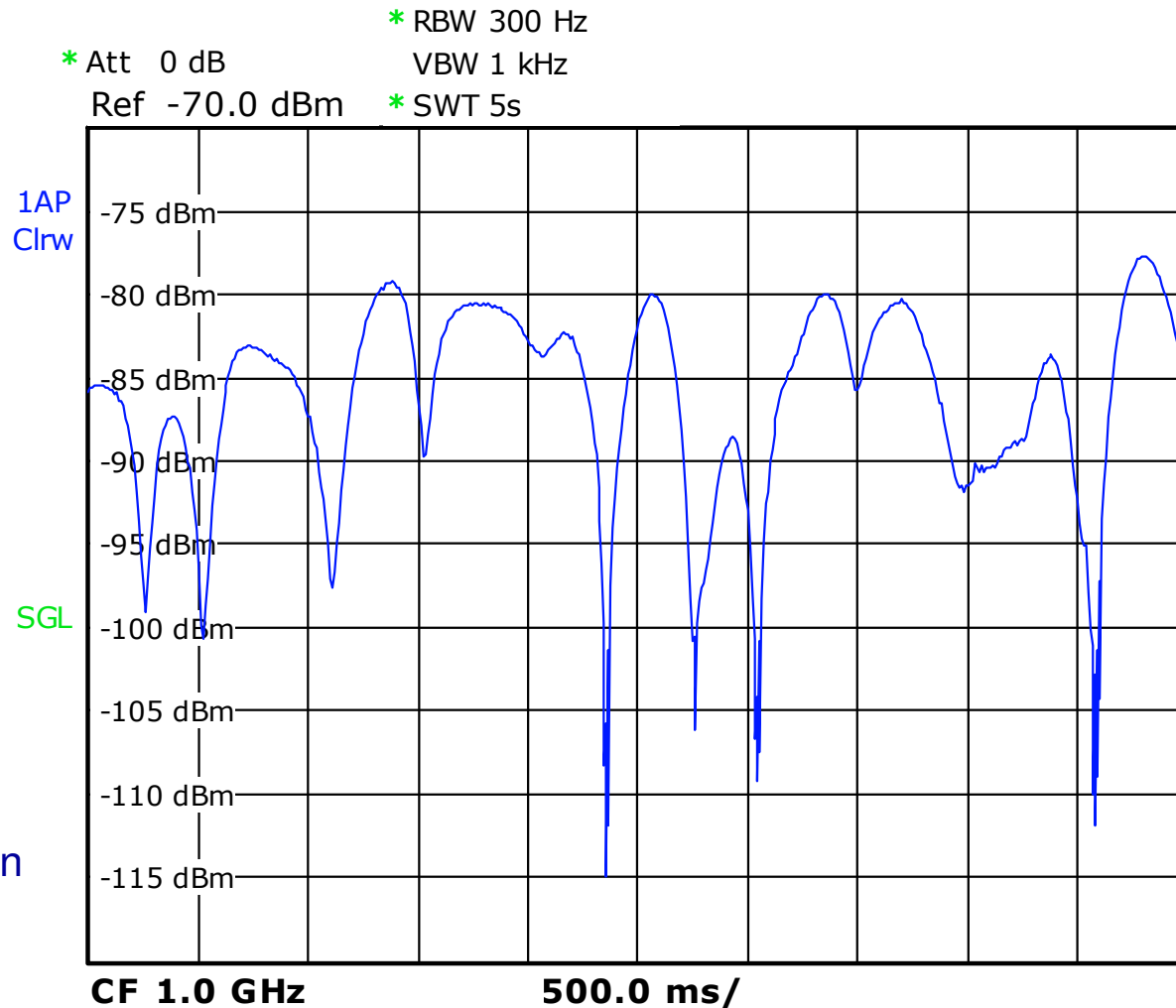
- Se define el **perfil Doppler** $S(\nu)$ como la densidad de potencia media (en sentido estadístico) recibida a la frecuencia $f_c + \nu$ cuando se transmite una senoide a la frecuencia portadora f_c .
- Modelo usual: espectro “clásico” o de Jakes:

$$S(\nu) = \frac{1}{2f_{d\max} \sqrt{1 - (\nu / f_{d\max})^2}}$$

Físicamente representa una distribución uniforme de ángulos de llegada.

- Se define la **dispersión Doppler** B_d de forma análoga a la dispersión de retardo.
- El **tiempo de coherencia** t_c indica en qué intervalo de tiempo el canal varía significativamente. $t_c \approx 1/B_d$.

Variación temporal del desvanecimiento



Portadora de 1 GHz

Analizador de espectro con
filtro estrecho y barrido
(*span*) cero

Desplazamiento de la
antena receptora de 1-2 m



Variación temporal y dispersión Doppler

- La **variación temporal** equivale a una **dispersión en frecuencia (Doppler)**.
- La variación temporal a lo largo de la transmisión de la señal produce:
 - Degradación si $t_c < T_{\text{intervalo}}$: falta de adaptación al canal (variabilidad interna en el “intervalo”, entendido como el periodo de estimación de la respuesta del canal).
 - Distorsión si $t_c < T_{\text{símbolo}}$: casi nunca ocurre.

Efectos de la distorsión sobre el diseño y la planificación radio

- La presencia de distorsión degrada la calidad, y obliga a modificar el valor de la sensibilidad (o E_B/N_0) dinámica.
- Por tanto, la **sensibilidad dinámica** incluye todos los efectos de multitrayecto: **desvanecimiento** y **distorsión**.
- En planificación radio se utilizan valores dinámicos de sensibilidad (o de E_B/N_0).
- La especificación del sistema debe contemplar los efectos de la distorsión y las condiciones en que es posible contrarrestarlos. Por ejemplo:
 - Velocidad máxima del móvil (t_c)
 - Retardo máximo ecualizable (D_s)

Recapitulación

$$\alpha = 1/l_b$$



Efecto de multitrayecto



Efecto de sombra

$$\alpha_{\text{real inst}} = \underbrace{\alpha_{\text{modelo}} \cdot \alpha_{\text{sombra}}}_{\alpha_{\text{real media}}} \cdot \alpha_{\text{multitray}}$$

$\alpha_{\text{real media}}$: valor medio de $\alpha_{\text{real inst}}$ respecto a variaciones por multitrayecto
(la media de $\alpha_{\text{real inst}}$ es igual a 1)

α_{modelo} : valor mediano de $\alpha_{\text{real media}}$ (la mediana de α_{sombra} es igual a 1)

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{tt} - L_{tr} - L_b$$

$$S_{\text{din}} = P_t + G_t + G_r - L_{tt} - L_{tr} - L_{b \text{ real media}}$$

$$P_{r \text{ mediana}} = P_t + G_t + G_r - L_{tt} - L_{tr} - L_{b \text{ modelo}}$$

$$S_{\text{din}} + M$$