

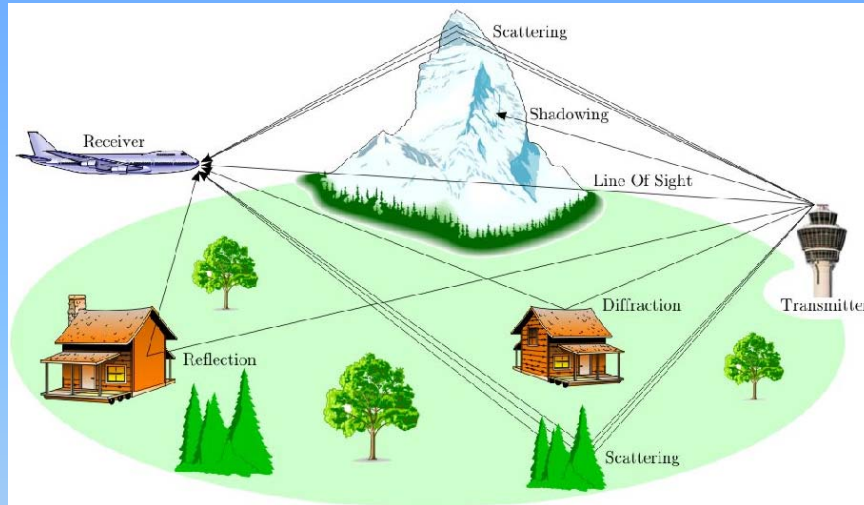
RADIOCOMUNICACIÓN

Tema 3: *Distribuciones estadísticas de la propagación*

0. INDICE

- 1. Introducción
- 2. Sistemas punto a punto
 - 2.1. Condiciones normales
 - 2.2. Variabilidad temporal
- 3. Sistemas punto a multipunto o punto a zona
 - 3.1. Condiciones normales
 - 3.2. Variabilidad temporal
 - 3.3. Variabilidad espacial
 - 3.4. Variabilidad total
- 4. Calidad de servicio
- 5. UIT-R P.1546
- 6. Técnicas de diversidad

1. INTRODUCCIÓN



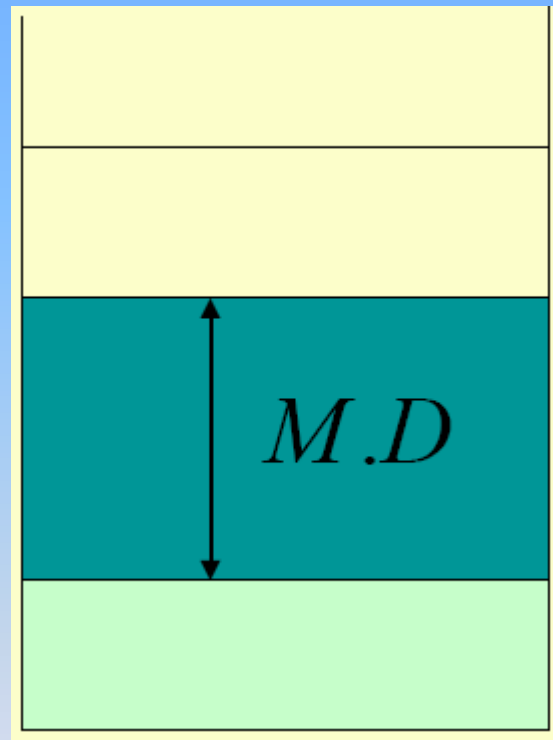
VARIABILIDAD
de la señal
recibida

DESVANECIMIENTO

*“Caída de potencia con
respecto al valor nominal”*

1. INTRODUCCIÓN

□ MARGEN DE DESVANECIMIENTO



Condiciones normales
de no desvanecimiento

Condiciones umbrales

$$MD = P_{rxn} - U$$

1. INTRODUCCIÓN

□ DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS

■ $f(x)$: función densidad de probabilidad

□ $f(x) = P(x=x_0)$

■ $F(x)$: función de distribución acumulativa

□ $F(x) = P(x \leq x_0)$

■ $Q(x)$: función de distribución acumulativa complementaria

□ $Q(x) = P(x > x_0) = 1 - F(x)$

■ \bar{x} : valor medio de todos los valores de x posibles

■ \tilde{x} : valor mediano es el valor equiprobable

□ $F(\tilde{x}) = Q(\tilde{x}) = 0,5$

1. INTRODUCCIÓN

□ PROBABILIDADES DE INTERÉS

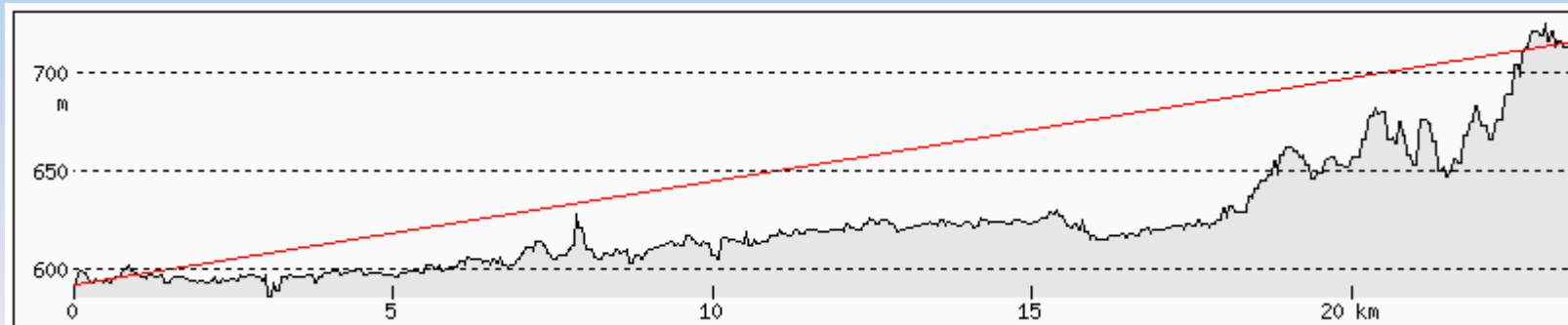
$$P(F > MD) = Q(MD) = P(\text{Prx} \leq U) = F(U)$$

$$P(F \leq MD) = F(MD) = P(\text{Prx} > U) = Q(U)$$

2.1. Condiciones normarles pto-ptu

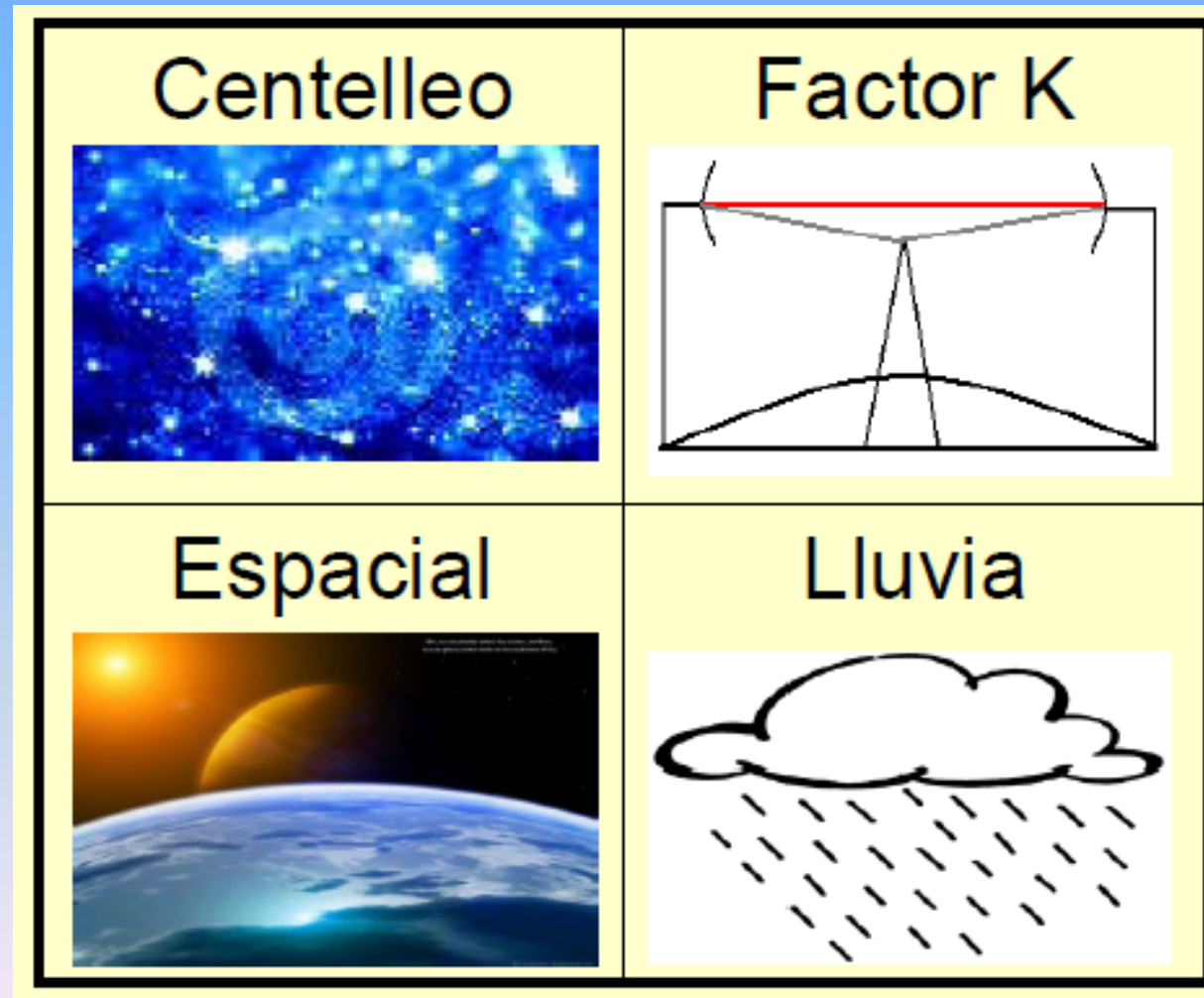
- Pérdidas de propagación básicas sin desvanecimiento

$$L_b = L_{bf} + L_{gases} + L_{dif} + L_{veg}$$



2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ CAUSAS Y CARACTERÍSTICAS:



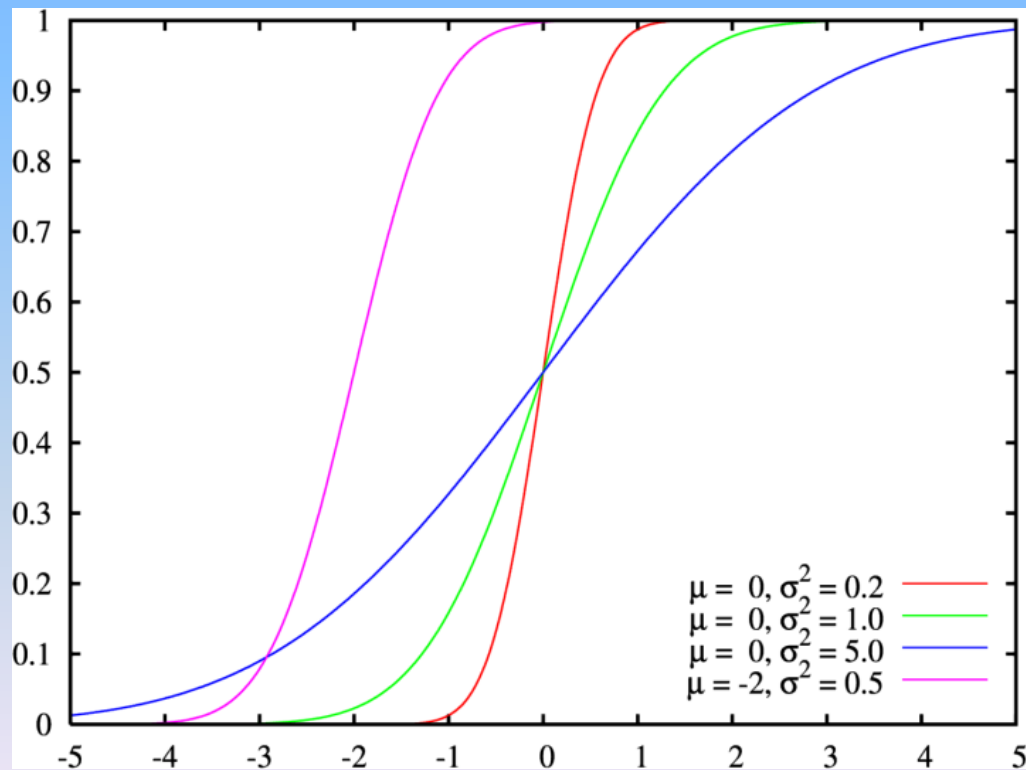
2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ CAUSAS Y CARACTERÍSTICAS:

- Profundos
- Duración mayor de 10 seg →
Desvanecimiento lento
- Plano (igual para todas la comunicaciones)
- Afecta a la calidad de disponibilidad

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ MODELO TEÓRICO: PDF Gaussiana



$$F(x) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma\sqrt{2}}\right)$$

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ MODELO TEÓRICO: PDF Gaussiana

- x puede ser E o P (unidades logarítmicas)
- $F(-x_0) = 1 - F(x_0) = Q(x_0)$
- $\bar{X} = \tilde{X}$
- Variable gaussiana de media cero y varianza unidad:
unidad: $t = \frac{x - \bar{X}}{\sigma}$
- En unidades naturales \rightarrow PDF log-normal

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

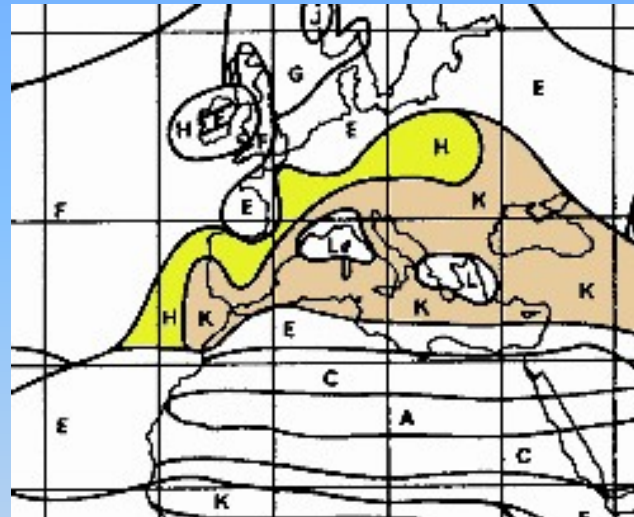
□ MODELO TEÓRICO: PDF Gaussiana

t	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
-1.0	0.15865	0.15625	0.15386	0.15150	0.14917	0.14686	0.14457	0.14231	0.14007	0.13786
-0.9	0.18406	0.18141	0.17878	0.17618	0.17361	0.17105	0.16853	0.16602	0.16354	0.16109
-0.8	0.21185	0.20897	0.20611	0.20327	0.20045	0.19766	0.19489	0.19215	0.18943	0.18673
-0.7	0.24196	0.23885	0.23576	0.23269	0.22965	0.22663	0.22363	0.22065	0.21769	0.21476
-0.6	0.27425	0.27093	0.26763	0.26434	0.26108	0.25784	0.25462	0.25143	0.24825	0.24509
-0.5	0.30853	0.30502	0.30153	0.29805	0.29460	0.29116	0.28774	0.28434	0.28095	0.27759
-0.4	0.34457	0.34090	0.33724	0.33359	0.32997	0.32635	0.32276	0.31917	0.31561	0.31206
-0.3	0.38209	0.37828	0.37448	0.37070	0.36692	0.36317	0.35942	0.35569	0.35197	0.34826
-0.2	0.42074	0.41683	0.41293	0.40904	0.40516	0.40129	0.39743	0.39358	0.38974	0.38590
-0.1	0.46017	0.45620	0.45224	0.44828	0.44433	0.44038	0.43644	0.43250	0.42857	0.42465
-0.0	0.50000	0.49601	0.49202	0.48803	0.48404	0.48006	0.47607	0.47209	0.46811	0.46414

$F(t)$

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

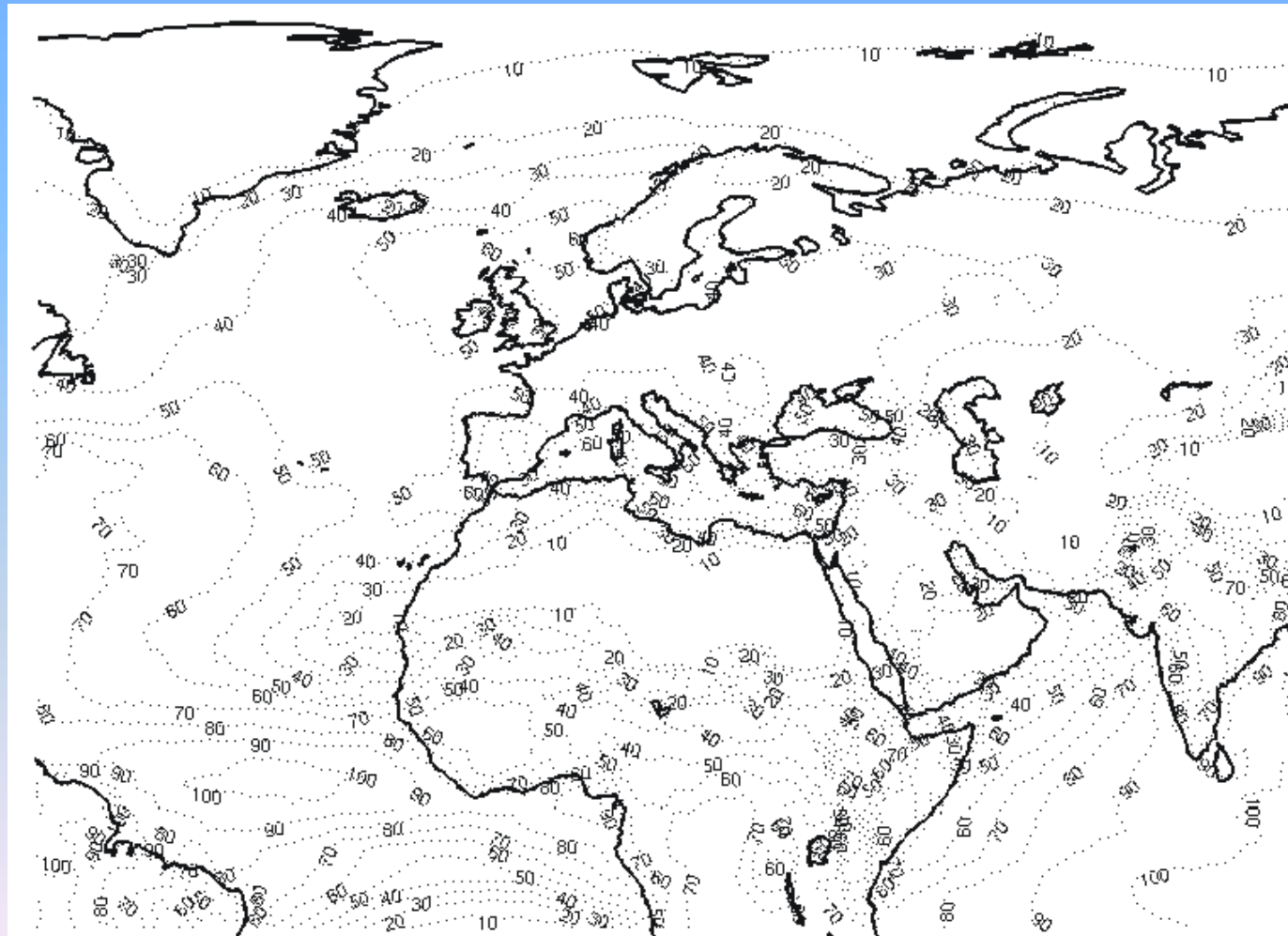
□ LLUVIA: Intensidad de lluvia (R, mm/h)



(%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P
1.0	-	1	-	3	1	2	-	-	-	2	-	4	5	12
0.3	1	2	3	5	3	4	7	4	13	6	7	11	15	34
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250

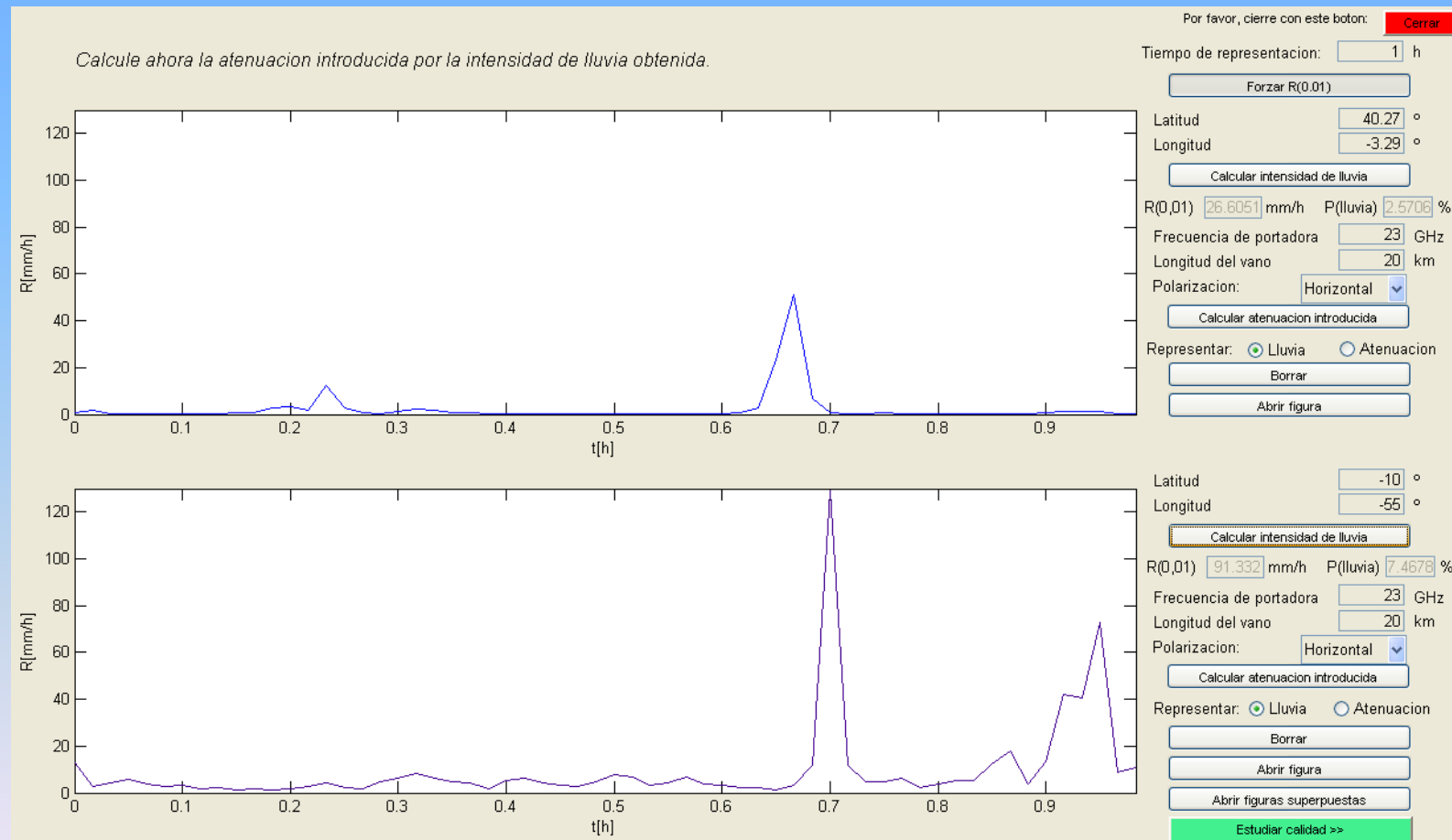
2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ LLUVIA: Intensidad de lluvia (R, mm/h)



2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ LLUVIA: Intensidad de lluvia (R, mm/h)



2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ LLUVIA: Atenuación específica ($\gamma = kR^\alpha$, dB/km)

- Valores de k y α para polarización horizontal y vertical

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha$$

- Valores de k y α para polarización oblicua y circular

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2k$$

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ LLUVIA: Atenuación específica ($\gamma = kR^\alpha$, dB/km)

- Valores de k y α para polarización horizontal y vertical

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha$$

- Valores de k y α para polarización oblicua y circular

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2k$$

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

- LLUVIA: Atenuación específica ($\gamma = kR^\alpha$, dB/km)

Coefficientes para k_V

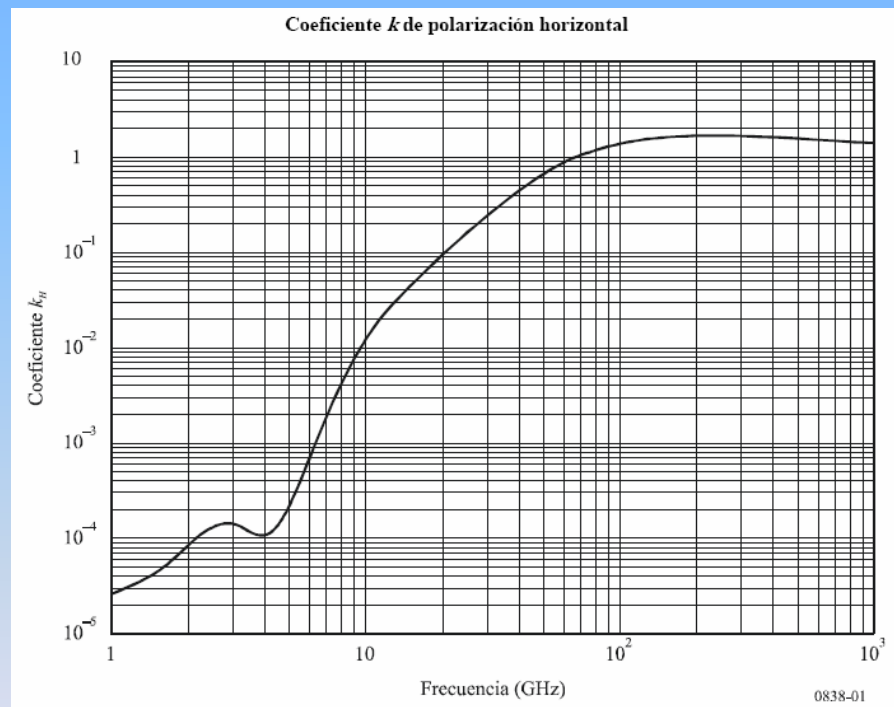
j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Coefficientes para α_V

j	a_j	b_j	c_j	m_α	c_α
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ LLUVIA: Atenuación específica ($\gamma = kR^\alpha$, dB/km)



Frecuencia (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
86	1,2398	0,7006	1,2376	0,6929
87	1,2504	0,6990	1,2484	0,6915
88	1,2607	0,6974	1,2590	0,6902
89	1,2708	0,6959	1,2694	0,6889
90	1,2807	0,6944	1,2795	0,6876
91	1,2903	0,6929	1,2893	0,6864
92	1,2997	0,6915	1,2989	0,6852
93	1,3089	0,6901	1,3083	0,6840
94	1,3179	0,6888	1,3175	0,6828
95	1,3266	0,6875	1,3265	0,6817
96	1,3351	0,6862	1,3352	0,6806
97	1,3434	0,6850	1,3437	0,6796
98	1,3515	0,6838	1,3520	0,6785
99	1,3594	0,6826	1,3601	0,6775
100	1,3671	0,6815	1,3680	0,6765

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

- LLUVIA: Desvanecimiento (F_{lluvia}^p dB)

$$F_{\text{lluvia}}^p = F_0 = \gamma \cdot L_{\text{ef}} \text{ (dB)}$$



la lluvia provoca un desvanecimiento mayor que F_0 en un $p\%$ del tiempo



$$P(F > F_0) = p$$

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ LLUVIA: Desvanecimiento (F_{lluvia}^p dB)

- PASO 1: Cálculo de $F_{lluvia}^{0,01}$:

$$L_{ef} = \frac{d}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad d_0 = 35 \cdot \exp(-0,015R_{0,01})$$

para $R_{0,01} \leq 100$ mm/h

- PASO 2: Corrección en porcentaje de tiempo para $p = [0,001-1]\%$:

- Para latitudes inferiores a 30° Norte o Sur

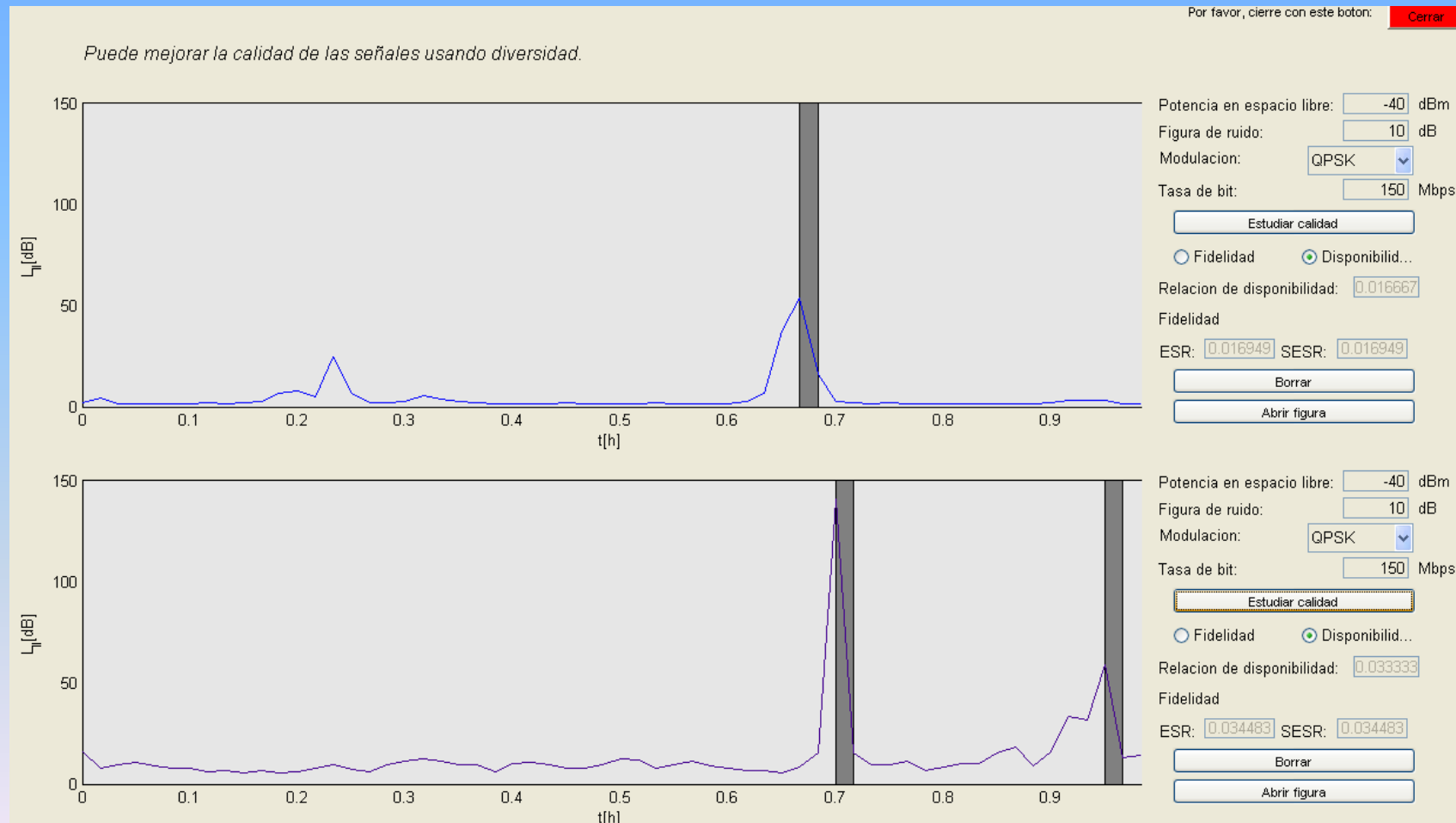
$$F_{lluvia}^p = F_{lluvia}^{0,01} \cdot 0,07 \cdot p^{-(0,855+0,139 \log p)}$$

- Para latitudes superiores a 30° Norte o Sur

$$F_{lluvia}^p = F_{lluvia}^{0,01} \cdot 0,12 \cdot p^{-(0,546+0,043 \log p)}$$

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ LLUVIA: Disponibilidad



2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

- LLUVIA: Disponibilidad

$$P(F > MD) = P(F > F_{lluvia}^p) = p$$

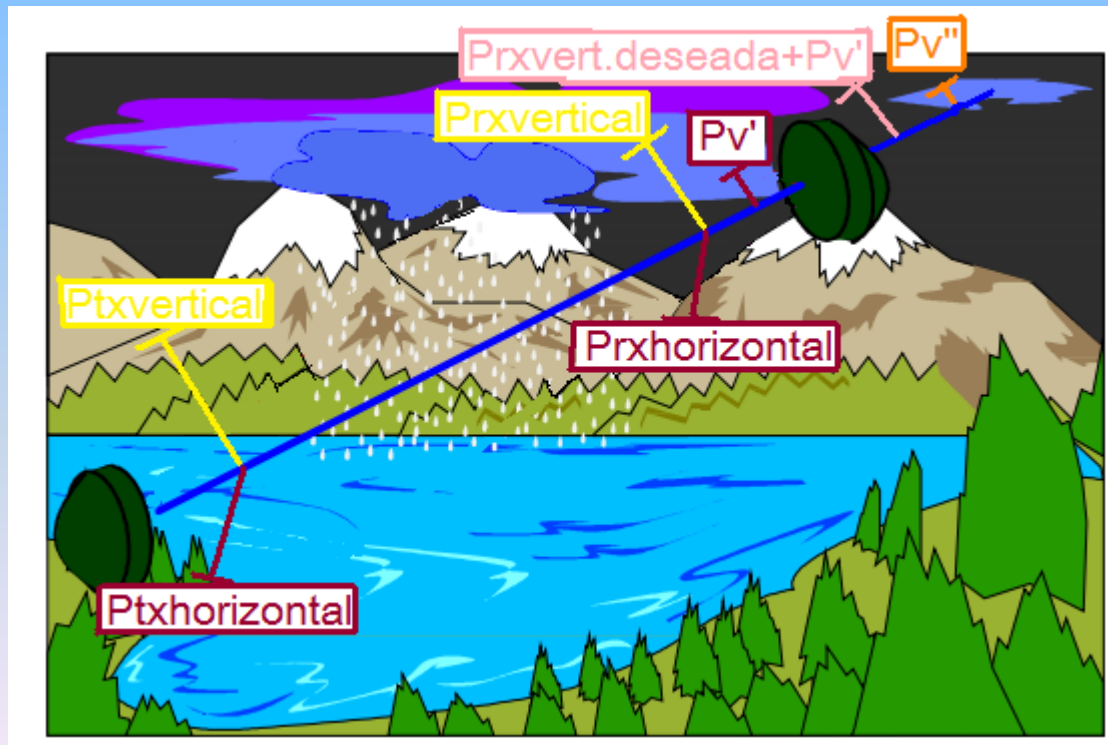


El sistema no está disponible el p% del tiempo por causa de la lluvia

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

□ LLUVIA: Despolarización

$$XPD = \frac{\text{pot con polarización deseada}}{\text{pot parásita debida a la lluvia con polarización ortogonal}}$$



$$XPD = U - V \log(F_{lluvia}^P)$$

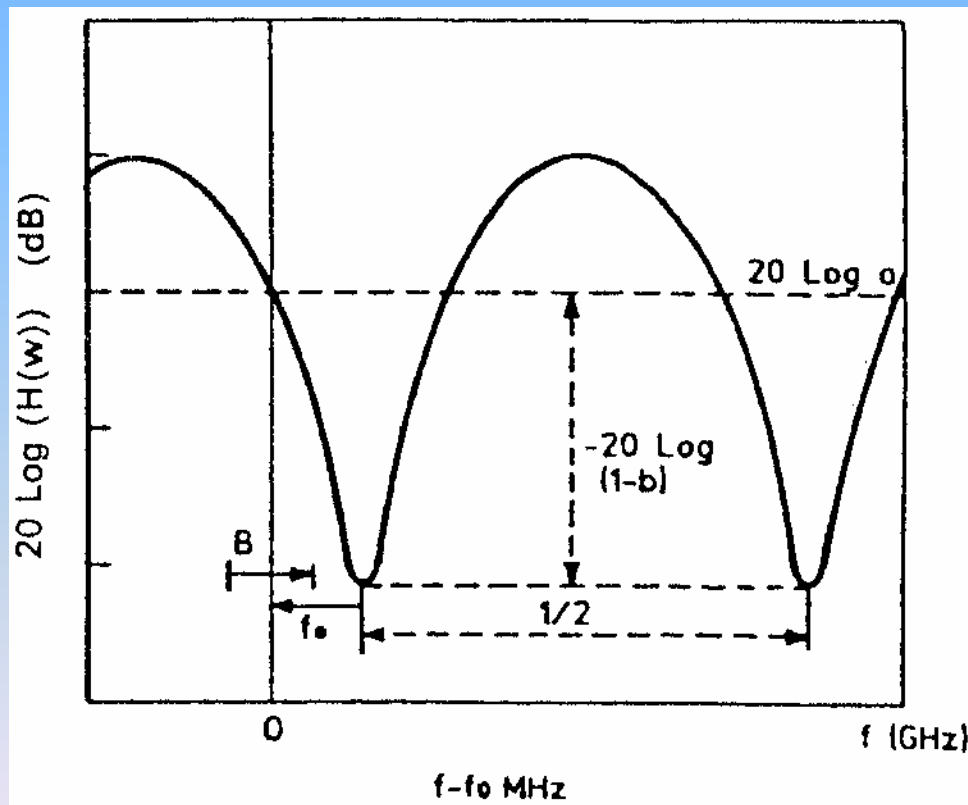
F_{lluvia}^P para la polarización deseada

$$U = 15 + 30 \log(f)$$

$$V = \begin{cases} 12,8 f^{0,19} & 8 < f \leq 20 \text{ GHz} \\ 22,6 & 20 < f \leq 35 \text{ GHz} \end{cases}$$

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

REFLEXIÓN EN EL SUELO



$$e = e_0(1 - Re^{j\phi})$$

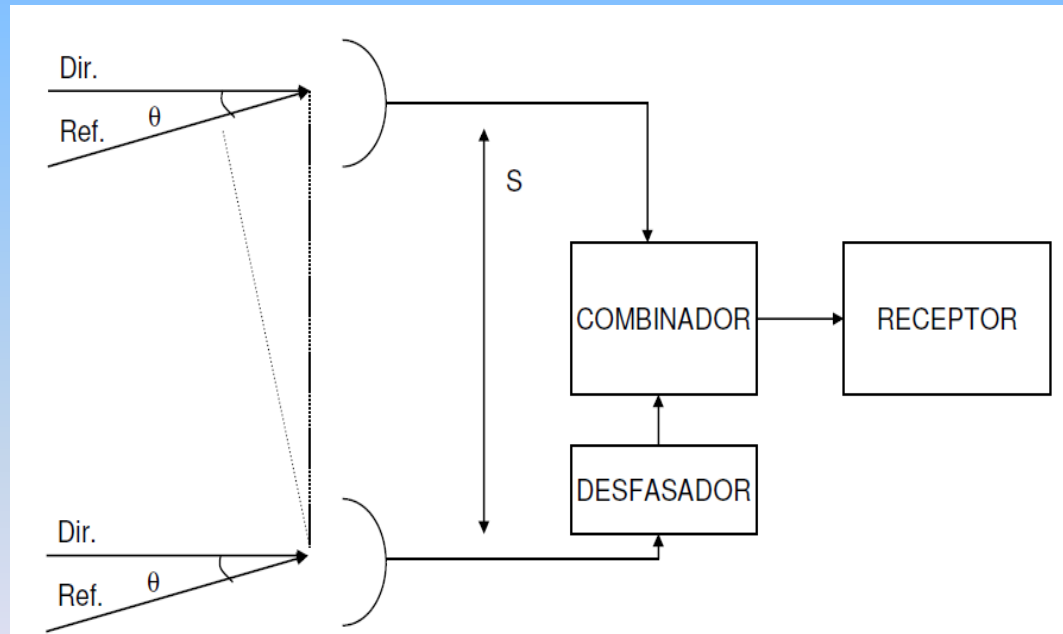
$$F = \frac{e_0^2}{e^2} = \frac{1}{1 + |R|^2 + 2|R|\cos(\beta + \omega\tau)}$$

$$F_{mx} \rightarrow \beta + \omega\tau = (2n + 1)\pi$$

2.2. Variabilidad temporal pto-ptto

REFLEXIÓN EN EL SUELO:

Sistema antireflectante



$$s = \frac{\lambda}{2\text{sen}\theta}$$

3.1. Condiciones normales pto-zona

□ TRAYECTOS MIXTOS



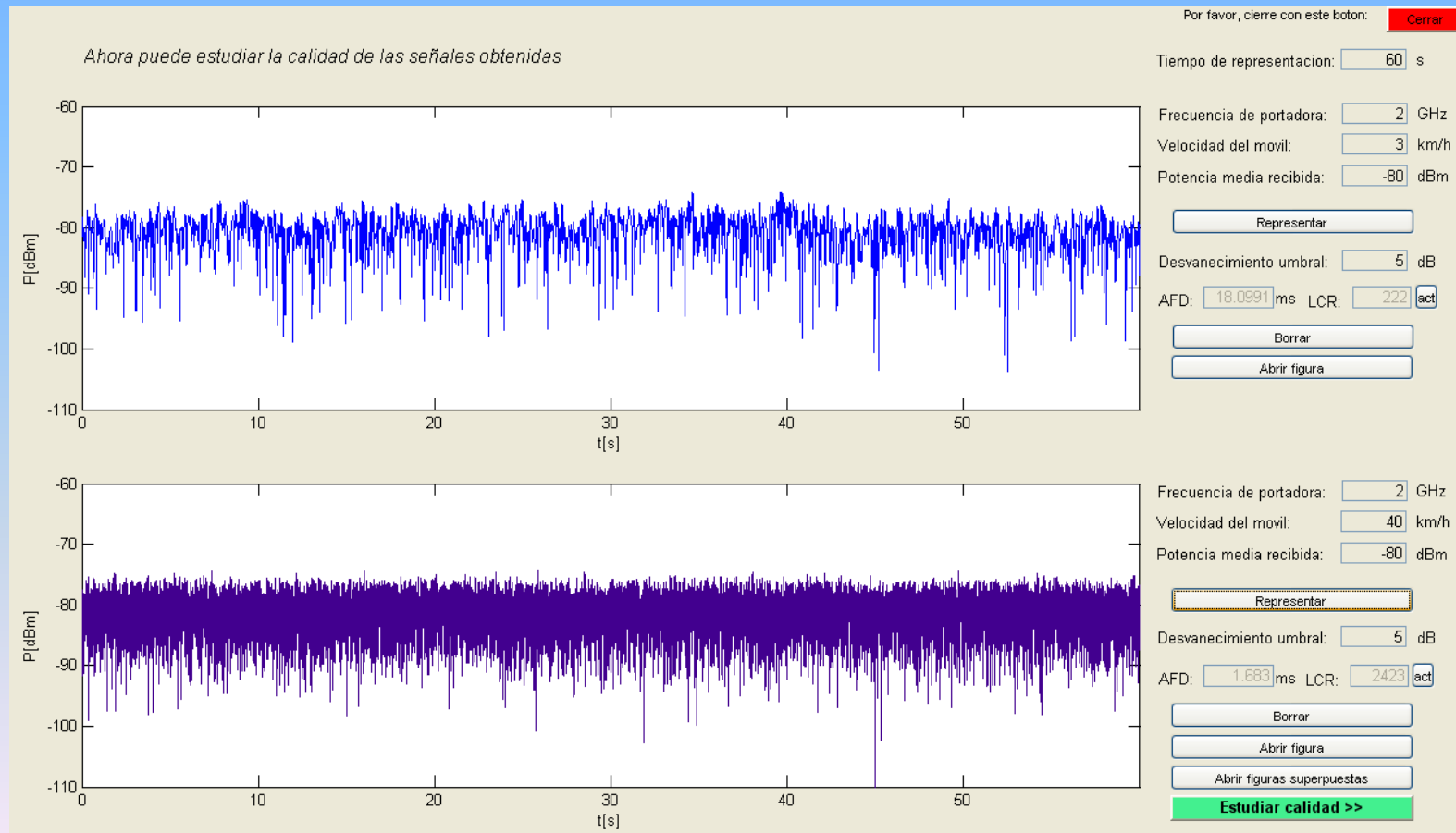
$$I_b = kd^n$$

Cumplir continuidad en los puntos de discontinuidad

Situación	Exponente de pérdidas en el trayecto, n
Espacio Libre	2
Celda Urbana	2.7 a 3.5
Celda Urbana con sombra	3 a 5

3.2. Variabilidad temporal pto-zona

□ CAUSAS Y CARACTERÍSTICAS

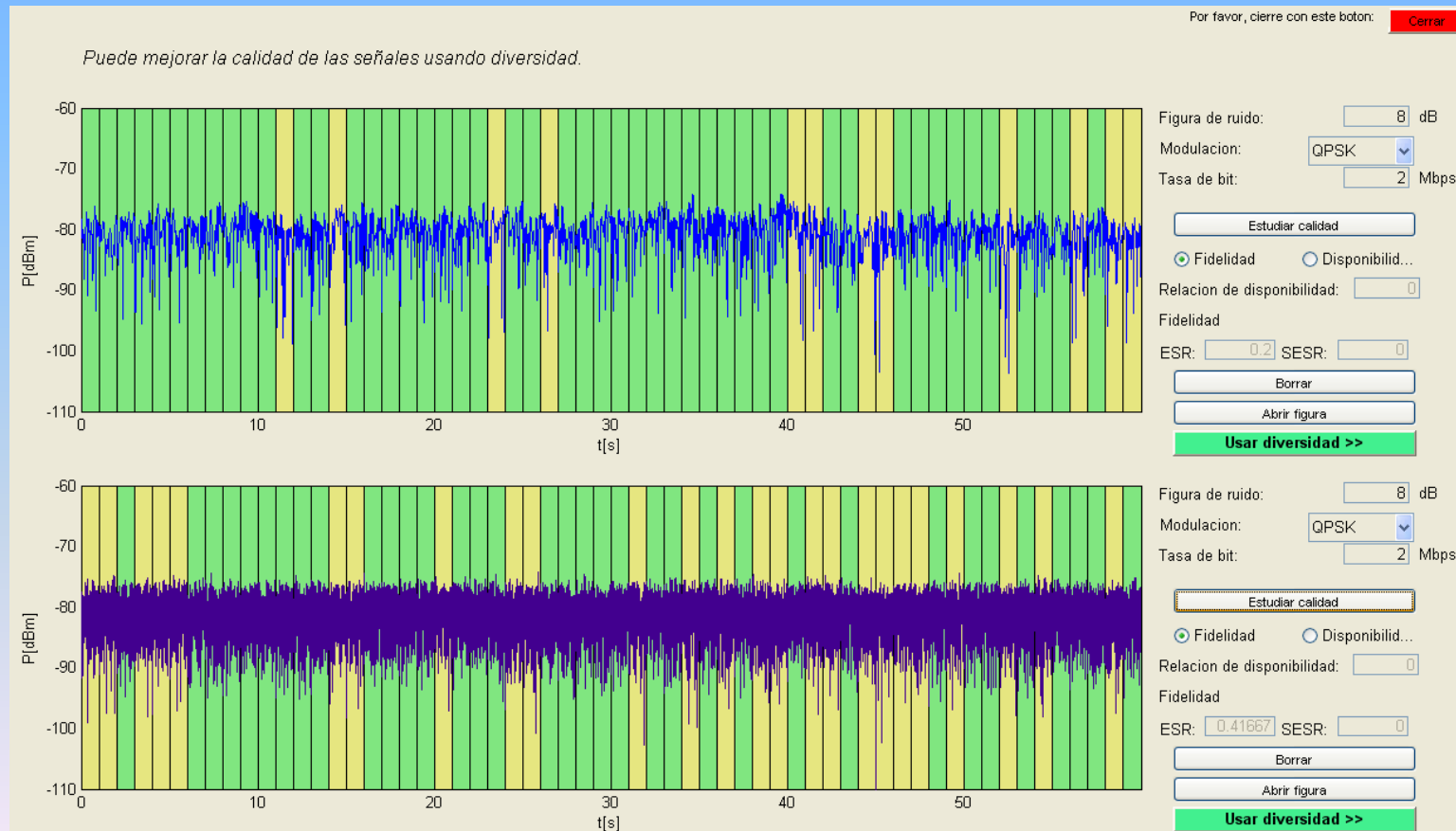


3.2. Variabilidad temporal pto-zona

- ❑ CAUSAS Y CARACTERÍSTICAS
 - ❑ Multitrayecto
 - ❑ Muy Profundos
 - ❑ Duración menor de 10 seg → **Desvanecimiento rápido**
 - ❑ Selectivo (no es igual para todas las frecuencias RF)
 - ❑ Afecta a la calidad de fidelidad

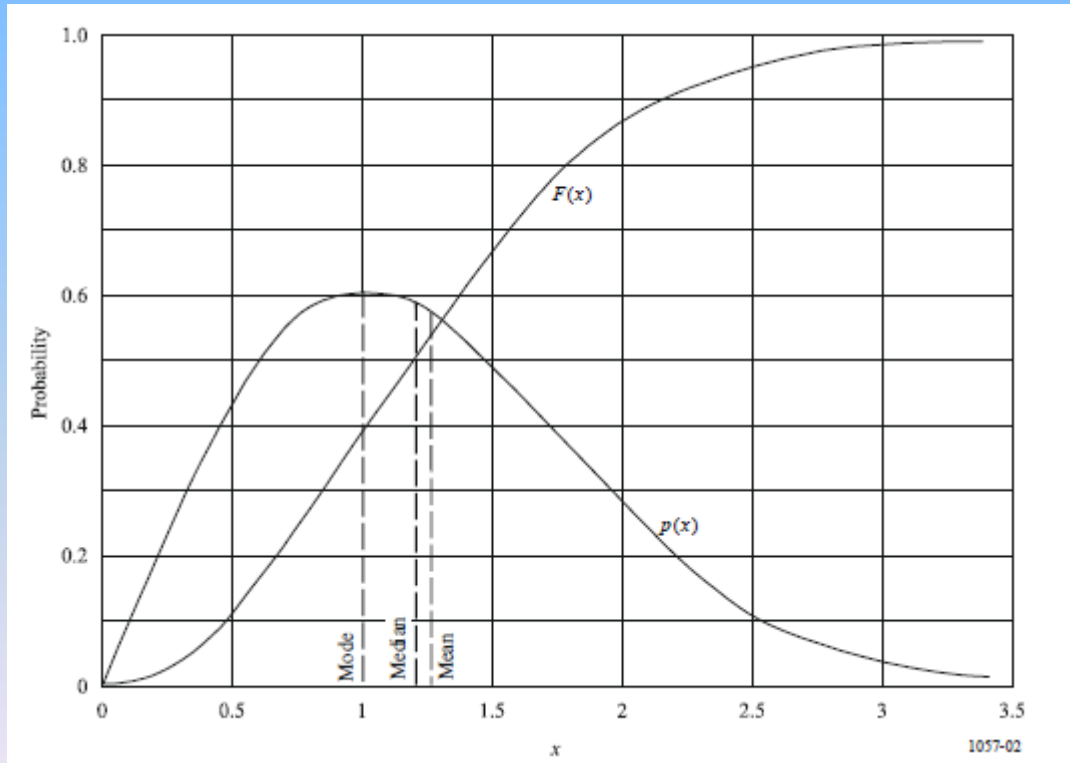
3.2. Variabilidad temporal pto-zona

□ CAUSAS Y CARACTERÍSTICAS



3.2. Variabilidad temporal pto-zona

□ MODELO TEÓRICO: PDF Rayleigh



$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{E[x^2]}\right)$$

$$F(x) = 1 - 0,693 \exp\left(-\left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^2\right)$$

3.2. Variabilidad temporal pto-zona

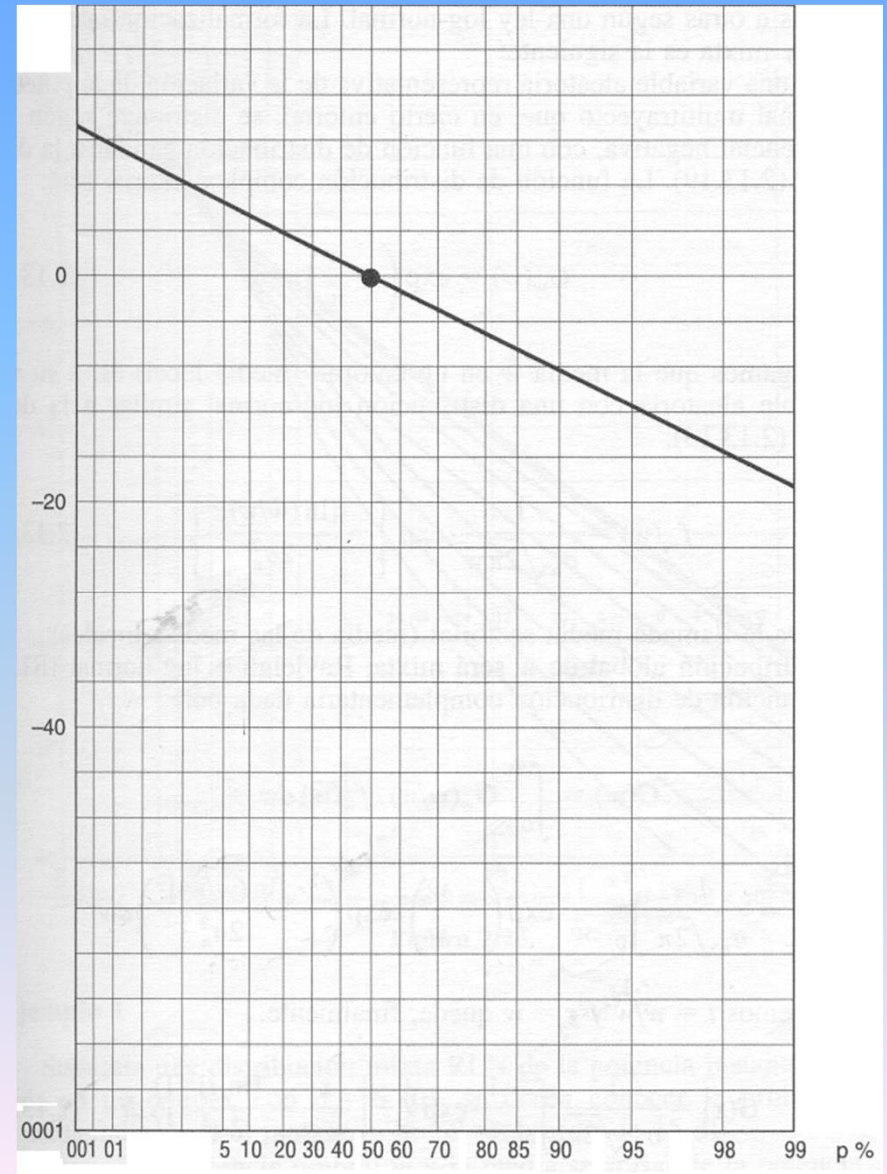
□ MODELO TEÓRICO: PDF Rayleigh

- x sólo modela e_{rx} (unidades naturales)
- $\bar{X} \neq \tilde{X}$
- La potencia recibida unidades naturales \rightarrow
PDF exponencial negativa

3.2. Variabilidad temporal pto-zona

□ MODELO TEÓRICO:
PDF Rayleigh

$$G(E_0 - \tilde{E}) = G(P_0 - \tilde{P})$$



3.2. Variabilidad espacial pto-zona

□ CAUSAS Y CARACTERÍSTICAS:
Desvanecimiento lento

□ MODELO TEÓRICO: PDF gaussiana

- σ representa la variabilidad del terreno o la variabilidad del movimiento

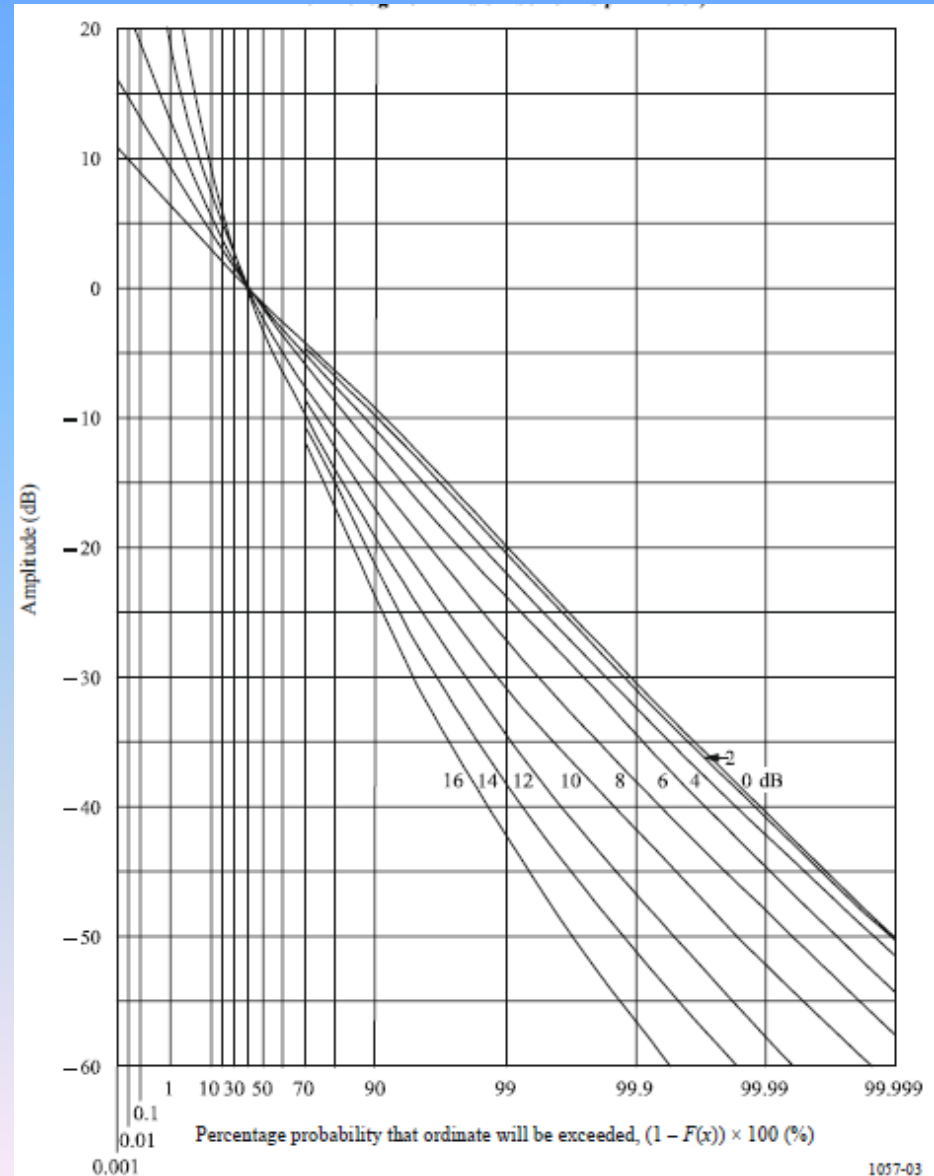
3.2. Variabilidad total pto-zona

□ CAUSAS Y CARACTERÍSTICAS:

- Desvanecimiento rápido cuya media sigue una variación lenta

□ MODELO TEÓRICO:

- PDF RLN
- $\sigma = 0$ no hay variabilidad espacial sólo queda la temporal



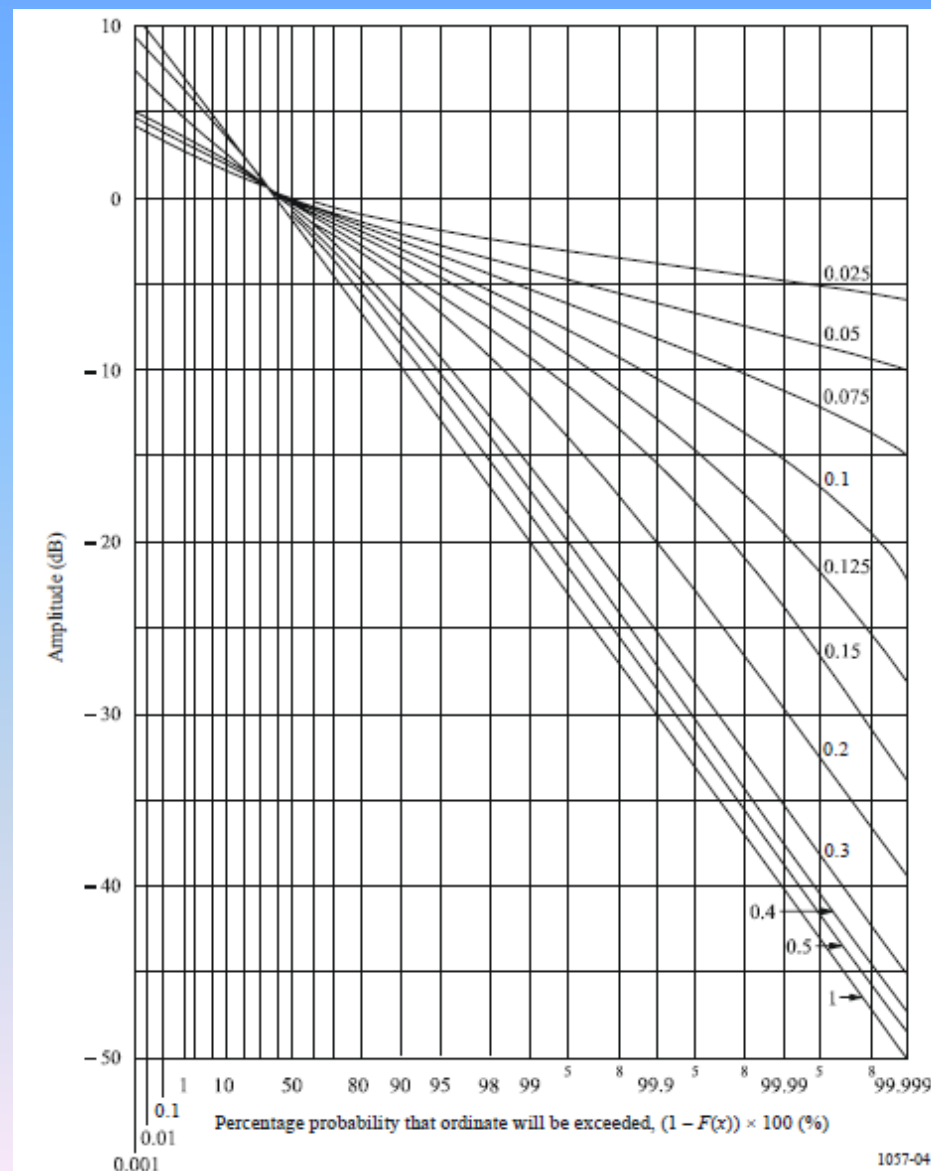
4. CALIDAD DEL SERVICIO

□ PDF Nakagami-Rice:

- En un servicio hay variación temporal que no es sólo rápida ni sólo lenta.

$$c^2 + 2b = 1 = \left(\frac{x}{\bar{x}}\right)$$

- Si c^2 (variación lenta) es próximo a uno tendemos a PDF gaussiana
- Si $2b$ (variación rápida) es próximo a uno tendemos a PDF Rayleigh



4. CALIDAD DEL SERVICIO

□ CALIDAD DE DISPONIBILIDAD:

- porcentaje de tiempo en el que el sistema está disponible
- Causad de indisponibilidad → la lluvia
- Indisponibilidad $U = P (F > MD) \rightarrow MD = F^u_{\text{lluvia}}$

4. CALIDAD DEL SERVICIO

□ CALIDAD DE FIDELIDAD:

- porcentaje de tiempo en el que el sistema recibe una señal igual a la transmitida
- Si se recibe señal es porque el servicio está disponible.
- Causad de infidelidad → multitrayecto
- Infidelidad =
= Prob disponibilidad * P (F > MD) debido al mutitrayecto=

$$= P_0 \cdot 10^{(-MD/10)}$$

4. CALIDAD DEL SERVICIO

□ CALIDAD DE FIDELIDAD: P_0

■ Método Mojoli

$$P_0 = 0,3 \cdot a \cdot b \cdot \left(\frac{f}{4}\right) \cdot \left(\frac{d}{50}\right)^3$$

■ Método UIT-R P-530 simplificado

$$P(F) = K \cdot d^3 \cdot (1 + |\varepsilon_p|)^{-1/2} \cdot 10^{[0,033f - 0,001h_L - F/10]} (\%)$$

4. CALIDAD DEL SERVICIO

□ MES MÁS DESFAVORABLE

*“Mes con valor mayor de
FTRMD en 12 meses civiles
consecutivos”*

$$FTRMD = f(FTRAM)$$

4. CALIDAD DEL SERVICIO

□ MES MÁS DESFAVORABLE:

$$\text{FRTMD} = Q * \text{FTRAM} \rightarrow p_w = Q * p$$

$$Q(p) = 12$$

$$p < \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{1/\beta}$$

$$Q(p) = Q_1 \cdot 3^{-\beta}$$

$$30 < p < 30\%$$

$$Q(p) = Q_1 \cdot p^{-\beta}$$

$$\left(\frac{Q_1}{12}\right)^{1/\beta} < p < 3\%$$

$$Q(p) = Q_1 \cdot \left(\frac{p}{30}\right)^{\frac{\log(Q_1 \cdot 3^{-\beta})}{\log 0,3}}$$

$$30 < p\%$$

VALORES DE β ; Q_1

Región	Lluvia		Multitrayecto	Trayectos transhorizonte	
	Trayecto terrenal	Trayecto oblicuo		Tierra	Mar
Mundial	0,13; 2,85	0,13; 2,85	0,13; 2,85	0,13; 2,85	0,13; 2,85
Noroeste Europa	0,13; 3,00	0,10; 3,10	0,13; 4,00	0,18; 3,30	0,11; 5,00
Europa mediterránea	0,14; 2,60	0,16; 3,10			

4. CALIDAD DEL SERVICIO

□ MES MÁS DESFAVORABLE:

$$\text{FRTMD} = Q * \text{FTRAM} \rightarrow p_w = Q * p$$

$$Q(p) = 12$$

$$p < \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{1/\beta}$$

$$Q(p) = Q_1 \cdot 3^{-\beta}$$

$$30 < p < 30\%$$

$$Q(p) = Q_1 \cdot p^{-\beta}$$

$$\left(\frac{Q_1}{12}\right)^{1/\beta} < p < 3\%$$

$$Q(p) = Q_1 \cdot \left(\frac{p}{30}\right)^{\frac{\log(Q_1 \cdot 3^{-\beta})}{\log 0,3}}$$

$$30 < p\%$$

VALORES DE β ; Q_1

Región	Lluvia		Multitrayecto	Trayectos transhorizonte	
	Trayecto terrenal	Trayecto oblicuo		Tierra	Mar
Mundial	0,13; 2,85	0,13; 2,85	0,13; 2,85	0,13; 2,85	0,13; 2,85
Noroeste Europa	0,13; 3,00	0,10; 3,10	0,13; 4,00	0,18; 3,30	0,11; 5,00
Europa mediterránea	0,14; 2,60	0,16; 3,10			

4. UIT-R P.1546

□ Curvas de propagación para:

- $30 < f < 3000$ MHz
- $1 < d < 1000$ km

□ Normalización para:

- $f = 100, 600$ y 2000 MHz
- $PRA = 1$ kW
- $h_1 = [10; 20; 37,5; \dots; 1200]$
- $h_2 = h_R = [10 \text{ ó } 20 \text{ ó } 30]$
- $p = 1, 10$ y 50%
- 50% ubicaciones
- Trayectos terrestres, mar frío y mar cálido

4. UIT-R P.1546

□ Altura antenna transmisora, h_1

- $d < 3$ km

$$h_1 = h_a \quad \text{altura de la antenna}$$

- $3 < d < 15$ km

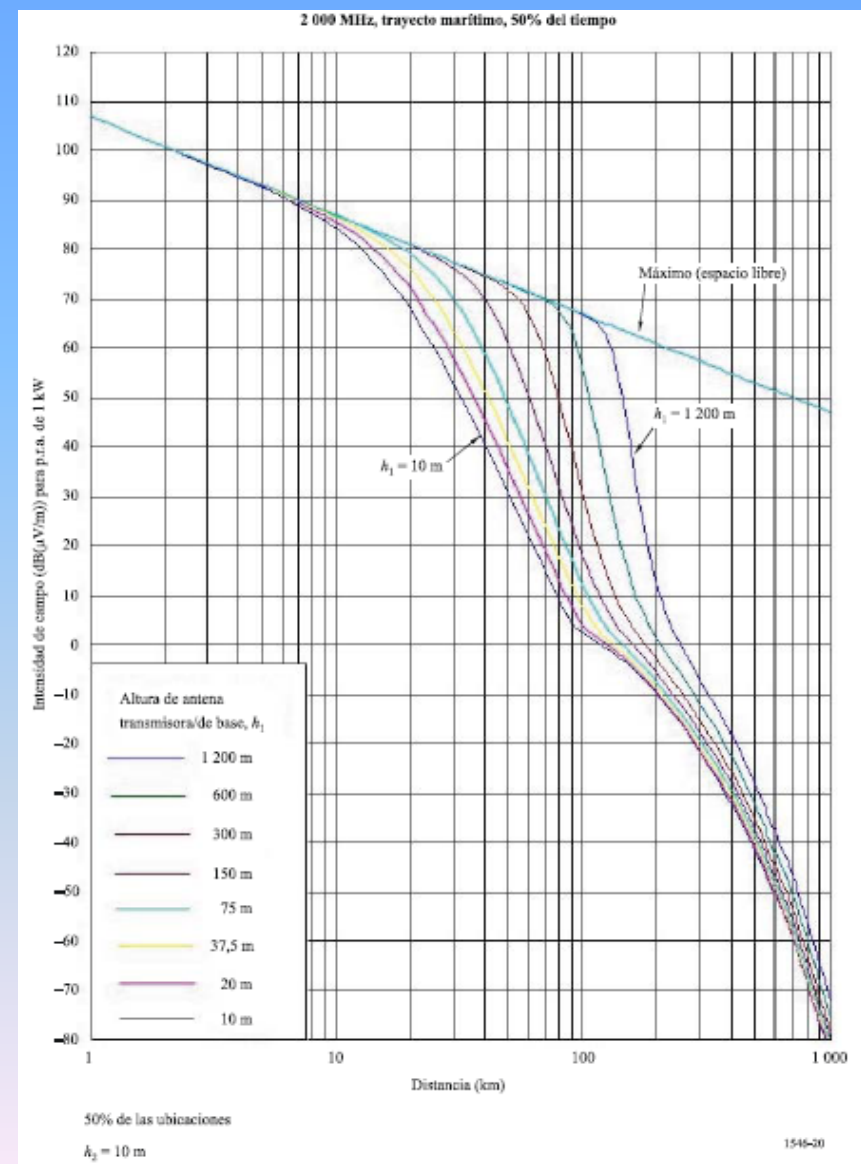
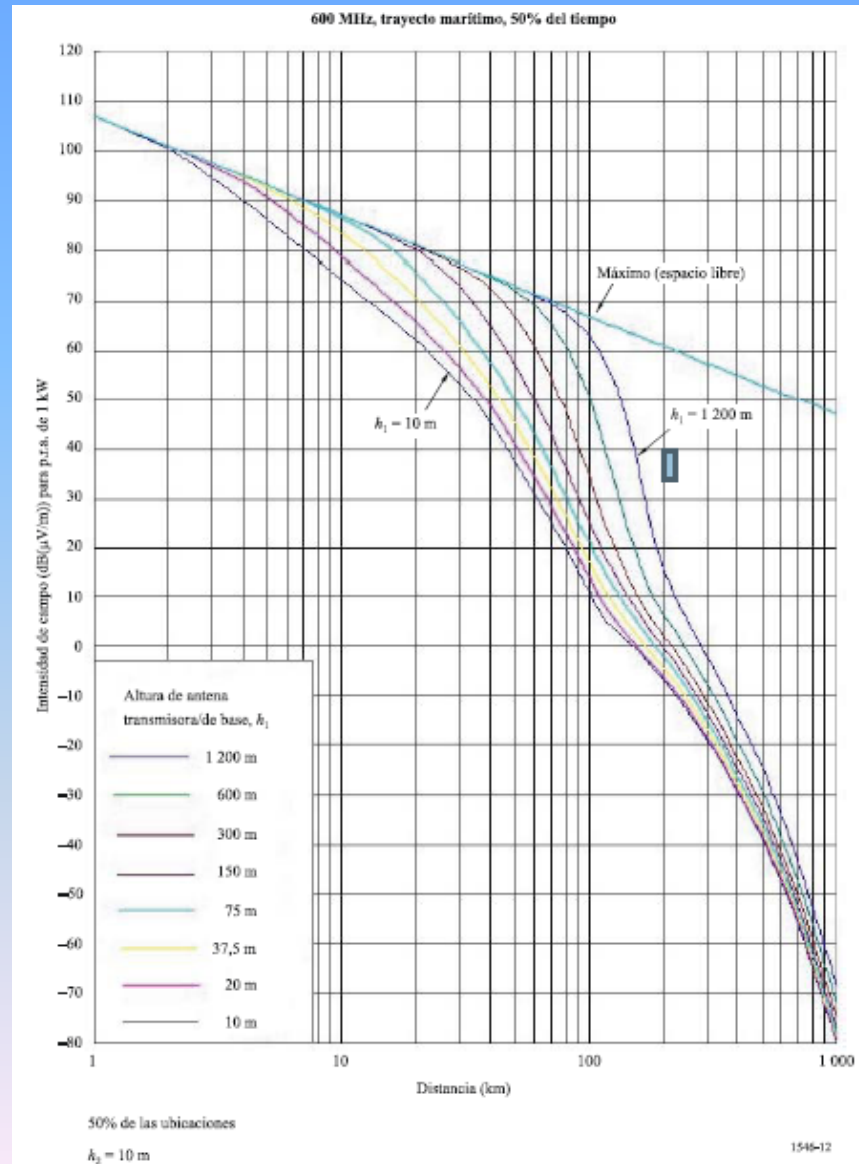
$$h_1 = h_a + (h_{ef} - h_a) \frac{(d-3)}{12}$$

- $d > 15$ km

$$h_1 = h_{ef} = h_a + \text{cota} - h_m$$

- Donde h_m es la altura media del terreno en los primeros 15 km

4. UIT-R P.1546



4. UIT-R P.1546

□ Paso a paso

- Determinar tipo de trayecto (trayecto mixto)
- Interpolar en porcentaje de tiempo
- Interpolar en frecuencia
- Corregir en potencia
- Corregir por la altura transmisora
- Corregir por la altura receptora
- Corregir en porcentaje de ubicaciones
- Añadir efecto de falta de despejamiento en el receptor
- Añadir efecto de trayecto urbano/semiurbano

5. TÉCNICAS DE DIVERSIDAD

□ DEFINICIÓN

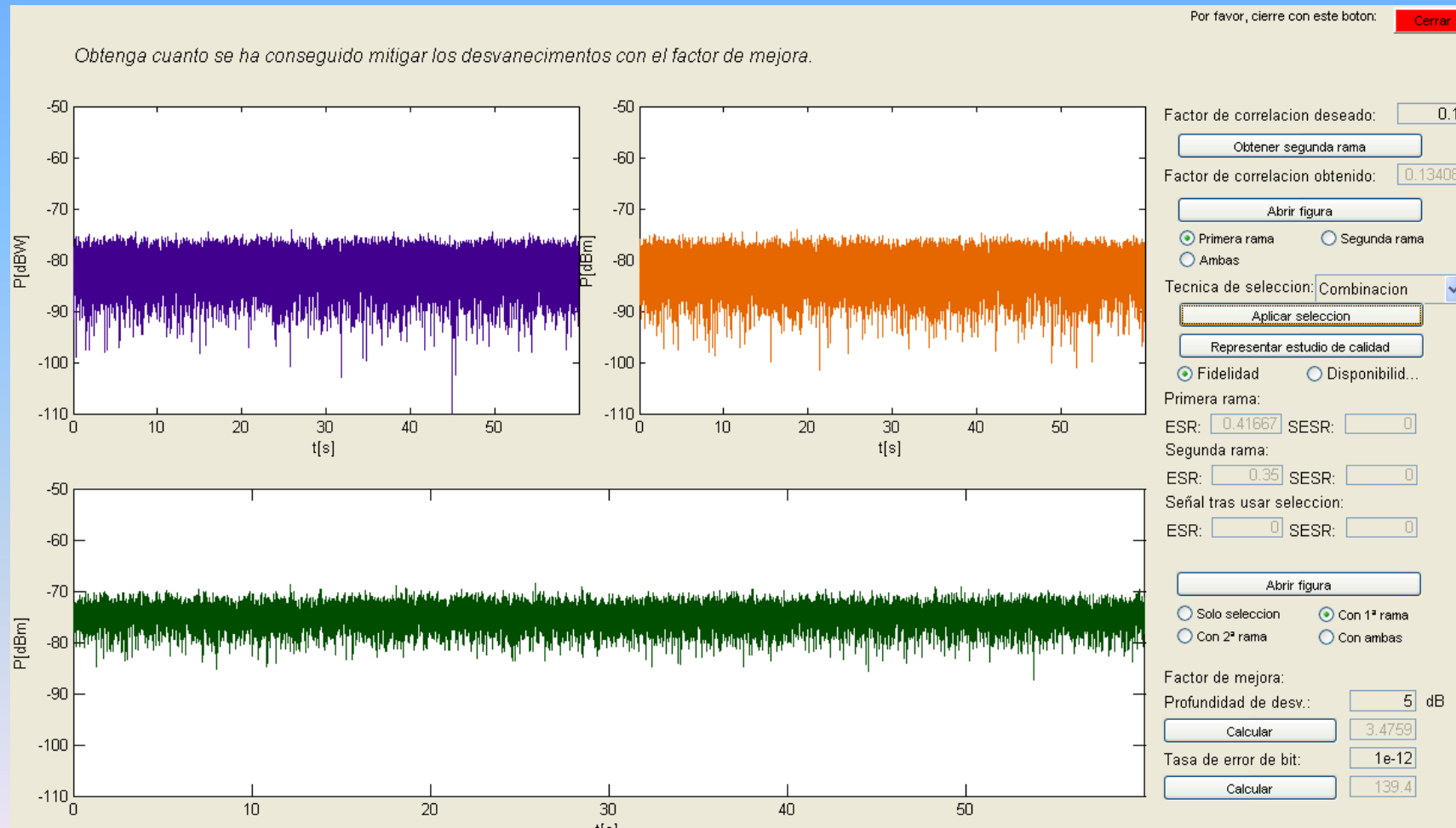
- Enviar la información por caminos radioeléctricos distintos
- Reduce el efecto de los desvanecimientos rápidos

- Mejora por diversidad

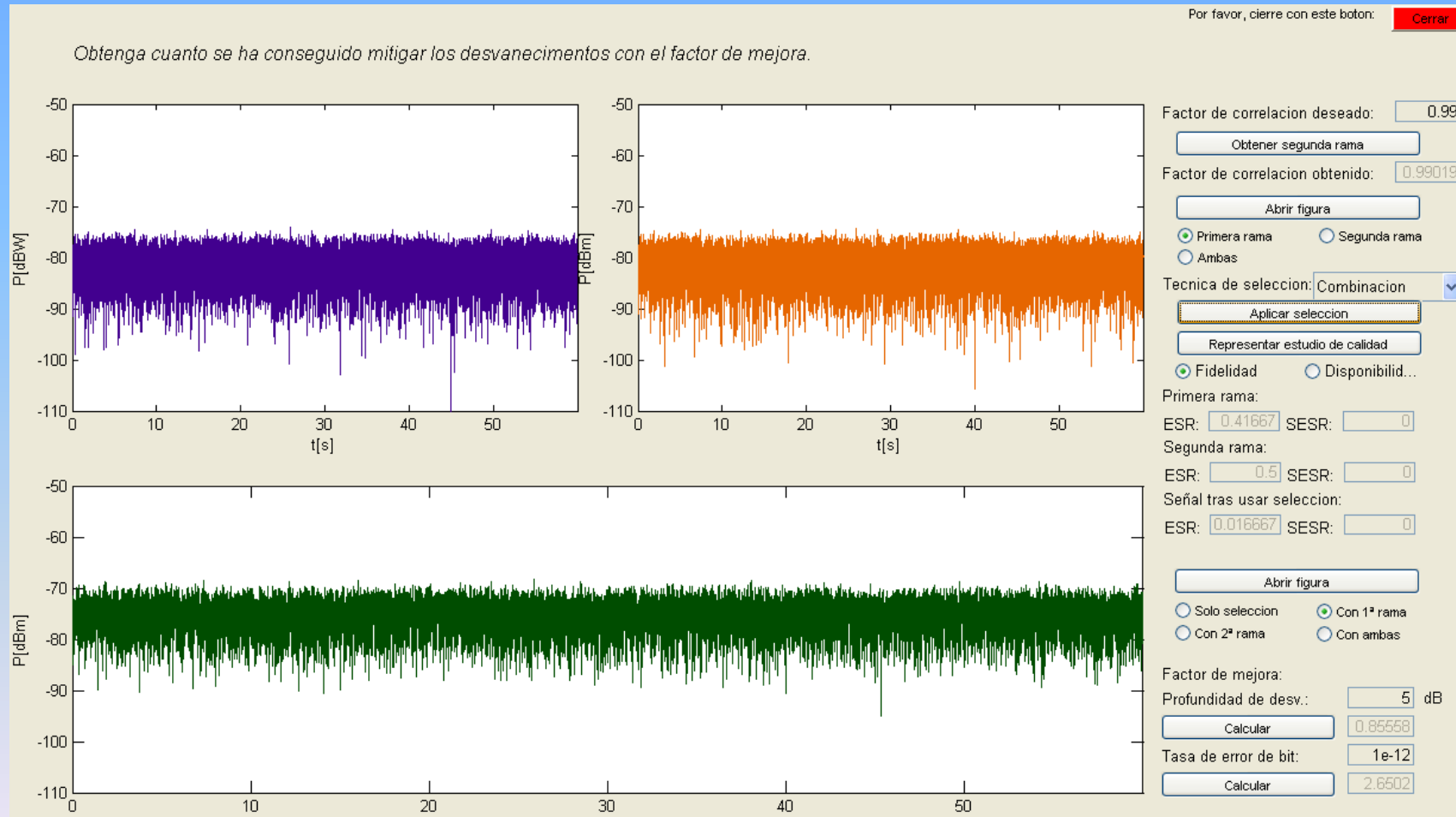
$$I = \frac{P(F > MD)}{P_D(F > MD)}$$

- Depende de la correlación entre los caminos

5. TÉCNICAS DE DIVERSIDAD



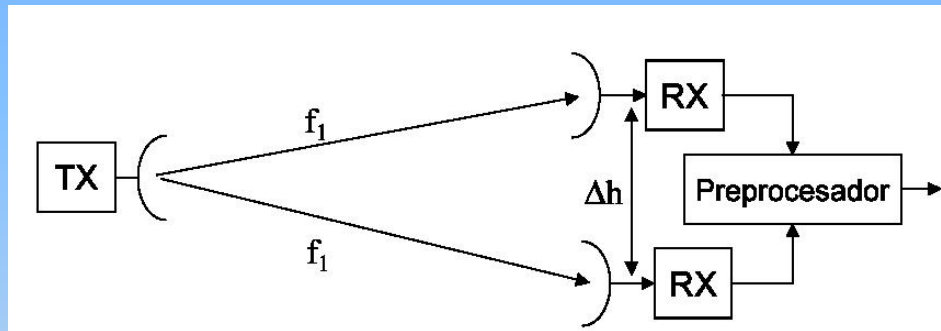
5. TÉCNICAS DE DIVERSIDAD



5. TÉCNICAS DE DIVERSIDAD

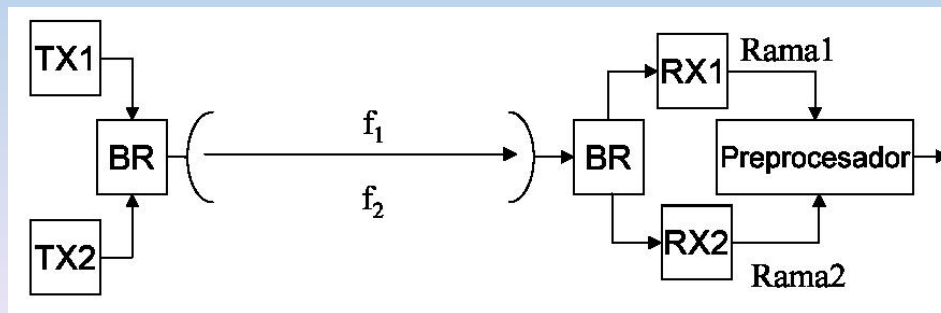
□ Tipos

Diversidad espacial



$$I = [1 - \exp(-0,04 \cdot s^{0,87} \cdot f^{-0,12} \cdot d^{0,48} \cdot P_0^{-1,04})] \cdot 10^{(F-V)/10}$$

Diversidad en frecuencia



$$I = \frac{80}{f \cdot d} \left(\frac{\Delta f}{f} \right) \cdot 10^{F/10}$$

5. TÉCNICAS DE DIVERSIDAD

□ Técnicas de selección

- Selección por conmutación → en cada instante la mejor SNR
- Selección por combinación lineal →
 - Suma en **unidades de campo** de las **señales deseadas**
 - Suma en **unidades de potencia** de las **señales ruidosas**
- Selección por combinación por relación máxima → suma ponderada