



UNIDAD N°: 1

RADIOPROPAGACIÓN

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



OBJETIVOS

- Caracterizar la influencia de la troposfera

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



- Para frecuencias $f > 30\text{MHz}$ deja de ser válida la propagación por O.S. Las comunicaciones se producen a través de capas bajas de la atmósfera llamada troposfera, entre antenas situadas a varias λ sobre el suelo.
- Es importante conocer la trayectoria de propagación ya que los accidentes del terreno pueden obstaculizar el paso de la onda produciendo una atenuación importante.
- Los trayectos múltiples por reflexión en el suelo o en capas estratificadas, pueden producir un alcance mayor al previsto y posibilidad de crear interferencias.

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



- Las ondas que viajan por la troposfera experimentan una refracción a causa de la no uniformidad de las capas atmosféricas que se traduce en una trayectoria curvilínea de los rayos.
- Los gases y vapores atmosféricos, O_2 y H_2O , producen absorción y atenuación adicional para $f > 10\text{GHz}$. Lo mismo ocurre con la lluvia, niebla y nubes.
- La lluvia produce además una despolarización de la onda y un incremento de la temperatura de ruido del receptor.

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



- En la troposfera se produce también dispersión, por lo que se puede aprovechar para constituir enlaces radio pero se producen interferencias.
- El alcance es del orden de la visión óptica entre antenas. Más allá se pueden producir enlaces por difracción y más lejos enlaces por dispersión aunque apenas se utilizan.
- Los aspectos a analizar son: Refracción, Difracción, Dispersión

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

El índice de refracción **n** es función de:

- presión atmosférica **p**
- presión del vapor de agua **e**
- Temperatura absoluta **T**

El valor de **n** varía muy poco (millonésimas) por lo que se utiliza el coíndice de refracción o Refractividad **N**

$$N = (n-1) 10^6$$

La Recomendación 453 CCIR facilita:

$$N = \frac{77.6}{T} \left(p + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad p, e(\text{mb}) ; T (^{\circ} \text{K})$$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

- En condiciones normales $T= 290^{\circ}\text{K}$, $p= 1013\text{mb}$, $e= 10.2\text{mb}$
 $\Rightarrow N=316$; $n= 1,000316$.
- Las características de la atmósfera varían con la altura. La Recomendación 453 del CCIR define la atmósfera de referencia en la que el índice de refracción

$$\begin{aligned} n(h) &= 1 + 315 * 10^{-6} * e^{-0.136h} \\ N(h) &= 315 * e^{-0.136h} \end{aligned} \quad , \quad h(\text{km})$$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN

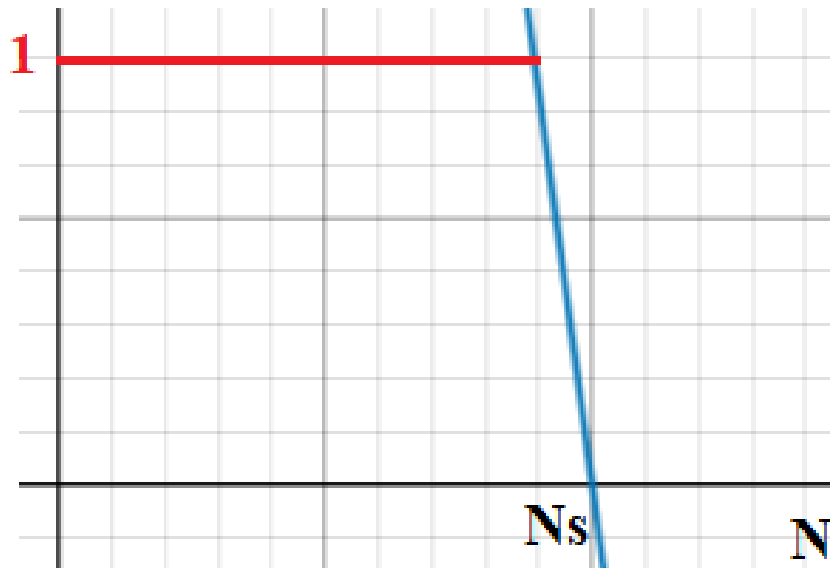


2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

Para alturas de hasta 1Km, se hace una aproximación lineal

$$N = N_s (1 - 0.136h); \quad 0 < h < 1 ; \quad N_s = \text{Coíndice en la superficie}$$

h(km)



Para tener datos de forma normalizada se trabaja con refractividad a nivel del mar (N_0)

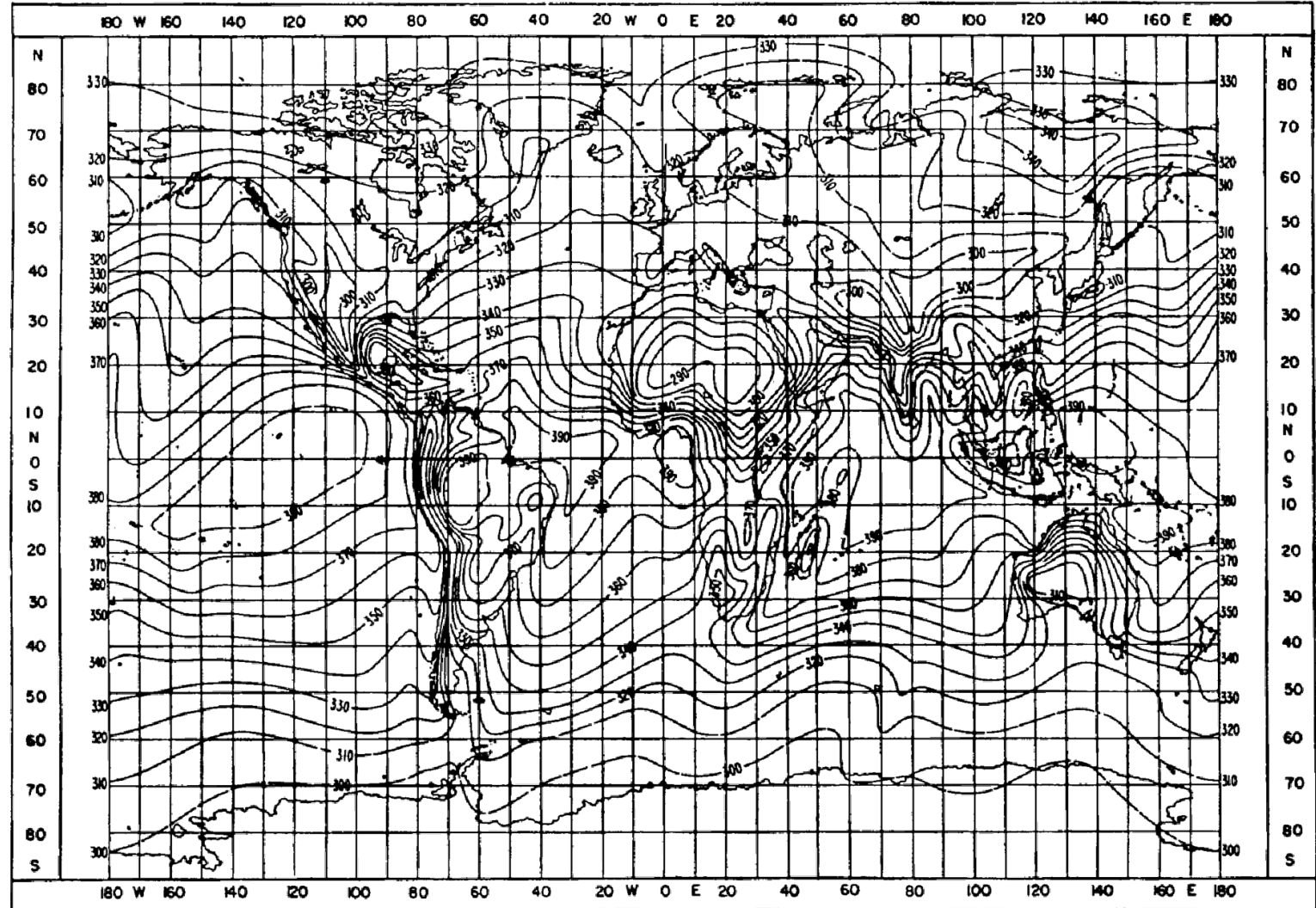
$$N_s = N_0 e^{-0.136h}$$

La Recomendación 453 CCIR proporciona N_0 para los meses del año.

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



La figura se muestra la gráfica para el mes de febrero.



2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

Ejemplo

Calcular la refractividad en la meseta castellana España ($h = 0.7\text{Km}$) para el mes de febrero.

De la figura CCIR 453 (febrero) $\Rightarrow N_o = 320$

$$N_s = N_o * e^{-0.136 * h_s} = 320 * e^{-0.136 * 0.7} = 290.94$$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

La ley de Snell dice:

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_r} = \frac{n(h+dh)}{n(h)}$$

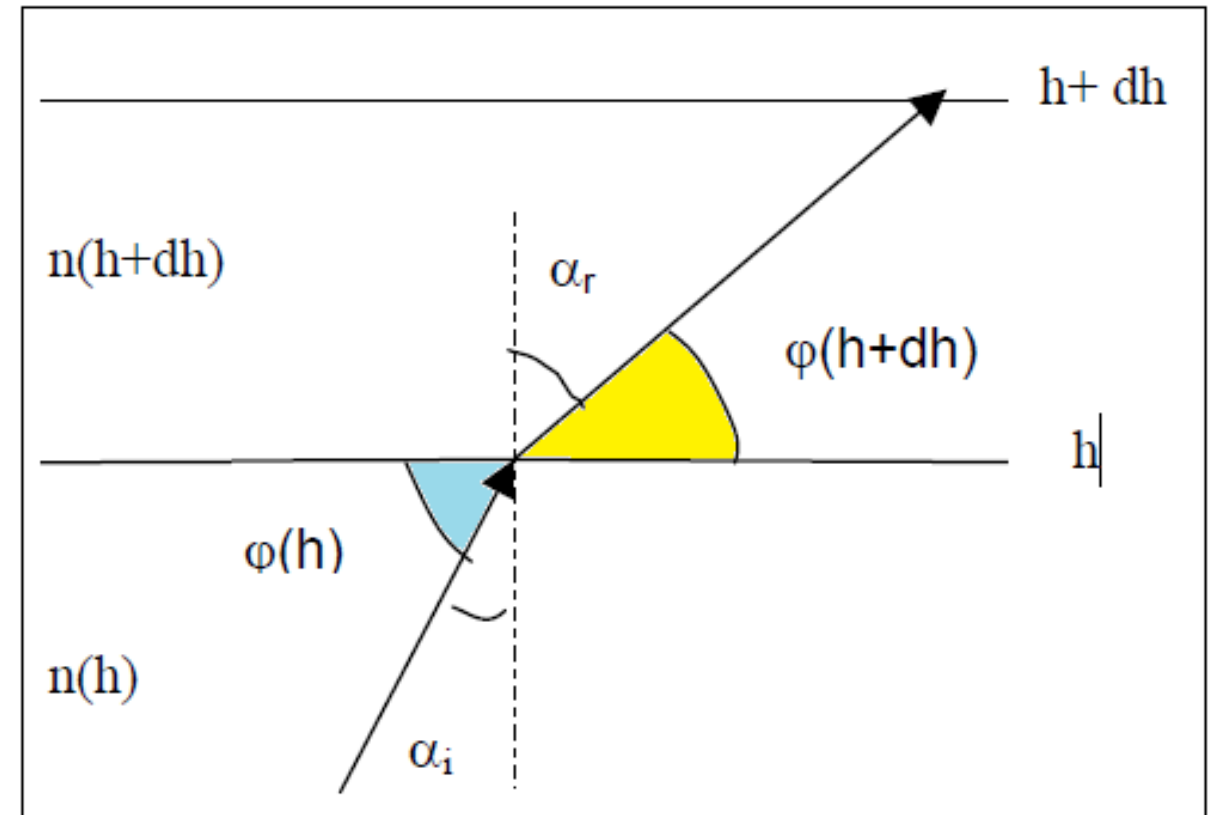
$$\varphi(h) + \alpha_i = 90^\circ \Rightarrow \alpha_i = 90^\circ - \varphi(h)$$

$$\sin(\alpha_i) = \sin(90^\circ - \varphi(h)) = \cos(\varphi(h))$$

$$n(h) \cdot \cos(\varphi(h)) = n(h+dh) \cdot \cos(\varphi(h+dh)) = \text{constante}$$

Derivando con respecto a la altura se obtiene:

$$\frac{dn(h)}{dh} \cdot \cos(\varphi(h)) - n(h) \cdot \sin(\varphi(h)) \cdot \frac{d\varphi(h)}{dh} = 0$$



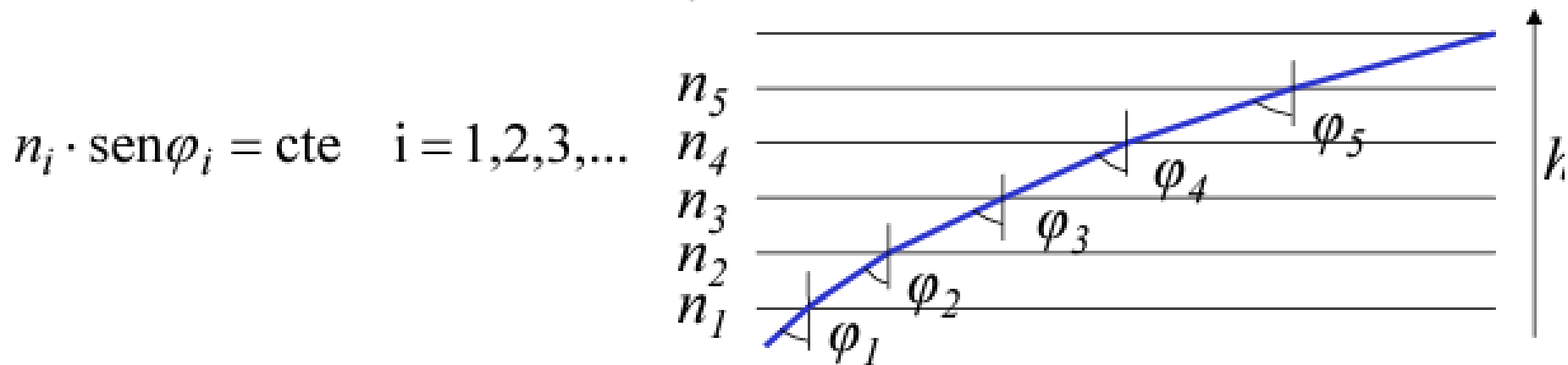
2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



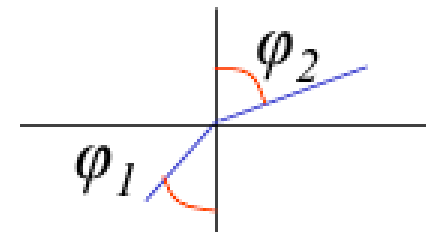
2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

Análisis de la trayectoria del rayo

La trayectoria es curvilínea debido a la disminución del índice de refracción con la altura. Por la ley de Snell,



$n_2 < n_1 \rightarrow \sin \varphi_2 > \sin \varphi_1 \rightarrow \text{el rayo se curva!}$



2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN

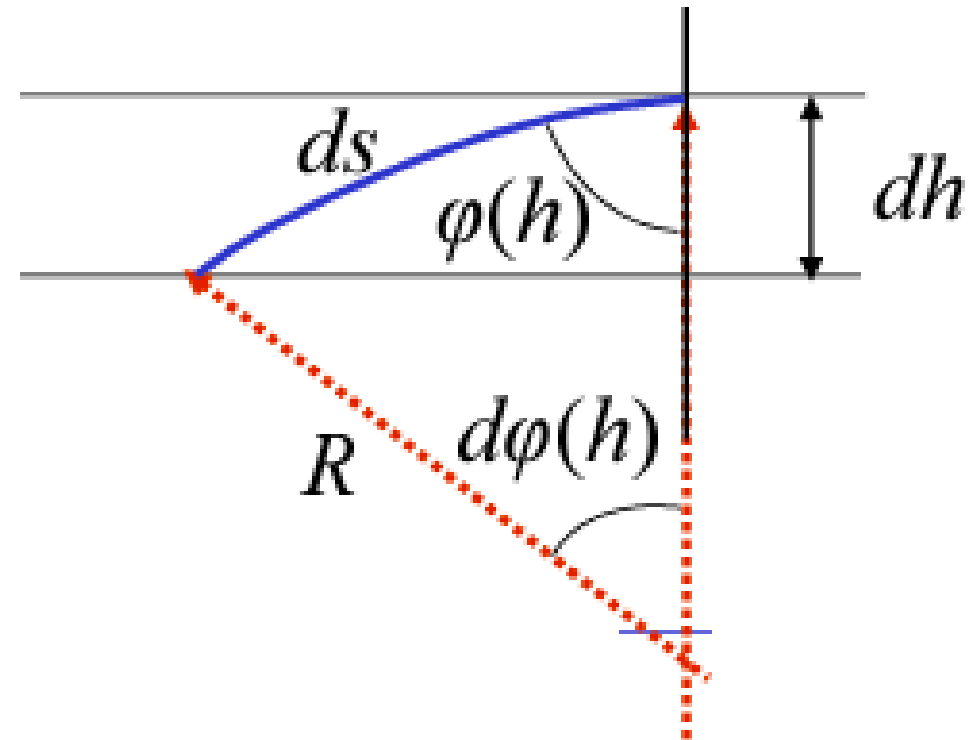


2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

Expresada en la variable continua **h** y tomando diferenciales,

$$n(h) \cdot \sin \varphi(h) = \text{cte}$$

Así $\left\{ \begin{array}{l} \cos(\varphi(h)) = dh / ds \\ ds = R d\varphi \rightarrow 1/R = d\varphi / ds \end{array} \right.$



2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

- Derivando la ley de Snell se obtiene

$$\frac{dn}{dh} \cdot \operatorname{sen} \varphi + n \cdot \cos \varphi \cdot \frac{d\varphi}{dh} = 0$$

- Y por otro lado, se puede escribir, utilizando $\cos \varphi = dh/ds$,

$$\cos \varphi \cdot \frac{d\varphi}{dh} = \frac{d\varphi}{ds}$$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

- Despejamos $d\varphi/ds$ para obtener la curvatura

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{R} = \frac{d\varphi}{ds} &= -\frac{1}{n} \cdot \operatorname{sen}\varphi \cdot \frac{dn}{dh} \Big|_{\varphi=90^\circ, n(h) \approx 1} \approx -\frac{dn}{dh} \\ -\frac{dn}{dh} &= -\frac{dN}{dh} \cdot 10^{-6} = 0.136 \cdot N_s \cdot 10^{-6} \end{aligned} \right\} \text{UN ARCO DE RADIO}$$

$$R = \frac{1}{0.136 \cdot N_s \cdot 10^{-6}}$$

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad N(h) = N_s(1 - 0.136 \cdot h), \quad h = 0$$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

Para incidencia casi rasante $\varphi(h) \approx 0$, $\cos(\varphi(h)) \approx 1$, $n(h) \approx 1$

$$\frac{dn(h)}{dh} = \frac{d\varphi(h)}{ds} = -\frac{1}{R} = -\rho$$

ρ es la curvatura del trayecto

R es el radio de curvatura del rayo $R = \frac{1}{\rho}$

El signo negativo indica que el rayo se incurva hacia la tierra (visto desde arriba es convexo)

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

$$N = (n-1) \cdot 10^6$$

$$\frac{dN}{dh} = \frac{dn}{dh} \cdot 10^6 \rightarrow \frac{dn}{dh} = 10^{-6} \frac{dN}{dh}$$

$$\Delta N = \frac{dN}{dh} = -10^6 \rho$$

$$\rho = -\Delta N \cdot 10^{-6}$$

$$N = N_s(1 - 0.136h) \text{ se deduce}$$

$$\Delta N = \frac{dN}{dh} = -N_s \cdot 0.136$$

$$\rho = 1.36 \cdot 10^{-7} \cdot N_s$$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.1 Índice de refracción. Curvatura de los rayos.

Para el ejemplo $N_s = 290,9$

$$\rho = 39.6 \cdot 10^{-6} \text{ km}$$

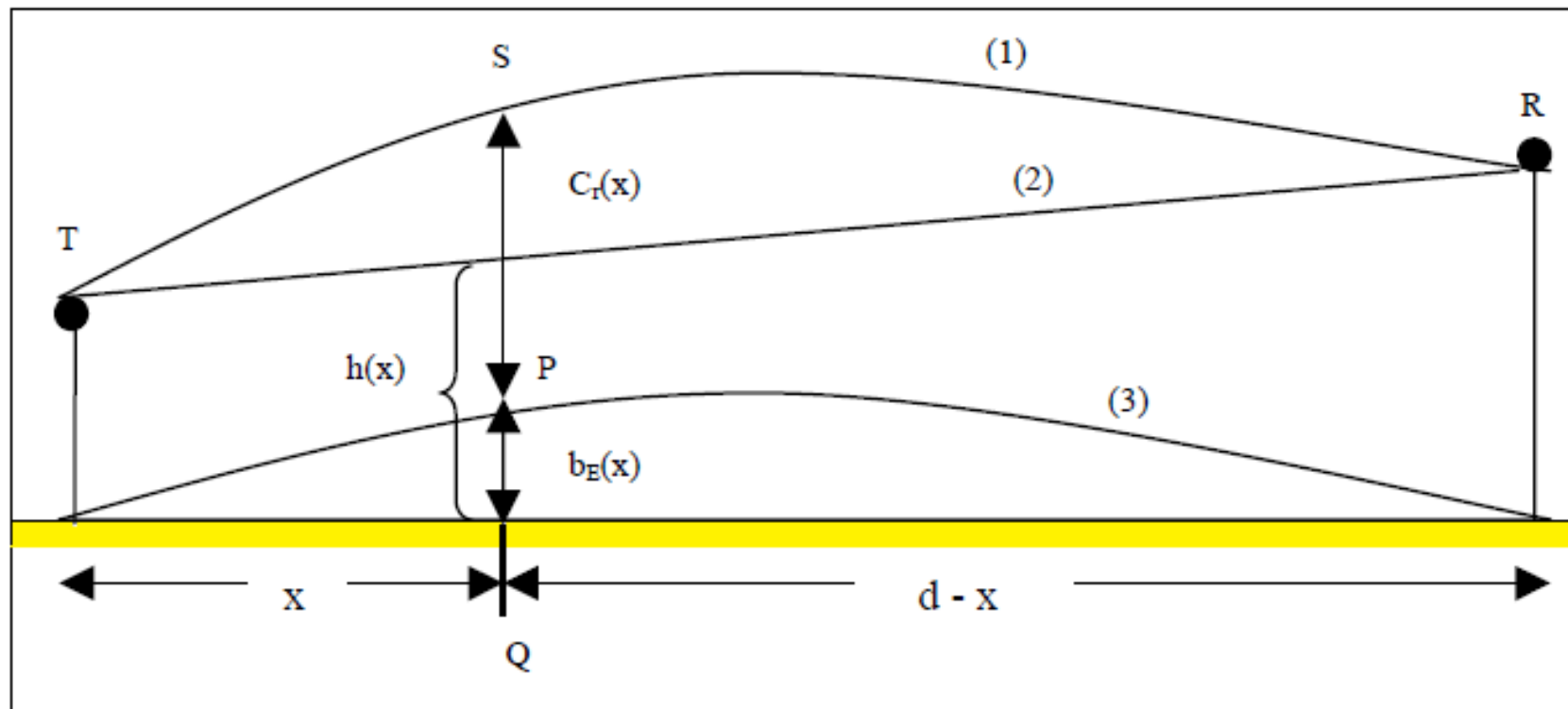
$$R = \frac{1}{\rho} = 25.250 \quad \text{km}$$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

Se va a estudiar la influencia de la refractividad sobre el trayecto radioeléctrico, utilizando el modelo de la figura donde por sencillez se asume la superficie terrestre lisa, sin rugosidades.



2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

En la figura anterior:

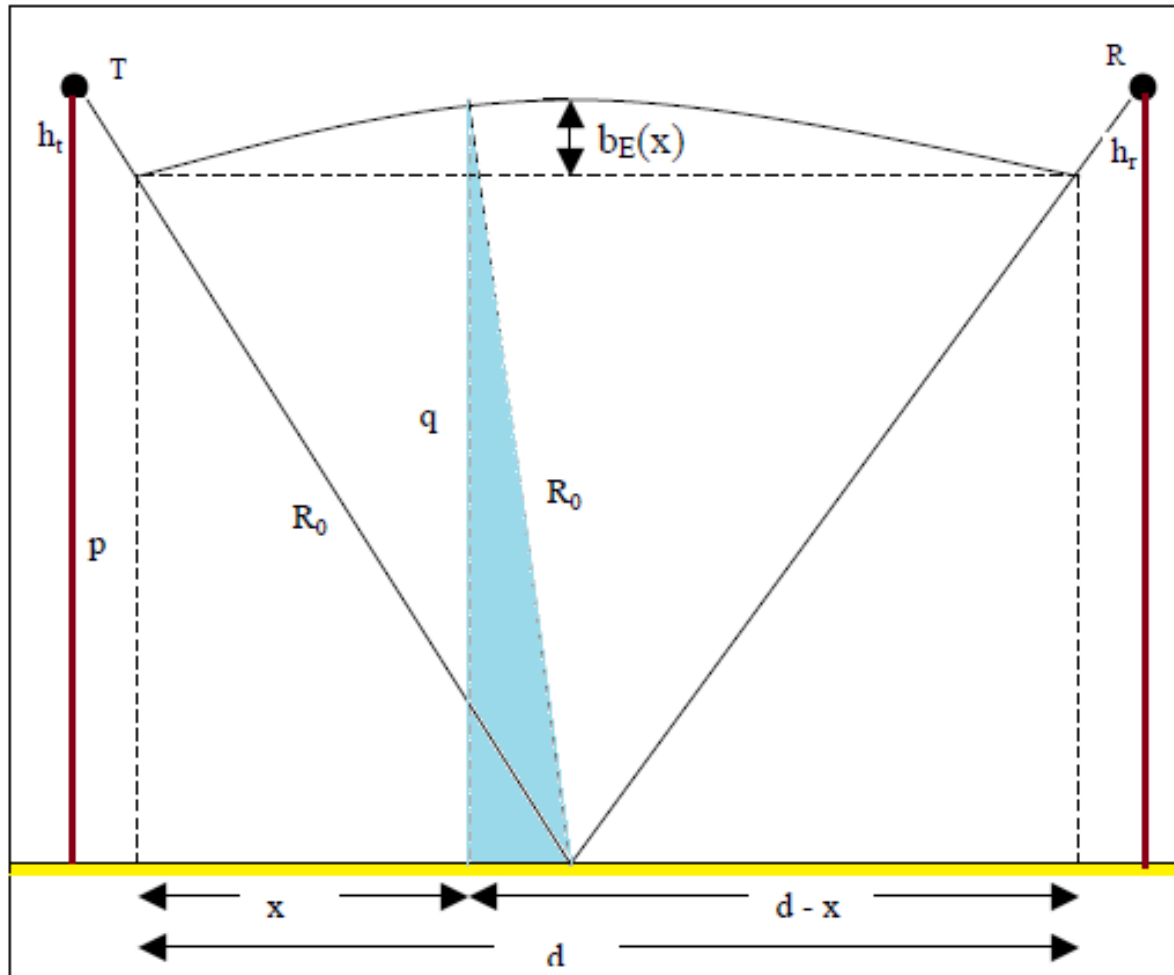
- (1) Trayectoria curvilínea del rayo
- (2) Trayectoria rectilínea del rayo
- (3) Curvatura terrestre

Sean $R_0 = 6370$ km el radio de la curvatura de la tierra y R el radio de curvatura de la tierra del rayo.

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno



En primer lugar se va a calcular la expresión de la protuberancia terrestre $b_E(x)$. La protuberancia terrestre es la altura de la tierra sobre la línea recta que une las bases de las antenas.

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

De la figura anterior se desprende que la protuberancia de la tierra $b_E(x)$ es:

$$b_E(x) = q - p = \sqrt{R_0^2 - \left(\frac{d}{2} - x\right)^2} - \sqrt{R_0^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{x(d - x)}{2R_0}$$

$$\text{si } x \ll 1 \quad \sqrt{1 - x^2} = 1 - \frac{x^2}{2}$$

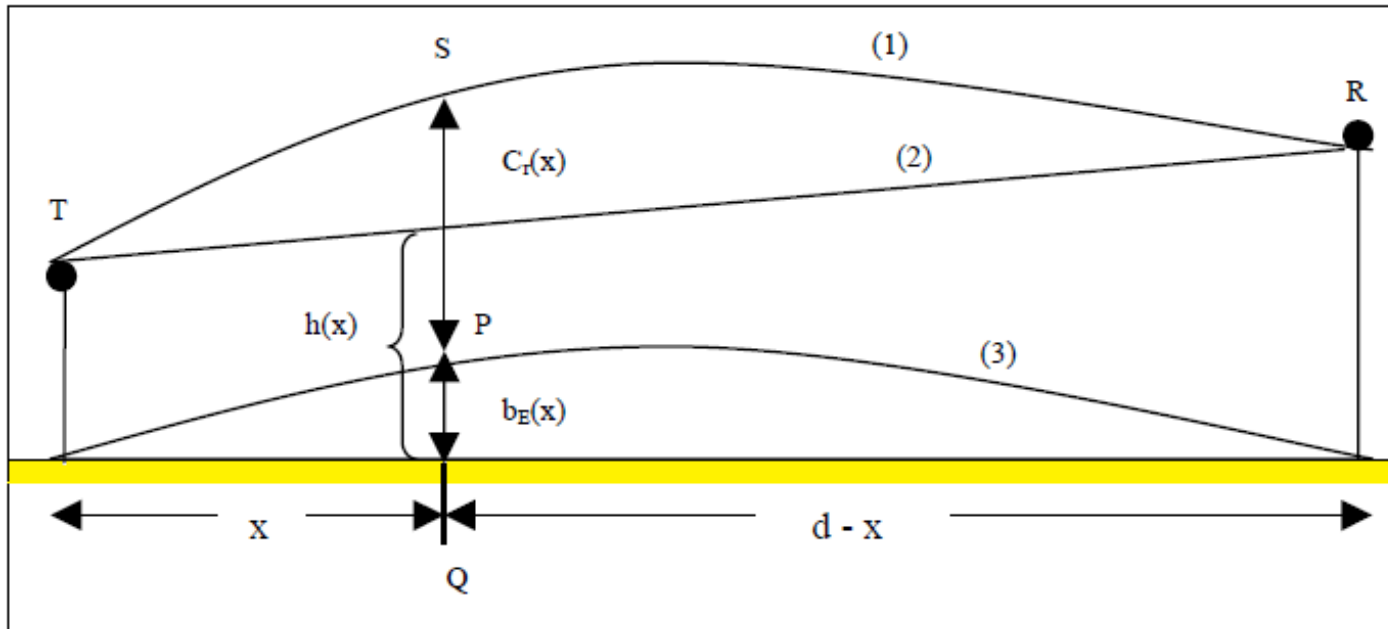
$$b_E(x) = 0.07849 \cdot x \cdot (d - x)$$

$$\begin{array}{l} b_E(x) \text{ (m)} \\ d, x \text{ (km)} \end{array}$$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno



Protuberancia del rayo $b_R(x)$:

$$b_R(x) = \frac{x(d-x)}{2R}$$

Despejamiento $C_R(x)$ para un punto

$$\begin{aligned} C_R(x) &= b_R(x) + h(x) - b_E(x) \\ &= h(x) + \frac{x(d-x)}{2} \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \end{aligned}$$

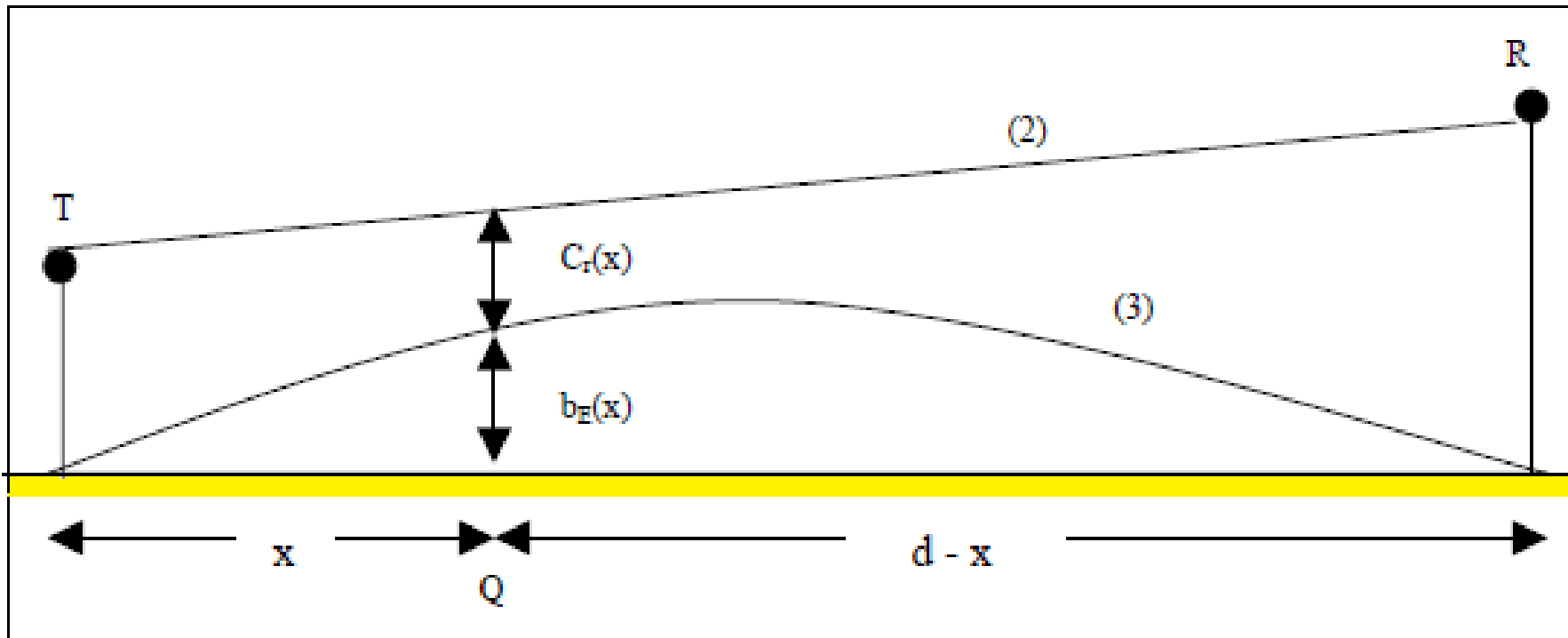
$h(x)$ = ordenada de la recta TR cuando pasa por el punto de abscisa x .

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

El cálculo del despejamiento $C_R(x)$ puede realizarse considerando que el rayo es rectilíneo y la tierra tiene una curvatura ficticia caracterizada por un radio kR_0



2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

La protuberancia terrestre es

$$b_E(x) = \frac{x(d-x)}{2kR_o} = 0.07849 \frac{x(d-x)}{k}$$

El despejamiento vale:

$$C_R(x) = h(x) - b_E(x) = h(x) - \frac{x(d-x)}{2kR_o}$$

Igualando

$$h(x) - \frac{x(d-x)}{2kR_o} = h(x) + \frac{x(d-x)}{2} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_o} \right)$$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

$$\frac{x(d-x)}{2} \left[\frac{1}{R_o} - \frac{1}{kR_o} \right] = \frac{x(d-x)}{2} \frac{1}{R}; \quad \boxed{\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R} = \frac{1}{kR_o}}$$

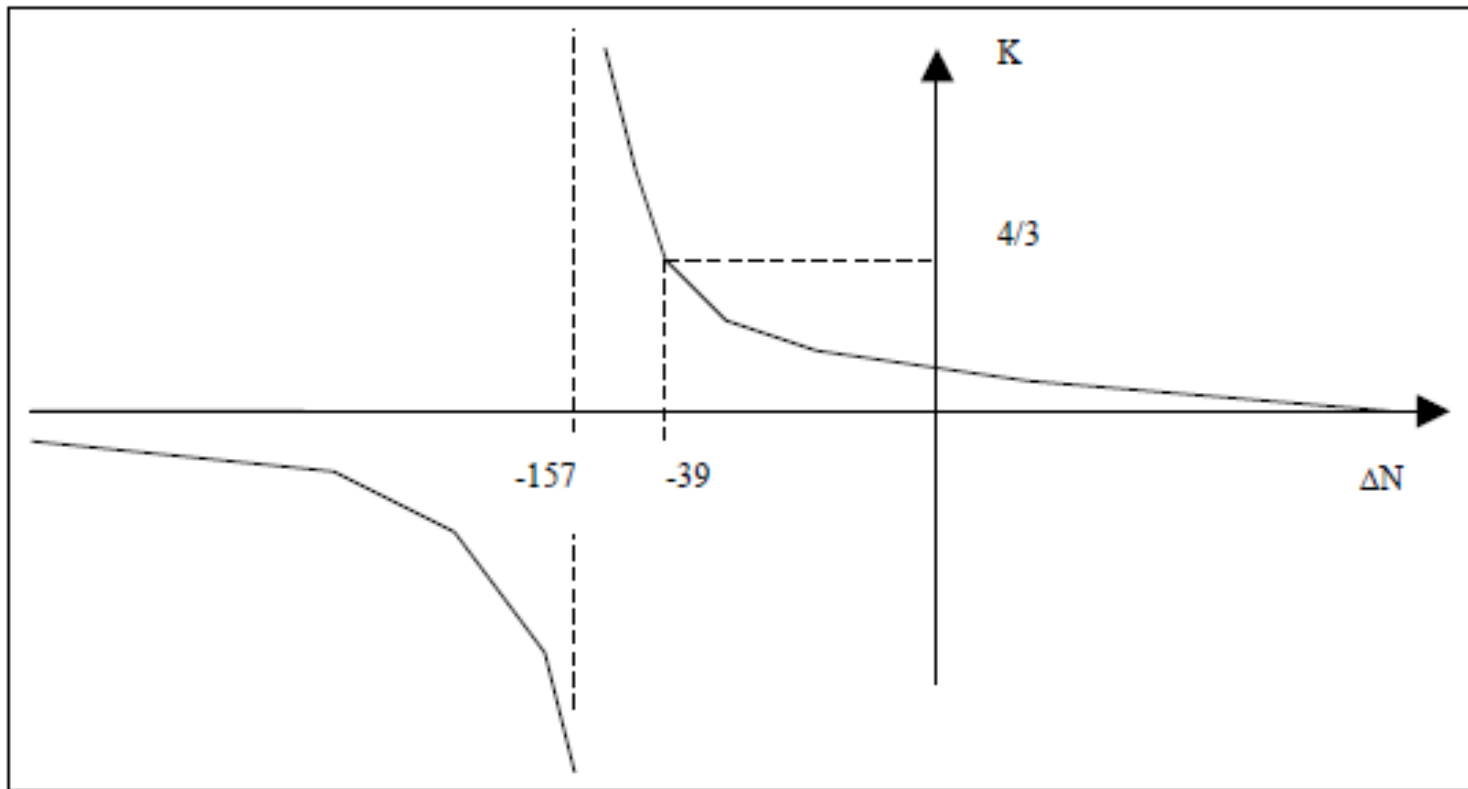
$$\begin{aligned} kR_o &= \frac{1}{\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R}} \rightarrow k = \frac{R}{R - R_o} = \frac{1}{1 - \frac{R_o}{R}} \\ &= \frac{1}{1 + R_o \rho} = \frac{1}{1 + R_o \Delta N \cdot 10^{-6}} = \frac{157}{157 + \Delta N} \end{aligned}$$

En climas templados $\Delta N = -39 \rightarrow k = \frac{4}{3}$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno



La tierra es un poco más plana que la realidad para propagación troposférica.

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

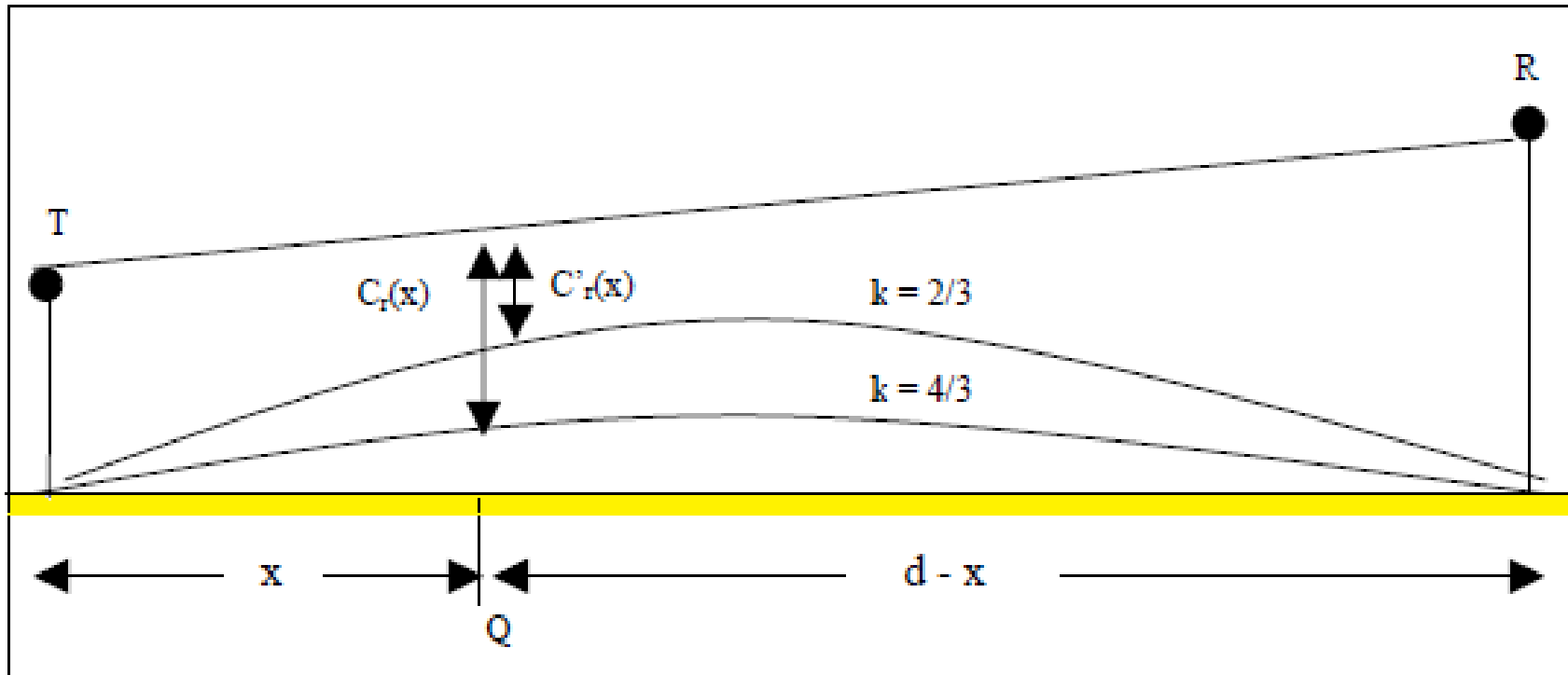
Según los valores de k , se clasifica la troposfera en:

Tipo de Troposfera	k	ΔN
Subrefractiva intensa	$0 < k < 1$	$0 < \Delta N < \infty$
Subrefractiva	$1 < k < 4/3$	$-39 < \Delta N < 0$
Standard	$k = 4/3$	$\Delta N = -39$
Superrefractiva	$k > 4/3$	$-157 < \Delta N < -39$
Conductiva	$k < 0$	$\Delta N < -157$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno



Influencia de k , o ΔN en el despejamiento

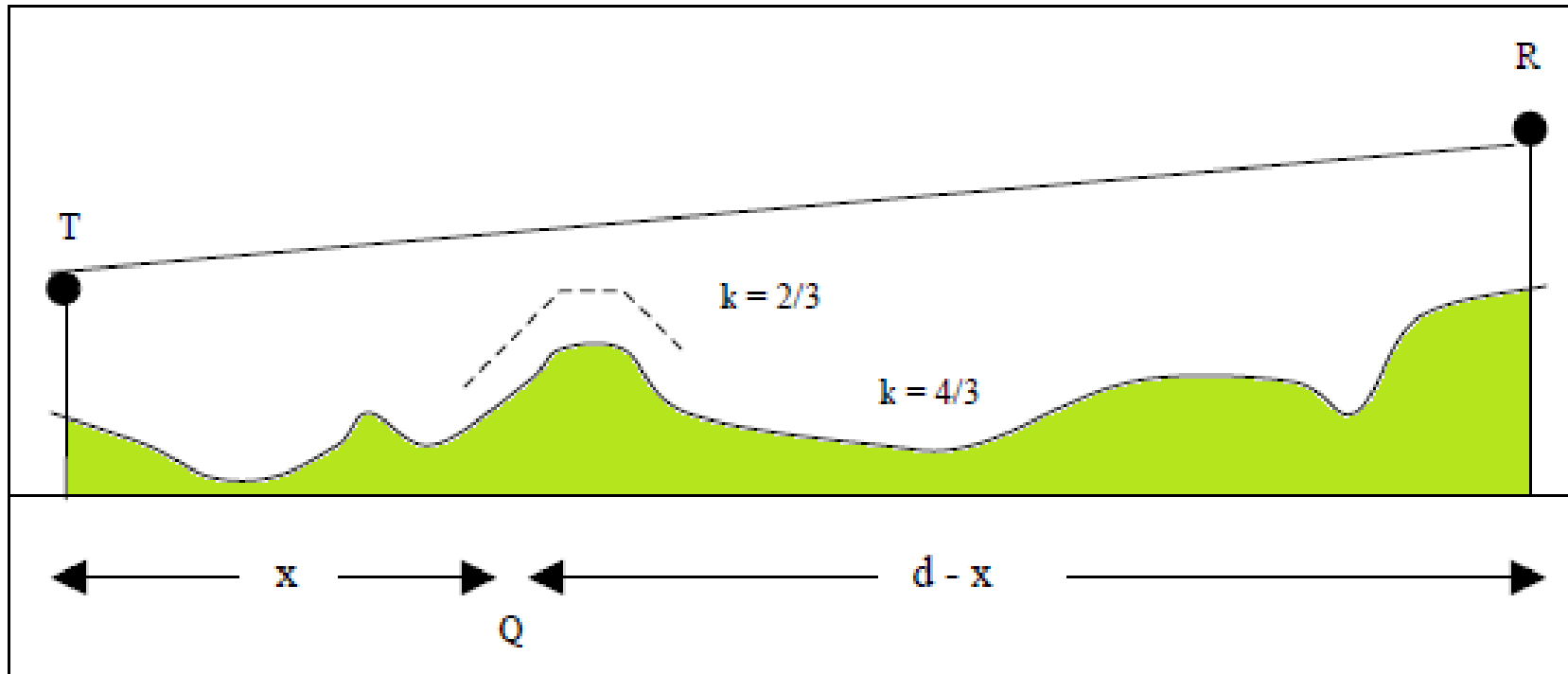
Si k disminuye también lo hace el despejamiento

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

Si la Tierra no es lisa, es decir con montañas y valles:



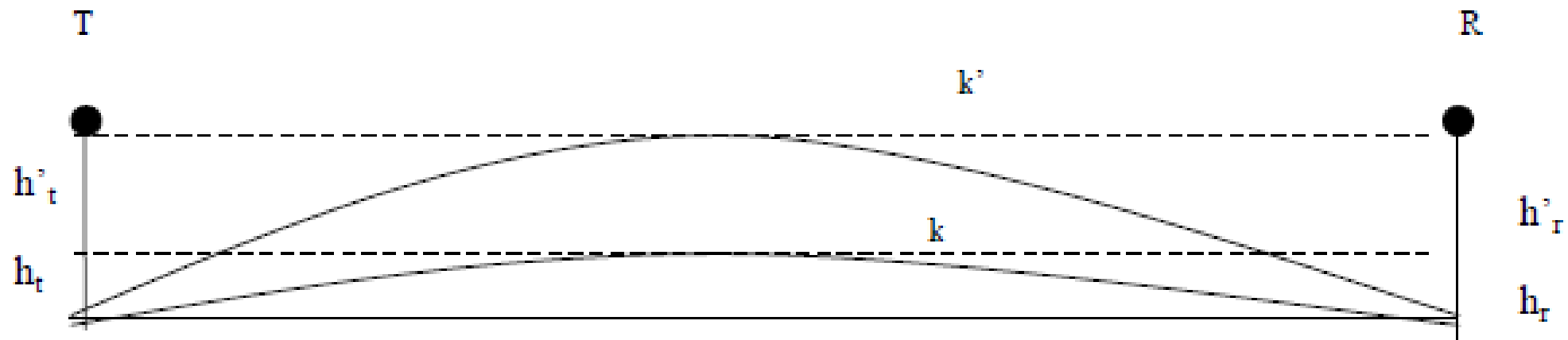
2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

Altura mínima de las antenas

Si k disminuye, con incidencia rasante hay que aumentar las alturas de las antenas de h a h' , para que el rayo pase por encima de la protuberancia terrestre. En la siguiente figura se ilustra este fenómeno.

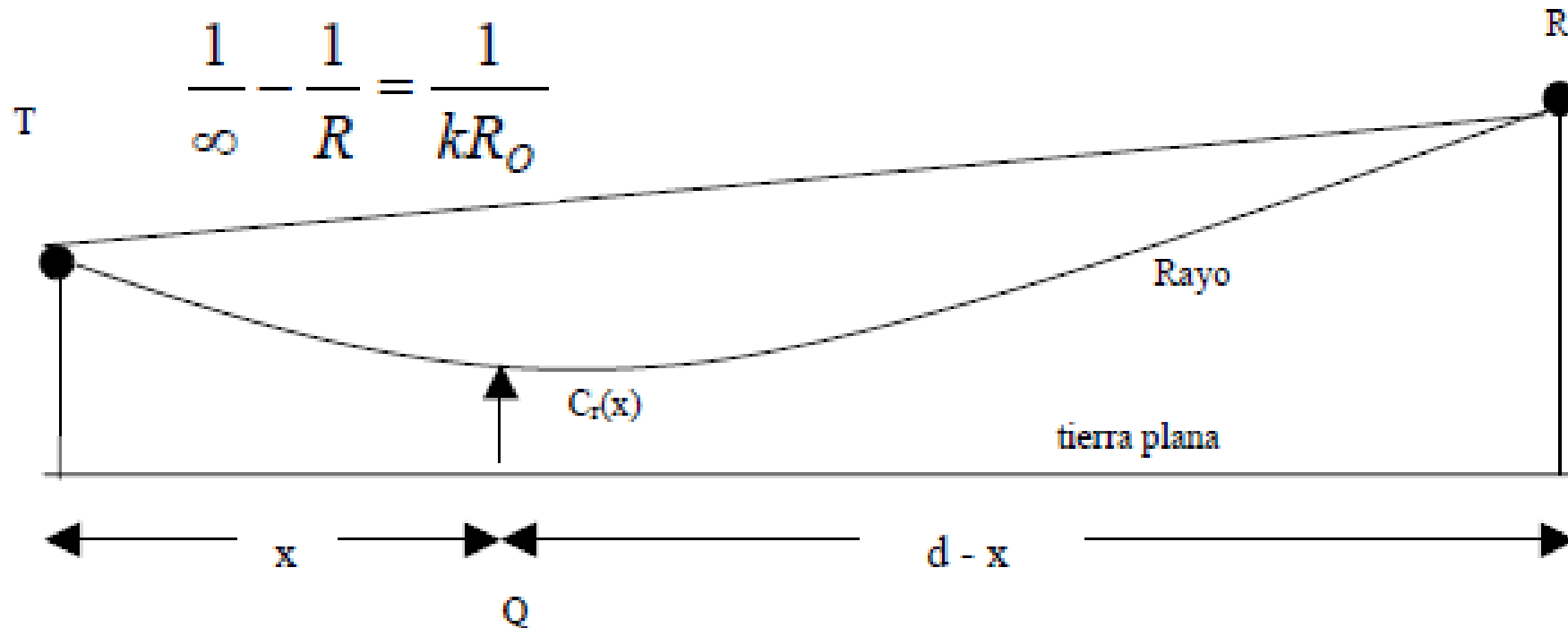


2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

En el caso de troposfera conductiva, k es negativa, no es cómodo pintar una tierra cóncava, por lo que se acostumbra a dibujar una tierra plana y el rayo curvilíneo, con un radio de curvatura R tal que:



2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



2.6.2 Geometría del terreno

Se define un índice de refracción modificado m , de forma que:

$$\frac{1}{R_o} + \frac{dn}{dh} = \frac{dm}{dh} = \frac{1}{kR_o}$$

En la práctica se utiliza $M = (m - 1) \cdot 10^6$

$$\Delta M = \frac{dM}{dh} = 10^6 \frac{dm}{dh} = \frac{10^6}{kR_o} = \Delta N + 157$$

Para $k = 4/3 \rightarrow \Delta N = -39 \rightarrow \Delta M = 118$

2.6 INFLUENCIA DE LA TROPOSFERA EN LA PROPAGACIÓN



GRACIAS