

## Capítulo 2: Presencia (e Influencia) del Suelo en la Radiopropagación

La presencia del suelo (**influencia del terreno**) sobre la propagación es otro de los factores que inciden de manera directa en la transmisión. Las ondas de radio al ser perturbadas por un obstáculo sufren difracción, además de la presencia de una onda reflejada en la superficie (ó indirectas) generalmente produce debilitamiento de la señal<sup>1</sup>, es decir, una disminución de la intensidad de la señal recibida. Los efectos de los diferentes obstáculos sobre las señales de radiopropagación, deben ser analizados y resueltos con el *análisis de trayectos de propagación* y muchas veces reducidos mediante una disposición adecuada del sistema y empleo de transmisiones en diversidad de espacio, frecuencia ó fase); estos son los tópicos que se desarrollan a continuación:

### 2.1.- Presencia del Suelo. Geometría

#### - *Análisis de Trayectos:*

**Distancia al Horizonte:** En la *figura 2.1* se muestra la definición gráfica de la Distancia al horizonte.

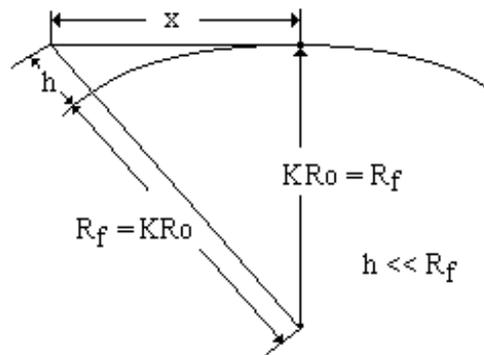


FIG.- 2.1

Donde  $x$  = **Distancia al horizonte**. A continuación se desarrollan las ecuaciones pertinentes:

$$(h + R_f)^2 = x^2 + R_f^2$$

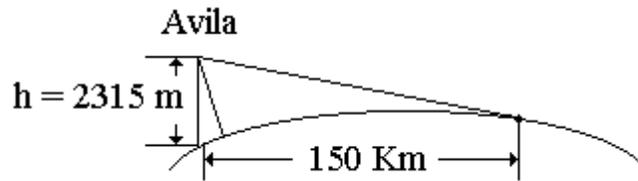
$$\underbrace{h^2}_{\text{Despreciable}} + R_f^2 + 2hR_f = x^2 + R_f^2$$

$$\therefore x = \sqrt{2hR_f} \quad \text{ó} \quad x = \sqrt{2hKR_0} \quad x \text{ depende de } K$$

#### **Ejemplo:**

**Ávila - La Orchila, 150 Km. sobre mapa:**

<sup>1</sup>Se dice generalmente, debido a que existen casos en los cuales la señal no se anula sino que por el contrario se refuerza, lo cual podría generar problemas de saturación en el extremo receptor, dando lugar a distorsiones de la señal y por consecuencia una pérdida de la misma.

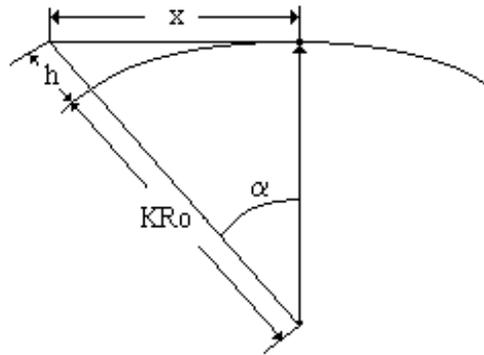


$K = 4/3 \quad x = 190.44 \text{ Km.}$

$K = 1 \quad x = 164.9 \text{ Km.}$

$K = 2/3 \quad x = 134,6 \text{ Km.}$

Cálculo aclaratorio del porque una distancia  $x$  es aproximadamente lo mismo que la distancia sobre la tierra curva (o distancia de mapa). Veamos el siguiente esquema, el cual nos representa el problema en sí:



$$\alpha = \text{Arc sen} \frac{x}{KR_0 + h} = \text{Arc sen} \frac{134.6}{\frac{2}{3} \cdot 6370 + 2.135} = \text{Arc sen} \frac{134.6}{4248.8} = 1.82^\circ$$

Perímetro de la Tierra =  $2\pi KR_0 = 26682.59 \text{ Km}$

$\therefore$  arco 134.90 Km

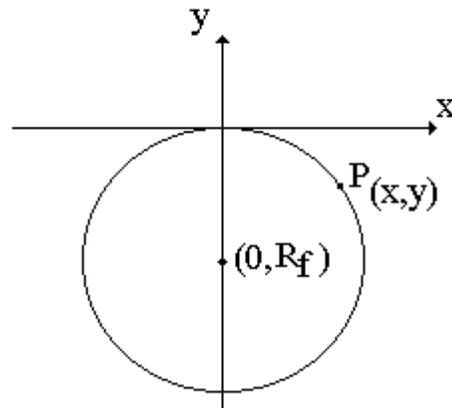
luego se pueden considerar iguales las distancia al horizonte y la distancia sobre mapa entre la torre y el punto de tangencia.

**2.2.- Análisis de Trayectos. Curvas de Altitud Cero. Efecto de la Curvatura (flecha).**

**2.2.1.- Ecuación de la Curva de altitud cero:**

Ing. Aldo N. Bianchi, MScEE

Sabemos que esta se trata (como lo muestra la **figura 2.2**) de la ecuación de una circunferencia, pero trataremos de simplificarla.



**Fig.- 2.2**

$$R_f = KR_0$$

$$R_0 = 6370 \text{ Km}$$

K = Índice Troposfé rico

$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 = r^2 \quad \text{Donde } (\alpha, \beta) = (0, -R_f)$$

$$x^2 + (y - R_f)^2 = R_f^2 \Rightarrow y^2 + 2R_f y + x^2 = 0$$

Es una ecuación de 2<sup>do</sup> Grado en la cual: **a** = 1, **b** = 2R<sub>f</sub>, **c** = x<sup>2</sup> y cuya **solución única** (pensando en que el valor de **y**, *no puede ser negativo*) es:

$$y = \frac{-2R_f + \sqrt{4R_f^2 - 4x^2}}{2} \Rightarrow y = -R_f + \sqrt{R_f^2 - x^2}$$

Simplificamos (pues  $x \ll R_f$ ) mediante el desarrollo en serie:

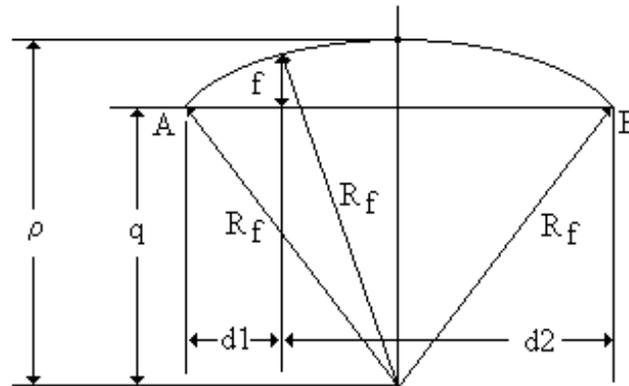
$$y = -R_f + R_f \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R_f}\right)^2} = -R_f + R_f \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{R_f}\right)^2 + \dots\right) \cong \frac{x^2}{2R_f}$$

$$y = \frac{x^2}{2R_f}$$

Que es la ecuación de una parábola de eje vertical, lo cual nos hace pensar que: **desde el punto de vista práctico se puede reemplazar la circunferencia con una parábola.**

### 2.2.2.- Calculo de la Flecha: (curvatura terrestre, "earth bulging factor")

En la **figura 2.3** se muestra la definición gráfica del parámetro denominado la flecha "f".



$$f = \rho - q$$

$$d_1 \text{ y } d_2 \ll R_f$$

**Fig.- 2.3.**

Cálculo de  $q$ :

$$q = \sqrt{R_f^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = R_f \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2R_f}\right)^2} = R_f \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{2R_f}\right)^2 + \Lambda\right) \cong$$

$$q = R_f - \frac{d^2}{8R_f}$$

Cálculo de  $\rho$ :

$$\rho = \sqrt{R_f^2 - (d_2 - d_1)^2} = R_f \sqrt{1 - \left(\frac{d_2 - d_1}{R_f}\right)^2} = R_f \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{d_2 - d_1}{R_f}\right)^2 + \Lambda\right)$$

$$\rho \cong R_f - \frac{1}{2} \frac{(d_2 - d_1)^2}{R_f}$$

Cálculo de la Flecha  $F$ :

$$f = \rho - q = \frac{d^2}{8R_f} - \frac{(d_2 - d/2)^2}{2R_f} = -\frac{d_2^2}{2R_f} + \frac{d_2 d}{2R_f} = \frac{d_1 d_2}{2R_f}$$

$$f = \frac{d_1 d_2}{2R_f} = \frac{d_1 d_2}{2kR_0}$$

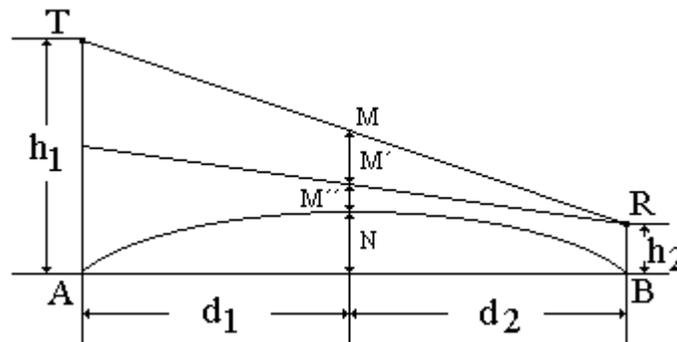
$$f_{\text{máx}} = \frac{d}{8kR_0} \quad \text{Cuando } d_1 = d_2 = d/2$$

Ejemplo:  $d = 50 \text{ Km.}$     $d_1 = 30 \text{ Km.}$     $d_2 = 20 \text{ Km.}$     $K = 4/3$

$$f = \frac{20 * 30}{2 * \frac{4}{3} * 6370} = 35.4\text{m} \quad f_{\text{máx}} = 36.9\text{m}$$

**2.2.3.- Despeje sobre tierra Esférica (CLEARANCE):**

Por ahora podemos definir que el despeje sobre la tierra, es la distancia entre la dirección principal de propagación (representada por la línea TR en la **figura 2.4**) y la tierra esférica.



**Fig.- 2.4**

(Cabe destacar que el análisis representado en la figura anterior es válido para  $d > \text{distancia al horizonte}$  y  $h_1, h_2 \neq 0$ , además la verticalidad en los extremos A y B es una fuente de errores de trayecto que se analiza más adelante)

Las ecuaciones que rigen el despeje sobre la tierra esférica son:

$$C = \overline{MM'} - \overline{MN} = \frac{d_1 d_2}{2kR_0}$$

$$\overline{MN} = \overline{M''N} + \overline{NM''} = \left\{ h_2 + \left( \frac{h_1 - h_2}{d} \right) d_2 \right\} \text{ este último término de la ecuación aparece}$$

por la semejanza de triángulos:  $\frac{h_1 - h_2}{d} = \frac{MM''}{d_2}$  quedando:

$$\overline{MN} = h_2 + \left( \frac{h_1 - h_2}{d} \right) d_2 \quad \text{Luego al sustituirlo en la ecuación original:}$$

$$C = h_2 + \frac{h_1 - h_2}{d} d_2 - \frac{d_1 d_2}{2kR_0} \quad \text{Este es el Despeje.}$$

Calculo de la distancia de despeje mínimo:

Para tal cálculo dispondremos de C en función solamente de  $d_1$ , es decir:

$$d_2 = d - d_1$$

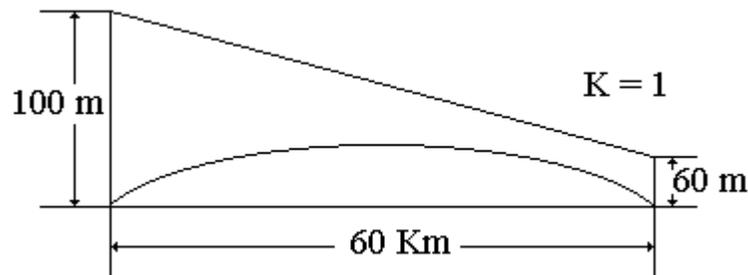
$$C = h_2 + \frac{h_1 - h_2(d - d_1)}{d} - \frac{d(d - d_1)}{2kR_0}$$

$$\frac{dC}{dd_1} = \frac{h_1 - h_2}{d} - \frac{d}{2kR_0} + \frac{d_1}{2kR_0}$$

$$(d_1)_{dmin} = \frac{d}{2} + \frac{h_1 - h_2}{d} kR_0 \quad \text{De donde } (d_1)_{dmin} = C_{min}$$

Existirá despeje mínimo si el término  $\frac{h_1 - h_2}{d} kR_0 \leq \frac{d}{2}$  porque  $(d_1)_{dmin} \leq d$  de otra forma el valor de C quedará fuera del trayecto, y el despeje será el valor de la altura de la torre de menor altura.

**Ejemplo:** Dado el siguiente trayecto sobre el mar;



Se pide su despeje mínimo (si cae en el trayecto), y el cálculo de su valor C.

$$(d_1)_{dmin} = \frac{d}{2} + \frac{h_1 - h_2}{d} kR_0 = 34,25 \text{ Km.}, \text{ está dentro del trayecto, por lo tanto}$$

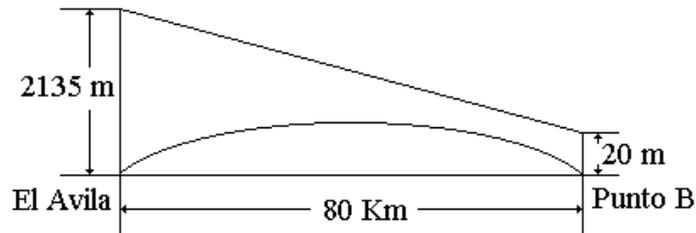
procedemos al cálculo de C:

$$C = h_2 + \frac{h_1 - h_2(d - d_1)}{d} - \frac{d(d - d_1)}{2kR_0} = 7,94 \text{ m, cabe destacar que los valores de } (d_1)_{dmin}$$

y C disminuyen a medida que K decrece, por lo tanto hay que calcularlos para el valor más crítico de K. ( $K_{min}$ ).

**Ejemplo:**

Se pide el despeje mínimo (si existe en el trayecto) y su valor  $C$ , del siguiente esquema que se muestra a continuación:



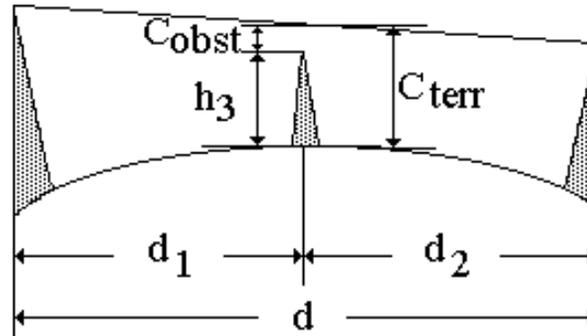
Aplicando la fórmula respectiva se obtiene  $(d_1)_{\text{dmin}} = 208 \text{ Km} > d$ , es decir está fuera del trayecto, por lo tanto el valor de despeje en el trayecto ( $C$ ) es el valor de la altura de la torre más pequeña (la torre del punto B = 20 m).

Como ya se observó anteriormente las variaciones del valor de  $K$  pueden controlar el hecho de que el despeje exista dentro del trayecto. El rango de variación del valor de  $K$  es  $[2/3 \dots 10]$ .

Además siempre que se calcule el trayecto sobre el mar hay que calcular el despeje mínimo, en cambio en tierra y sobre obstáculos se hace así:

**2.2.4 Despeje sobre obstáculos:**

Como se vio anteriormente el despeje sobre la tierra es la distancia mínima entre la dirección principal de propagación y la tierra esférica, ahora en este caso de despeje sobre obstáculos, se puede definir como la *distancia entre la dirección principal de propagación y el obstáculo que afecte la línea de propagación* (esto se puede observar en la **figura 2.5**).

**Fig.- 2.5**

$C_{\text{obst}} = C_{\text{terr}} - h_3$ , donde  $C_{\text{obst}}$  = despeje sobre el obstáculo.

$$C = h_2 + \frac{h_1 - h_2}{d} d_2 - \frac{d_1 d_2}{2kR_0} - h_3 \text{ para } d_1 \text{ y } d_2 \text{ del obstáculo que afecta, la dirección}$$

principal de propagación.

Es lógico pensar que si el obstáculo no afecta la línea principal de propagación resulta inadmisibles el cálculo del despeje en él, tal y como se muestra en la **figura 2.6**.

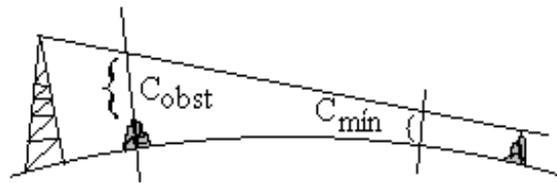


Fig.- 2.6

Cabe destacar que si se cumple la relación  $C_{obst} < C_{min}$ , entonces el despeje es  $C_{obst}$ .

**Despeje negativo. (El obstáculo supera a la dirección de propagación principal).**

Este sería de por sí el peor de los casos, en el cual el obstáculo obstruye la dirección de propagación principal. Este caso se ilustra en la **figura 2.7**.

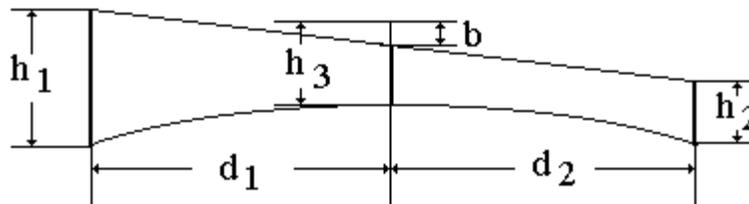


Fig.- 2.7

$$b = h_3 + \frac{d_1 d_2}{2kR_0} - h_1 - \left( \frac{h_1 - h_2}{d} \right) d_1$$

**2.2.5.- Calculo de la altura de las Torres:**

En este punto se da el siguiente planteamiento:

Dados  $h_1$  y  $h_2$  si hay obstrucción por parte de  $h_3$ , se agrega  $H$ , calcular  $x$  de modo tal que se verifique el valor de  $C$ . (El esquema de dicho planteamiento se muestra en la **figura 2.8**).

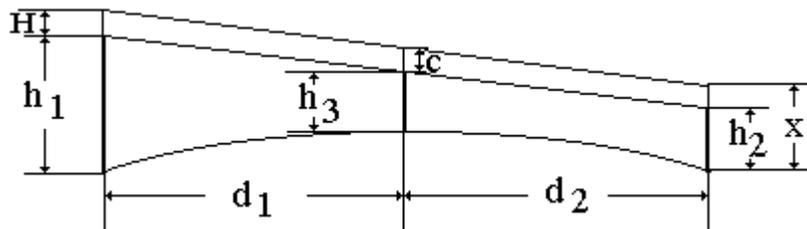


Fig.- 2.8

Otra manera de resolver el problema es:

Dados  $h_1$  (aún sin agregar  $H$ ),  $C$  y  $h_3$ , calcular  $X$ .

Para tal cálculo se aplicará la siguiente fórmula:

$$x = h_1 + \frac{d}{d_1} \left[ C + h_3 + \frac{d_1 d_2}{2kR_0} - h_1 \right]$$

$$C = h_2 + \frac{h_1 - h_2}{d} d_2 - \frac{d_1 d_2}{2kR_0} - h_3$$

$$C = h_2 + \frac{h_1 d_2}{d} - \frac{h_2 d_2}{d} - \frac{d_1 d_2}{2kR_0} - h_3 = h_2 \left( 1 - \frac{d_2}{d} \right) + \frac{h_1 d_2}{d} - \frac{d_1 d_2}{2kR_0} - h_3, \quad \text{ahora si}$$

sustituimos el término entre paréntesis por  $\left( \frac{d_1}{d} \right)$ , y acomodamos un poco nos queda:

$$h_2 = -h_1 \frac{d_2}{d_1} + \frac{d}{d_1} \left[ C + \frac{d_1 d_2}{2kR_0} + h_3 \right] = -h_1 \frac{d_2}{d_1} + h_1 \frac{d}{d_1} + \frac{d}{d_1} \left[ C + \frac{d_1 d_2}{2kR_0} + h_3 - h_1 \right]$$

$$\text{Luego la ecuación final es: } x = h_2 = h_1 + \frac{d}{d_1} \left[ C + \frac{d_1 d_2}{2kR_0} + h_3 - h_1 \right].$$

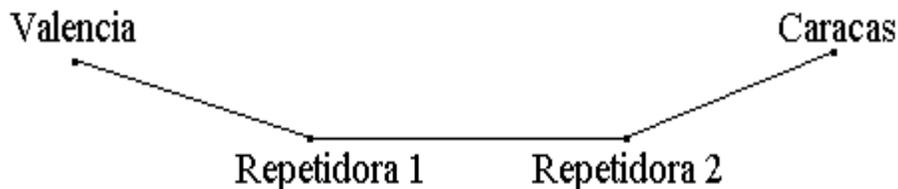
El problema del cálculo de altura de las antenas no es solamente un problema técnico ya que el costo de las torres que darán la altura requerida es una parte significativa del costo del radioenlace. Por otra parte, como el enlace se compone de varios tramos, la escogencia de una altura de torre en un punto no solo afecta al tramo en cuestión sino al contiguo y así sucesivamente. Existen programas de computadora que permiten optimizar la altura de las antenas para minimizar costos. El Apéndice 2A muestra uno de ese tipo.

Al proyectar un enlace entre dos ciudades importantes es necesario estudiar cada tramo del trayecto con detalle, ello implica trazar "El perfil", que es un diagrama que muestra las alturas en cada tramo y permite estudiar principalmente el efecto de los obstáculos.

### 2.3.- Trazado de Perfiles. Construcción del papel de perfil. Cambio de escalas.

#### 2.3.1 Trazado de Perfiles

Supongamos en enlace entre Valencia y Caracas, obviamente para conocer el comportamiento de cada tramo tenemos que ver en primer lugar si hay obstrucciones y de que magnitud. Para ello debemos "trazar un perfil", veamos en que consiste.



El primer paso que hay que realizar para hacer el trazado de un perfil, es efectuar un estudio previo de los planos de cartografía. Como por ejemplo:

*Planos de Cartografía:* Cartografía Nacional (antes en la Esquina de Camejo):

Escala 1:100.000 curvas de Nivel c/40 m de venta libre salvo las zonas costeras donde las venden con carta de la empresa interesada.

Escala 1:100.000 curvas de Nivel c/20 m. Venta restringida(requiere carta de la empresa interesada).

También existen planos de Catastro Minero.

Catastro del IAN.

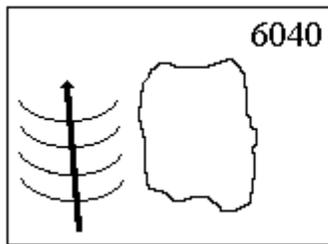
Catastro de la CVG.

Catastro del Concejo Municipal.

Además de que existen mapas digitalizados de casi todo el mundo, que se pueden adquirir en USA. (Presentados en formato CD-ROM) y la Fundación Instituto de Ingeniería en Caracas posee excelente información obtenida por satélite..

Siempre luego del trazado, hay que ir al terreno, llevar el teodolito, asegurar la línea de vista del despeje, etc.

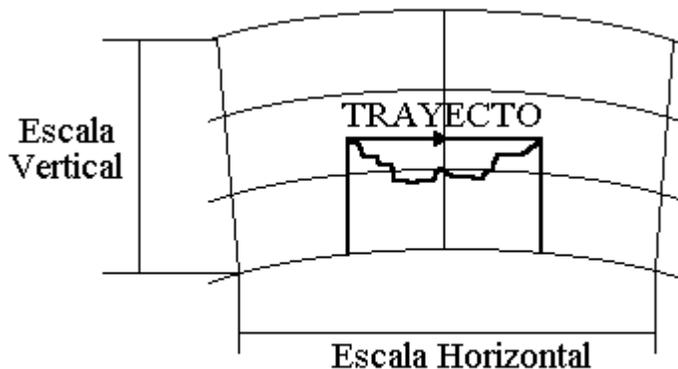
Ejemplo:en el mapa 6040 con dos puntos extremos se traza la línea que lo une,se leen las distancias y las alturas y se construye la Tabla del Trayecto.



**Se construye la**  
**Tabla del Trayecto**

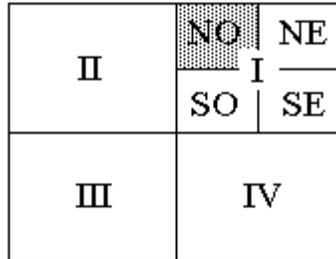
Distancia	Altura
0	980
:	:
:	:
:	:
40	460

Luego de obtener la tabla del trayecto se llevan los valores sobre el papel de perfil que es un papel (adquirido comercialmente ó construido) que tiene en cuenta la curvatura de la tierra y sobre el que se dibujará el trayecto:



**PAPEL DE PERFIL**

Esto en el caso de tener un plano 1:100.000, si el plano deseado fuese de 1:25.000, entonces estaríamos tomando un pedazo ampliado del plano total y además habría que dar la orientación de ese pedazo en el plano total. Por ejemplo: Se desea la sección I, de un plano dirección NO (nor-oeste) en escala 1:25.000, en la **figura # 2.9**. se puede observar, el plano requerido (con un sombreado oscuro).



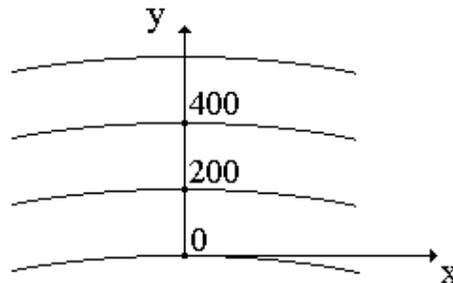
**2.3.2- Construcción del papel de perfil**

A continuación se muestra de manera gráfica como se construye un papel de perfil:

0 - 60 Km. d

0 - 1000 Km. h

$y = \frac{x^2}{2kR_0}$ , luego el papel de perfil con los parámetros ya definidos queda:



con  $R_0 = 6370$  se construyó la siguiente tabla de valores:

X (Km.)	Y(m)	Y(m)sobre 200m
0	0	0
3	-0.53	-0.53
6	-2.12	-2.12
9	-4.77	-4.77
12	-8.48	-8.48
15	-13.25	-13.25
18	-19.07	-19.07
21	-25.96	-25.96
24	-33.91	-33.91
27	-42.92	-42.92
30	-52.98	-52.98



### 2.4.- Errores en el estudio de trayectos (1) pág. 57 a 59.

Cuando se estudia un trayecto mediante un perfil, debe tomarse en cuenta que, aunque éste no es una representación exacta de la realidad, los errores que presenta son, desde el punto de vista práctico, despreciables.

Los principales errores que se cometen son los siguientes:

1. La superficie es dibujada como un arco parabólico en lugar de circular debido a la expansión del eje vertical y a la eliminación del término  $h^2$ . El error es menor de 0.5%.
2. Las alturas son tomadas verticalmente en lugar de seguir la dirección radial del centro de la Tierra. El ángulo  $\varphi/2$  de la figura X.X es pequeño ( $0.22^\circ$  para 50km), por lo tanto el error es pequeño.
3. La distancia real  $d$  no está corregida por la diferencia de alturas sino tomada directamente del mapa. El error es pequeño ya que generalmente  $\alpha$  (figura X.X) es menor de  $2^\circ$ , o sea, que se puede suponer que  $d = D1 = D2$ .
4. En lugar de medirse perpendicularmente a la trayectoria el radio de la 1ª zona de Fresnel, éste se mide verticalmente. Este error también es pequeño ya que el ángulo entre las dos direcciones es igual a  $\theta = 3.44 \cdot \frac{h_2 - h_1}{d}$  minutos, estando las alturas en metros y la distancia en km. Por ejemplo, si  $d = 500\text{km}$ ,  $h_1 = 0\text{m}$  y  $h_2 = 1000\text{m}$ , el ángulo  $\theta$  será igual a  $1.15^\circ$ .
5. Otras fuentes de error son:
  - a) Puede haber errores en los mapas.
  - b) La línea recta dibujada en un mapa no representa la verdadera trayectoria de la onda la cual sigue un círculo,
  - c) No es fácil localizar en un mapa el sitio exacto de la estación o de una obstrucción.
  - d) Las condiciones indicadas pueden cambiar, por ejemplo: construcciones nuevas, inundaciones, altura de los árboles, etc.
  - e) Se supone que el valor de K es igual para todo el trayecto.

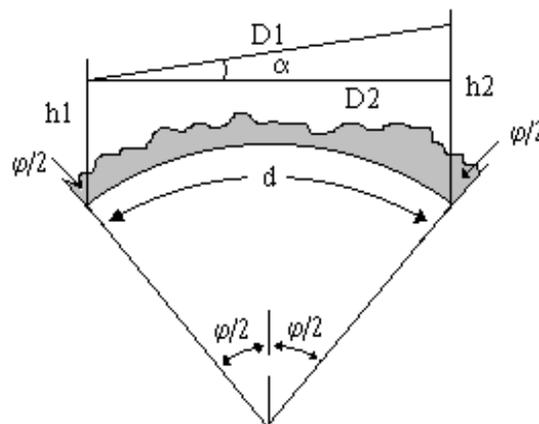


Fig.- X.X

BIBLIOGRAFIA:

- (1) GOODING Clemente, **Apuntes de Ingeniería de Comunicaciones**,  
UCV.
- (2)

Apéndice 2A