



# Propagación y Antenas (ET444)

## Trabajo Integrador Final:

# Descripción General del Proceso de Cálculo de Radioenlace

*Alumna:*

**PRYSZCZUK, Sabrina Daiana**

*Docentes:*

Dr. Ing. Garassino, Sergio

Dr. Ing. Mendoza, Horacio

Ing. Sebely, José

*Oberá, Misiones – Año 2022*



Universidad Nacional de Misiones

## Índice de contenidos

Resumen .....	3
1. Introducción Teórica.....	4
1.1 Radioenlaces .....	4
1.2 Características de Propagación .....	5
1.2.1 Modelo de Tierra Plana.....	5
1.2.2 Modelo de Tierra Curva .....	7
1.2.3 Definición del horizonte óptico o visual, el horizonte de radio y corrección de la curvatura terrestre7	
2. Consideraciones de Diseño.....	9
2.1 Normativa Vigente .....	9
2.2 Estudio de viabilidad de radioenlace .....	9
2.2.1 Zonas de Fresnel .....	9
2.3 Determinación de la altura de los mástiles.....	12
2.4 Pérdidas y atenuación en radioenlaces .....	13
2.4.1 Influencia de los efectos meteorológicos .....	13
2.4.2 Fading o desvanecimiento temporal de la onda .....	14
2.4.3 Atenuación por obstáculos .....	15
2.4.4 Atenuación en el espacio libre.....	18
2.5 Umbral de ruido y sensibilidad .....	19
2.6 Ecuación del Enlace .....	20
3. Ejemplo de Aplicación .....	21
3.1 Determinación de la altura de los mástiles de las antenas.....	21
3.2 Cálculo de la Ecuación del Enlace.....	24
3.3 Contraste con resultados obtenidos mediante software de simulación .....	26
3.3.1 Radiomobile .....	26
3.3.2 WiFi – Fresnel.....	27
3.3.3 ISP Design Center .....	28
4. Descripción del Estado del Arte.....	30
4.1 “Diseño de altura de antena óptima para mejorar la capacidad en radioenlaces sobre el agua afectados por las mareas” .....	30

4.2	“Internet desde el espacio con enlaces inter-satelites” .....	30
4.3	“Evaluación de Radioenlaces Móviles como Enlaces de Comando y Control de Vehículos Aéreos No Tripulados (UVAs)” .....	31
4.4	“El Efecto del Polvo y la Arena en Radioenlaces Terrestres 5G” .....	31
5.	Conclusiones .....	32
	Bibliografía .....	32

## Resumen

El presente trabajo integrador tiene como principal objetivo presentar una síntesis o visión integral de los temas desarrollados en la cátedra “Propagación y Antenas”. Para ello, mediante los conocimientos adquiridos durante el cursado sumados a una posterior investigación y consulta en bibliografías relacionadas, se desarrolló esta descripción general del proceso de cálculo básico aplicable a un radioenlace terrestre, más allá de la línea de horizonte óptico y el correspondiente cálculo de disponibilidad de este.

Primeramente, se presentan los conceptos teóricos necesarios y la descripción de los parámetros fundamentales para el proceso de cálculo, así como también las simplificaciones y criterios adoptados.

Luego, se presentan los aspectos más importantes y las consideraciones de diseño del enlace, teniendo en cuenta las especificaciones antes mencionadas. Esto con el objetivo de luego contrastar estas consideraciones con el análisis de aplicaciones comerciales existentes del enlace.

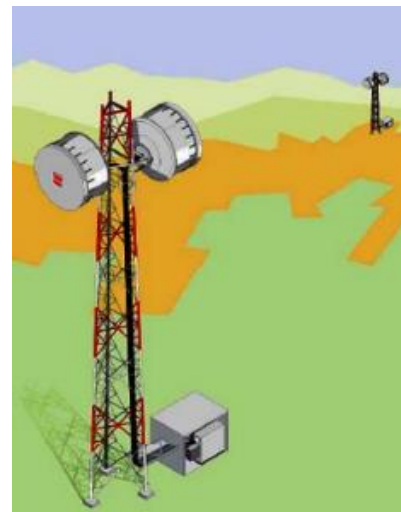
Finalmente, se presenta la descripción del estado del arte junto a las conclusiones obtenidas del trabajo integrador.

# 1. Introducción Teórica

## 1.1 Radioenlaces

Un radioenlace se define como una interconexión entre dos o más estaciones (pueden ser terminales o repetidoras) de telecomunicaciones, la cual se da mediante la propagación de ondas electromagnéticas a través de un medio no guiado. Dichas estaciones pueden ser fijas o móviles.

Existen diferentes tipos de radioenlaces que pueden ser clasificados según los terminales utilizados y las señales emitidas. Por ejemplo, un parámetro a partir del cual se puede clasificar un radioenlace es la ubicación de sus terminales: si todos los terminales están en la Tierra, se trata de un **radioenlace terrestre**; en cambio, si alguno de los terminales se encuentra en un satélite, se trata de un **radioenlace satelital**.



La estructura básica de un radioenlace terrestre está compuesta por cuatro elementos principales: las antenas (y sus correspondientes mástiles), las líneas de transmisión (cables y conectores), el transmisor y el receptor (Fig. 1).

Las **antenas** son dispositivos que permiten transformar la energía eléctrica a ondas electromagnéticas para transmitir señales y el proceso opuesto para recibir señales. Los parámetros más importantes al momento de elegir una antena para una determinada aplicación son: patrón de radiación, ganancia, directividad, polarización, ancho de haz, ancho de banda, frecuencia de trabajo y sensibilidad; siendo los más relevantes la ganancia y la frecuencia de trabajo. Modificando estos parámetros surgen diferentes tipos de antenas y la elección de uno en particular dependerá del sistema de comunicación a implementar, la longitud y las condiciones físicas del enlace. Por ejemplo, para radioenlaces a distancias cortas, se necesitarán antenas con baja ganancia y que operen en frecuencias altas, por lo que físicamente serán antenas pequeñas; en caso contrario, si se trata de distancias mayores, la ganancia debe ser alta y la frecuencia de operación debe ser baja, lo que conlleva a utilizar antenas de mayor dimensión y mástiles físicamente más robustos y altos.

El **transmisor** genera una señal modulada a una frecuencia y potencia determinadas que es enviada a la antena, mediante las líneas de transmisión, para ser emitida al espacio libre. Esta señal es captada por otra antena y enviada, también mediante líneas de transmisión, al receptor. El **receptor** se encarga de demodular la señal recibida y procesarla para así obtener y poder interpretar la información recibida.

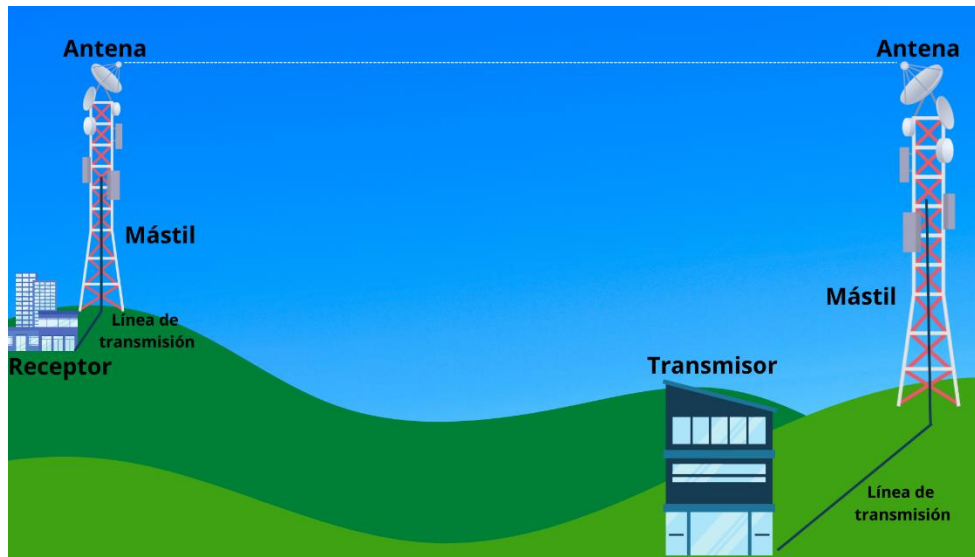


Fig. 1: Estructura básica de un radioenlace

## 1.2 Características de Propagación

La presencia de la superficie terrestre, el aire y los fenómenos meteorológicos, influyen en la propagación de las señales a través de fenómenos como: absorción, atenuación, difracción, interferencia, refracción y reflexión. Es decir, las ondas de la antena emisora llegan a la receptora por otros caminos además de la línea recta o línea de vista que se muestra en la Fig. 1. Por ejemplo, como se puede ver en la Fig. 2, las ondas pueden reflejarse en el suelo, así como también en otros objetos.

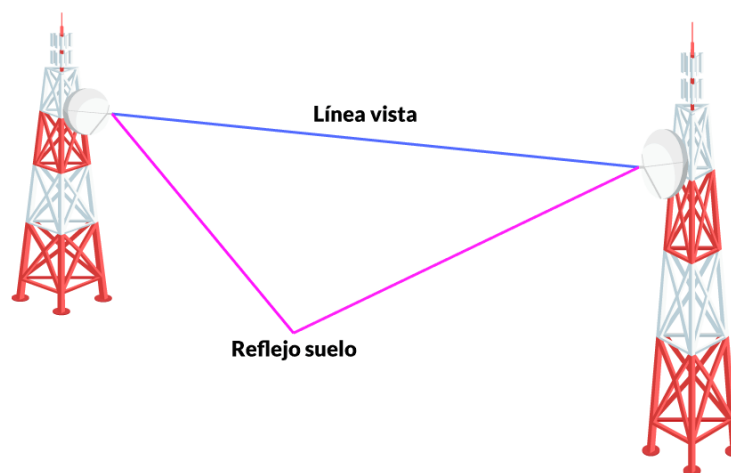


Fig. 2: Reflejo de las ondas en el suelo

### 1.2.1 Modelo de Tierra Plana

Cuando la distancia entre las antenas es corta se puede despreciar la curvatura terrestre y se presentan dos únicas trayectorias posibles, tal como se muestra en la gráfica de la Fig. 3.

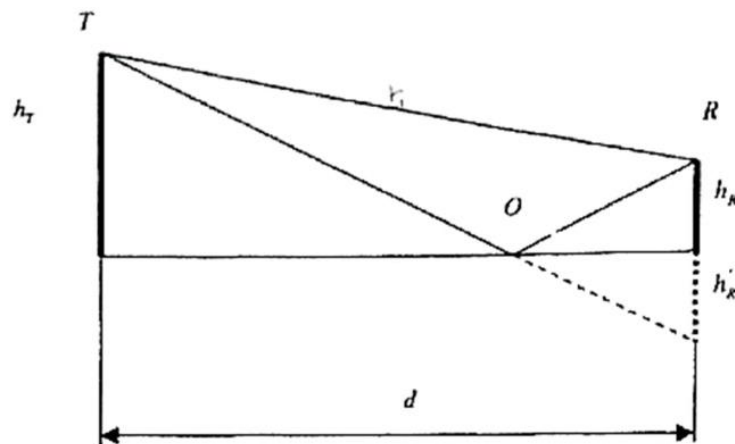


Fig. 3: Modelo de Tierra Plana

Siendo:

$h_T$ : la altura de la antena transmisora

$h_R$ : la altura de la antena receptora

$d$ : distancia entre las antenas transmisora y receptora

$TR = r_1$ : distancia recorrida por la onda directa

$TOR = r_2$ : distancia recorrida por la onda reflejada

$r_1 - r_2$ : diferencia de distancias recorridas por la onda directa y la onda reflejada

Los valores de  $r_1$  y  $r_2$  se pueden obtener mediante las expresiones 1.2.1 y 1.2.2.

$$r_1^2 = (h_T - h_R)^2 + d^2 \quad (1.2.1)$$

$$r_2^2 = (h_T + h_R)^2 + d^2 \quad (1.2.2)$$

Existen dos caminos en que la onda puede llegar al receptor, por lo tanto, la energía que llega a este es la suma vectorial de la composición de estos rayos. En su propagación a través del espacio sufren atenuaciones despreciables, y en caso de considerarlas, la intensidad de campo que llega es función de la inversa de la distancia.

Esta reflexión puede ser constructiva o destructiva, depende de la fase con la que el rayo reflejado incida en la antena receptora.

### 1.2.2 Modelo de Tierra Curva

Cuando la distancia entre ambas antenas es considerable entonces es necesario tener en cuenta la curvatura de la Tierra. Cuando la antena receptora está encima del horizonte de la tierra curva se modifica la geometría y se deben tener en cuenta las alturas efectivas como se muestra a continuación.

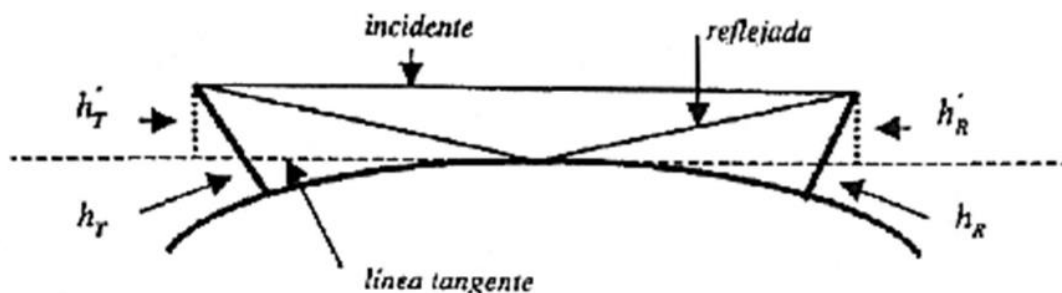


Fig. 4: Modelo de Tierra Curva

Siendo:

$h_T, h_R$ : alturas reales

$h'_T, h'_R$ : alturas efectivas

Se puede observar que la señal recibida será la suma de los rayos directo y reflejado considerando la altura efectiva de las antenas.

Dada una antena de altura limitada a gran distancia puede perder el horizonte óptico respecto a la otra antena debido a la curvatura de la tierra, esto hace que ni el rayo incidente ni el reflejado puedan alcanzarla.

### 1.2.3 Definición del horizonte óptico o visual, el horizonte de radio y corrección de la curvatura terrestre

Se denomina **horizonte óptico o visual** a la distancia entre el pie de la antena y el punto de tangencia con la superficie terrestre de un rayo trazado desde la misma. Éste se calcula con base a la geometría de la Tierra y la altura de la antena mediante la ecuación 1.2.3.

$$d_{HO}(km) = \sqrt{12,74 h_1(m)} \quad (1.2.3)$$

Siendo:

$d_{HO}$ : distancia al horizonte óptico

$h_1$ : altura a la que se encuentra la antena

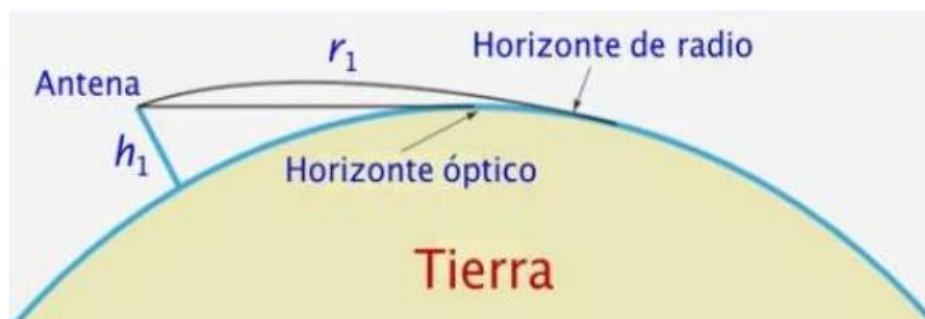


Fig. 5: Diferencia entre el horizonte óptico y el horizonte de radio

En la práctica, se pueden lograr alcances más allá del horizonte óptico debido a que existe un fenómeno de refracción en la troposfera (porción de la atmósfera que está en contacto con la Tierra) debido a las diferencias de densidades entre las capas atmosféricas y esto tiende a curvar el rayo hacia la Tierra. Este efecto es ventajoso debido a que, manteniendo la altura de la antena, se pueden lograr distancias de enlace mayores. De esta manera se define el **horizonte de radio** ( $d_{HR}$ ).

$$d_{HR}(km) = \sqrt{12,74 * K * h_1(m)} \quad (1.2.4)$$

La constante  $K$  es un factor de corrección que se utiliza en el cálculo de radioenlaces para modelar los efectos de la curvatura terrestre y la curvatura del rayo debido a la refracción en la troposfera. Este valor modifica la curvatura terrestre tal como se muestra en la Fig. 6. En Argentina se adopta el valor de  $K$  igual a  $4/3$  para condiciones atmosféricas estándares.

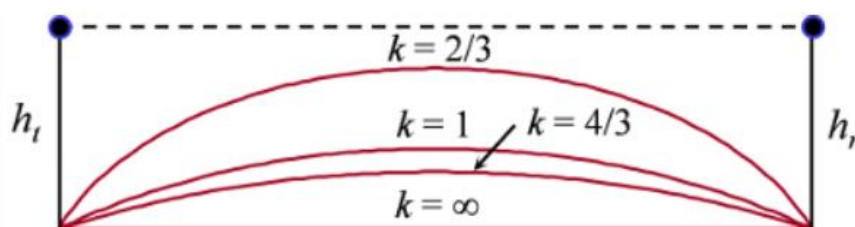


Fig. 6: Factor de corrección  $K$

Mediante la ecuación 1.2.5 se obtiene la **corrección del radio terrestre** considerando los efectos mencionados anteriormente, la cual servirá para obtener las alturas de las antenas en el proceso de diseño.

$$h_l = \frac{d_1 d_2}{2 K a} \quad (1.2.5)$$

Siendo:

$d_1, d_2$ : distancias entre el punto analizado y las antenas

$K$ : factor de corrección (igual a  $4/3$  en Argentina)

$a$ : radio terrestre real (igual a 6370 km)

## 2. Consideraciones de Diseño

En el diseño de radioenlaces son muchos los factores que influyen en la propagación de las ondas entre la antena transmisora y la receptora, siendo las condiciones más importantes para la correcta transmisión de la información: la línea de visión entre las antenas y la definición correcta del rango de frecuencias a utilizar en el enlace. También se debe tener en cuenta que la trayectoria que sigue la onda se encuentra llena de obstáculos y que, además, está afectada por la curvatura terrestre tal como se mencionó anteriormente.

De forma general, los pasos a seguir para diseñar un radioenlace son:

1. Seleccionar el sitio o lugar de instalación
2. Relevamiento del perfil del terreno y zona de Fresnel
3. Cálculo de la altura del mástil para la antena de manera que se permita una correcta visualización.
4. Cálculos completos del radioenlace teniendo en cuenta la trayectoria y los obstáculos que se presentan en la misma (atenuaciones, interferencias, etc.)

### 2.1 Normativa Vigente

Uno de los aspectos fundamentales del proceso de diseño es consultar las normativas vigentes. Dentro de Argentina, la entidad reguladora de las telecomunicaciones es ENACOM (Entidad Nacional de Comunicaciones), la cual es un ente autárquico y descentralizado que funciona en el ámbito de la jefatura del gabinete de ministros de la nación.

Esta institución es la que brinda todas las normas respecto al uso de las diferentes bandas de frecuencias, también ofrece información sobre las aplicaciones y servicios que se pueden brindar en cada banda de frecuencias, las modalidades y formas de otorgamiento de autorizaciones de uso de determinadas frecuencias, normativas relacionadas con los soportes y a infraestructura de las antenas.

Para la asignación de las diferentes frecuencias, ENACOM dispone de un cuadro a través del cual distribuye el espectro de frecuencia en la Argentina, a este cuadro se lo conoce con el nombre de Cuadro de Atribución de Frecuencias de la República Argentina (CABFRA), el cual dispone el ordenamiento, basándose en la frecuencia, de todos los servicios de comunicaciones inalámbricos. Este cuadro relaciona el Reglamento de radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicación, Región 2 (RR UIT-R2) con las atribuciones y normativas de la República Argentina.

### 2.2 Estudio de viabilidad de radioenlace

#### 2.2.1 Zonas de Fresnel

Como se indicó anteriormente, la línea de visión y el rango de frecuencias del enlace son elementos importantes para la correcta transmisión de datos, ya que la onda emitida puede ser difractada, reflejada, atenuadas o absorbida por los obstáculos que se encuentran en su trayecto, y que producen pérdidas que pueden llegar a ser importantes. La onda emitida por el transmisor puede tener múltiples trayectorias para llegar al receptor, como se puede ver en la Fig. 7.

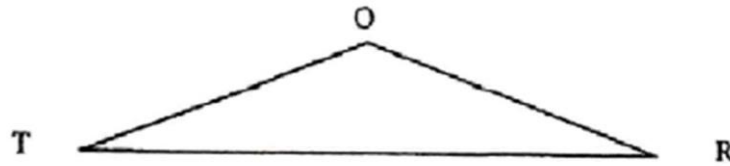


Fig. 7: Distancias recorridas por la onda directa y reflejada

Se puede observar que cada trayectoria tendrá una distancia de recorrido distinta, estas distancias pueden ser expresadas en función de longitudes de onda mediante la expresión 2.2.1.

$$TR + TOR = TR + n \frac{\lambda}{2} \quad (2.2.1)$$

Estos caminos se pueden considerar como distancias cofocales de un elipsoide de revolución. Si se analizan los diferentes caminos, se pueden dibujar círculos concéntricos dentro del modelo con las radios correspondientes a  $n = 1, 2, 3 \dots$  tal como se muestra en la Fig. 8.

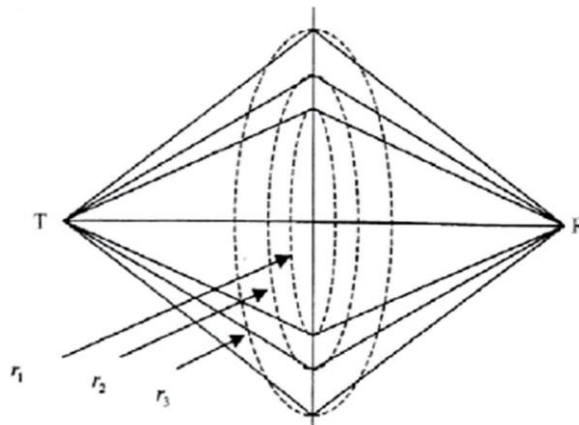


Fig. 8: Distancias recorridas correspondientes a diferentes valores de  $n$

Estos son denominados los **radios de Fresnel**, que acotan cada camino según el valor de  $n$ . Básicamente, sirven para determinar qué zonas del espacio entre el emisor y el receptor deben estar libres para evitar interferencias destructivas que causen una reducción de la potencia de la señal. Estas zonas se denominan **zonas de Fresnel** (Fig. 9).

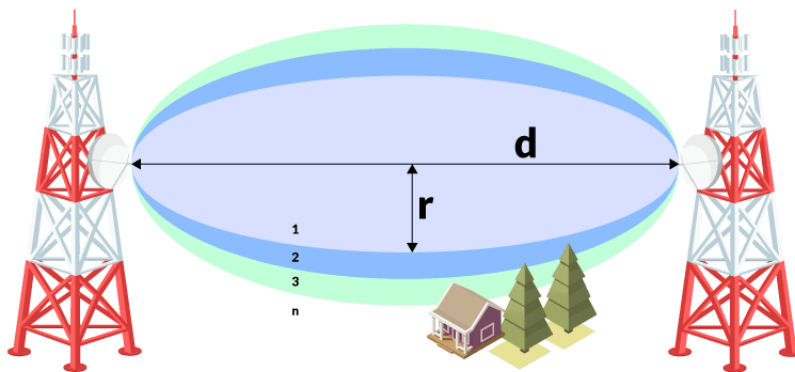


Fig. 9: Zonas de Fresnel

Existe un número infinito de zonas ( $n$ ) pero a partir de la 3° zona los efectos de interferencia destructiva se hacen despreciables.

Las zonas de Fresnel se calculan mediante la siguiente expresión:

$$F_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (2.2.2)$$

Siendo:

$n$ : número de zona (1, 2, 3, ...)

$\lambda$ : longitud de onda de la señal emitida

$d_1, d_2$ : distancia del punto analizado hasta las antenas

También se puede calcular las zonas en función de la frecuencia de operación, sabiendo que  $\lambda = \frac{c}{f}$ .

$$F_n[km] = 547,72 \sqrt{\frac{n d_1[km] d_2[km]}{f[MHz](d_1 + d_2)[km]}} \quad (2.2.3)$$

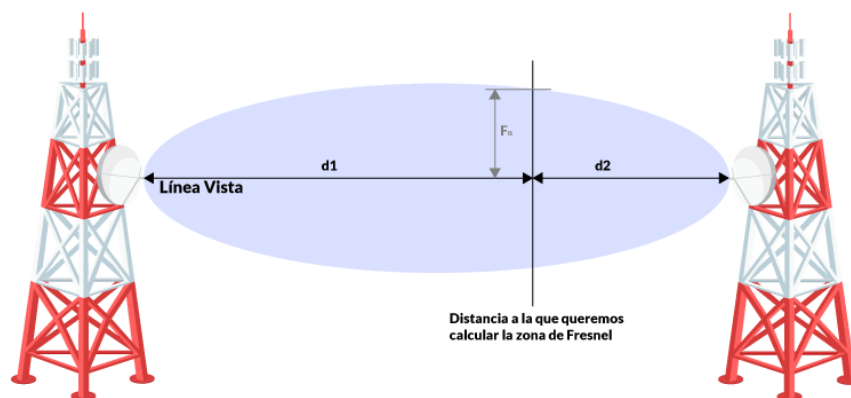


Fig. 10: Cálculo de zonas de Fresnel

### 2.3 Determinación de la altura de los mástiles

Teniendo los datos del radio de Fresnel, la corrección del radio de la Tierra y los datos del perfil de elevación del terreno en la trayectoria del enlace es posible determinar la altura de los mástiles de las antenas. El método generalmente utilizado es gráfico y se realiza mediante el siguiente procedimiento.

Primeramente, se obtiene la representación de la curva terrestre entre las dos antenas en función de la constante K (perfil plano). Luego, a esa curva se le suman los valores de las cotas del perfil de elevación del terreno (perfil no plano). Por último, se le debe sumar el radio de Fresnel en cada punto. De esta forma queda determinada la zona prohibida por la cual no puede atravesar el haz. Finalmente, para obtener la altura de las antenas, se traza una recta por encima del límite de la zona prohibida la cual representa la línea de vista. Por practicidad se suele establecer que las alturas de ambos mástiles sean iguales. En la Fig. 11 se muestra un ejemplo utilizando este método donde la altura resultante de los mástiles es de 20 metros.

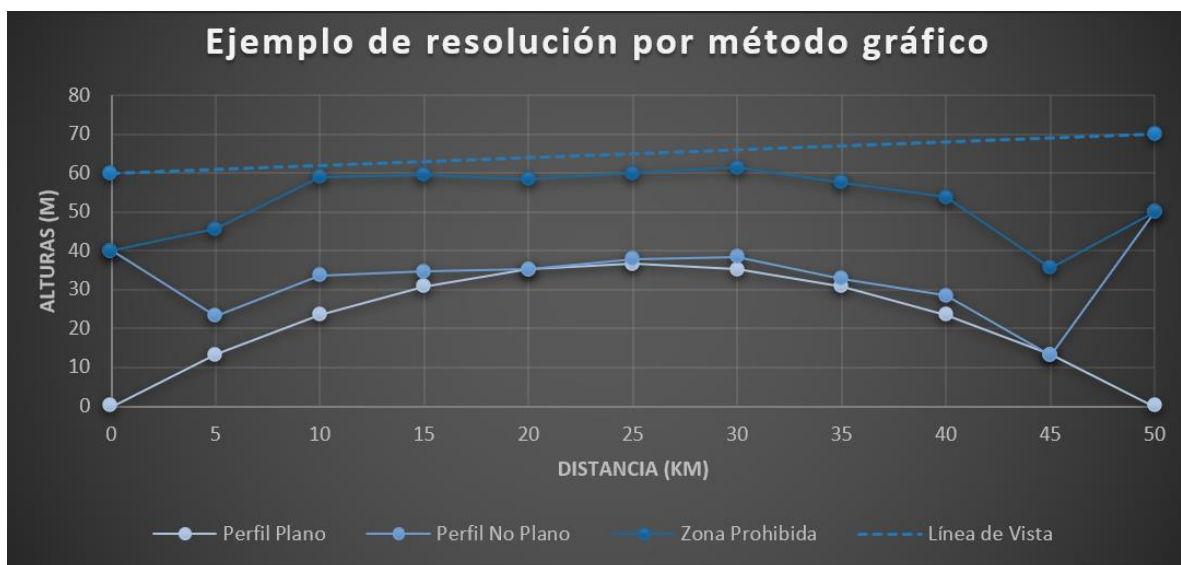


Fig. 11: Ejemplo de determinación de altura de los mástiles mediante método gráfico

## 2.4 Pérdidas y atenuación en radioenlaces

Las pérdidas en los radioenlaces pueden surgir por diferentes factores, como por ejemplo, algunas pueden estar dadas por los dispositivos utilizados como conectores o líneas de transmisión. También, como se mencionó anteriormente, algunas pueden estar dadas por interferencias o por obstáculos que se presentan en la trayectoria de las ondas. Para evitar estas últimas, se recomienda tener libre la primera zona de Fresnel en un 100% para enlaces digitales y en un 60% para enlaces analógicos.

### 2.4.1 Influencia de los efectos meteorológicos

Los fenómenos meteorológicos como la lluvia, el granizo y la niebla producen absorción y dispersión en las ondas electromagnéticas. Este efecto tiene más intensidad cuanto mayor sea el tamaño y la cantidad de gotas de lluvia. Con la niebla, el efecto es similar, pero con menor intensidad.

Se considera relevante la atenuación por lluvia cuando se opera en frecuencias iguales o superiores a 6 GHz, es decir que dichas pérdidas deben considerarse en los cálculos de diseño. Para calcular la atenuación por lluvia puede utilizarse la recomendación UIT-R 838. La atenuación específica  $\gamma \left[ \frac{dB}{km} \right]$  se obtiene a partir de la intensidad de lluvia  $R \left[ \frac{mm}{h} \right]$  mediante la siguiente expresión.

$$\gamma = kR^\alpha \quad (2.4.1)$$

Donde  $k$  y  $\alpha$  son constantes que dependen de la frecuencia  $f [GHz]$  en la gama de 1 a 1000 GHz y de la polarización de las ondas electromagnéticas. Estas constantes pueden ser calculadas mediante una serie de ecuaciones que se presentan en las Rec. UIT-R P.838-3, sin embargo, para facilitar la obtención de los parámetros dicha recomendación presenta una serie de graficas y una tabla donde se indican los valores numéricos de los coeficientes para determinadas frecuencias, una sección de dicha tabla se muestra en la Fig. 12. Los subíndices  $H$  y  $V$  representan la polarización horizontal y vertical, respectivamente.

A su vez para la predicción de la atenuación por lluvia se necesita información de la estadística de intensidad de precipitación. En la Rec. UIT-R PN.837 se proporcionan métodos para obtener los valores de  $R$  durante determinado porcentaje de tiempo y para distintas zonas hidrometeorológicas mundiales.

**Coefficientes que dependen de la frecuencia para estimar la atenuación específica debida a la lluvia utilizando las ecuaciones (4), (5) y (1)**

Frecuencia (GHz)	$k_H$	$\alpha_H$	$k_V$	$\alpha_V$
1	0,0000259	0,9691	0,0000308	0,8592
1,5	0,0000443	1,0185	0,0000574	0,8957
2	0,0000847	1,0664	0,0000998	0,9490
2,5	0,0001321	1,1209	0,0001464	1,0085
3	0,0001390	1,2322	0,0001942	1,0688
3,5	0,0001155	1,4189	0,0002346	1,1387
4	0,0001071	1,6009	0,0002461	1,2476
4,5	0,0001340	1,6948	0,0002347	1,3987
5	0,0002162	1,6969	0,0002428	1,5317
5,5	0,0003909	1,6499	0,0003115	1,5882
6	0,0007056	1,5900	0,0004878	1,5728
7	0,001915	1,4810	0,001425	1,4745
8	0,004115	1,3905	0,003450	1,3797
9	0,007535	1,3155	0,006691	1,2895

*Fig. 12: Coeficientes para estimar la atenuación por lluvia*

#### 2.4.2 Fading o desvanecimiento temporal de la onda

Este efecto se produce cuando las variaciones más o menos rápidas de las condiciones meteorológicas hacen variar los valores del índice de refracción. Estas variaciones pueden alterar el patrón de radiación de la antena transmisora, sacando la energía de la dirección correcta; y/o también, variar la fase relativa de las componentes que forman el campo resultante en la antena receptora.

Este efecto se puede sintetizar como una pérdida instantánea de la señal por efectos de la atmósfera. En general las variaciones del índice de refracción hacen que el haz se curve de una manera muy distinta por lo que la señal se va por otro camino y se pierde. Esto obliga a redireccionar constantemente la antena para encontrar el haz, lo cual es poco práctico.

Sin embargo, como la onda ataca como frente por lo menos en el primer radio de Fresnel, es posible sobredimensionar en potencia el enlace para superar estos problemas.

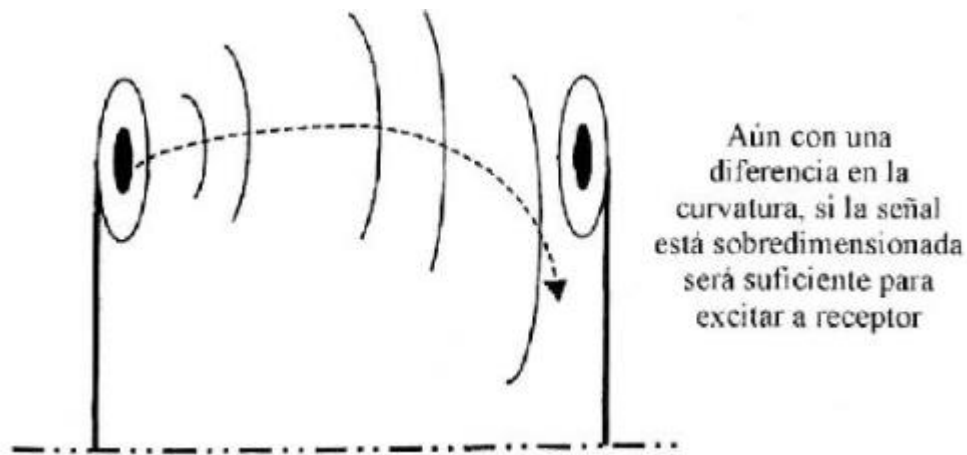


Fig. 13: Fading y sobredimensionamiento en potencia del enlace

Una muy buena aproximación del cálculo de las pérdidas adicionales adicionadas por el fading se obtiene de la ecuación de confiabilidad de Bennett-Vignat (ecuación 2.4.2).

$$M_f = -30 \log(d) - 10 \log(6\sigma bf) + 10 \log(1 - Q) + 70 \quad (2.4.2)$$

Donde el primer término tiene en cuenta los efectos de la trayectoria múltiple, el segundo los aspectos denominados de sensibilidad de la superficie rocosa, el tercero es la confiabilidad y el cuarto es una constante. A efectos de poder aplicar con factibilidad la ecuación, en la literatura se sugiere algunos valores en función al tipo de terreno:

$M_f$ : margen adicional de pérdida en dB

$d$ : distancia del enlace en km

$\sigma$ : factor de rugosidad (4 para agua o tierra muy llana, 1 para tierras intermedias, 0,25 para tierras muy rugosas o montañosas)

$b$ : factor de conversión de probabilidad del peor mes de una probabilidad anual (1 para conversión básica, 0,5 para áreas calientes y húmedas, 0,25 para tierras mediterráneas y 0,125 para zonas secas o montañosas)

$f$ : frecuencia en GHz

$Q$ : porcentaje de calidad esperado en forma decimal (0 a 1)

### 2.4.3 Atenuación por obstáculos

La atenuación producida por obstáculos debe ser considerada como una pérdida que se agrega dentro del margen de fading. Debido a la complejidad de los obstáculos en cuanto a formas y características, se consideran dos tipos de obstáculos:

- Filo de cuchillo, cuando su radio de curvatura  $R_C \leq 0$ .
- Forma redondeada, cuando  $R_C \geq 0$ .

Para calcular esta atenuación primeramente se obtiene  $R_C$  mediante la expresión 2.4.3 cuyos términos se describen en la Fig. 14.

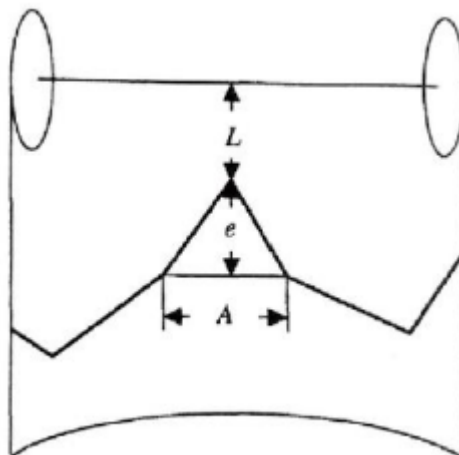


Fig. 14: Cálculo de  $R_C$

$$R_C = \frac{A^2}{8e} \quad (2.4.3)$$

Si se trata de un **obstáculo tipo filo de cuchillo**, pueden presentarse dos situaciones tal como se muestra en la Fig. 15.

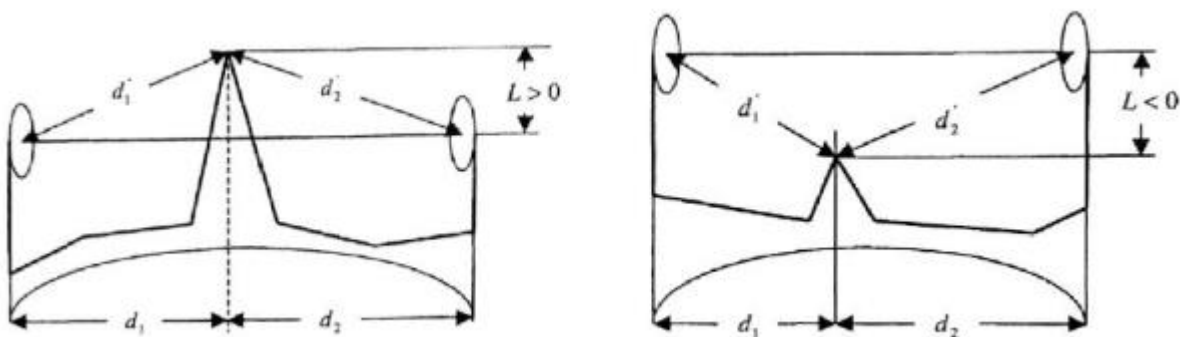


Fig. 15: Cálculo de atenuación por obstáculo tipo filo de cuchillo

El valor de la atenuación, expresado en dB, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$A_{FC} = 6,4 + 200 \log \left[ \left( \sqrt{V^2 + 1} + V \right) \right] \quad (2.4.4)$$

Donde el valor de  $V$  está dado por:

$$V = L \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (2.4.5)$$

En cambio, si se trata de un **obstáculo de forma redondeada**, la atenuación se puede obtener mediante la siguiente expresión aproximada en dB, válida para  $K = 4/3$ .

$$A_{OR} = P(V) + P(q) + P(s) \quad (2.4.6)$$

Donde:

$$P(V) = 6,4 + 200 \log \left[ \left( \sqrt{V^2 + 1} + V \right) \right] \quad (2.4.7)$$

$$V = 2 \operatorname{sen} \left( \frac{\theta}{2} \right) \sqrt{\frac{2 \left( d_1 + \frac{R_c \theta}{2} \right) \left( d_2 + \frac{R_c \theta}{2} \right)}{\lambda d}} \quad (2.4.8)$$

$$P(q) = 7,912q - 2,018q^2 + 3,36q^3 - 0,754q^4 \quad (2.4.9)$$

$$q^2 = \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \sqrt{\frac{\pi}{\lambda}} \quad (2.4.10)$$

$$P(s) = 12s \quad \text{para } s < 4 \quad (2.4.11)$$

$$P(s) = 17,1s - 62 - 20 \log(s) \quad \text{para } s > 4 \quad (2.4.12)$$

$$s = \sqrt{\frac{\pi R_c}{\lambda}} \theta \quad (2.4.13)$$

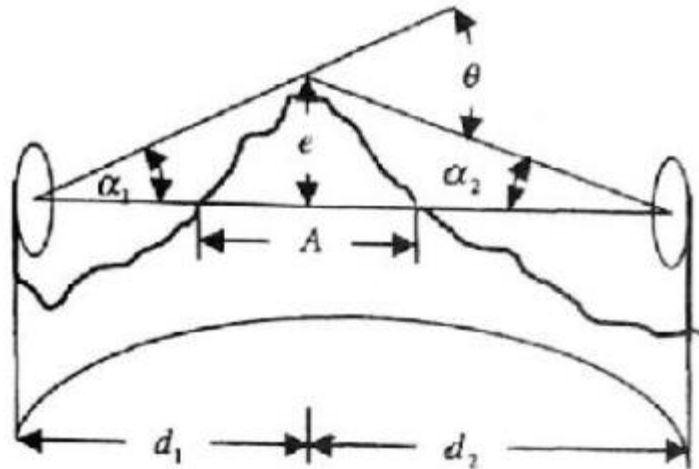


Fig. 16: Cálculo de atenuación por obstáculo de forma redondeada

#### 2.4.4 Atenuación en el espacio libre

Otro efecto para tener en cuenta es la atenuación en el espacio libre. Si se considera que el radioenlace se encuentra despejado de obstáculos, parte de la señal transmitida se pierde y no llega a la antena receptora. Esto sucede porque el frente de onda, al momento de salida de la antena transmisora, tiene una densidad de potencia determinada, es decir, la potencia está distribuida sobre un área determinada. A medida que el frente de onda avanza, el área crece y la densidad de potencia disminuye. Es por ello por lo que, para recibir la mayor potencia posible, la antena receptora debe ser lo más grande posible.

Sin embargo, en la práctica el área con el que se captura la señal en la antena receptora es menor al área del frente de onda y por eso no se recibe toda la señal, esto se puede observar en la Fig. 17. Esta incapacidad de recibir la totalidad de la señal o la diferencia que existe entre lo que se transmite y lo que se recibe se denomina atenuación en el espacio libre.

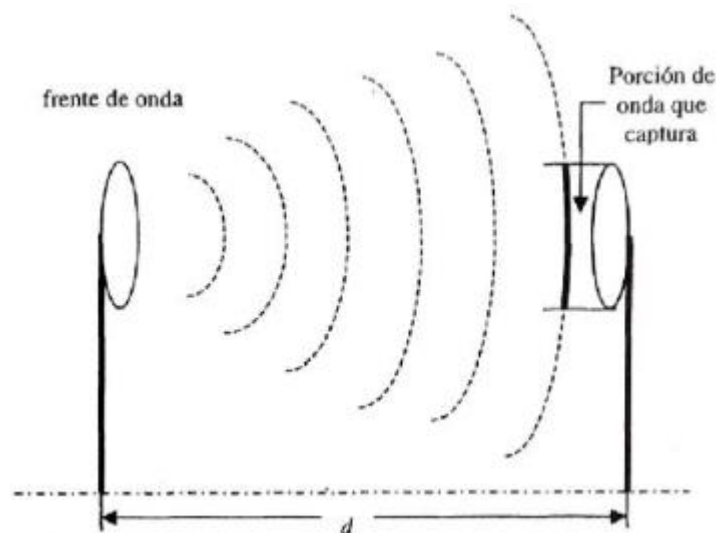


Fig. 17: Atenuación en el espacio libre

La atenuación en el espacio libre se obtiene realizando el cociente entre la potencia recibida y la potencia transmitida, esto se representa en la siguiente ecuación.

$$A_o = \frac{P_R}{P_T} = \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.4.14)$$

Se puede observar que la atenuación está en función de la frecuencia y la distancia. Para obtener la atenuación en dB, la frecuencia debe ser expresada en MHz, la distancia en km. A tal efecto se expresa la longitud de ondas en km en función de la frecuencia:

$$\lambda = \frac{0,3}{f} \quad (2.4.15)$$

Reemplazando (2.3.15) en (2.3.14) se obtiene la expresión de la atenuación en veces.

$$A_o = \left( \frac{0,3}{4\pi f d} \right)^2 \quad (2.4.16)$$

La cual expresada en dB resulta:

$$A_o = -20 \log(f) - 20 \log(d) - 32,44 \quad (2.4.17)$$

### 2.5 Umbral de ruido y sensibilidad

Para el estudio del ruido en sistemas de comunicaciones se hace uso de la relación señal ruido que se define como el cociente de la potencia de la señal y la potencia del ruido.

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{Potencia de la señal}}{\text{Potencia del ruido}} \quad (2.5.1)$$

Expresado en dB, resulta:

$$\left( \frac{S}{N} \right)_{dB} = 10 \log \left( \frac{S}{N} \right) \quad (2.5.2)$$

La relación señal ruido proporciona una medida de la calidad de la señal. Esto depende tanto del nivel de la señal recibida como del ruido total, es decir, del ruido procedente de fuentes externas y el ruido inherente al sistema. En el diseño de sistemas se desea que la relación señal ruido tenga un valor tan elevado como sea posible, pero por lo general esto implica aumentar considerablemente los costos de implementación del sistema. Un valor adecuado de esta relación es aquel que permite considerar que la señal recibida no tiene defectos, es decir, que la señal recibida es una reproducción fiel de la señal transmitida.

## 2.6 Ecuación del Enlace

Una vez analizados todos los elementos del radioenlace, es necesario realizar los cálculos que para terminar de definir las características que deben tener cada uno de ellos y que permitirán que se realice la comunicación. Para ello se utiliza la ecuación de equilibrio desde el punto de vista de la potencia que rige un enlace.

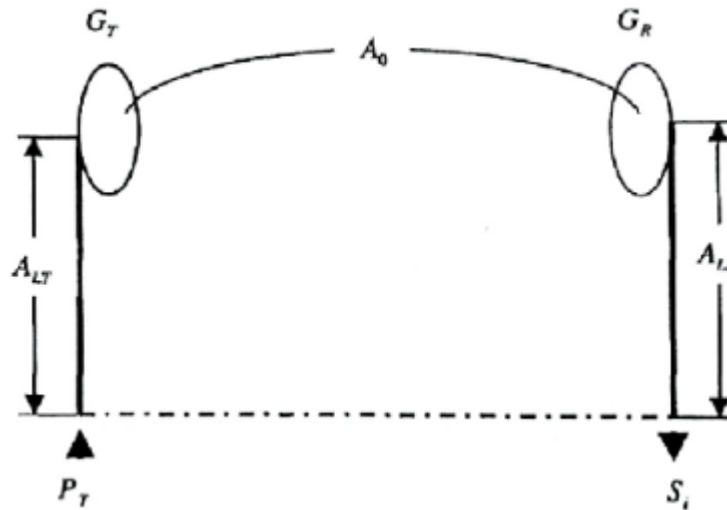


Fig. 18: Elementos que intervienen en un radioenlace

Se puede expresar que la señal mínima que debe llegar al receptor es la sensibilidad  $S_i$ , y esta es la resultante de la potencia del transmisor ( $P_T$ ) más las ganancias menos las pérdidas. Las pérdidas están representadas por las líneas de transmisión y recepción ( $A_{LT}$  y  $A_{LR}$ ), los conectores ( $A_{CT}$  y  $A_{CR}$ ), el espacio libre ( $A_0$ ) y el margen fading ( $M_F$ ). Las ganancias se obtienen de las antenas transmisoras y receptoras ( $G_T$  y  $G_R$ ). Teniendo todo esto en cuenta, la ecuación de equilibrio en dB se muestra a continuación.

$$S_i = P_T + A_{LT} + A_{CT} + G_T + A_0 + M_F + G_R + A_{CR} + A_{LR} \quad (2.6.1)$$

Donde la sensibilidad y la potencia se encuentran en dBm, las pérdidas en dB y las ganancias en dBi.

Las atenuaciones de los conectores vienen especificadas en las hojas de datos y es muy común usar -0,2 dB. Las atenuaciones de las líneas de transmisión suelen expresarse en dB/metros y se debe tener cuidado con las ganancias de las antenas debido a que éstas suelen estar expresadas en dBd.

En general se conocen los datos de los equipos transmisores y receptores, debiendo calcular solamente la ganancia de las antenas para equilibrar el enlace.

### 3. Ejemplo de Aplicación

En algunas áreas rurales o pueblos que rodean la ciudad de Oberá, Misiones, es muy frecuente encontrarse con la imposibilidad de acceso a una conexión de Internet. En esta sección, se toma como ejemplo una escuela rural ubicada en Villa Armonía. Para poder brindarle acceso a Internet tanto a la escuela como a las viviendas y establecimientos de la zona, se realizó el diseño de un radioenlace entre el punto geográfico donde se encuentra la misma y un punto cercano a la zona urbana de Oberá donde sí se tiene acceso a internet.

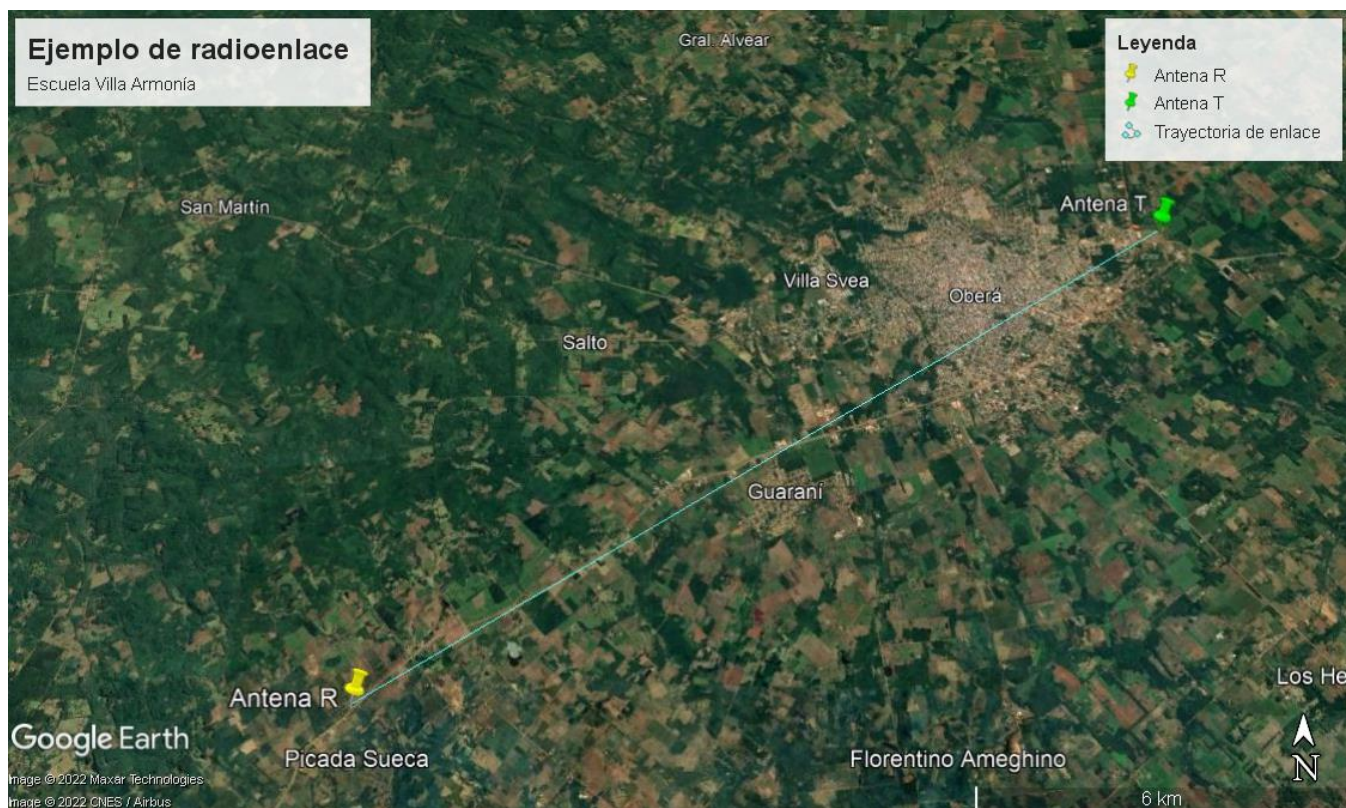


Fig. 19: Vista satelital de la ubicación geográfica de las antenas

Se buscó principalmente que el radioenlace diseñado cumpla con las siguientes especificaciones:

- $Q_{\%} = 99,99\%$
- $f = 5,825 \text{ GHz} = 5825 \text{ MHz}$

#### 3.1 Determinación de la altura de los mástiles de las antenas

En la Fig. 19 se puede observar la ubicación geográfica propuesta de las antenas receptora y transmisora, las cuales están separadas por una distancia de 18 km. Mediante el software *Google Earth Pro* se obtuvo el perfil de elevación del terreno de la trayectoria del enlace, el cual se muestra en la Fig. 20.



Fig. 20: Perfil de elevación del terreno en la trayectoria del enlace

Se procedió a dividir dicha trayectoria en cincuenta puntos y a determinar primeramente la curvatura terrestre en cada punto. Luego, se adicionó a cada punto la cota proporcionada por el software. Finalmente, se sumó el primer radio de Fresnel para así obtener la zona prohibida y la altura de los mástiles de las antenas. En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos para cada punto y en la Fig. 21 se muestra la gráfica resultante de dichos puntos mediante la cual se obtuvieron las alturas. En este caso, la altura de los mástiles resultó en 35 metros.

Cabe destacar que en los perfiles obtenidos no se tienen en cuenta los obstáculos que puedan presentarse en la trayectoria como árboles, edificios, etc.

Tabla 1: Valores obtenidos para determinar la altura de los mástiles de las antenas

Distancia (km)	Perfil Plano (m)	Elevación (m)	Perfil del terreno (m)	Radio de Fresnel (m)	Zona prohibida (m)
0,00	0,00	337,00	337,00	0,00	337,00
0,36	0,37	327,00	327,37	4,27	331,65
0,72	0,73	340,00	340,73	5,98	346,71
1,08	1,08	331,00	332,08	7,25	339,32
1,44	1,40	328,00	329,40	8,28	337,68
1,80	1,72	333,00	334,72	9,15	343,87
2,16	2,01	344,00	346,01	9,92	355,93
2,52	2,30	341,00	343,30	10,59	353,88
2,88	2,56	344,00	346,56	11,19	357,75
3,24	2,82	341,00	343,82	11,72	355,54
3,60	3,05	348,00	351,05	12,21	363,26
3,96	3,27	355,00	358,27	12,64	370,91
4,32	3,48	343,00	346,48	13,03	359,51
4,68	3,67	335,00	338,67	13,38	352,05
5,04	3,85	329,00	332,85	13,70	346,55

Distancia (km)	Perfil Plano (m)	Elevación (m)	Perfil del terreno (m)	Radio de Fresnel (m)	Zona prohibida (m)
5,40	4,01	331,00	335,01	13,98	348,99
5,76	4,15	335,00	339,15	14,23	353,38
6,12	4,28	327,00	331,28	14,45	345,73
6,48	4,39	338,00	342,39	14,65	357,04
6,84	4,49	362,00	366,49	14,81	381,30
7,20	4,58	353,00	357,58	14,95	372,53
7,56	4,65	369,00	373,65	15,06	388,71
7,92	4,70	359,00	363,70	15,15	378,85
8,28	4,74	365,00	369,74	15,21	384,95
8,64	4,76	365,00	369,76	15,24	385,00
9,00	4,77	373,00	377,77	15,26	393,02
9,36	4,76	364,00	368,76	15,24	384,00
9,72	4,74	356,00	360,74	15,21	375,95
10,08	4,70	353,00	357,70	15,15	372,85
10,44	4,65	350,00	354,65	15,06	369,71
10,80	4,58	330,00	334,58	14,95	349,53
11,16	4,49	320,00	324,49	14,81	339,30
11,52	4,39	308,00	312,39	14,65	327,04
11,88	4,28	326,00	330,28	14,45	344,73
12,24	4,15	300,00	304,15	14,23	318,38
12,60	4,01	292,00	296,01	13,98	309,99
12,96	3,85	300,00	303,85	13,70	317,55
13,32	3,67	313,00	316,67	13,38	330,05
13,68	3,48	337,00	340,48	13,03	353,51
14,04	3,27	350,00	353,27	12,64	365,91
14,40	3,05	368,00	371,05	12,21	383,26
14,76	2,82	375,00	377,82	11,72	389,54
15,12	2,56	354,00	356,56	11,19	367,75
15,48	2,30	326,00	328,30	10,59	338,88
15,84	2,01	346,00	348,01	9,92	357,93
16,20	1,72	360,00	361,72	9,15	370,87
16,56	1,40	378,00	379,40	8,28	387,68
16,92	1,08	375,00	376,08	7,25	383,32
17,28	0,73	382,00	382,73	5,98	388,71
17,64	0,37	373,00	373,37	4,27	377,65
18,00	0,00	384,00	384,00	0,00	384,00

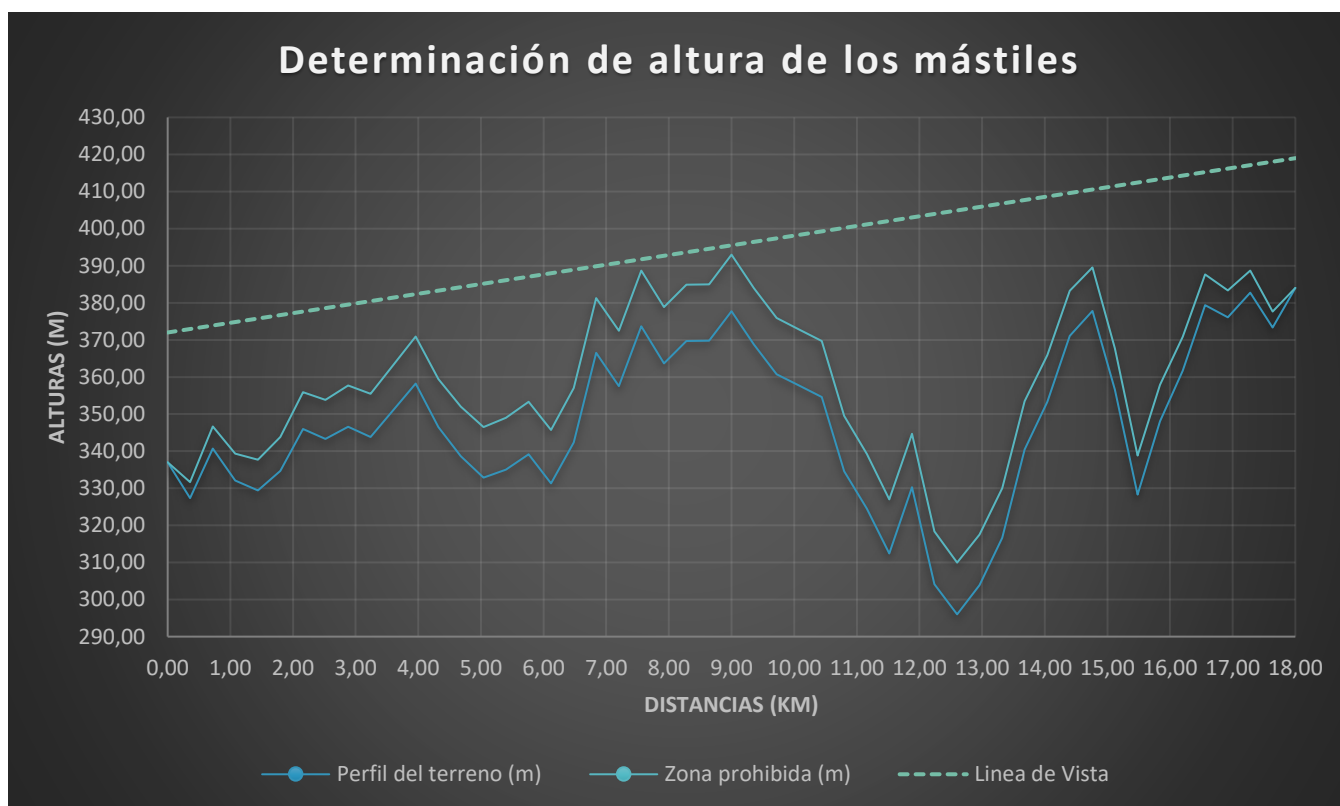


Fig. 21: Determinación de altura de los mástiles de las antenas mediante método gráfico

### 3.2 Cálculo de la Ecuación del Enlace

La frecuencia de 5,8 GHz se encuentra en la banda ISM, por lo que la máxima potencia que se puede transmitir es de 1 W. Se planteó la ecuación de equilibrio de potencias para definir la ganancia de las antenas, teniendo cuenta esta limitación y que un equipo utilizado para estos fines tiene una sensibilidad de alrededor de los -80 dBm. Además, considerando que la zona geográfica equivale a  $\sigma=1$  y  $b=0,5$ , se calculó la suma  $G_T + G_R$  de la ecuación de equilibrio de potencias despreciando las pérdidas de las líneas de transmisión.

$$G_T + G_R = -(P_T + A_{LT} + A_{CT} + A_0 + M_F + A_{CR} + A_{LR} - S_i) \quad (3.2.1)$$

En la Tabla 2 se muestran los datos que se tienen disponibles, mientras que en la Tabla 3 se muestran las atenuaciones y ganancias calculadas mediante dichos datos.

Tabla 2: Datos del enlace

Datos	
<b>f (MHz)</b>	5825
<b>d (km)</b>	18
<b>Q (%)</b>	99,99
<b>b</b>	0,5
<b><math>\sigma</math></b>	1
<b>P<sub>T</sub> (dBm)</b>	30
<b>S<sub>i</sub> (dBm)</b>	-80

Tabla 3: Atenuaciones y ganancias calculadas

Atenuaciones y ganancias	
<b>A<sub>LT</sub> (dB)</b>	0,0
<b>A<sub>LR</sub> (dB)</b>	0,0
<b>A<sub>CT</sub> (dB)</b>	-2,0
<b>A<sub>CR</sub> (dB)</b>	-2,0
<b>A<sub>0</sub> (dB)</b>	-132,8
<b>M<sub>f</sub> (dB)</b>	-20,1
<b>GT + GR</b>	46
<b>GT (dBi)</b>	23
<b>GR (dBi)</b>	23

Como se puede observar, se obtuvo que tanto la ganancia de la antena receptora como la de la antena transmisora debe ser como mínimo de 23 dBi para garantizar que se cumplan los requerimientos del enlace.

### 3.3 Contraste con resultados obtenidos mediante software de simulación

Para verificar los resultados obtenidos se contrastaron los mismos con los obtenidos en tres softwares de simulación: *Radiomobile*, *WiFi – Fresnel* e *ISP Design Center*.

#### 3.3.1 Radiomobile

*Radiomobile* es un software gratuito desarrollado por *Roger Coudé*. Este programa tiene en cuenta todos los parámetros mencionados en este informe y también facilita el acceso al perfil del terreno que se encuentra entre las antenas del enlace junto a sus respectivas zonas de Fresnel. Solamente se debe seleccionar la ubicación geográfica de ambos puntos y una altura inicial de las antenas.

En la Fig. 22 y en la Fig. 23 se muestran la gráfica del perfil de elevación y las especificaciones de las antenas obtenidas con el software.

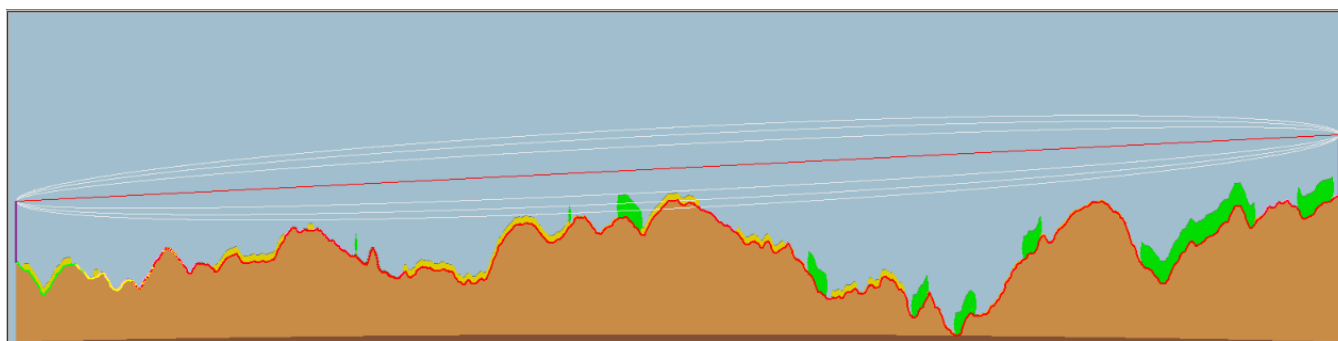


Fig. 22: Gráfica del perfil de elevación de la trayectoria del enlace y las zonas de Fresnel obtenida con el software *Radiomobile*

Estudio del radio enlace 2****			
<b>Antena R (1)</b>		<b>(2) Antena T2</b>	
Latitud	-27.559474 °	Latitud	-27.473666 °
Longitud	-55.235546 °	Longitud	-55.081136 °
Elevación del terreno	339.9 m	Elevación del terreno	383.0 m
Altura de la antena	40.0 m	Altura de la antena	40.0 m
Azimuth	57.96 TN   73.60 MG °	Azimuth	237.89 TN   253.67 MG °
Inclinación	0.06 °	Inclinación	-0.22 °
<b>Sistema de radio</b>		<b>Propagation</b>	
Potencia TX	30.00 dBm	Pérdida en espacio libre	132.80 dB
Pérdida en cable TX	2.00 dB	Pérdida por obstrucción	0.88 dB
Ganancia de antena TX	23.00 dBi	Pérdida por bosque	0.00 dB
Ganancia de antena RX	23.00 dBi	Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida en cable RX	2.00 dB	Pérdida estadística	41.52 dB
Sensibilidad RX	-80.00 dBm	Pérdida total	175.19 dB
<b>Performance</b>			
Distance			17.970 km
Precisión			10.0 m
Frecuencia			5825.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente			125.893 W
Ganancia del sistema			152.00 dB
Fiabilidad requerida			99.900 %
Señ recibida			-103.19 dBm
Señ recibida			1.55 µV
Márgen de escucha			-23.20 dB

Fig. 23: Especificaciones de las antenas transmisora y receptora, obtenidas con el software *Radiomobile*

Como se puede observar la altura de los mástiles obtenida es de 40 metros y las ganancias de las antenas deben ser de 23 dBi, los cuales son valores cercanos a los obtenidos mediante el cálculo.

### 3.3.2 WiFi – Fresnel

*WiFi – Fresnel* es una aplicación para dispositivos móviles con sistema operativo *Android*. En la Fig. 24, se muestra el entorno de la aplicación en el cual se debe seleccionar las ubicaciones geográficas de ambos puntos del enlace, elegir la frecuencia de operación y las alturas de los mástiles. También permite agregar obstáculos en la trayectoria como edificios o árboles. Una vez configurado todo esto, la aplicación brinda el perfil de elevación de la trayectoria del enlace y la gráfica de las primeras tres zonas de Fresnel.

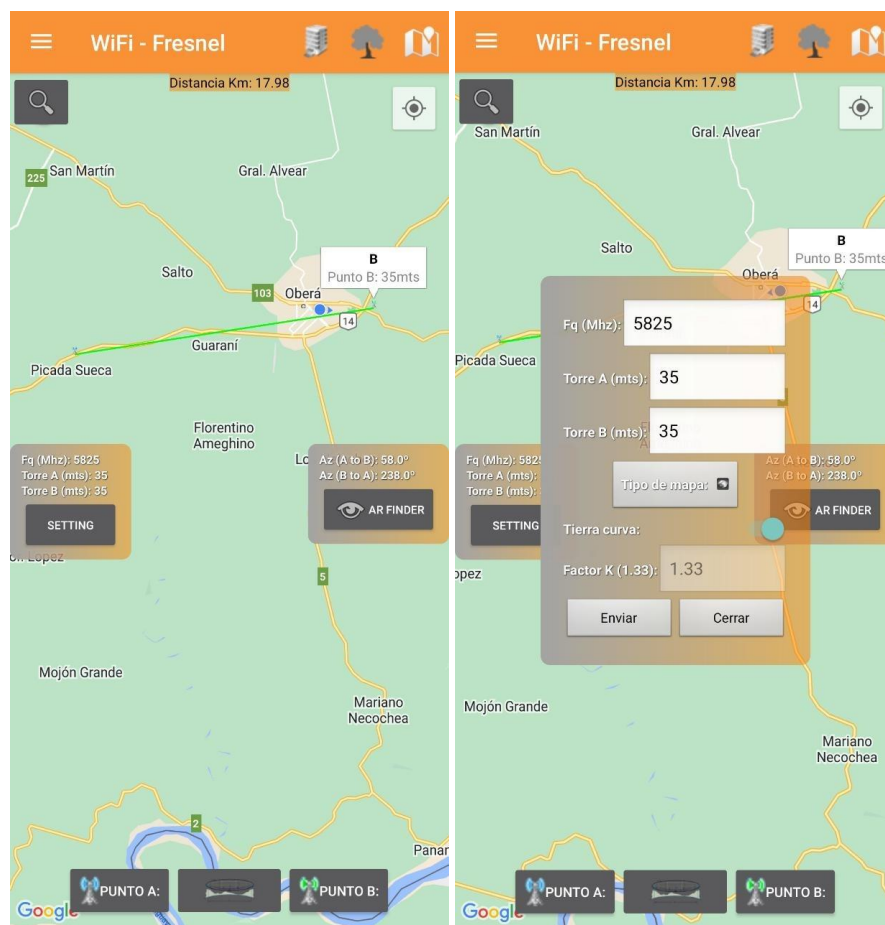


Fig. 24: Entorno de la aplicación WiFi – Fresnel

En este caso, para no tener obstrucciones dentro de la primera zona de Fresnel, tal como se muestra en la Fig. 25 fue necesario configurar las alturas de los mástiles a 38 metros.



Fig. 25: Gráfica de las zonas de Fresnel obtenidas con la aplicación WiFi - Fresnel

### 3.3.3 ISP Design Center

*ISP Design Center* es una aplicación web desarrollada por la empresa *Ubiquiti Networks* para el cálculo de radioenlaces punto a punto (PtP) y punto a multipuntos (PtMP). Como se trata de una empresa que fabrica sus propios equipamientos para proveedores de servicios de internet (WISP), solamente se pueden utilizar estos para la simulación.

En este caso, seleccionando una altura de 35 metros para los mástiles y una ganancia de 23 dBi para las antenas se obtenía un enlace con -79 dBm de intensidad de señal (Fig. 26). Por lo tanto, se aumentó la altura a 36 metros y, de esta forma, se obtuvo un enlace con -57 dBm de intensidad de señal (Fig. 27), lo cual es bastante aceptable.

Además, la aplicación ofrece los datos de los modelos de antena que se podrían utilizar para efectuar el enlace y sus correspondientes precios (Fig. 28). Lo cual resulta útil para estimar el costo económico de la implementación del radioenlace.

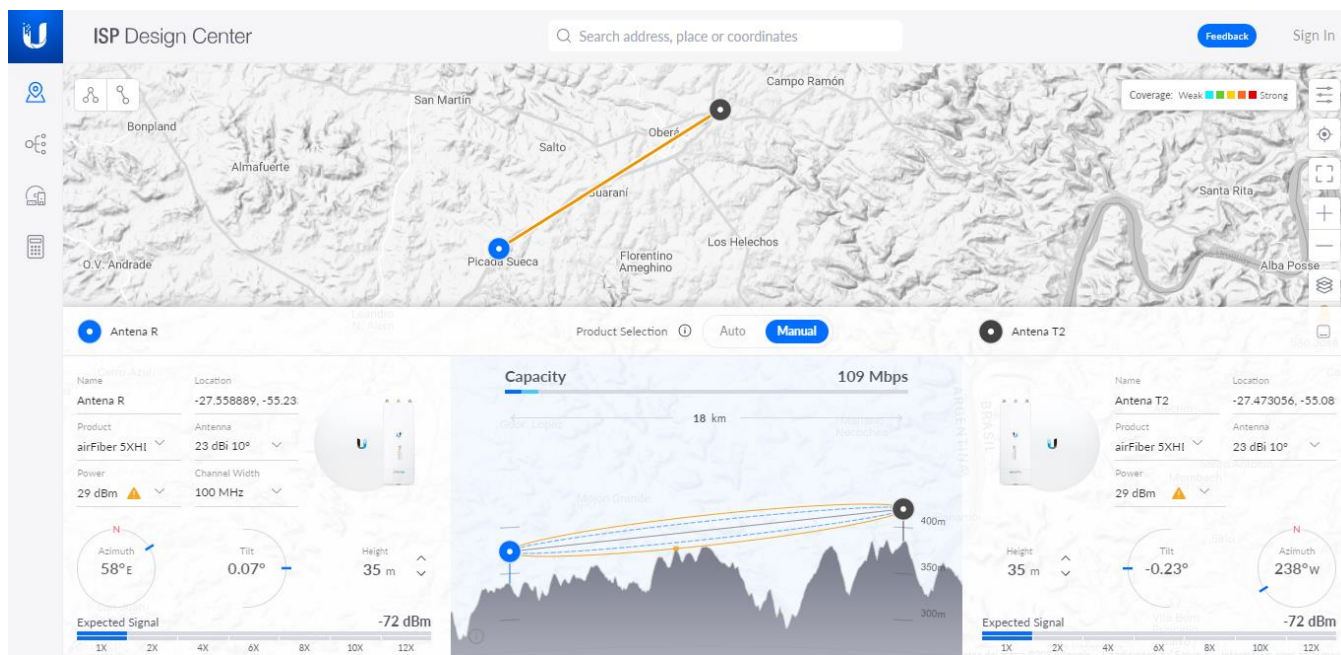


Fig. 26: Parámetros obtenidos mediante el software ISP Design Center para una altura de mástiles de 35 metros.



Fig. 27: Parámetros obtenidos mediante el software ISP Design Center para una altura de mástiles de 36 metros.

<input checked="" type="checkbox"/>	WIRELESS	STATUS	QUANTITY	UNIT PRICE	PRICE
<input checked="" type="checkbox"/>	airFiber 5XHD	In Stock	2	\$429.00	\$1,056.00
<input checked="" type="checkbox"/>	AF-5G23-S45	In Stock	2	\$99.00	\$198.00
<b>Selected items total:</b>					<b>\$1,056.00</b>
<b>Total:</b>					<b>\$1,056.00</b>
					VAT not included

Fig. 28: Precio estimado de las antenas obtenido mediante el software ISP Design Center

En conclusión, utilizando las diferentes aplicaciones se obtuvieron resultados similares a los obtenidos mediante el cálculo.

## 4. Descripción del Estado del Arte

### 4.1 *“Diseño de altura de antena óptima para mejorar la capacidad en radioenlaces sobre el agua afectados por las mareas”*

Autores: Miguel Gutierrez Gaitan, Pedro M. Santos, Luis R. Pinto, Luis Almeida.

Año: 2021

En las masas de agua afectadas por las mareas, los radioenlaces a una altura fija de la costa pueden experimentar el llamado desvanecimiento de las mareas, es decir una interferencia cíclica inducida por las mareas que varía en el tiempo. Para mitigar este efecto generalmente se utiliza la clásica técnica de recepción con diversidad espacial (es decir, utilizar dos o mas antenas receptoras colocadas a diferentes alturas), combinada con la consideración de tener una de las antenas a la mayor altura posible. Sin embargo, esta solución no siempre garantiza el mejor rendimiento. En este trabajo, los autores se enfocan en realizar enlaces estáticos sobre el agua de corto a mediano alcance que utilizan antenas instaladas a unos pocos metros sobre la superficie. Se aprovecha la base geométrica del modelo de propagación de dos rayos para investigar el diseño optimo de altura de antena única que minimiza las perdidas de trayectoria promedio en un rango de marea determinado. Luego, amplían el análisis para incorporar una segunda antena receptora e identificar su altura optima. Este método demuestra superar a la técnica clásica y permitir capacidades de enlace superiores.

### 4.2 *“Internet desde el espacio con enlaces inter-satelites”*

Autores: Yannick Hauri, Debopam Bhattacharjee, Manuel Grossmann, Ankit Singla

Año: 2020

Impulsadas por los avances en la tecnología espacial, varias empresas están planificando constelaciones de satélites para ofrecer servicios de internet de banda ancha. Si bien estos desarrollos están ocurriendo rápidamente, también existen muchas incertidumbres sobre el diseño de estas redes. Una pregunta abierta clave es si incorporarán o no conectividad directa entre satélites, en lugar de solo conexiones tierra-satélite. Los autores comparan el comportamiento de la red resultante de los dos resultados de esa pregunta. El análisis muestra que los enlaces entre satélites reducen sustancialmente las variaciones temporales en la latencia, agregan una mayor resiliencia al clima y podrían producir más de tres veces el rendimiento logrado sin tales enlaces. Por lo tanto, el hecho de que este elemento de diseño funcione podría tener una gran influencia en el rendimiento, la confiabilidad y la economía de estas redes.

#### 4.3 “Evaluación de Radioenlaces Móviles como Enlaces de Comando y Control de Vehículos Aéreos No Tripulados (UVAs)”

Autores: Klaus Kainrath, Mario Gruber, Holger Flühr, Erich Leitgeb, Wolfgang Dautermann, Andreas Hinze

Año: 2018

Los Sistemas aéreos No Tripulados (UAS) consisten en una aeronave no tripulada, una estación de control terrestre (GCS) y un enlace seguro de comando y control (C2) como conexión bidireccional de estos sistemas. Para poder operar un vehículo no tripulado es inevitable utilizar un enlace C2 seguro dentro y mas allá de la línea de visión. Para realizar tales conexiones existen muchas tecnologías inalámbricas disponibles. En este artículo se evaluaron módems de radio móvil de tercera (3G) y cuarta (4G) generación para determinar si son adecuados como hardware C2.

#### 4.4 “El Efecto del Polvo y la Arena en Radioenlaces Terrestres 5G”

Autores: Esmail M. M. Abuhdima, Gurcan Comert, Pierluigi Pisu, Chin-Tser Huang, Ahmed El Qaouaq, Chunseng Zhao, Shakendra Alston, Kirk Ambrose, Jian Liu

Año: 2021

Los canales de comunicación inalámbrica se ven afectados por diferentes factores climáticos, como lluvia, nieve, niebla, polvo y arena. Este efecto es más evidente en las altas frecuencias de la banda de ondas milimétricas. Esta investigación analiza el impacto del polvo y la arena en el canal de comunicación de los minienlaces 5G utilizando el modelo de dispersión de Mie para estimar la atenuación de la onda que se propaga mediante el cálculo de la pérdida de espacio libre de una región polvorienta. Además, se tiene en cuenta la polarización cruzada de la onda que se propaga con el polvo y la arena a diferentes distancias de la longitud de propagación. Se consideran dos tipos de minienlaces, ML-6363 y ML-6352, para demostrar el efecto del polvo y la arena en estas bandas de frecuencia operativas específicas. Los 73,5 GHz (banda V) y los 21,5 GHz (banda K) son la radiofrecuencia ML-6352 y ML-6363, respectivamente. Los resultados de la simulación muestran que el 5G ML-6352 es más afectado por el polvo y la arena que el ML 6363.

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo mediante la exposición de una introducción al calculo de radioenlaces se logró sintetizar todos los conocimientos adquiridos en la catedra “Propagación y Antenas” sumados a los adquiridos al investigar en la bibliografía disponible.

A su vez, este trabajo permitió conocer diferentes softwares para complementar, validar y planificar el diseño del radioenlace, así como también poder analizar el entorno en el que se implementará el sistema.

Finalmente, mediante los artículos investigados para la descripción del estado del arte se logró conocer nuevos avances de tecnologías para radioenlaces, así como también nuevas técnicas para mejorar la calidad y el rendimiento de estos eliminando interferencias y atenuaciones.

## Bibliografía

- *Introducción al Cálculo de Radioenlaces*, Pedro E. Danizio, 1ra edición, Universitas.
- *Transmisión por Radio*, José María Hernando Rábanos, 1ra edición, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S.A.
- ENACOM. <http://www.enacom.gob.ar>
- ITU. <http://www.itu.int/es>
- Ubiquiti. <http://www.ui.com>
- “Optimal antenna-height design for improved capacity on over-water radio links affected by tides”. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9389132>
- “Internet from Space without Inter-satellite Links”. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3422604.3425938>
- “Evaluation of Mobile Radio Links as Command-and-Control Links for Unmanned Aerial Vehicles”. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8443968>
- “The Effect of Dust and Sand on the 5G Terrestrial Links”. <https://arxiv.org/abs/2108.09226>