



## **Título: “Radio Enlaces Digitales en un Entorno Urbano y Suburbano”**

**Tesista: José Balacco**  
([jbalacco@frm.utn.edu.ar](mailto:jbalacco@frm.utn.edu.ar),  
[bacoom@gmail.com](mailto:bacoom@gmail.com))

**Director: Ing. Luís Marrone**

### **ESPECIALIZACIÓN EN INTERCONEXIÓN DE REDES Y SERVICIOS**

**Facultad de Informática – Universidad Nacional de La Plata**

**Noviembre 2008**

#### **Resumen:**

Con el avance de la tecnología y el creciente desarrollo de las comunicaciones móviles, de redes de área local (LAN) inalámbricas con diversas tecnologías como WIFI (Wireless Fidelity), WMAX (Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microonda), WBRO (Tecnología inalámbrica Banda Ancha para internet), Tetra (Sistemas Digitales Troncalizados para Seguridad), y otras en desarrollo, se hace necesario realizar una adecuada predicción de la cobertura, para obtener sistemas de comunicaciones digitales con mayores capacidades. Es importante la obtención de un nivel de cobertura mínimo para el correcto funcionamiento de éstos sistemas. Esto permite minimizar el costo de la inversión necesaria para su implementación.

Se han desarrollado para esto diversos modelos de predicción de la propagación aplicables a escenario variados y complejos.

En este trabajo se procederá a realizar el estudio, análisis y cálculo teórico que permita predecir la atenuación producida en estas redes en un entorno urbano y



suburbano de la ciudad capital de la Provincia de Mendoza, luego realizar en forma experimental mediciones de campo en diversos puntos que permitan contrastar los valores obtenidos mediante los modelos empíricos y los valores medidos en el área de cobertura de la radio base.

Con los datos obtenidos se realizará un análisis de estos, verificando el grado de aproximación del método empírico con los valores reales y posibles correcciones, lo que podrá permitir generar conclusiones.

### **Abstract:**

Of the advance of the technology and the increasing development of the movable communications, of local area networks (LAN) wireless with diverse technologies like WIFI (Wireless Fidelity), WMAX (World-wide Interoperability for Access by Microwave), WBRO (wireless Tecnología Broadband for Internet), Tetra (Digital Systems Trunking for Security), and other developing ones, take control necessary to realise a suitable prediction of the cover, to obtain systems of digital communications with majors capacities. The obtaining of a minimum level of cover for the correct operation of these systems is important. This allows to diminish the cost of the necessary investment for its implementation.

They have been developed for this diverse models of prediction of the variable and complex propagation applicable to scene.

In this work it will be come to realise the study, analysis and theoretical calculation that allows to predict the attenuation produced in these networks in urban and suburban surroundings of the capital city of the Province of Mendoza, soon to realise in experimental form measurements of field in diverse points that allow to resist the values obtained by means of the empirical models and the values measured in the coverage area of the radio base.

With the collected data an analysis of these will be realised, verifying the degree of approach of the empirical method with the real values and possible corrections, which will be able to allow to generate conclusions.



## **1. Introducción**

Las comunicaciones móviles y el desarrollo de aplicaciones basadas en sistemas de telecomunicaciones inalámbricas se han incrementado considerablemente en los últimos años, provocando una revolución de los sistemas de comunicaciones, provocando un gran impacto en nuevas redes y en las ya existentes, tendiendo a un mejoramiento de la calidad de vida cotidiana de las personas. Es previsible una gran convergencia de las redes de datos, servicios, aplicaciones, etc., las que aplicando estas tecnologías permitan implementar sistemas inalámbricos que converjan en la obtención de una mejora sustancial en diversos ambientes como laborales, personales, industriales, jugando estas redes móviles un rol importante debido a la gran flexibilidad que presentan.

Es necesario en estos nuevos escenarios proyectar redes que den soporte adecuado a las nuevas necesidades, incorporando a las ya existentes, permitiendo una optimización de los sistemas, mejorando sus rendimientos con menores costos.

Los recientes desarrollos de las TICs necesitan mayores anchos de banda para poder atender y desarrollar nuevos servicios que son requeridos por las aplicaciones que apuntan a proveer un servicio inalámbrico a terminales móviles ó móviles/fijos actualmente en uso.

Los diseños de los enlaces deben permitir obtener resultados lo más cercanos a la realidad. Existen diversas bandas de frecuencia para estas aplicaciones, las que están en el orden de los Gigahertz (Ghz), a estas frecuencias de operación, la propagación de las ondas electromagnéticas se comportan de forma variada, dependiendo ésta de diversos factores, siendo su análisis realizado a través de modelos de propagación que tienen en cuenta los diversos entornos y frecuencias donde se utilizan estas soluciones. Se debe evaluar el problema de la propagación en una determinada zona, pudiendo utilizarse los varios modelos disponibles, a los que se deberá corroborar mediante mediciones de campo en la zona en cuestión, con el fin de obtener resultados lo más cercanos a la realidad, permitiendo esto mantener un nivel de actualización adecuado al creciente mundo de las comunicaciones móviles.



La señal que reciben los receptores de los sistemas inalámbricos se ve afectada en su camino desde el emisor al receptor por diversos factores tales como:

- Atenuación a espacio libre.
- Obstrucción presente entre el transmisor y el receptor.
- Reflexiones de la señal.
- Refracciones de la señal.
- Multitrayectorias para la señal emitida.
- Características de las antenas utilizadas.
- Potencia de radio frecuencia del emisor.

En el proceso de diseño de un radio enlace se pretende obtener con la mayor precisión posible el nivel de la señal que ingresa al terminal móvil, para esto se deberá predecir de la forma más adecuada el efecto de los factores enunciados. Por esto se debe realizar un cuidadoso diseño y planificación de los parámetros y características con el fin de optimizar recursos, obteniendo una implementación con la menor inversión posible y que permita brindar a los usuarios una mejor prestación y calidad de servicio.

Los modelos de cálculo y predicción para enlaces fijos que consideran la elevación o perfil del terreno, atenuación a espacio libre, obstrucciones, zonas de Fresnel, etc., permiten obtener resultados muy cercanos a la realidad, pero resultan ser poco precisos cuando los enlaces involucran comunicaciones móviles.

Para el caso de comunicaciones móviles se utilizan otros modelos con diversos grado de complejidad en el cálculo, que permiten obtener una predicción más aproximada a la realidad en diversos entornos, siendo muchas veces necesario acompañar al estudio con mediciones del enlace que permitan obtener una aproximación mayor del cálculo con el fin de minimizar el error en la predicción.

Una parte fundamental en la planificación de una red inalámbrica consiste en predecir el camino de propagación entre la estación base o repetidor y el terminal móvil como así también la cantidad de la pérdida de señal en ese camino. Teniendo en cuenta



la pérdida de potencia en esa trayectoria se puede determinar si la cantidad de potencia con que llega la señal al receptor es suficiente para establecer un enlace entre el transmisor y el receptor, pudiendo simplemente calificarse al enlace como suficiente o insuficiente. Esto es independiente del tipo de modulación, técnicas de codificación, protocolos, etc., siendo válido para redes analógicas y digitales.

Este trabajo presenta los principales modelos de propagación y sus limitaciones en su implementación y resultados obtenidos. En los procedimientos se determina la pérdida básica de propagación y la medición de la intensidad de campo en puntos determinados que permita realizar ajustes. Se utilizarán modelos que permitan obtener el perfil mediante herramientas disponibles en Internet, que permiten obtener el perfil (elevaciones) del terreno a utilizar en las predicciones, como así también la experiencia internacional en la temática. Se realizará un análisis de algunos modelos de propagación, los que utilizan un conjunto de diagramas y expresiones matemáticas que permiten representar en forma parcial las características de un enlace de radio en un ambiente determinado, los que son muy utilizados en comunicaciones móviles. Estos modelos pueden ser encuadrados como:

- Modelos Determinísticos (teóricos): Estos se basan en principios fundamentales aplicables a la radio propagación, se pueden aplicar en entornos diversos, donde para mantener un cierto grado de exactitud es necesario disponer de gran cantidad de datos referente a las características del medio. Estos modelos utilizan algoritmos complejos y lentos por lo que su aplicación se aplica a áreas pequeñas (microcélulas) o ambientes interiores.
- Modelos Empíricos (Estadísticos): Estos modelos se basan en mediciones, por lo que se tienen en cuenta las condiciones ambientales, su precisión depende de la exactitud de la medición y de la semejanza del medio analizado y el contexto donde se llevan a cabo las mediciones.
- Modelos mixtos: Estos se basan en la combinación de ambos modelos.

Algunos modelos aplicables a diferentes entornos ambientales son:



- Okumura
- Okumura-Hata
- Okumura-Hata extendido
- Walfish-Bertoni
- Walfish-Ikegami (COST 231)
- Sakagami-Kuboi (SK)

## **2. Terminología y definiciones**

Para entender los requerimientos necesarios para la planificación y análisis de redes inalámbricas se hace necesario entender primero algunos conceptos básicos de la teoría de radio propagación, incluyendo la transmisión, propagación y recepción de la señal. Del lado transmisor es necesario considerar la potencia de transmisión, la pérdida del alimentador, la ganancia de la antena y su directividad. Respecto de la propagación se deberá evaluar los obstáculos encontrados y la atenuación o pérdida de potencia que sufra la señal cuando alcance a la antena receptora. Del lado receptor se deberá tener en cuenta la ganancia de la antena receptora, su directividad, pérdida en alimentadores, con el fin de poder determinar el nivel de señal que ingresa al receptor y poder compararlo con los niveles necesarios del diseño y su margen de seguridad, con el fin de poder evaluar la performance del enlace y su integridad frente a diversas circunstancias que provoquen una disminución de los niveles de señal.

**Decibel (dB):** El decibel es una unidad básica de medida de escala logarítmica de base 10, que indica relación entre dos niveles de señal. Muchas veces se lo utiliza para describir el efecto de un dispositivo del sistema en forma de relación entre el nivel de la intensidad de la señal de salida respecto de la entrada, reflejando un cambio en los niveles de potencia indicados en **dB**. (ARRL UHF/Microwave Experimenter's Manual, 1990). La expresión del **dB** en términos de potencia se puede expresar mediante:

$$\mathbf{dB = \log_{10} (P_2 / P_1)}$$



donde: para  $P_1 = 1 \text{ mW}$  se expresa en **dBm**, donde  $0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$

para  $P_1 = 1 \text{ W}$  se expresa en **dBw**, donde  $0 \text{ dBw} = 1 \text{ w}$

De este modo en **dB** se puede expresar el comportamiento de diversas partes constitutivas del sistema, pudiendo entonces reflejarse:

- Niveles de potencia de salida (dBm, dBw).
- Niveles de potencia de entrada (dBm, dBμ).
- Atenuaciones que sufre la señal (dB).
- Ganancias de potencia (dB)
- Ganancia de antenas (dBi, dBd).

**Onda Electromagnética:** La propagación de energía eléctrica a lo largo de una línea de transmisión o en el espacio libre ocurre en forma de una Onda electromagnética, la cual constituye un movimiento oscilatorio. La onda viaja o se propaga a través de un medio, en el caso de una línea física este medio es el dieléctrico que separa los conductores. (Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, 2003)

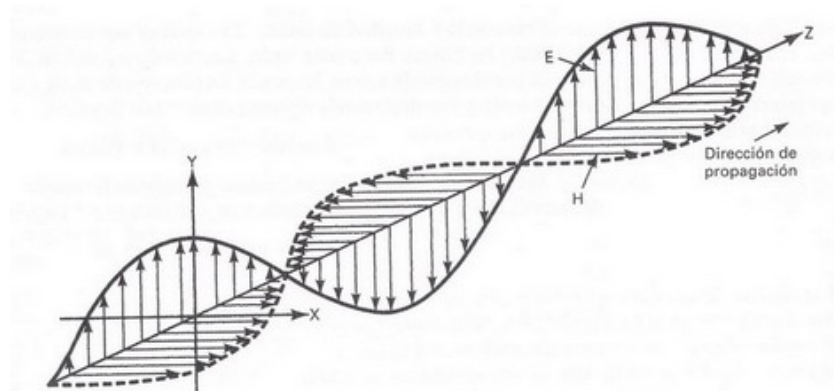
Para poder estudiar fácilmente fenómenos de propagación y radiación de ondas, es necesario utilizar el concepto de Campo. Radiación es la generación de un Campo Electromagnético en regiones alejadas, y un campo en un punto se puede manifestar o medir colocando cargas y corrientes de prueba y observando las fuerzas que se ejercen sobre ellas.

Según las leyes de electromagnetismo, una corriente variable con el tiempo produce una electromagnética en el espacio que la rodea (ecuaciones de Maxwell), estas relacionan Campos Eléctricos y Magnéticos con las cargas y corrientes que los crean. Estas ondas electromagnéticas generalmente están relacionadas con una estructura (Línea de Transmisión) o libres en el espacio (Ondas producidas por antenas), que al alejarse de la fuente la onda es esférica y se propaga hacia el infinito.

Toda onda se caracteriza por su frecuencia (**f**) y su longitud de onda (**λ**), estas se relacionan por la velocidad de propagación del medio, para el caso de antenas, ésta es la velocidad de la luz ( $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ) para el aire o vacío, siendo  $c= f \cdot \lambda$ . En el aire de la atmósfera terrestre las ondas viajan a una velocidad algo menor y en una línea de

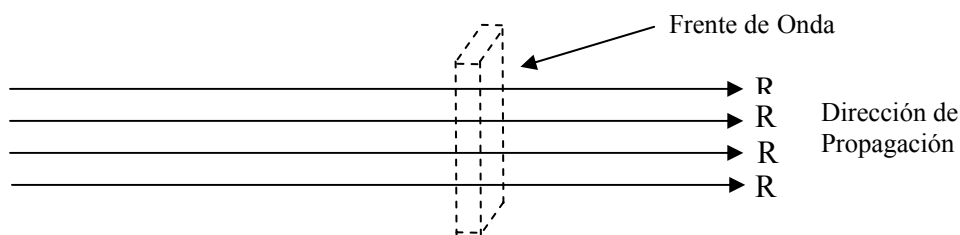


transmisión es bastante menor, dependiendo del tipo de línea. La relación de los campos E y H en una onda electromagnética se puede ver en la figura siguiente



La polarización de una onda electromagnética depende de la posición del vector campo eléctrico respecto de la superficie de la tierra. Si el campo eléctrico se propaga en dirección paralela a la superficie de la tierra, la polarización de la onda es **horizontal**, si en cambio la dirección de propagación del campo eléctrico es perpendicular a la superficie de la tierra la polarización de la onda es **vertical**. Si el vector polarización gira  $360^\circ$  a medida que la onda recorre una longitud de onda y la intensidad del campo es igual en todos los ángulos, la polarización es **circular** (sentido horario o anti horario), en cambio si la intensidad del campo varía entonces la polarización es **elíptica**.

Un frente de onda lo representa una superficie de ondas electromagnéticas de fase constante, un frente se forma cuando se unen puntos de igual fase en rayos que se propagan desde la misma fuente, esto se puede ver en la figura siguiente:

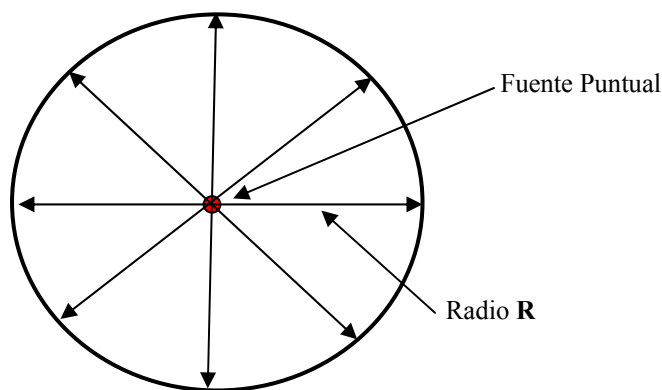


**Fuente Isotrópica:** Cuando la superficie es plana, el frente de onda es perpendicular a la dirección de propagación. Con una fuente puntual (**Fuente Isotrópica**) los rayos se





propagan igual en todas las direcciones, en este caso el frente de onda es una esfera de radio  $R$ , con centro en el origen de las ondas. En el espacio libre y a una distancia de la fuente suficiente, los rayos dentro de una superficie pequeña se pueden considerar paralelos, por lo que a mayor distancia de la fuente, la propagación de la onda se parece más a un frente de onda plano, esto se puede ver en la siguiente figura:



**Líneas de Transmisión:** Una línea de transmisión es un sistema conductor que se utiliza para transferir energía de un lugar a otro, constituida por dos o más conductores separados por un material aislante. Cuando se propagan señales de alta frecuencia las características de las líneas de transmisión se vuelven más complicadas y su comportamiento presenta características particulares. (Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, 2003). La línea de transmisión utilizadas en alta frecuencia pueden ser:

- **Líneas Desbalanceadas:** En este caso uno de los conductores se encuentra al potencial de tierra. Este es el caso de las líneas coaxiales o línea concéntrica, esta se compone de un conductor central rodeado por un conductor externo concéntrico separado a una distancia uniforme (Cable Coaxial), esta además funciona como blindaje del conductor interno, de modo que el campo electromagnético fuera de la línea es mínimo o cero.
- **Guías de Onda:** Por encima de los 2 Ghz. las pérdidas en los cables coaxiales se hacen importantes, por otro lado las longitudes de onda se hacen pequeñas,



por lo que se hace práctico utilizar otro método para transportar esta energía, mediante el uso de Guías de Onda. Esta es un tubo construido con un material perfectamente conductor, que encierra y transporta una onda electromagnética por reflexión en sus paredes, confinando la energía y evitando radiación fuera de ellas. La energía se inyecta por un extremo mediante radiación o por acoplamiento inductivo o capacitivo, y se extrae de la misma forma en el otro extremo.

Las líneas de transmisión presentan propiedades o características particulares que deben ser consideradas cuando se diseña un enlace, las más importantes son:

- **Pérdidas de Potencia:** Todas las líneas provocan pérdidas en la potencia de la señal que viaja por ellas. Estas pérdidas pueden ser por radiación (Malla deficiente), por calentamiento (en el dieléctrico), por acoplamiento, las que dependen del tipo de línea y de la frecuencia de operación. En general cuanto mayor es el diámetro de la línea menores serán las pérdidas, y cuanto mayor es la frecuencia de operación mayores serán las pérdidas. Las pérdidas en una línea siempre se expresan en dB, por ejemplo si una línea de determinada longitud y a una determinada frecuencia presenta una pérdida de potencia de 3 dB, significa que la mitad de la potencia entregada se pierde en la línea, llegando a la salida solo el 50% de la potencia de entrada, generando calor en ésta.
- **Impedancia Característica:** Una línea de transmisión se caracteriza por sus constantes primarias (Resistencias, inductancias, capacidades), cuyos valores dependen del tipo de línea y que se encuentran distribuidos uniformemente a lo largo de toda la línea, a estos se los llama “Parámetros Distribuidos”, estos representan una extremadamente pequeña sección del conductor. El valor de la inductancia disminuye cuando se incrementa el diámetro del conductor y el valor de las capacidades disminuye cuando se incrementa la distancia entre los conductores. La máxima transferencia de potencia desde la fuente a la carga a través de una línea de transmisión se produce cuando se encuentran adaptadas las impedancias de la fuente, de la línea y de la carga ( $Z_0 = 50 \Omega$ ). Cuando la



impedancia de la carga no se encuentra adaptada (coincide) con la impedancia de la línea, se genera en ésta una onda estacionaria que provoca un incremento en las pérdidas de señal.

- **Factor de Velocidad:** Esta se define como la relación entre la velocidad real de propagación de la onda a través de un determinado medio y la velocidad de propagación en el espacio libre ( $V_f = V_p / c$ ), donde es:

$V_f$  = Factor de velocidad (adimensional)

$V_p$  = Velocidad de propagación m/s

$c$  = Velocidad de la luz  $3 \times 10^8$  m/s

La velocidad a la que viaja una onda electromagnética por una línea de transmisión depende de la constante dieléctrica del material aislante que separa a los dos conductores, algunos valores del FV para distintos materiales son: para aire 0,95 a 0,97, para dieléctrico como polietileno ó teflón 0,66, para dieléctrico Foam 0,80.

**Ganancia de una Antena:** En esencia una antena es un conductor metálico capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas. Una antena es la región de transición o interfase entre una zona donde existe una onda guiada (en una línea) y una onda en el espacio libre.. La energía que recibe la antena es radiada con una determinada eficiencia hacia el medio, donde se propaga alejándose de ésta en forma de onda electromagnética. Una antena es un elemento pasivo, esto es que no puede amplificar la señal, si embargo una antena puede presentar una determinada ganancia en la dirección de irradiación, según el caso. Las antenas pueden tener formas variadas y características de direccionalidad específicas que dependerán del tipo de servicio en el que se utilizarán

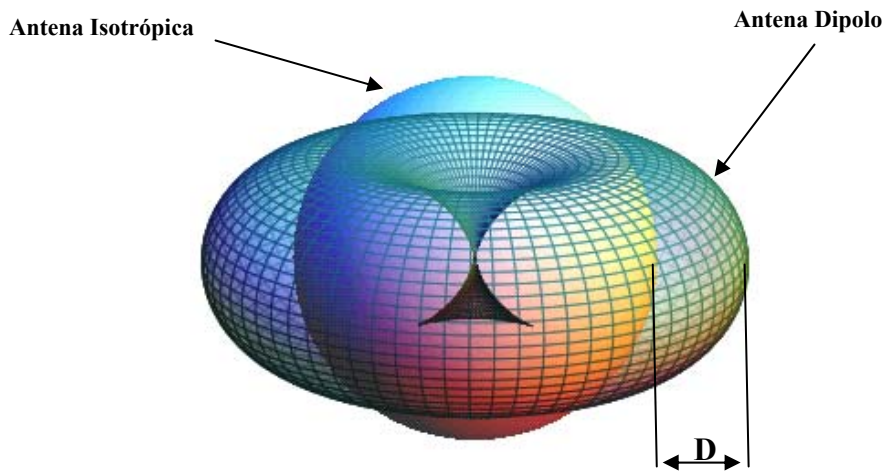
La ganancia que presenta una antena es la misma ya sea que la antena se comporte como transmisora o receptoras o ambas. La ganancia o directividad o ganancia direccional de una antena, es la relación entre la densidad de potencia que una antena irradia en una determinada dirección y la densidad de potencia que irradia en el mismo punto una antena de referencia, siendo la potencia de radiación la misma para las dos antenas y la eficiencia de la antena del 100%. Cuando se indica la ganancia de



una antena, se suele utilizar como referencia o la antena isotrópica o el dipolo de  $\frac{1}{2} \lambda$ . Si la antena no tiene pérdidas la ganancia en dB se expresa mediante:

$$A_{P(dB)} = 10 \log P / P_{ref}$$

Para el caso de un dipolo de  $\frac{1}{2} \lambda$  la ganancia de potencia referida a la antena isotrópica es de 2,15 dB. Cuando la ganancia de una antena se expresa respecto de la **antena isotrópica** se indica como dBi, pero si se indica con respecto al dipolo de  $\frac{1}{2} \lambda$  se indica como dBd. El efecto de ganancia de una antena se refiere en realidad a una concentración del haz en una determinada dirección, en desmedro de otras direcciones, donde no se desea irradiar señal. En la figura siguiente se puede ver el lóbulo de una antena isotrópica comparado con el de un dipolo de  $\frac{1}{2} \lambda$  (Antenas 2º edición-Cardama Aznar y otros – Alfaomega 2004):



El diagrama de irradiación ó lóbulo de radiación es un gráfico que muestra la intensidad del campo radiado o densidad de potencia radiada a una distancia fija en función de la dirección desde el sistema de antena. Los plano principales de la gráfica determinan la dirección de la máxima potencia radiada. Además se puede observar un lóbulo principal en la dirección deseada, lóbulos laterales y opuesto que son no deseados (pérdida de potencia). La relación entre el lóbulo principal (frente) y el lóbulo trasero (espalda) es un valor especificado en antenas y se denomina Relación Frente-



Espalda (dB), siendo deseable la mayor relación. Para el caso de una antena directiva, la gráfica es la siguiente:



La ganancia que presenta una antena está directamente relacionada con la directividad de la misma, esto es que como se ve en la gráfica anterior, la antena distribuye su energía privilegiando una determinada dirección, o sea concentra la energía en una dirección en desmedro de otra. Las antenas pueden ser básicamente de dos tipos:

- **Omnidireccionales:** En éstas el lóbulo de irradiación cubre 360° en el plano horizontal, se utiliza cuando los usuarios se encuentra en diversas direcciones, por lo que la irradiación de señal debe ser en todas las direcciones, éstas antenas se utilizan en enlaces punto-multipunto. La ganancia de estas antenas puede variar según su construcción, pudiendo llegar a valores del orden de 10 a 12 dBi.
- **Direccionales:** En éstas el lóbulo de irradiación es directivo, como el que se ve en la gráfica anterior, estas antenas se utilizan en enlaces punto a punto, pudiendo obtenerse ganancias elevadas, pudiendo llegar según el caso a valores del orden de 30 o 35 dBi o más. Estas antenas pueden ser tipo Yagi, diedros, parábolas o semi parábolas.

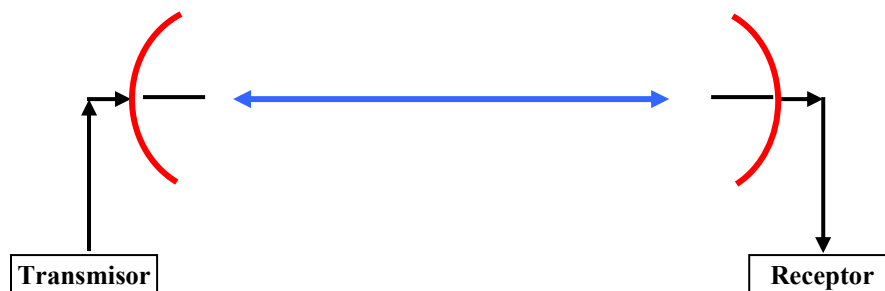
**Potencia Radiada Aparente (PRA):** La potencia radiada aparente es la potencia emitida por la entena en la dirección de máxima ganancia, para su determinación se debe tener en cuenta la potencia de salida del transmisor, las pérdidas producidas en el alimentador (cable coaxial), conectores y filtros y la ganancia de la antena, esta se puede expresar como:

$$PRA \text{ (dB)} = (P_{Tx} - A_T + G_{An}) \text{ dB}$$



Donde:  $P_{Tx}$  es la potencia de salida expresada en dBm ó dBw  
 $A_T$  es la atenuación introducida por el alimentador (cable coaxial) más la pérdida en conectores y filtros si los hubiera.  
 $G_{An}$  es la ganancia de la antena expresada en dBi ó dBd.

**Atenuación a Espacio Libre:** Todo sistema de telecomunicaciones debe diseñarse para que en el receptor se obtenga una relación señal-ruido mínima que garantice su correcto funcionamiento. Existen muchos mecanismos mediante los cuales la potencia de la portadoras de la señal (onda electromagnética) experimentan pérdidas mientras viaja a través del espacio entre el transmisor y el receptor, una de ellas es la Atenuación a Espacio Libre (AEL), esto es la atenuación de potencia que sufre la señal cuando no existen obstáculos entre el transmisor y el receptor. De esta forma la AEL se produce cuando hay línea de vista entre ambos terminales, esto se puede ver en la siguiente figura:



la AEL se puede expresar mediante la siguiente expresión:

$$A_{el} \text{ (dB)} = 32,44 + 20 \text{ Log } F + 20 \text{ Log } D$$

Donde: F = frecuencia en Mhz.

D = distancia en Km.

**Polarización:** La polarización de una antena se define mediante la orientación del campo eléctrico de la onda que se está irradiando, se pueden clasificar en polarización lineal o polarización elíptica o circular:

- **Polarización Lineal:** En este caso el Vector Campo eléctrico es irradiado en forma vertical u horizontal respecto de la superficie de la tierra, lo que

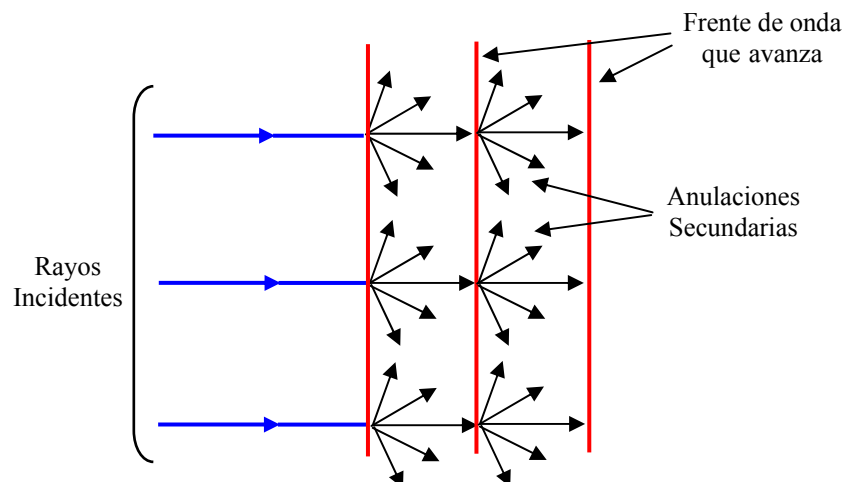


dependerá de la ubicación de la antena, en el primer caso se denomina Polarización Vertical y en el segundo Polarización Horizontal.

- **Polarización elíptica o circular:** En este caso el vector Campo Eléctrico gira describiendo una elipse o un círculo mientras la onda irradiada se aleja de la antena. El sentido de giro puede ser derecho (la antena ve al vector girar en el sentido de las agujas del reloj mientras se aleja) o izquierdo, cuando el vector gira en sentido contrario.

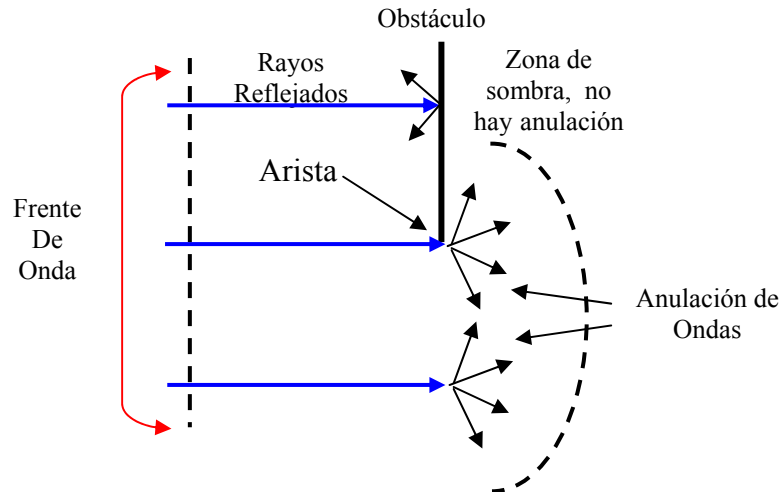
Cuando se selecciona una determinada polarización para la antena transmisora, se deberá seleccionar la misma polarización para la antena receptora, en caso contrario se produce una atenuación adicional a las pérdidas del enlace denominado atenuación por polarización cruzada que es del orden de 20 dB.

**Difracción:** Este fenómeno permite que las ondas de radio se propaguen en torno de un borde o esquina de un objeto opaco. Para explicar este fenómeno se utiliza el principio de Huygens, el cual establece que “Todo punto sobre un determinado frente de onda esférico se puede considerar como una fuente puntual secundaria de ondas electromagnéticas, desde la cual se irradian otras ondas secundarias”. Si no hay obstáculos el frente de onda avanza plano, debido a que si bien cada fuente puntual secundaria irradia energía hacia fuera y en todas las direcciones, se anulan todas las componentes salvo las de la dirección de avance, como se puede ver en la figura:





Pero cuando se encuentra con un obstáculo el frente de onda se reparte o dispersa, efecto llamado difracción, como se ve en la figura:



Este efecto al aumentar la frecuencia pierde relevancia, y para frecuencias de la banda de UHF o superiores la presencia de un obstáculo puede limitar la comunicación en forma significativa.

**Reflexión:** Cuando una onda choca contra una superficie de distinto material, parte de la onda es absorbida (refracción) y parte es reflejada (reflexión). La potencia de la onda reflejada depende del coeficiente de reflexión de la superficie. La reflexión puede ser difusa, cuando la superficie de reflexión es irregular y el frente reflejado se dispersa en diferentes direcciones. Cuando la superficie es lisa la reflexión es especular, al igual que la reflexión en un espejo. El problema que puede generar la reflexión se debe a que se generan frentes de onda desfasados del frente original y que en determinadas condiciones pueden provocar una disminución en la densidad de potencia.

**Zonas de Fresnel:** La atenuación a espacio libre representa una condición ideal en la propagación de ondas, se debe considerar la condición de visibilidad para poder considerar en que caso se puede, en el cálculo de un enlace, considerar solamente la AEL.

La condición de visibilidad se refiere a cuando debe considerarse que un obstáculo interrumpe el camino directo entre dos antenas, adquiriendo importancia el



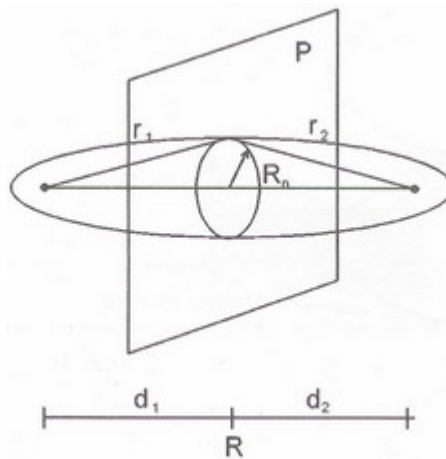


fenómeno de la difracción. La onda electromagnética presenta un frente compuesto por zonas denominadas **Zonas de Fresnel**, estas zonas son elipsoides de revolución donde el eje mayor tiene una longitud de  $R+n\lambda/2$ , donde  $n=1,2,\dots$

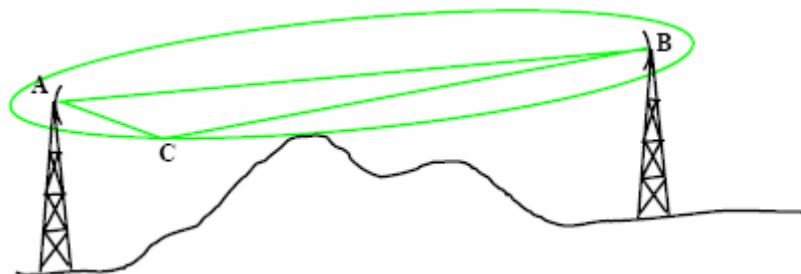
Según el valor de  $n$  se obtienen las distintas zonas de Fresnel, las que en un plano perpendicular al obstáculo presentan una forma circular cuyo radio es:

$$R_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Donde:  $d_1$  y  $d_2$  son la distancia al obstáculo desde la antena 1 y antena 2, como se puede ver en la figura siguiente, (Antenas 2º edición-Cardama Aznar y otros – Alfaomega 2004):



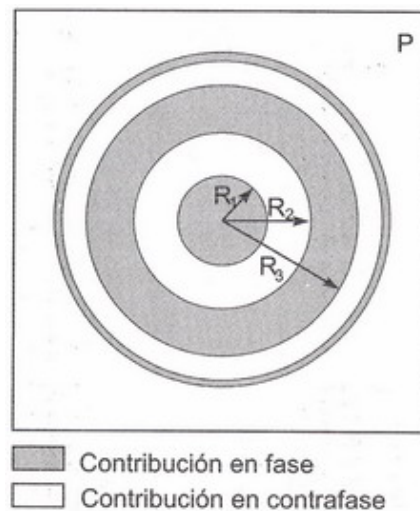
O ante la presencia de un obstáculo se puede ver en la siguiente figura:



Las distintas zonas de Fresnel llegarán al receptor con distintas fases, teniendo en cuenta el principio de Huygens, los campos producidos en la zona 1 se sumarán en la antena receptora con una fase inferior a  $180^\circ$  (constructivamente), las fuentes de la



zonas siguiente tienden a cancelarse mutuamente. Por lo que si se considera solo la primer zona de Fresnel y se anulan el resto, la potencia recibida por el receptor no disminuirá apreciablemente. Esto significa que mientras no se obstruya la primer zona de Fresnel, se considera que el haz no ha sido obstruido, pero si el obstáculo se incrusta en esta se producirán pérdidas en la potencia recibida por la antena receptora. Para los cálculos de enlaces se considera aceptable que el obstáculo penetre en la primer zona de Fresnel, no debiendo superar el  $0,6R_1$ , las zonas de Fresnel se pueden ver en la siguiente figura (Antenas 2º edición-Cardama Aznar y otros – Alfaomega 2004):



**Sensibilidad del Receptor:** La sensibilidad del receptor representa el menor nivel de señal de radio frecuencia recibida, medida en  $-dBm$ , que el receptor necesita para poder demodular y decodificar el paquete de datos sin error, o con una tasa de error determinada, para el caso de radios digitales, en éstos se especifica el mínimo nivel de señal recibido para un determinado **Bit Rate**. Si el nivel de la señal resulta menor, se obtiene un menor Bit Rate, lo que se traduce en una menor velocidad de comunicación, por ejemplo para un determinado equipo se puede obtener para distintos niveles de señal las siguientes velocidades:

- Para: 11 Mbps  $\geq -82$  dBm
- 5,5 Mbps  $\geq -87$  dBm
- 2 Mbps  $\geq -91$  dBm
- 1 Mbps  $\geq -94$  dBm



**Relación Señal/Ruido:** La relación señal-ruido en el receptor condiciona la factibilidad del enlace. Se considera ruido en un radio enlace a toda señal que ingrese al receptor que no sea la señal deseada, por ejemplo: ruido térmico, ruido industrial, interferencias, etc. En un radio enlace siempre el nivel de la señal es superior al del ruido y se puede expresar mediante la siguiente expresión:

$$S/N \text{ (dB)} = 10 \text{ Log}_{10} [\text{potencia de la señal (w)} / \text{potencia de ruido (dB)}]$$

Si el nivel de ruido es bajo, entonces el sistema estará limitado casi exclusivamente por la sensibilidad del receptor, siendo la mínima sensibilidad del receptor lo que ponga un límite a la implementación del sistema. Por ejemplo si el nivel de ruido presente es de -100 dBm, y la relación S/R requerida es de 16 dB, entonces el nivel mínimo de señal ingresante al receptor deberá ser  $\geq -84$  dBm.

**Cálculo del enlace no obstruido:** En el cálculo de cualquier enlace es de fundamental importancia suministrar al receptor suficiente intensidad de campo para obtener la performance requerida. El cálculo de enlace más simple es aquel en el cual no hay ninguna obstrucción en el trayecto entre el transmisor y el receptor, en este caso para la atenuación del trayecto, solo se debe tener en cuenta la atenuación a espacio libre, pudiendo obtenerse el valor de la intensidad de la señal que ingresa al receptor mediante la siguiente ecuación:

$$N_{Rx} \text{ (dBm)} = P_{Tx} - A_{CTx} + G_{ATx} - AEL + G_{ARx} - A_{CRx}$$

Donde:  $P_{Tx}$  = Potencia del transmisor en dBm

$A_{CTx}$  = Atenuación lado transmisor en cable coaxial, conectores y filtros en dB

$G_{ATx}$  = Ganancia de la antena transmisora en dB

$G_{ARx}$  = Ganancia de la antena receptora en dB

$AEL$  = Atenuación a espacio libre en dB

$A_{CRx}$  = Atenuación lado receptor en cable coaxial, conectores y filtros en dB

En general al valor obtenido es conveniente agregarle una determinada cantidad como margen de seguridad, lo que permitirá mantener en funcionamiento el enlace



frente a mayores niveles de ruido o interferencia, un valor de 20 dB adicionales pueden satisfacer este margen.

### **3. Generalidades de un sistema Digital Tetra**

**TETRA** (Terrestrial Trunked Radios) es el único Estándar Europeo para redes digitales avanzadas en telecomunicaciones para sistemas de Radio Móvil Privados u Oficiales desarrollado por **ETSI** ( European Telecommunications Standards Institute ) como respuesta a las necesidades crecientes, tanto de los operadores y prestadores de servicio, como así también de las distintas administraciones de Gobierno.

Este está especialmente concebido para cubrir necesidades de comunicaciones de voz y datos en usuarios de Seguridad Pública que tienen que enfrentarse a una congestión de tráfico y una demanda creciente de servicios adicionales. La Seguridad Pública encuentra en esta tecnología una muy potente herramienta para hacer frente a estos problemas. TETRA está diseñado especialmente para comunicaciones profesionales.

El objetivo del estándar TETRA es el de definir la interfaz aire y las interfaces entre TETRA y otras redes teles como: ISDN, PSTN, etc.

TETRA es un estándar abierto que representa una evolución de la tecnología digital, que permite obtener una alta eficiencia del uso del espectro y una coexistencia con los sistemas analógicos actuales. El rango de funciones y servicios ofrecidos hace que el sistema sea adecuado para aplicaciones tales como:

- Comunicaciones de voz y datos seguras y simultáneas.
- Localización de terminales.
- Aplicaciones en el área de Seguridad Pública.
- Información de tráfico de vehículos.
- Transferencia de ficheros y acceso a bases de datos.
- Fax.



- Transmisión de imagen fija.
- Transmisión de vídeo.
- Gestión de flotas y grupos de usuarios.

El servicio de radiocomunicaciones se basa en un servicio integral, en el sentido que permite la integración, dentro de la misma infraestructura, distintas organizaciones de usuarios que tengan características operativas diferentes con total independencia unas de otras y que permitan su interconexión entre sí en un momento o situación determinada, y la posibilidad de interconexión con el exterior bajo pautas predeterminadas.

A cada usuario y grupo de usuarios se le puede asignar un perfil de privilegios y prioridades con todas las prestaciones y posibilidades de funcionamiento, pudiendo existir consecuentemente diferentes grupos con distintos privilegios y niveles de prioridad acordados, operando sobre diferentes tipos de terminales que los soporten, TETRA permite obtener a los usuarios los siguientes beneficios:

- Mayor eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico (cuatro canales por portadoras de 25 Khz de ancho de banda.
- Canal abierto: Permite que un canal de tráfico pueda ser utilizado por varios usuarios simultáneamente.
- Puede trabajar en modo terminal a terminal, en caso de falla en la radio base de influencia.
- Trabaja en modo “Handover”, este es la transferencia o conmutación automática de una llamada en curso cuando el móvil pasa de una célula a otra.
- Una estandarización de las frecuencias de operación.
- Poder disponer de una interfase común entre sistemas (ISI) que permite a los usuarios móviles desplazarse a través de distintas redes sin necesidad de cambiar de Terminal.



- Facilidades y servicios avanzados estándares, por ejemplo transmisión de señales de vídeo, se están haciendo experiencias, con resultados totalmente positivos, de transmitir por la red TETRA señales de vídeo captadas por una videocámara portátil, utilizando la transmisión digital y mediante técnicas de compresión de la información
- Acceso a redes de datos: El sistema TETRA está diseñado para aceptar la interconexión con las redes de datos X.25, IBM/SNA y DEC/DNA
- Mejor aprovechamiento del canal, ya que permite comunicaciones half-duplex como la radio convencional o full-duplex como el teléfono en casos necesarios, utilizando los canales no ocupados.
- Suministro de muchos fabricantes, tanto para terminales como radio bases e infraestructura.
- Facilidad de voz y datos integradas.
- Reducción de costos tanto para equipamiento como para operación, por permitir compartir los recursos.
- Equipos diseñados para soportar futuras aplicaciones.
- Autonomía del Terminal: Mediante el control de la potencia transmitida y otras técnicas, se consigue aumentar notablemente la duración de la batería del portátil.
- Es un sistema digital más moderno que GSM por lo que la calidad de audio es superior al implementar sistemas más modernos de compresión de voz.
- Las capacidades de transmisión de datos están definidas en el propio estándar inicial y sólo son comparables al actual estándar GPRS.
- Menor grado de saturación, ya que el propio estándar garantiza una capacidad por defecto superior al doble de los canales convencionales en uso. Además dispone de comunicaciones priorizadas, por lo que en caso de saturación se garantizan la disponibilidad de estas comunicaciones prioritarias.



- Permite comunicaciones uno a muchos lo que mejora la gestión de grupos en caso de comunicaciones para coordinación de urgencias.
- Dispone de terminales específicos para cada necesidad. Así dispone de terminales portátiles (equiparables a teléfonos móviles), terminales móviles (destinados a vehículos) y terminales para bases.

Sus principales inconvenientes frente a GSM son:

- Admite una menor densidad de usuarios que los servicios de GSM debido al tipo de modulación realizada.
- Los terminales tienen un precio mucho mayor al estar dirigido a sectores diferentes y no disponer de un mercado masivo de clientes.
- Las transferencias de datos son más lentas (max 19 Kbps), aunque se está mejorando en versiones más modernas de esta tecnología.
- Debido a la baja modulación de frecuencia, los terminales pueden interferir con dispositivos electrónicos sensibles, como marcapasos o desfibriladores.

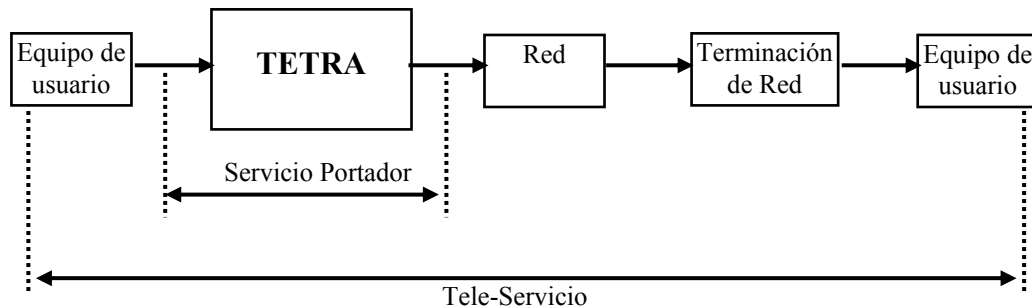
El estándar TETRA utiliza las últimas tecnologías de compresión de voz que permiten comprimir la información manteniendo una excelente calidad de audio con reconocimiento de voz. Este es un sistema digital de segunda generación que utiliza técnicas de modulación que permiten con una alta tasa de bits (alta velocidad digital) en un canal con un estrecho ancho de banda. TETRA permite obtener servicios que se pueden aproximar a tres niveles:

- **Servicio Portador:** Este servicio permite el intercambio de información entre interfaces de usuarios de la red, por ejemplo la transmisión de datos en modo circuito, o en modo paquete, o el transporte de voz en modo circuito.
- **Tele-Servicio:** Este servicio facilita la capacidad básica de comunicación entre usuarios, como por ejemplo llamadas de voz, llamadas individuales, llamadas grupales, etc.



- **Servicio Suplementario:** Este está representado por todo otro servicio que suplementa al Tele-Servicio, por ejemplo prioridad de llamadas, escucha ambiente, etc.

Esto se puede diagramar de la siguiente forma:



**Modos especiales de operación del TETRA:** Además de la forma clásica de trabajar de los sistemas troncalizados “trunking” basados en el tráfico que soportan las estaciones de base y los móviles, TETRA ha desarrollado otras formas que resultan muy importantes para determinados tipos de aplicaciones, por ejemplo:

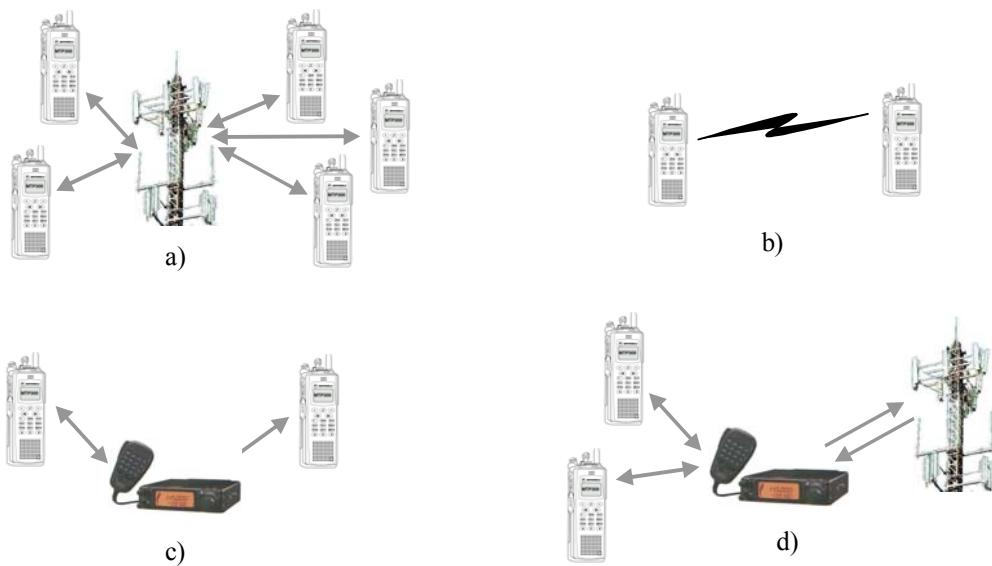
- a. Indica una forma estándar de trabajo donde varios móviles son soportados por una estación radio base, todos los equipos suscriptos se integran a la red a través de esta radio base.
- b. En ésta se puede observar el modo denominado “Modo Directo de Operación” entre dos móviles sin necesidad de una estación radio base o estación repetidora, en este caso los móviles se comunican entre si en el modo simplex.
- c. En ésta se puede ver el modo denominado “Modo Directo con Repetidor”, en éste modo los móviles de mano comunican utilizando la ayuda de un repetidor, el que está constituido por un terminal de radio, esto permite ampliar el radio de cobertura de los portátiles cuando no son servidos por una estación radio base integrada a al red. Este terminal puede estar en un móvil o ser una estación fija.
- d. Este modo es una alternativa al anterior, donde el terminal que hace de repetidor se conecta a la radio base, integrándose a la red. A este modo se lo denomina





“Gateway to System”, los portátiles operan en modo simplex con el terminal repetidor, el que se conecta a la radio base integrada a la red en modo dúplex.

Esto se puede ver en la figura siguiente:



El estándar TETRA prevé el uso de diferentes interfaces que son utilizadas para permitir obtener diversas prestaciones y funcionalidades, algunas de estas son:

1. **Interfaz Aire del Sistema:** esta proporciona las siguientes prestaciones:

- Llamada de Llamada de grupo, llamada privada, llamada a teléfono, y una serie de características estandarizadas relacionadas con las llamadas y las “no-llamadas”.
- Servicio de datos cortos con hasta 140 bytes de datos de usuario por mensaje.
- Un juego de servicios de datos, con conmutación en modo paquete y en modo circuito, con velocidades desde 2.400 bits/s con alta protección hasta 28.800 bits/s sin protección.
- Capacidades de seguridad y autenticación.



- Gestión de movilidad, de forma tal que la infraestructura de gestión y conmutación siempre sabe en que área está situada la estación móvil.

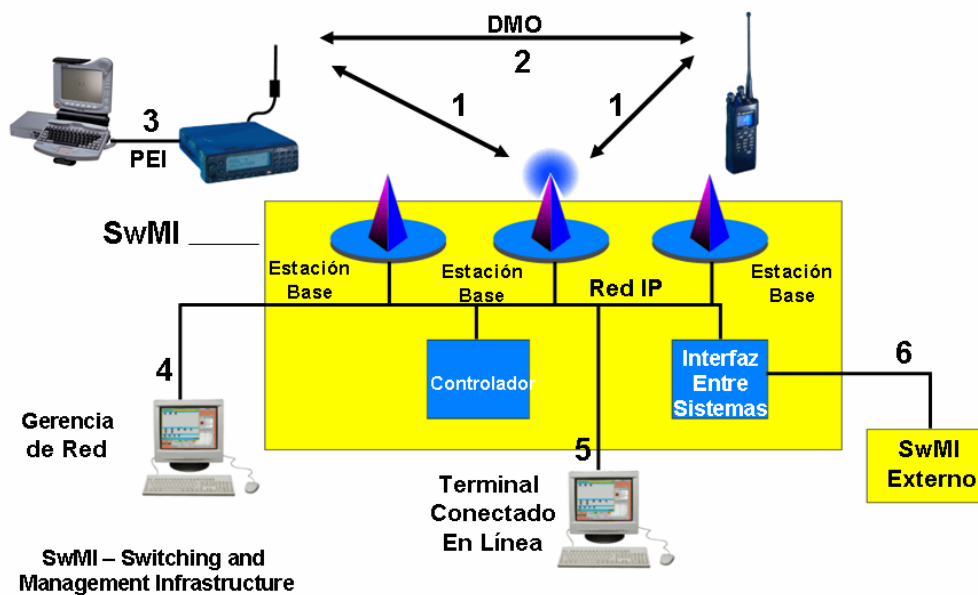
**Interfaz Aire en Modo Directo:** En la operación en Modo Directo, los usuarios radio pueden comunicar directamente con cualquier otro sin necesidad de utilizar la infraestructura del sistema. En este modo los servicios disponibles son:

- Llamada Privada.
  - Llamada de Grupo.
  - Servicio de Transporte de Datos Cortos.
  - El Modo Directo también proporciona una cobertura extendida, mediante la utilización de una radio como repetidor móvil entre terminales radio DMO (en modo directo) y la infraestructura trunking del sistema
2. **Interfaz Hombre –Máquina:** Este interfaz proporciona un juego de funciones estandarizadas, operadas mediante teclado, para facilitar a los usuarios la utilización de los terminales radio móviles de diferentes fabricantes.
  3. **Interfaz de Equipo Terminal:** Este es un Interfaz serie entre el equipo radio móvil y un dispositivo periférico de datos externo.
  4. **Gateway con Redes Externas:** Permite la conexión de redes telefónicas externas para enviar y recibir llamadas desde centralitas privadas (PABX), desde la red telefónica pública (RTC o RDSI), o redes de datos tales como X.25, Intranet privada e Internet.
  5. **Interfaz de Terminal Remoto por Línea:** El interfase de terminal remoto por línea puede ser considerado como un abonado más donde la parte inferior del protocolo aire ha sido reemplazada por un enlace ISDN. La intención es que este pueda ser utilizado como un terminal en total conformidad con el estándar TETRA pero conectado por línea.
  6. **Interfaz entre Sistemas:** Se trata de un Interfase entre Sistemas TETRA que permita la interconexión de sistemas de distintos fabricantes de forma que puedan trabajar conjuntamente y permitir a los usuarios de una red poder migrar a un área servida por otro sistema. La implantación del estándar ISI está aún



siendo desarrollada por los fabricantes de Sistemas TETRA. La especificación de este estándar incluye el “hand-over” para llamadas de voz y datos de forma que un abonado pueda pasar de un sistema TETRA a otro de distinto fabricante, incluyendo las llamadas privadas, de grupo y telefónicas.

Esto se puede ver en la siguiente gráfica:



#### **4. Características y niveles de señal del sistema**

##### **a. Características Operativas del sistema:**

El sistema de comunicaciones TETRA presenta características de funcionamiento propias del estándar ETSI que deben cumplir los equipos para garantizar la interoperabilidad entre ellos.

##### **1. Características básicas:**

- Tiempo de establecimiento de llamada < 300 mseg.
- Calidad de la voz: mejor que en los sistemas analógicos
- Tiempo de establecimiento de llamadas de datos:
- Conmutación de circuitos < 300 mseg.



- Conmutación de paquetes  $< 2$  seg.
- Retardo de tránsito para datos en modo paquete orientados a conexión inferior a 500 msec. (Paquete de 100 octetos).
- Retardo de tránsito para datos modo paquete no orientados a conexión: 3 seg., 5 seg., 10 seg., según prioridad.
- Régimen binario neto: hasta 19,2 Kbit/s

Desde el punto de vista de diseño del sistema el ETSI ha supuesto las siguientes hipótesis de cálculo:

- Dimensiones típicas del sistema: entre 1.000 y 100.000 MS
- Área de cobertura: desde 50 Km<sup>2</sup> a nacional
- Densidad de usuarios: 0,1 a 70 usuarios/ Km<sup>2</sup>
- Velocidad de los móviles: desde 0 a 150 Km/h
- Duración media de la llamada: 30 seg.
- Tráfico por usuario: 20 mE
- Longitud de los mensajes: cortos 100 octetos / largos 10.000 octetos
- Número de mensajes/hora/usuario: cortos 20/hora - largos 0,5/hora

## 2. Características del Enlace de Radio:

- Tipo de acceso: Multiacceso TDMA con cuatro intervalos por trama. Más adelante, en el punto 2.6, se desarrollará más a fondo.
- Canalización: A 25 KHz.
- Retardo multitrayecto máximo: Es de 5  $\mu$ s. En ciudad, las condiciones de propagación multitrayecto suponen retardos no superiores a este valor.
- Relación portadora/interferencia cocanal: El umbral de pérdida de calidad se estima en una relación C/IC= 19 dB.



- Modulación utilizada: Se ha elegido la modulación digital  $\pi/4$  DQPSK de alto rendimiento con filtros conformadores en coseno alzado con un parámetro de caída progresiva  $\alpha=0,35$ .
- Velocidad de modulación: Es de 36 Kbps.
- La reelección de la célula, una vez que el terminal se encuentra suscripto a una radio base, el terminal puede realizar una reelección cuando el proceso no es satisfactorio. Puede hacerlo en el modo desocupado (idle) o en el modo tráfico. Se establecen cuatro categorías de reelección:
  - a. Reelección lenta, es obligatoria para todos los móviles.
  - b. Reelección rápida, es opcional y tiene la ventaja de una menor interrupción del servicio en el cambio de célula, en comparación con la lenta.
  - c. Reelección libre, cuando falla otra reelección.
  - d. Traspaso (Handover), con continuidad de llamada, implica reelección rápida, es opcional.

El control del enlace de radio, necesario para realizar las funciones de traspaso, control de potencia y handover, se efectúa mediante mediciones de la intensidad de la señal, calidad y retardo en bucle, teniendo en cuenta el enlace de subida y de bajada (ida y vuelta de la señal). Los valores de intensidad de la señal, medidos en el conector de antena, se codifican según su gama como se indica en la tabla siguiente.

Intervalo de valores de potencia	Valor del parámetro de nivel de señal
< -110	0
-100 a -109	1
-109 a -108	2
...	...
-49 a -48	62
> -48	63



- Los receptores de los terminales móviles deben ser sincronizados con la radio base, esto involucra los siguientes aspectos:
  - a. Frecuencia y tiempo del receptor.
  - b. Sincronismo de tramas.
  - c. Base de tiempos.
  - d. Linealización de los transmisores: Como consecuencia de utilizar la modulación digital  $\pi/4$  DQPSK y el filtro digital asociado, es preciso.
- Los transmisores deben ser linealizados: Como consecuencia de utilizar la modulación digital  $\pi/4$  DQPSK y el filtro digital asociado, es preciso linealizar el transmisor, ya que no es posible utilizar un amplificador lineal Clase A debido a su bajo rendimiento y por tanto alto consumo.
- Sincronización: Realiza las siguientes funciones:
  - a. Sincronización de la frecuencia y reloj del receptor con la BTS.
  - b. Ajuste de la base de tiempos del receptor.
  - c. Ajuste de la trama temporal, para el enlace ascendente.
- Temporizaciones: Son las precisas para realizar correctamente el multiacceso TDMA, siendo preciso extraer datos de los contadores de las radio base, tanto si transmiten como si no lo hacen, ajustando los contadores de los terminales, sincronizándolos con la radio base. Es preciso compensar las variaciones del retardo de propagación entre radio bases y terminales, para ello la radio base envía a cada terminal una señal de avance temporal “Timing Advance” (TA), que es función del retardo; el terminal inicia su transmisión en el instante  $T_0 + TA$ , siendo  $T_0$  el instante básico teórico, de este modo las ráfagas del terminal llegan correctamente a la radio base, a pesar de que la distancia varíe. Este proceso recibe el nombre de “ajuste adaptativo”, y va ligado al proceso de *selección de la célula*, ya mencionado.

**Bandas de Frecuencias:** Si bien el sistema TETRA está diseñado para trabajar sin problemas en las bandas de PMR y PAMR normales, las administraciones pretenden



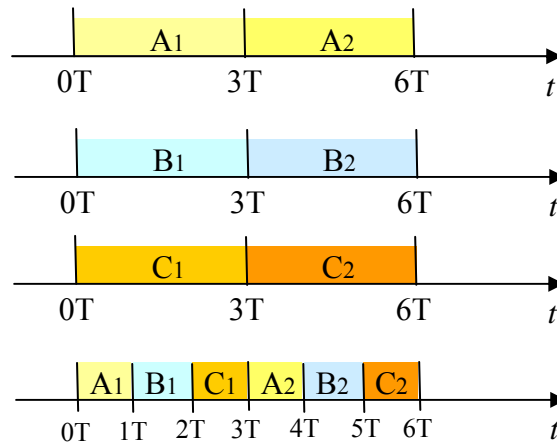
asignar frecuencias concretas de trabajo para los sistemas TETRA. Hasta el momento se ha llegado a los siguientes compromisos:

- Banda de 800 MHz y 380-400 MHz, cedida por la OTAN, para servicios de policía y seguridad.
- Para aplicaciones comerciales, se contempla empezar en la banda de 410-430 MHz, para posteriormente ocupar otras que se asignen.
- Otras bandas en discusión son: 450/460, 460/470, 915/921 MHz

**Modulación:** La utilización de los canales RF de un Sistema TETRA está basada en la técnica de Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA), ésta permite cuatro canales de comunicación simultáneos para cada una de las portadoras RF con un ancho de canal de 25 KHz.

Por definición la Multiplexación por División de tiempo (TDMA) es la intercalación cronológica de muestras provenientes de varias fuentes, en ésta cada conexión origina un flujo de datos de información que son insertados en una línea de transmisión de mayor velocidad, esto permite la transmisión de varias señales por una única ruta o canal de transmisión, el proceso de mezcla puede realizarse a nivel de bits, byte o un bloque de tamaño fijo de bits. (Sistemas de Comunicaciones Digitales y Analógicas, Leon W. Couch II – Pearson Educación – 1997), (Redes de Comunicación, Alberto León, García Indra Widjaja, Mac Graw Hill, 2002).

Los datos transmitidos en la línea de transmisión se organizan en tramas, cada una de las cuales a su vez están divididas en un ciclo de ranuras temporales de igual tamaño, en cada trama se dedican una o más ranuras a cada una de las fuentes, a la secuencia de ranuras dedicadas a una fuente, de trama en trama se lo llama canal. Cada ranura temporal contiene un carácter de datos, donde usualmente los bits de inicio y fin de cada carácter se eliminan antes de la transmisión, siendo reinsertados por el receptor, lo que mejora la eficiencia, esto se puede ver en la figura siguiente:



La línea de transmisión envía una unidad de información cada  $T$  segundos, y la señal combinada tiene una estructura de trama que consta de 3 ranuras, una para cada usuario. El tamaño de la ranura y la razón de repetición determinan la tasa de transferencia de bits en las conexiones individuales.

Los datos recibidos en el receptor, se demultiplexan y se encaminan al destino apropiado.

**Modulación TETRA:** El sistema de modulación utilizado en el sistema TETRA consiste en la modulación avanzada  $\pi/4$  DQPSK ( $\pi/4$ -shifted, **Differential Quaternary Phase Shift Keying**), donde la velocidad de modulación es de 36 Kbit/s.

Notar la diferencia entre *bits* y *símbolos*. Por símbolo se entiende a la agrupación de bits que se transmiten en cada salto de fase; así en el caso de la modulación BPSK (“Binary Phase-Shift Keying”) se transmiten símbolos de un sólo bit, pero en la QPSK (“Quadrature Phase-Siht Keying”) se transmiten dos bits por salto de fase. Esta técnica podemos potenciarla añadiendo diferentes niveles de AM, alcanzando estructuras sumamente potentes; la máxima utilizada es la denominada 16-QAM (“16-symbol quadratura amplitude modulation”).

Estas técnicas, son la principal causa del gran rendimiento de las comunicaciones digitales. No obstante, hay que destacar que cuanto mayor es el





número de símbolos transmitidos, mayor es la sensibilidad del demodulador a los ruidos e interferencias, por lo que el receptor debe ser más sofisticado y preciso.

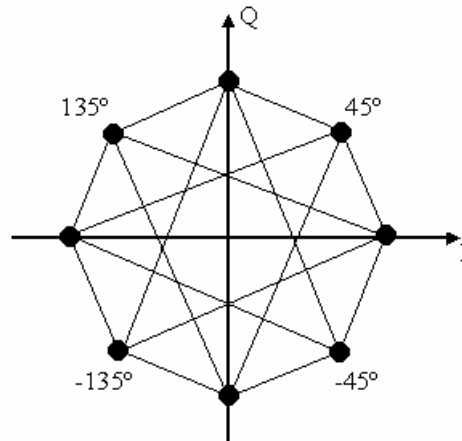
El inconveniente de la modulación QPSK es el espectro ocupado (lóbulos laterales importantes cuando la señal moduladora pasa por amplificadores no lineales, lo que la hace no adecuada para aplicaciones móviles). Para disminuir el espectro se ha propuesto la modulación O-QPSK (Offset-QPSK), en la que se realiza un desplazamiento de medio periodo de bit para suavizar las transiciones de fase y, por tanto, reducir notablemente el espectro generado; pero tiene el inconveniente de precisar una demodulación coherente complicada.

Una modificación importante de la modulación QPSK descrita, es la  $\pi/4$  **DQPSK** que fue la primera modulación de fase que se introdujo en los sistemas móviles digitales, y que es la que utiliza el sistema TETRA (y otros sistemas no europeos avanzados, D-AMPS en USA y JDC en Japón), donde se añaden incrementos de fase de  $\pi/4$  en cada salto de dos bits y que constituye un compromiso entre la modulación QPSK y la modulación O-QPSK ya que es una modulación diferencial que permite en recepción el uso de métodos de demodulación más sencillos que la demodulación coherente. Además,  $\pi/4$  DQPSK soporta mejor las perturbaciones del canal móvil tales como el efecto Doppler y el desvanecimiento Rayleigh.

Las transiciones de fase se relacionan con los bits de modulación mediante la relación indicada en la siguiente tabla, es decir, a cada pareja de bits no le corresponde una fase absoluta como en la modulación coherente, sino una transición de fase.

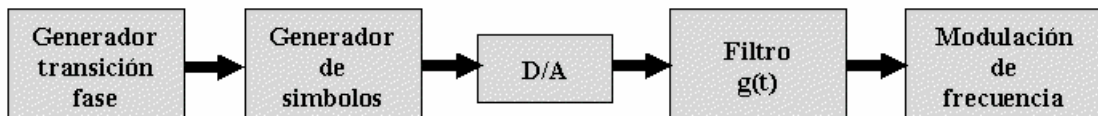
<b>B(2k-1)</b>	<b>B(2k)</b>	<b>Fase</b>
1	1	$-3\pi/4$
0	1	$3\pi/4$
0	0	$\pi/4$
1	0	$-\pi/4$

La figura siguiente representa el universo de símbolos posibles:

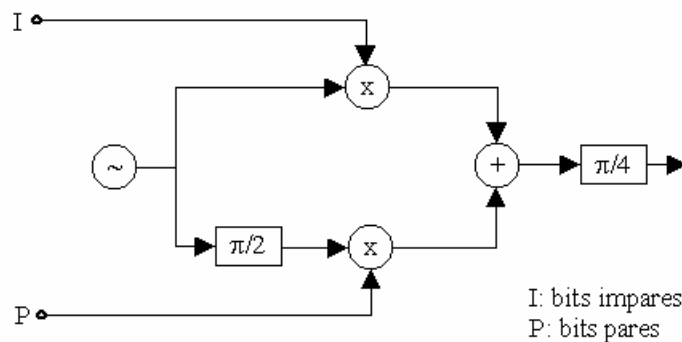


Salto de fase posibles en modulación  $\pi/4$  DQPSK.

La figura siguiente se puede ver el proceso para obtener la señal modulada



El filtro de modulación se define como el filtro que tiene una respuesta de frecuencia de la forma  $G(f)$  y tiene un retardo constante de  $t_0$ . Su efecto es suavizar las transiciones de fase. La figura siguiente representa el esquema de la modulación  $\pi/4$  DQPSK.



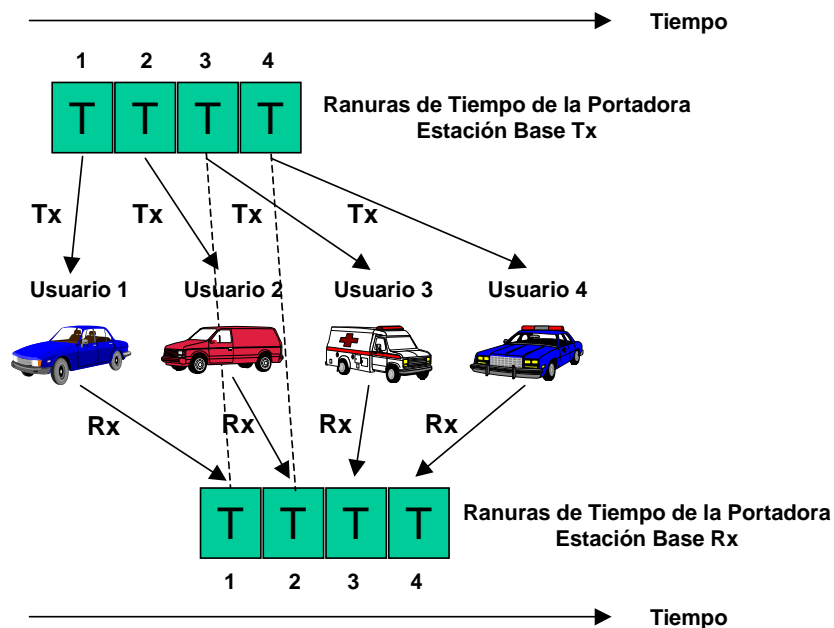
Las ventajas de haber elegido la modulación  $\pi/4$  DQPSK se pueden concretar en:

- Dos bits se transmiten en cada símbolo, lo que produce una eficiencia de 2 bits/seg./Hz.



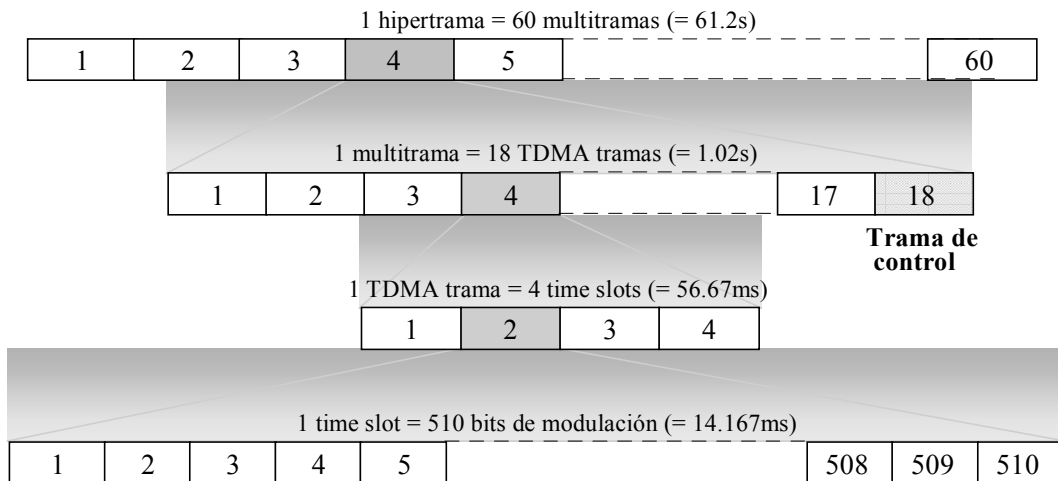
- Las transiciones no pasan por cero de amplitud lo que resulta muy importante para diseñar el amplificador linealizado de RF.
- Puesto que la información se transmite mediante cambios de fase, no es necesario conocer el valor absoluto de la fase de la señal, pudiéndose utilizar demoduladores muy simples, salvo en los casos que se precise ecualizar el receptor.

**Ranuras de Tiempo:** La utilización de los canales RF de un Sistema TETRA como ya se ha mencionado, se basa en la técnica de Acceso Múltiple por División en el Tiempo (TDMA), esto permite cuatro canales de comunicación simultáneos en cada una de las portadoras RF de 25 KHz de TETRA, como se ve en la figura siguiente:

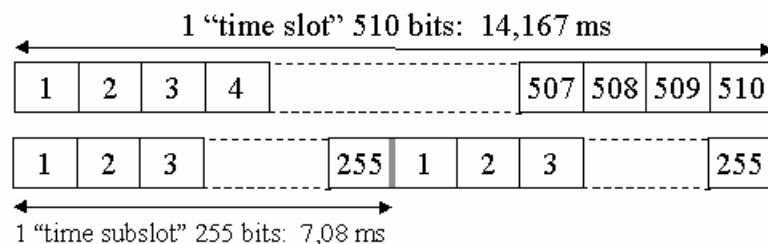


**Estructura de la Trama Tetra:** El ancho de banda de cada canal analógico, o portadora es de 25 KHz. De esta forma se facilita la emigración de los actuales sistemas analógicos MPT-13XX al sistema TETRA.

El sistema TETRA trabaja con un "timing" de modulación de 36 Kbit/s. El elemento básico de medida del tiempo es el "time slot" o ranura, de duración 14,166 ms, que podríamos traducir por *intervalo de tiempo* o simplemente *intervalo*.



La figura anterior indica las agrupaciones de intervalos, o particiones del tiempo, que constituyen lo que se denomina *estructura de la trama*. Como se ve, el tiempo se divide en: “frames”, “multiframe” e “hiperframes” (tramas, multitramas e hipertramas). Dentro de “estos tiempos” se insertarán los bits de mensajes. **Cada trama tiene 4 intervalos o ranuras.** En la figura siguiente se pueden ver las divisiones de los intervalos y subintervalos. Como se puede observar el intervalo puede soportar hasta 510 bits (téngase presente que la velocidad de reloj de la modulación es de 36 Kbit/s). Los subintervalos (“subslots”) soportan 255 bits. La duración de los bits de modulación es de 27,78  $\mu$ s.



En las especificaciones TETRA del ETSI [3], se numeran las tramas desde 1 a 18, denominándose tramas FN(1) y FN(18) respectivamente. La trama FN(18) se dedica exclusivamente para el control de los canales. Los intervalos se numeran de 1



a 4, denominándose respectivamente TN(1) y TN(4). Los subintervalos se denominan SSV.

**Canales de Control y Tráfico:** Las ranuras de tiempo de la portadora TETRA son utilizadas como canales de control y de tráfico. Los Canales de Control transportan los mensajes de señalización y paquetes de datos, razón por la cual siempre deberá existir al menos un Canal de Control en la primera portadora TETRA. Los Canales de Tráfico transportan la información de usuario (voz y datos).

La primera ranura de tiempo en la frecuencia portadora TETRA más baja es siempre utilizada como el Canal de Control Principal. El resto de los canales de comunicaciones (ranuras) son utilizados como Canales de Tráfico o canales de control adicionales si así se requiriese.

**Cuatro Canales de Comunicaciones  
por Portadora TETRA, también denominados  
como ranuras de tiempo TETRA**



**1ª Portadora TETRA**



**2ª Portadora TETRA**

**Canales Lógicos:** Estos se definen como la comunicación lógica entre dos partes de un sistema, desde un punto de vista formal y no físico, éstos se pueden clasificar en:

1. **Canales Lógicos de Control:** transportan exclusivamente mensajes de señalización e información de datos en modo paquete ya sea para el enlace ascendente como para el descendente, se pueden clasificar en:
  - a. **Canales de difusión,** es descendente y permite difundir información de uso general, ya sea información general de la red TETRA a los suscriptores, como identificación de la radio base, o información de



sincronización, que permite ajustar frecuencia, sincronización temporal y secuencias de entremezclado.

- b. **Canales de linealización**, éste es bidireccional y permite a la radio base y a los suscriptores linealizar su transmisor, ya sea para los suscriptores como para la radio base.
- c. **Canales de señalización**, es recibido por todos los móviles, pero la información transmitida es válida para un sólo móvil, o grupo de móviles, cada radio base necesita por lo menos un canal de señalización.
- d. **Canales de asignación de acceso**, de sentido descendente, indica a cada canal físico los intervalos de la trama que le han sido asignados, tanto para el sentido descendente como para el sentido ascendente.

2. **Canales de tráfico (TCH)**: Transportan mensajes de voz o de datos con conmutación de circuitos, pueden ser:

- a. Canales de tráfico de voz (TCH/S), se emplean únicamente para la transmisión de la voz.
- b. Canales mixtos, para voz y datos, según la velocidad de los datos, se han definido los siguientes:
  - i. TCH/7,2 (canales con velocidad neta 7,2 Kbit/s)
  - ii. TCH/4,8 (canales con velocidad neta 4,8 Kbit/s)
  - iii. TCH/2,4 (canales con velocidad neta 2,4 Kbit/s)

Es posible obtener velocidades de transmisión mayores: 9,6 Kbps, 19,2 Kbps y 28,8 Kbps, agrupando varios canales de tráfico

**Canales físicos:** Se entiende por canal físico al conjunto de dos portadoras (una para el enlace ascendente y la otra para enlace descendente). El tipo de canal físico utilizado en un intervalo determinado se indica en el canal lógico transmitido en ese intervalo, los canales físicos que se utilizan pueden ser: de control CP (“Control Physical channel”), de tráfico TP (“Traffic Physical channel”), sin dirección UP (“Unallocated Physical channel”).

**Ráfagas (Bursts):** Los mensajes de control y de tráfico del TETRA, se introducen en la trama anteriormente descrita mediante ráfagas o chorros discontinuos de bits. **En**

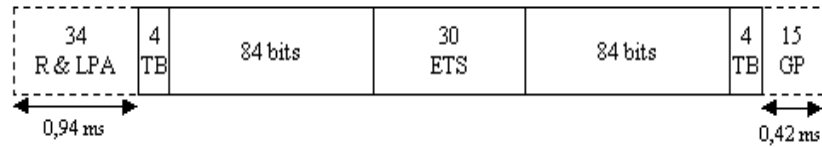


**cada intervalo (14,1 ms) se introduce una ráfaga**, que puede llegar a tener hasta 510 bits. Se definen siete tipos de ráfagas. En la figura siguiente se indica la estructura detallada de los siete tipos de ráfagas, y su posición en el tiempo dentro del intervalo (“time slot”). Las líneas de trazo interrumpido corresponden a los períodos de guarda y las de trazo continuo a los períodos activos. Se denomina período activo de la ráfaga a la parte del intervalo en que tiene lugar la transmisión de bits, teniendo en cuenta que los contenidos de las ráfagas son muy distintos, dependiendo del tipo de ráfaga; no obstante, algunos campos son fijos, por ejemplo:

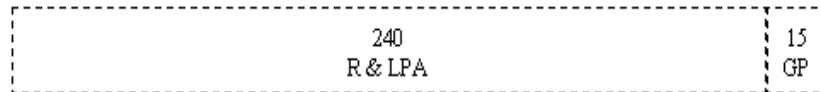
- Todas las ráfagas (salvo la continua normal del enlace descendente y la continua de sincronización del enlace descendente) tienen unos períodos de guarda variables, al principio y al final de la ráfaga, en los que no hay transmisión; los de comienzo permiten que el transmisor se linealice y alcance su potencia nominal (en la figura siguiente se denominan R & LPA), y los finales ayudan a evitar las colisiones entre ráfagas (denominados GP en la figura). Si las ráfagas se emiten de forma continua, al no haber interrupciones, no son necesarios períodos de guarda.
- Todas las ráfagas tienen una secuencia de “training” con la misión de ajustar el ecualizador receptor, evitando en lo posible los efectos de la transmisión multitrayecto.
- Las ráfagas ascendentes pueden transmitir informaciones separadas en dos campos: Bloque 1 y Bloque 2. Las ráfagas descendentes tienen un tercer campo (Bloque de Difusión), que consta de 30 bits y permite transmitir la información del canal lógico AACH. Los dos primeros bloques se utilizan como soporte de canales lógicos, es decir, para cursar información de tráfico o mensajes de señalización.



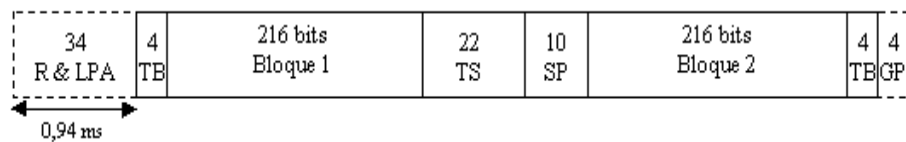
**Ráfaga de control de enlace ascendente**



**Ráfaga de linealización de enlace ascendente**



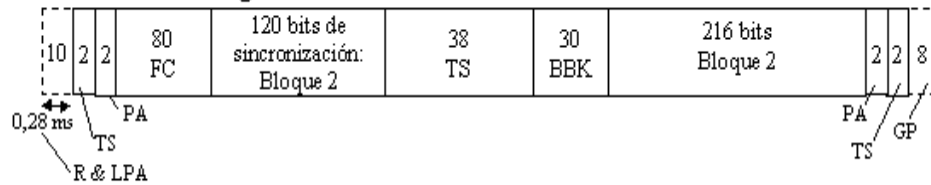
**Ráfaga normal de enlace ascendente**



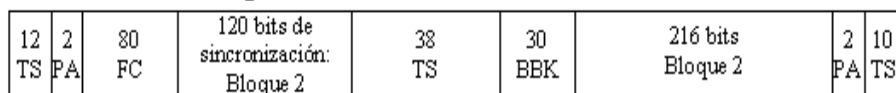
**Ráfaga continua normal de enlace descendente**



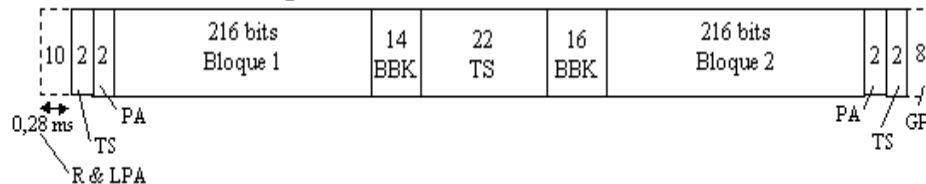
**Ráfaga discontinua de sincronización de enlace descendente**



**Ráfaga continua de sincronización de enlace descendente**



**Ráfaga normal discontinua de enlace descendente**



BBK: Bloque de difusión  
ETS: Secuencia de ajuste ampliada  
FC: Bits de corrección de frecuencia  
GP: Período de guarda  
LPA: Linealización del amplificador de potencia

PA: Ajuste de fase  
R: Margen de subida de potencia  
SP: Bits de reserva  
TB: Bits de cola  
TS: Secuencia de ajuste normal

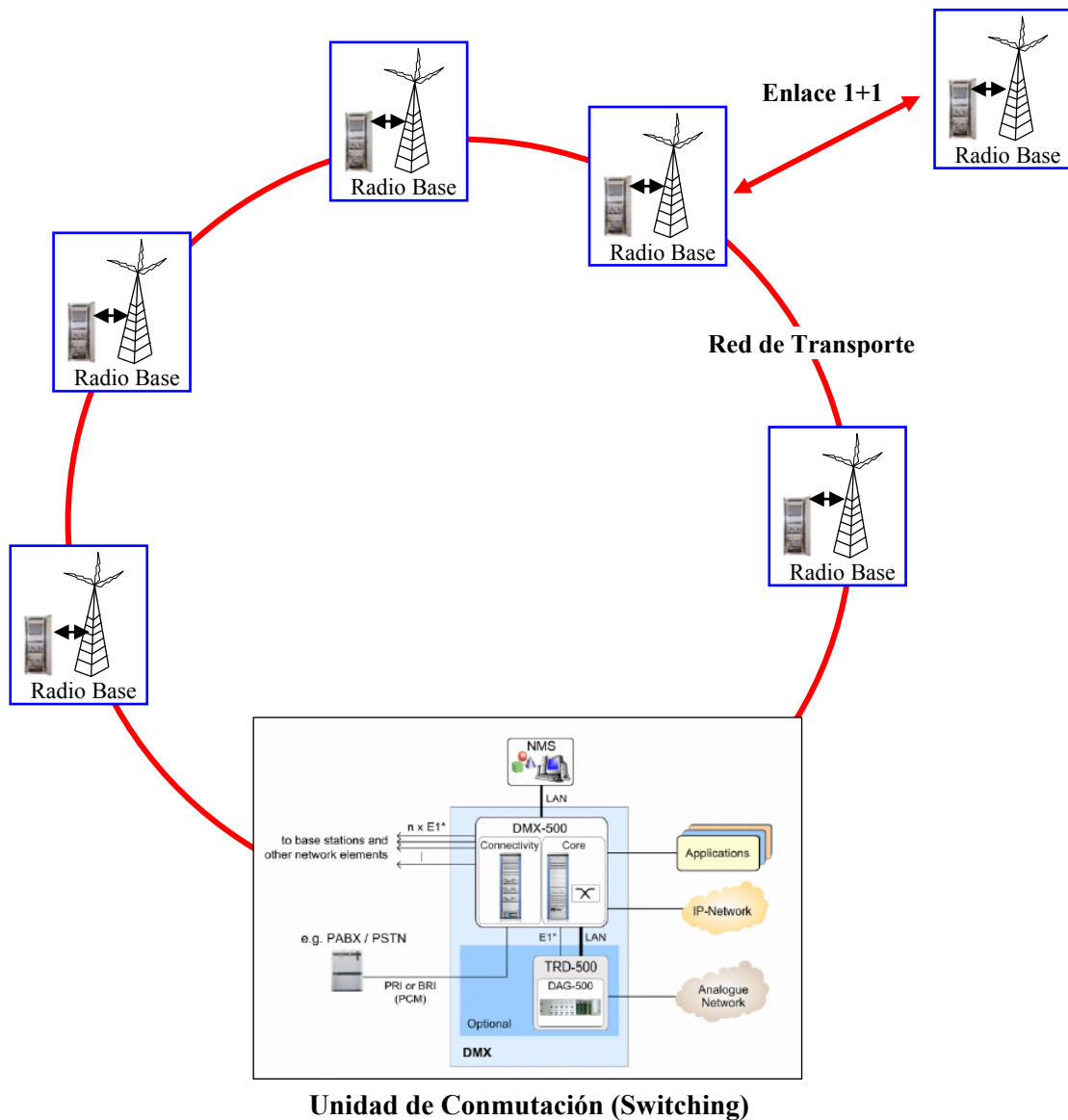




**b. Niveles mínimos de señal requeridos:**

La estructura de Radio Frecuencia de la red se compone de una serie de Radio Bases que suscriben una cierta cantidad de terminales portátiles, móviles y fijos. Estas radio bases poseen una cantidad de portadoras (canales) que distintas que responden a la cantidad de equipos que se deben suscribir a la misma tendiendo a mantener una cierta cantidad de tráfico mínima establecida (Erlang).

Las radio bases son elementos de la red, que constituyen verdaderas celdas que se interconectan con otros elementos de la red, a través de vínculos adecuados, ya sea mediante el uso de fibras ópticas o en la mayoría de los casos mediante enlaces de microonda que pueden operar en bandas de 7 Ghz., 15 Ghz., ó 23 Ghz., dependiendo esto de las distancia a cubrir y normativas de la CNC. Para dar confiabilidad a la red estos vínculos constituyen una estructura en anillo o cuando esto no es posible, mediante enlaces redundantes 1+1. La red utiliza una o más unidades de conmutación, donde la cantidad de estas unidades utilizadas depende del tamaño y topología de la red. Cada unidad de conmutación controla un determinado número de estaciones bases. La topología de la red puede ser muy variable, pudiendo conectarse en anillo, estrella, malladas o mixtas, se debe tener en cuenta que la red en anillo asegura un alto grado de redundancia y confiabilidad operativa. Un diagrama reducido que muestra la estructura de la red se puede ver en la siguiente figura:



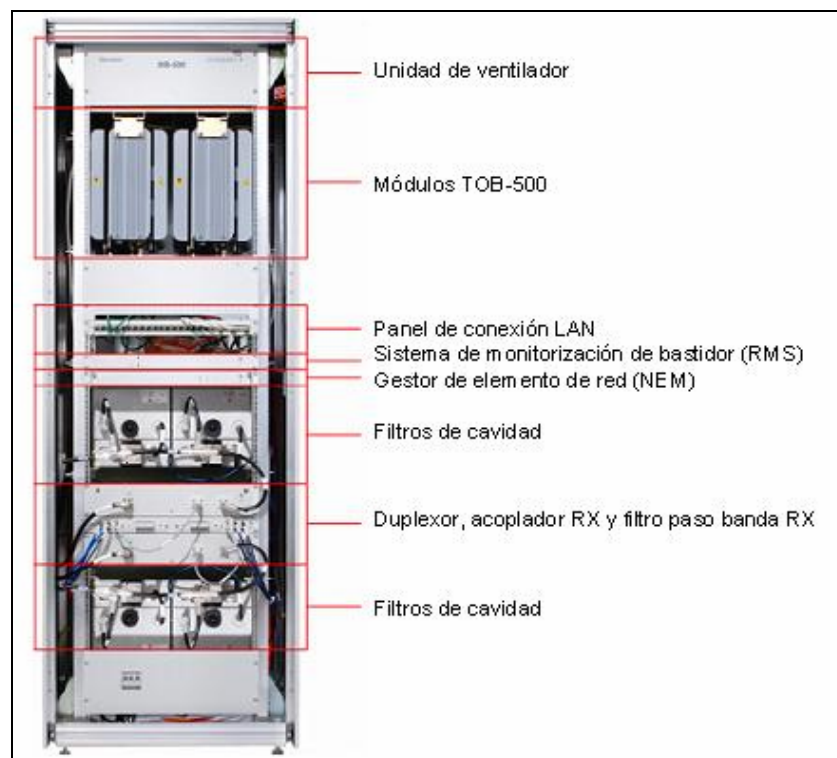
Dentro del sistema o red, la estación Radio Base es el elemento que proporciona cobertura de radiofrecuencia en su área de influencia determinada. En la red y con el fin de conferirle mayor confiabilidad y seguridad en casos determinados se diseña la ubicación de las radio bases de forma de obtener superposición en la cobertura, esto permite conferir a la red de radio frecuencia una cierta redundancia, ante la caída o salida de servicio de una radio base.

- **Radio Base:** La estación base **RBS** (Radio Base Transceiver Station) actúa como una pasarela entre el protocolo TETRA utilizado sobre la interfaz aire y



los componentes de conmutación, permitiendo la interconexión con los terminales suscriptores o terminales móviles. En este caso cada RBS puede configurarse con hasta 4 portadoras de RF, proporcionando así 1 Canal de Control y hasta 15 Canales de Tráfico.

En este caso cada RBS está equipada con 2 antenas para recepción, lo que le confiere una recepción en doble diversidad. La combinación de estas dos señales de recepción que provienen de las dos antenas (diversidad), constituye una forma efectiva de obtener un incremento en el nivel de señal recibido por la RBS, lo que provoca una mejora en la fiabilidad y rendimiento en la recepción con un costo reducido. Una radio base de 4 portadoras se puede ver en la siguiente figura, con dos módulos TOB-500 y 4 portadoras:



#### Radio Base de 4 portadoras Rohde & Schwarz - DIB-500/4

La determinación de la cobertura se realizará para un sitio que utiliza una radio base de 2 portadoras ( 8 canales), ésta utiliza como conexión estándar una interfaz E1 de 2 Mbit/s, que puede diseñarse tanto para conexiones punto a punto como para



aplicaciones lineales. La estación base incluye un multiplexor add/drop integrado que habilita un uso muy flexible de los canales de 64 Kbit/s incluidos en el enlace E1.

**Radio Base de 2 portadoras:** Las características más relevantes de la radio base de 2 portadoras se detallan a continuación:

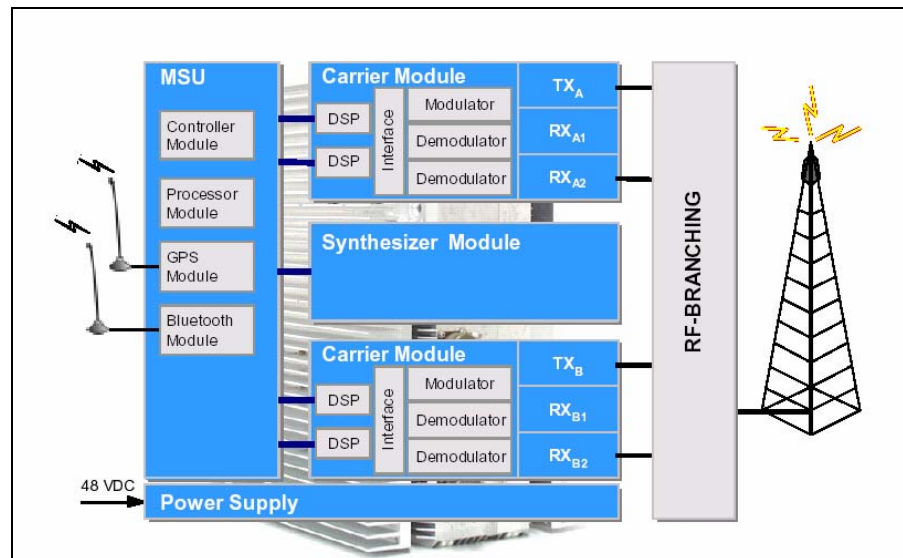
- Implementación de interfaz aire conforme a la norma EN 300-392-2 ( TETRA V+D ).
- Sensibilidad de recepción dinámica conforme a norma EN 300-392-2V2.3.2
- Recepción con diversidad de dos vías.
- Disponibilidad de redundancia (modo *fallback* y topología de anillo).
- Interfaces a conexiones múltiplex primarias.
- Interfaz al sistema de gestión técnica de red mediante canal de control embebido en el interfaz primario múltiplex o conexión local Ethernet.
- Configurable tanto de forma remota como de forma local mediante interfaces de mantenimiento.
- Detector de alarmas externas (acoplamiento de alarmas externas del emplazamiento).
- Actuadores externos (control de salidas).
- Bandas de frecuencia utilizada de 806 a 921 MHz.
- Potencia de salida de 15 W en conector de antena (señal modulada TETRA).
- Sistema de Distribución de Radio Frecuencia: constituido por los filtros, Duplexor de recepción, acopladores y combinadores de transmisión, etc.

**La estación radio base de 2 portadoras utilizada incluye:**

- 1 módulo TOB de 2 portadoras: Éste incluye una serie de sub módulos encargados de generar la señal de radio frecuencia, en este caso alojando 2



transceptores, un diagrama de lo que incluye se puede ver en la siguiente figura:



1. **El módulo MSU**, es el elemento central de conmutación de la estación base. Conmuta conexiones en modo circuito para transmisiones de voz y datos de los usuarios a los que presta servicio la estación base. La función de conmutación de la estación base soporta la conmutación de varios canales en modo circuito (8 Kbit/s). El módulo MSU proporciona todas las funciones necesarias para la conexión del módulo TOB-500 al segmento de conmutación mediante interfaces E1 ( G.703 / G.704 ). Soporta hasta 3 interfaces E1 y 3+1 interfaces Ethernet además del interfaz de sistema para propósitos de mantenimiento. Existen 3 interfaces E1 y 1 interfaz Ethernet para conexiones externas. Cada interfaz E1 cuenta con función *drop/insert* para permitir la asignación libre de canal dentro del interfaz de 2 Mbit/s. Además éste: suministra la señal horaria mediante el receptor GPS integrado, permite la transmisión de datos de señalización y control y gestión de las funciones de red de las unidades.



2. **El módulo Sintetizador**, proporciona las señales de tiempo y frecuencia para todas las portadoras TETRA basándose en la señal horaria de referencia que proporciona el receptor GPS integrado en la unidad MSU.
3. **Unidad de Portadora**, La unidad de portadora utilizada opera en la banda de frecuencias de 800 a 950 MHz., y desempeña todas las funciones del interfaz aire de una portadora junto con el receptor.
4. **Unidad de distribución de señal RF**, esta unidad enlaza el sistema radiante (dos conectores de antena) con las conexiones RF de la estación base (1 conexión TX y 2 conexiones RX por portadora). La diversidad en recepción se asegura en las estaciones base mediante distribución de la señal RF sin necesidad de una tercera antena. la unidad de distribución de señal RF incluye una serie de duplexores, acoplador en recepción, combinador mediante cavidad para transmisión y filtros pasa banda para recepción.

**Datos Técnicos Radio Base:** Los datos técnicos que describen las características de la radio base de las estaciones repetidoras utilizadas corresponden con la DIB-500/2 de Rohde & Schwarz, son los siguientes:

<b>DIB-500/2</b>	
Especificación interfaz aire	EN 300 392-2 V2.3.2 ( TETRA V+D )
Pruebas interfaz aire	EN 300 394-1 V2.3.1
Paso en frecuencia	6.25 KHz
Especificación de frecuencia	TX ( MHz ):   851 – 866   915 - 921 RX ( MHz ):   806 – 821   870 – 876
Separación de portadoras	Min. 250 KHz (cavidad)
Separación dúplex	≥ 45 MHz @ ≥ 806 MHz
Diversidad receptor	Doble



Modo de operación	Duplex
Sincronización	GPS
Potencia de transmisión en antena	40 dBm (nominal)
Monitorización VSWR	Configurable, ajuste fábrica 40 dB <sub>m</sub>
Sensibilidad	-115 dBm estático -106 dBm dinámico
Consumo de potencia	550 W (2 portadoras)
Tensión alimentación	-48 VDC nominal
<b>Interfaces</b>	
Número de interfaces E1	3
Impedancia de interfaz E1	120 Ω
Número de interfaces LAN	1 por módulo TOB para servicio en panel de conexión (RJ-45)
Especificación interfaces LAN	Ethernet 100BaseT
Entradas para alarmas externas	8
Conexión de antena (2 Tx/Rx )	2 x 7/16"
Conexión antena GPS	Tipo N
<b>Medioambientales</b>	
Temperatura de operación	5 °C a +40 °C
Humedad relativa operación	5% a 85%, sin condensación
Temperatura almacenamiento	-25 °C a +55 °C

**Antenas de transmisión y recepción:** El sistema radiante de la estación radio base está compuesto por dos antenas, la radio base dispone de dos conectores de antena signados como Tx/Rx.

En éste caso se utilizan antenas con diagramas de irradiación del tipo omnidireccional, que permiten asegurar la cobertura para todas las dos portadoras radiadas por la estación. Las antenas utilizadas son marca RFS modelo **Omni AO8410M-54T0 806-896MHz 10dBd**, esta se puede ver en la figura siguiente:



Los datos técnicos de estas antenas más sobresalientes para el cálculo de cobertura son los siguientes:

TModelNumber	<b>AO8410R-54T0</b>
Frequency Band	<b>Trunking/SMR (806-824, 851-869 MHz)</b>
Horizontal Pattern	<b>OmniDirectional</b>
Antenna Type	<b>Fiberglass Omni</b>
Electrical Down Tilt Option	<b>Fixed</b>
Gain, dBi (dBd), dBi (dBd)	<b>12.1 (10)</b>
Frequency Range, MHz, MHz	<b>806-869</b>
Electrical Downtilt, deg, deg	<b>0</b>
Gain (Omni), dBi (dBd), dBi (dBd)	<b>12.14 (10)</b>
VSWR	<b>&lt; 1.5:1</b>





Vertical Beamwidth, deg, deg	5.5
Polarization	Vertical
Maximum Power Input, W, W	500
[*Top_Frequency*]	806-869 MHz

**Datos Técnicos Terminal Portátil:** El terminal portátil que se utilizará para realizar el estudio es el equipo marca Sepura modelo SRH 3500, el que se puede ver en la figura siguiente:



**Equipo Sepura modelo SRH 3500**

Los datos técnicos más relevantes para el cálculo de la cobertura de este equipo transceptor son los siguientes:



#### GPS Receiver (SRH3500 sGPS™)

- Fully Integrated sGPS™ receiver
- -182dBW (-152dBm) acquisition sensitivity
- -185dBW (-155dBm) tracking sensitivity

#### Security

- End 2 End Architecture with tamper protection
- Fully integrated hardware solution, enabled via software upgrade
- Integral SIM connector

#### Weight

- Radio without battery: 143g
- With Standard battery pack: 214g
- With High Capacity battery pack: 247g

#### Dimensions

- Height: 130mm
- Width: 58mm
- Depth: 30mm

#### Frequency Bands

- 300 - 344MHz<sup>1</sup>
- 350 - 372MHz<sup>1</sup>
- 368.5 - 400MHz
- 400 - 433MHz
- 440 - 473MHz
- 806/825 paired with 851/870MHz<sup>1</sup>

#### Power

- 1W RF Power (customisable)
- Adaptive Power Control supported
- RF power control in 3 steps of 5dB

#### Receiver (Class A)

- -112dBm static sensitivity
- -103dBm dynamic sensitivity

#### Environmental

- Dust & Water protection to IEC529 IP54
- ETS 300 019 Drop & Vibration
- Storage Temp -40°C to +85°C
- Operating Temp -20°C to +60°C

#### Power Supply

- 7.4V (nominal) Lithium Ion Intelligent Battery packs -
  - 1130mAh Standard Pack
  - 1850mAh High Capacity Pack

#### Voice Services Supported

- Full Duplex Calls (to MS and PABX/PSTN)
- Half Duplex Calls (Individual and Group)
- Priority Call
- Emergency Call (Pre-emptive Priority Call)
- Talking Party Identity
- Calling Line Identity Presentation
- DTMF Dialling

## 5. Cálculo de niveles de señal

Para el cálculo de los niveles de señal en primer lugar se debe tener en cuenta los parámetros de diseño establecidos para determinar la cobertura, para esto se establece como primer objetivo la condición de que los porcentajes de calidad de cobertura deberán ser del 95 % del tiempo en el 95% de las ubicaciones, esto se refiere a el tráfico y la cobertura. Los terminales o suscriptores utilizados son del tipo de mano con su



propia antena. Por esta se ha asumido que el campo eléctrico mínimo dentro del área de cobertura (indicado con color rojo), sea considerado con el terminal colocado a una altura de 1,5 metros, proporcionando para el servicio requerido un nivel de señal que debe ser 20 dBm superior a la sensibilidad dinámica del terminal (-103 dBm de sensibilidad dinámica), lo que da un nivel de señal de -83 dbm en la zona considerada.

a. **Cálculo de los niveles de señal utilizando la atenuación a espacio libre.**

En este caso se realizará el cálculo de la cobertura para niveles de señal de -83 dBm, -98 dBm y -103 dBm, teniendo en cuenta solamente la atenuación a espacio libre. Esto significa que no se tienen en cuenta ni obstrucciones, ni el perfil del terreno, ni reflexiones, ni arboleda, o sea que este cálculo indica hasta que distancia se puede obtener el nivel de señal indicado, en un caso ideal. Se realizarán los cálculos para el caso del enlace descendente, considerando los parámetros de la RBS en transmisión y del portátil en recepción. Para el enlace ascendente se deben considerar los parámetros de las RBS en recepción y del portátil en transmisión. Se debe tener en cuenta que siempre se busca balancear los enlaces ascendentes y descendentes, para optimizar los recursos, por esto los valores obtenidos para el enlace descendente pueden considerarse similares a los valores del enlace descendente. Los parámetros a utilizar son los siguientes:

1. Sensibilidad dinámica de RBS (en conector de antena) = -106 dBm.
2. Potencia de salida de la RBS (en conector de antena) = 16W (+42 dBm)
3. Potencia de salida portátil = 1 W (+30 dBm)
4. Sensibilidad dinámica del portátil = -103 dBm
5. Ganancia de antena portátil (por presencia del cuerpo) = -5 dBm
6. Ganancia de antena RBS = +12 dBi
7. Ganancia Diversidad antenas RBS = +3 dB
8. Perdidas en cables y conectores (alimentador antena RBS) = - 3 dB
9. Perdidas adicionales Interf./desvanecimiento = -3 dB
10. Atenuación a Espacio Libre = cálculo según Distancia



Se realiza el cálculo para el enlace descendente donde el nivel de señal para este caso corresponde a la potencia de señal recibida por el equipo portátil o móvil, los parámetros utilizados son los siguientes:

$$P_{\text{Rec Desc}} (\text{dBm}) = P_{\text{Tx RBS}} - A_{\text{cables y conectores}} + G_{\text{ATx}} - A_{\text{interf./Degradación}} - A_{\text{Espacio Libre}}$$

$$P_{\text{Rec Desc}} (\text{dBm}) = 42 - 3 + 12 - 3 - A_{\text{Espacio Libre}} = 48 - A_{\text{Espacio Libre}}$$

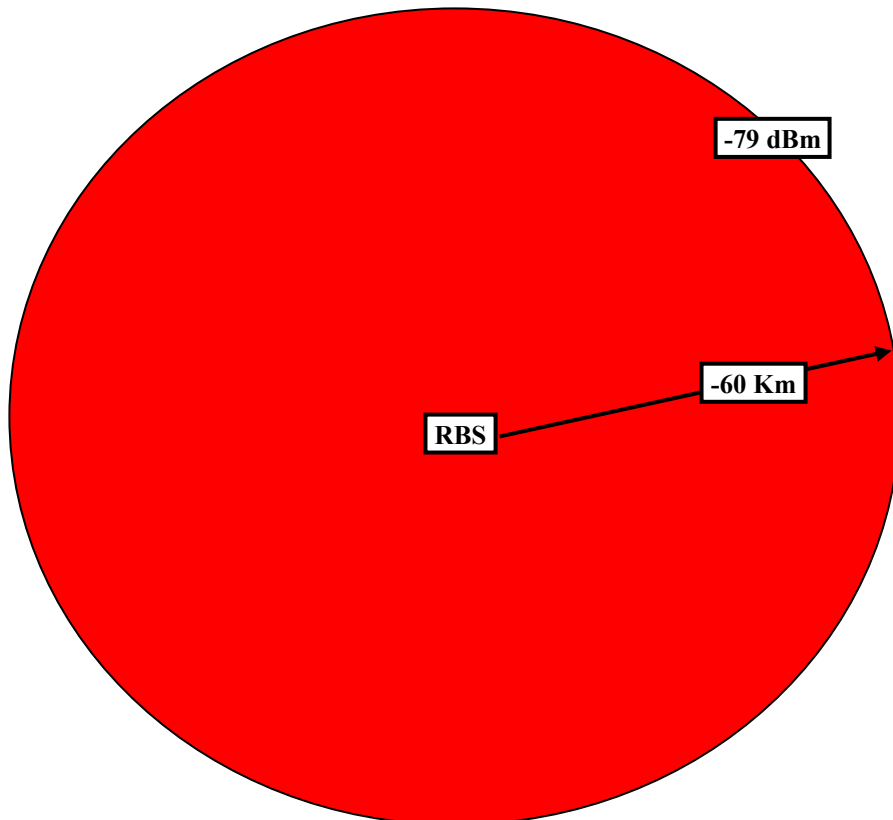
$$= 48 - [32,45 + 20 * \log(850) + 20 * \log(d_{\text{Km}})]$$

<b>Atenuación a Espacio Libre</b>		
Distancia	AEL	Descendente
Km		PRec Desc
	dB	dBm
1	91,04	-43,04
2	97,06	-49,06
3	100,58	-52,58
4	103,08	-55,08
5	105,02	-57,02
6	106,60	-58,60
7	107,94	-59,94
8	109,10	-61,10
9	110,12	-62,12
10	111,04	-63,04
11	111,87	-63,87
12	112,62	-64,62
13	113,32	-65,32
14	113,96	-65,96
15	114,56	-66,56
16	115,12	-67,12
17	115,65	-67,65
18	116,14	-68,14
19	116,61	-68,61
20	117,06	-69,06
25	119,00	-71,00
30	120,58	-72,58
40	123,08	-75,08
50	125,02	-77,02
60	126,60	-78,60

Se considera hasta una distancia de 60 Km debido a que a mayores distancias, si bien se obtiene cobertura de radio frecuencia, la transmisión de la información



digital se hace inestable debido a problemas de pérdida de sincronismo provocados por la distancia. Una grafica que refleja el resultado indicado en la tabla anterior para el enlace descendente se puede ver a continuación:



En la gráfica anterior, se indica hasta que distancia para el enlace descendente, se puede alcanzar en este caso un nivel de señal igual o mejor que  $-79$  dBm (círculo rojo), donde se observa que el nivel de señal indicado se alcanza hasta una distancia de 60 Km. Se debe tener en cuenta que el cálculo se ha realizado solamente considerando la atenuación a espacio libre, lo que representa condiciones de propagación óptimas, en donde las antenas transmisora y receptora se están viendo, esto es, no se ha tenido en cuenta ninguna pérdida adicional causada por: arboleda, edificación, perfil del terreno, etc. Por esto se puede asegurar que ésta es la máxima distancia a la cual se puede obtener el nivel de señal indicado. Además el cálculo realizado se puede aplicar a cualquier radio base, ya que no se ha tenido en cuenta ningún parámetro que dependa de las características del terreno ni ubicación.



**b. Cálculo de los niveles de señal utilizando el método Okumura-Hata.**

**Propagación en Entornos Complejos:** Cuando la pérdida de propagación sufre varios efectos superpuestos, se está frente a un entorno complejo, como por ejemplo un entorno urbano de comunicación (Telefonía móvil), en este caso la antena Tx y la Rx generalmente no se ven, la intensidad del campo es el resultado de la contribución de varias ondas, tales como ondas reflejadas y difractadas en edificios y obstáculos del entorno. Estas señales pueden llegar al receptor con distinta fase, pudiendo llegar éstas en forma constructiva o destructiva, siendo esto muy dependiente de la posición del receptor, pudiendo con un desplazamiento de  $\frac{1}{2}\lambda$  (media longitud de onda) transformar las contribuciones destructivas en constructivas, pudiendo provocar variaciones del orden de 40 dB en la señal recibida. En estos casos se debe asociar a las pérdidas de propagación una atenuación con probabilidad de que pueda ocurrir, con el objetivo de garantizar que la pérdida de propagación no supere un porcentaje determinado (90,95 o 99%) del tiempo, este valor depende de la confiabilidad que se quiera dar al servicio.

**Modelo de Okumura-Hata:** Este es un modelo empírico de los más utilizados en el diseño de redes de comunicación inalámbricas, que permite distinguir entre zonas urbanas: muy densas, de baja densidad o zonas rurales. Estos modelos empíricos sólo proporcionan el valor medio esperado de las pérdidas de propagación en un entorno genérico y que depende de la distancia entre la radio base y el móvil, obviamente el nivel de la señal recibida en el receptor fluctuará al cambiar de ubicación el móvil, aún manteniendo la distancia al transmisor. Además este modelo se aplica para frecuencias comprendidas entre 150 Mhz y 1500 Mhz (aunque en la actualidad el valor máximo ha sido extendido), con alturas para la estación base (RBS) entre 30m y 200m y para el portátil o móvil entre 1m y 10m.

Inicialmente Okumura realizó una gran cantidad de mediciones de campo en áreas de Japón, obteniendo una serie de curvas de propagación, las que proporcionan una gran cantidad de valores de intensidad de campo en medios urbanos. A los datos obtenidos se le aplicaron correcciones que tienen en cuenta



efectos como pendiente del terreno, ondulación del terreno, heterogeneidad del terreno, presencia de obstáculos y hasta la orientación de calles y densidad de edificación en entornos urbanos, permitiendo obtener resultados bastante acordes con las mediciones realizadas.

Con el fin de informatizar el método, Hata desarrollo expresiones numéricas que convergen a las curvas de propagación de Okumura, obteniéndose una serie de expresiones que proporcionan la pérdida de señal ( $L_b$ ) en entornos urbanos, suburbanos y rurales. La ecuación que permite obtener el valor de la potencia de señal recibida en el receptor utilizando el modelo de Hata es la siguiente:

$$P_{Rec} = -L_b + P_T - A_{Coax} + G_T + G_R$$

Donde:  $P_{Rec}$  = Potencia de señal recibida en el móvil o portátil

$L_b$  = Pérdida de propagación según el entorno (O-H)

$P_T$  = Potencia de transmisión

$A_{Coax}$  = Atenuación de cable coaxial y conectores

$G_T$  = Ganancia antena transmisora

$G_R$  = Ganancia antena receptora

El término de la expresión anterior que permite tener en cuenta el tipo de entorno es  $L_b$ . Los tipos de entornos clasificados por este método son:

- Zona rural.
- Zona Suburbano o baja densidad.
- Ciudad Media/Pequeña.
- Ciudad Grande.

Para obtener el valor del nivel de la señal que ingresa al receptor del móvil o portátil en los diversos entornos se debe obtener el valor de  $L_b$  para los diversos entornos. La expresión general para este término es:

$$L_b \text{ (dB)} = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_t + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d - a(h_m) - K$$

Donde  $a(h_m)$ , es un factor de corrección de altura de antena receptora, que depende del entorno y el factor  $K$  es usado para corregir la fórmula que tiene en



cuenta el tipo de área. La categoría de Ciudad Grande se utiliza cuando hay edificios con una altura superior a los 15m. La fórmula final para este tipo de servicio (Tetra), donde la frecuencia de operación es de 850 Mhz., la altura de la antena receptora es de 1,5 m y la distancia hasta donde se realiza el cálculo es de 20 Km se expresa como:

$$L_b \text{ (dB)} = 146,18 - 13,82 \log h_t + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d - a(h_m) - K$$

Donde:  $f$  = Frecuencia en Mhz.,

$h_m$  = Altura sobre el suelo de la antena Rx (m), entre 1 y 10 m.

$d$  = Distancia entre Tx y Rx (Km), entre 1 y 20 Km.

$a(h_m)$  = Factor de corrección por el valor de  $h_m$  y entorno.

$h_t$  = Altura efectiva de la antena Tx (m) entre 30 y 200 m., para su cálculo se tiene en cuenta la altura media del terreno.

**Obtención de la altura media del terreno ( $h_t$ ):** Ésta representa el valor medio del terreno alrededor de la antena transmisora, para esto se toman 8 radiales comenzando por el radial norte y luego uno cada 45°, se toman las cotas del terreno sobre estos radiales cada 1 Km, comenzando a los 3 Km de la radio base y finalizando a los 15 Km. EL promedio de estas mediciones será la altura media del terreno. Con el valor de la altura media del terreno se puede obtener el valor de la altura efectiva de la antena transmisora con:

$$h_t = h_0 + c_0 - h_{mt}$$

Donde:  $h_0$  = altura de la antena sobre el suelo

$c_0$  = cota del terreno al pie del mástil de la antena transmisora

$h_{mt}$  = valor medio del terreno (si el desnivel del terreno es pequeño, se puede hacer a  $h_t = h_0$ )

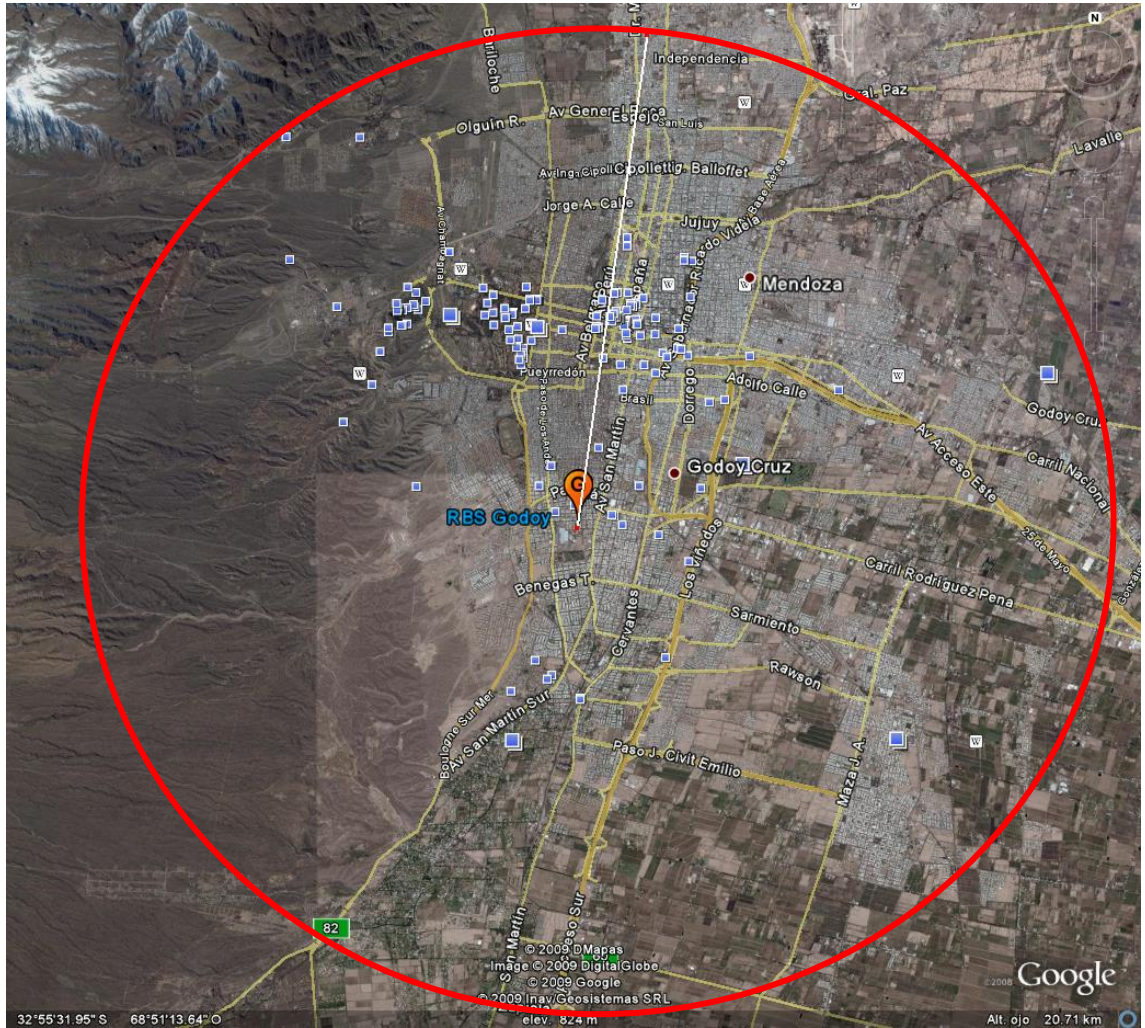
Según el tipo de zona a considerar se le deben realizar las correcciones indicadas para los términos que se indican en tabla siguiente:



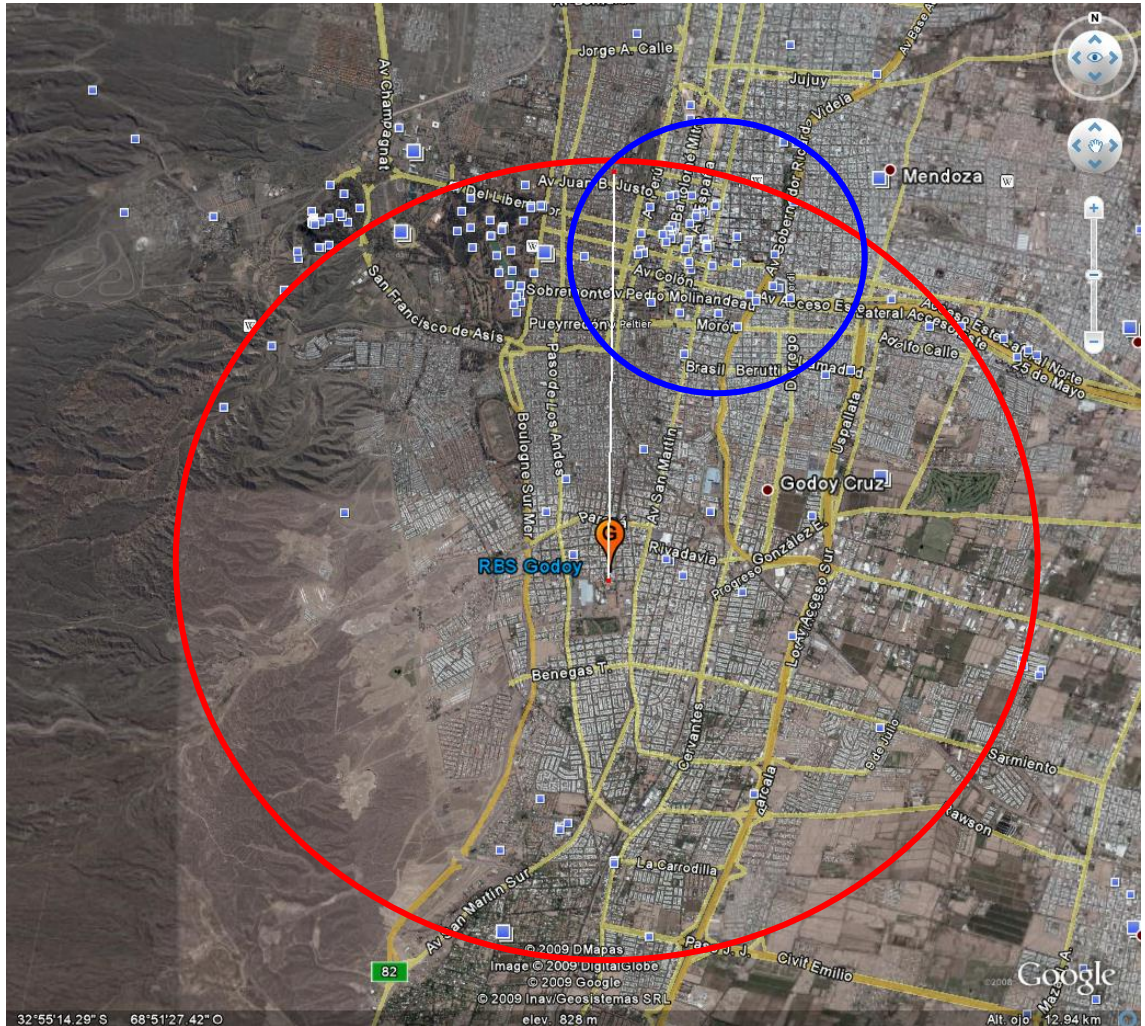


<b>Tipo de área</b>	<b><math>a(hm)</math></b>	<b><math>K</math></b>
Rural	$[1,11 \log (f-0,7)]hm - [1,56 \log (f-0,8)]$ (para 850 Mhz., = 2,52 hm – 3,77)	$4,78 (\log f)^2 - 18,33 \log f + 40,94 =$ (para 850 Mhz., = <b>28,26</b> )
Sub Urbana		$2[\log (f/28)]^2 + 5,4 =$ (para 850 Mhz., = <b>9,79</b> )
Ciudad media/pequeña		0
Ciudad Grande	$3,2 [\log (11,75hm)]^2 - 4,97$	0

En este caso el estudio se realizará para la radio base ubicada en la ciudad de Godoy Cruz, Provincia de Mendoza. Ésta es un área urbana dentro de la ciudad de Mendoza. Incluye áreas que se pueden considerar entre Suburbana y ciudad Mediana/Pequeña, incluye arboledas de una altura promedio de unos 25 a 30m. En dirección hacia el micro centro de la ciudad (Norte), distante a unos 3 Km de la radio base (RBS), existen edificación con una altura de 15m o superior, en el resto la edificación es de baja altura, en la figura siguiente se puede ver una imagen de esta, donde se pueden observar las zonas donde se va a realizar el estudio:



Vista de la zona, El círculo rojo indica una distancia de 10 Km desde la RBS Godoy



### Vista desde la RBS Godoy hasta una distancia de 5Km

En la figura anterior el círculo rojo indica un radio de 5 Km y el círculo azul indica el micro centro de la ciudad de Mendoza, en esta zona se encuentran edificios de más de 15m de altura. Teniendo en cuenta el tipo de zona donde esta radio base debe proveer cobertura, el cálculo se realizará considerando un entorno Suburbano y de ciudad mediana/pequeña, para luego realizar comparaciones de lo calculado con el resultado de la medición realizadas en la zona. Las ecuaciones de cálculos para estos casos serán:



**Cálculo para zona Suburbana:** En este caso la ecuación de cálculo queda:

$$L_{bs} \text{ (dB)} = 146,18 - 13,82 \log h_t + (44,9 - 6,55 \log h_t) \log d - \{ [1,11 \log (f-0,7)] hm - [1,56 \log (f-0,8)] \} - 2[\log (f/28)]^2 - 5,4$$

$$L_{bs} \text{ (dB)} = 121,6 + 33,25 \log d - (2,52 hm - 3,77) - 4,39 - 5,4 \quad (\text{para } hm = 1,5\text{m}) \\ = 121,6 - 0,1 - 4,39 - 5,4 + 33,25 \log d$$

$$L_{bs} \text{ (dB)} = 111,7 + 33,25 \log d$$

$$\text{Como es: } P_{Rec} = -L_b + P_T - A_{Coax} + G_T + G_R = -L_b + 42 - 3 + 12 + 0 = -L_b + 51$$

**Calculo para ciudad Mediana/Pequeña:** En este caso la ecuación de cálculo queda:

$$L_{bCMP} \text{ (dB)} = 146,18 - 13,82 \log h_t + 33,5 \log d - \{ [1,11 \log (f-0,7)] hm - [1,56 \log (f-0,8)] \} = 121,6 - 0,1 + 33,25 \log d$$

$$L_{bCMP} \text{ (dB)} = 121,5 + 33,25 \log d$$

$$\text{Como es: } P_{Rec} = -L_b + P_T - A_{Coax} + G_T + G_R = -L_{bCMP} + 42 - 3 + 12 + 0 = -L_b + 51$$

En primer lugar se debe calcular la altura media del terreno, la que se debe considerar en las ecuaciones anteriores, éste cálculo se realiza en la tabla siguiente:



Cálculo de la altura media del terreno:

PLANILLA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ALTURA MEDIA DEL TERRENO, h <sub>mt</sub> (m)								
<b><u>Lugar de emplazamiento de la estación de base</u></b>								
<b><u>Provincia:</u></b> _____			<b>Mendoza</b>					
<b><u>Localidad:</u></b> _____			<b>Godoy Cruz</b>					
<b><u>Código Postal:</u></b> _____								
<b><u>Coordenadas geográficas</u></b>								
<b><u>Latitud:</u></b> _____ ° S			<b>32° 55' 36,5"</b>					
<b><u>Longitud:</u></b> _____ ° W			<b>68° 51' 10,6"</b>					
<b>Cotas Altimétricas Leídas (m)</b>								
D(Km)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
3	789	853	900	911	869	823	796	775
4	784	866	956	945	875	825	785	759
5	780	894	1040	1023	884	819	774	745
6	768	930		1022	894	818	763	731
7	759	950		1004	899	816	752	718
8	754	984		1026	906	811	742	708
9	751	1027		1034	910	807	729	697
10	747	1082		1053	914	803	718	687
11	741			1026	920	801	705	679
12	750			1099	924	797	693	676
13	752			1118	929	791	683	672
14	753			1138	930	785	676	666
15	764			1153	932	780	671	660
<b>h<sub>mt</sub> (m) =</b>				<b>858</b>				

$$h_t = h_0 + c_0 - h_{mt} = 60 + 824 - 858 = 26 \text{ m}$$

como el desnivel es pequeño, por normativa se adopta:  $h_t = h_0 = 60\text{m}$



El cálculo de los niveles de señal para el enlace descendente y para los 2 casos indicados anteriormente (Entorno Suburbano y ciudad Mediana/Pequeña), se indica en la tabla siguiente:

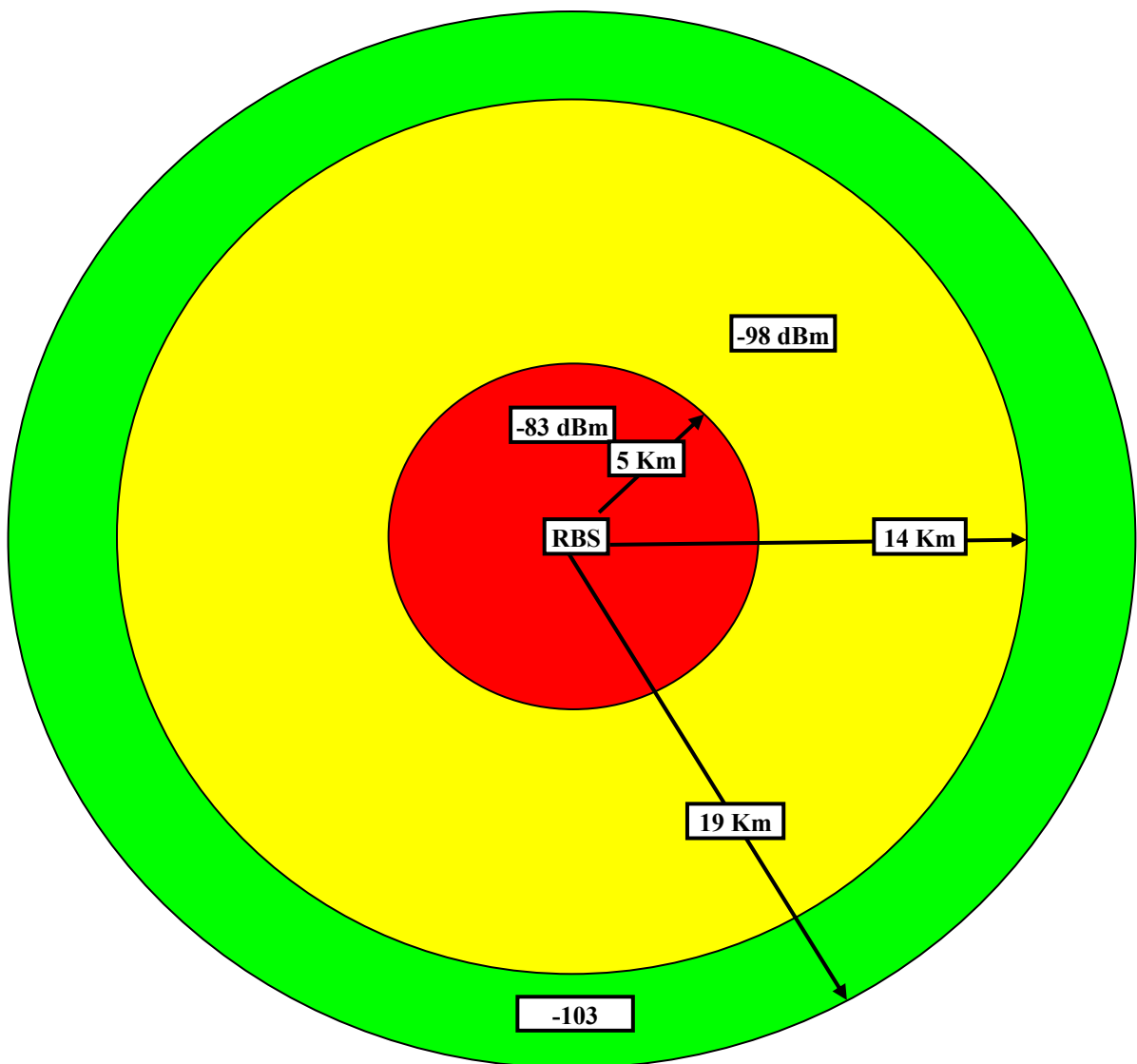
Distancia	Aten. Sub Urbano		Aten. Ciudad Pequeña/Mediana	
	LbR	Descende.	LbsU	Descende.
Km		PRec		PRecSU Asc
	dB	dBm	dB	dBm
1	111,50	-60,50	121,50	-70,50
2	121,51	-70,51	131,51	-80,51
3	127,36	-76,36	137,36	-86,36
4	131,52	-80,52	141,52	-90,52
5	134,74	-83,74	144,74	-93,74
6	137,37	-86,37	147,37	-96,37
7	139,60	-88,60	149,60	-98,60
8	141,53	-90,53	151,53	-100,53
9	143,23	-92,23	153,23	-102,23
10	144,75	-93,75	154,75	-103,75
11	146,13	-95,13	156,13	-105,13
12	147,38	-96,38	157,38	-106,38
13	148,54	-97,54	158,54	-107,54
14	149,61	-98,61	159,61	-108,61
15	150,61	-99,61	160,61	-109,61
16	151,54	-100,54	161,54	-110,54
17	152,41	-101,41	162,41	-111,41
18	153,24	-102,24	163,24	-112,24
19	154,02	-103,02	164,02	-113,02
20	154,76	-103,76	164,76	-113,76
25	157,98	-106,98	167,98	-116,98
30	160,61	-109,61	170,61	-119,61
40	164,77	-113,77	174,77	-123,77

- c. **Elaboración de mapa de cobertura con niveles de señal para una radio base, enlace descendente.** Los resultados de los cálculos anteriores indicados en la tabla, tienen en cuenta la altura media del terreno, pero asume que las características del terreno alrededor de la radio base es igual en cualquier dirección, por esto el resultado es un círculo concéntrico alrededor de la radio base. Se pueden graficar para cada uno de los escenarios planteados en las



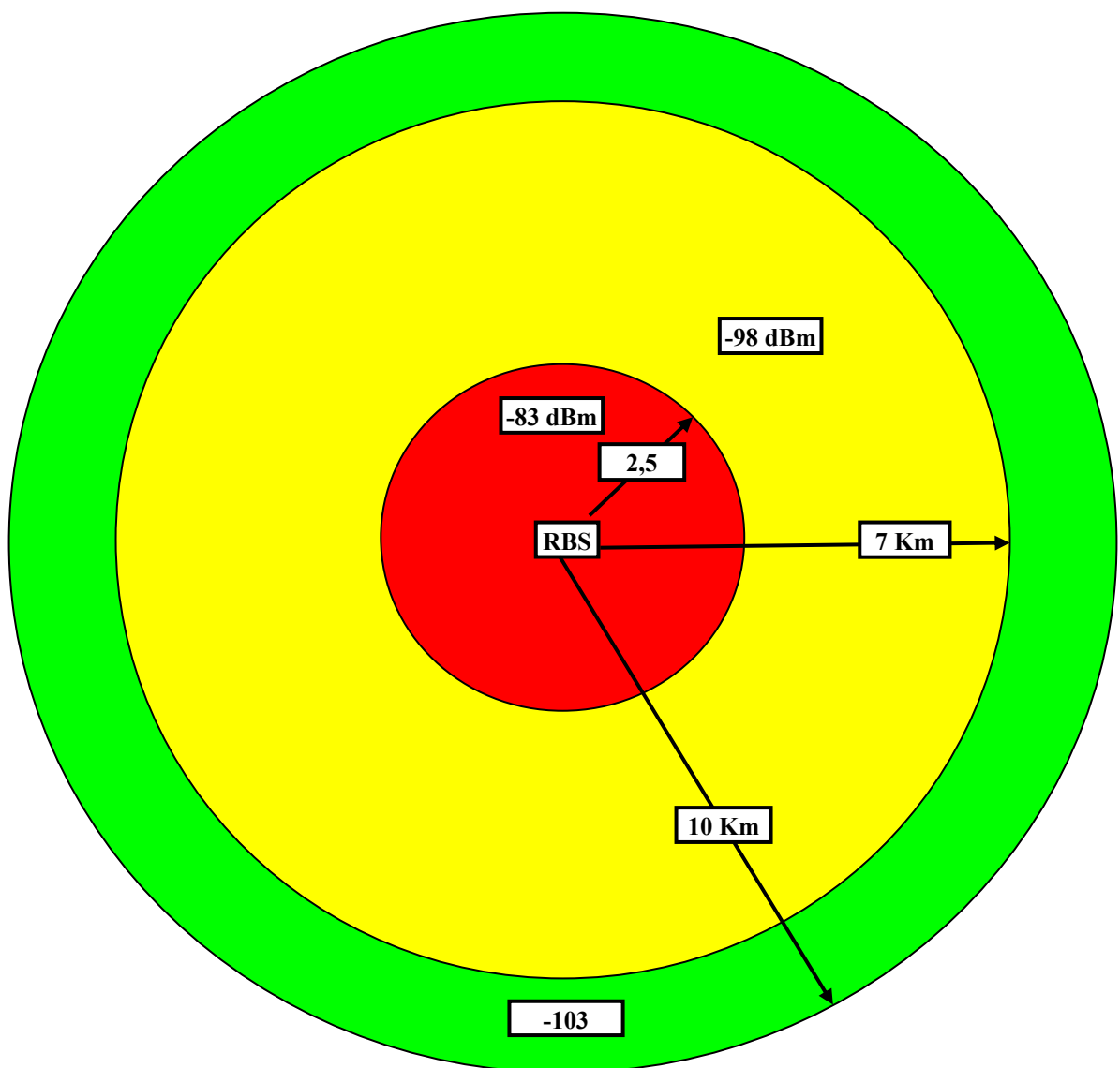
siguientes figuras, donde cada color indica el nivel de señal calculado en esas áreas:

**Para el entorno Suburbano:**





Para el entorno Ciudad Mediana/Pequeña:

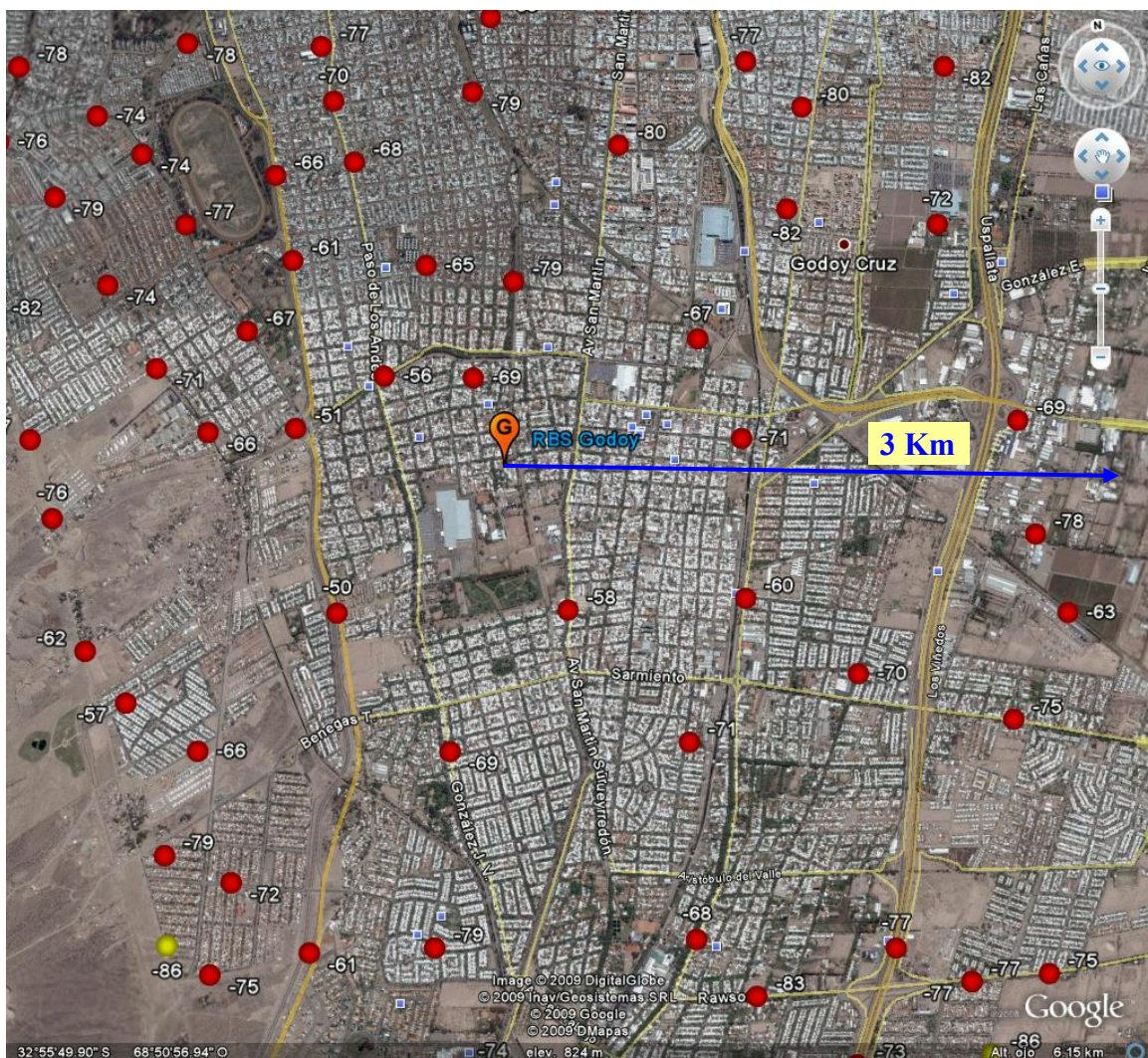


d. **Realización de mediciones de niveles de señal en zona de influencia de la radio base:** Con el fin de corroborar los niveles de señal calculados, se procedió a





realizar mediciones de campo en la zona de influencia de la radio base. Se utilizó un instrumento que suministra el nivel de señal recibida de la radio base (RBS), indicando el valor en dBm, para determinar la posición de realización de la medición se utilizó en GPS. Se registraron esos datos (coordenadas geográficas y nivel de señal) recolectados en diversos los puntos alrededor de la RBS y a distintas distancias. Esos datos se cargaron en el mapa georeferenciado obtenido del Google Herat. El resultado fue la ubicación geográfica precisa de cada medición realizada con el nivel de señal obtenido, una vista en zonas cercanas a la RBS se puede ver en la siguiente gráfica:

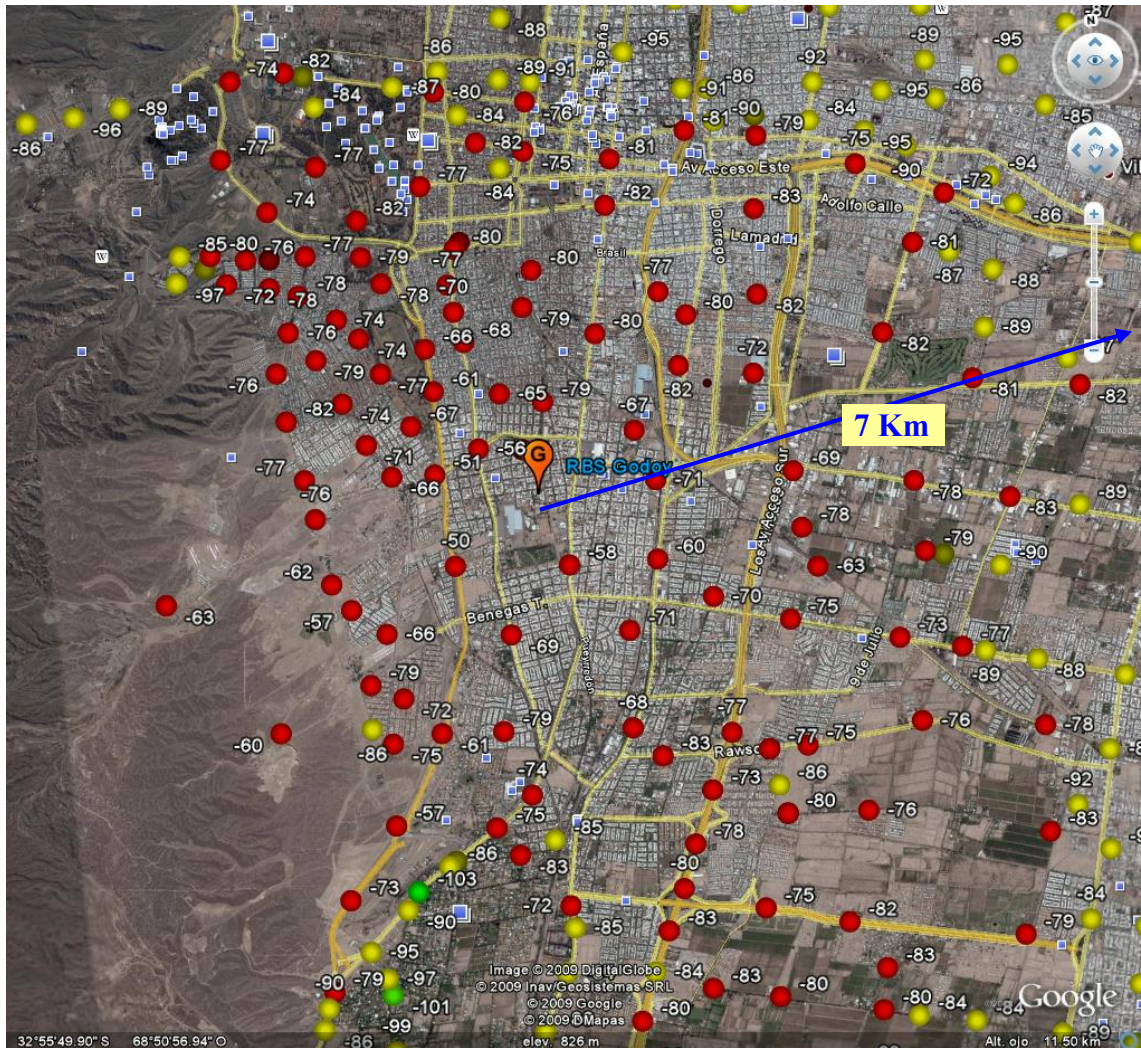




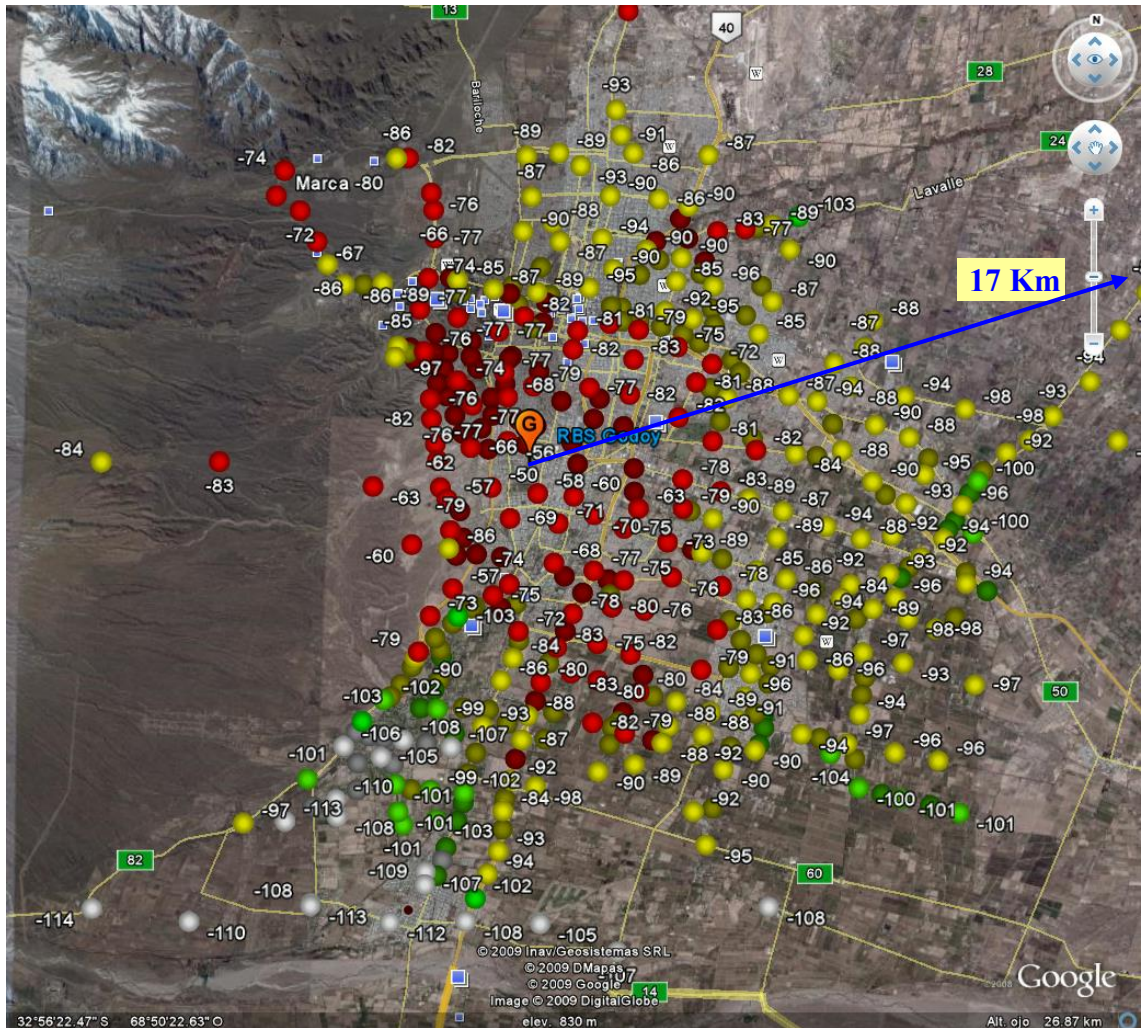
El punto medido se indica con un círculo color rojo, indicando niveles de señal mejor que -83 dBm, color amarillo para niveles de señal entre -83 dBm y -98 dBm, color verde para niveles de señal entre -98 dBm y -103 dBm y color blanco para niveles de señal menores a -103 dBm. El número que acompaña a la marca indica el nivel de señal medido en el punto en dBm. Las mediciones fueron realizadas a una altura de 1,5m del suelo y con el equipo de medición separado del cuerpo, esto evita que la presencia del cuerpo modifique el resultado de las mediciones.

Se construyeron diversas gráficas que permiten observar los niveles de señal obtenidos a distintas distancias y bajo diferentes características de la ciudad, se indican además las distancias que resultan más representativas par el análisis.

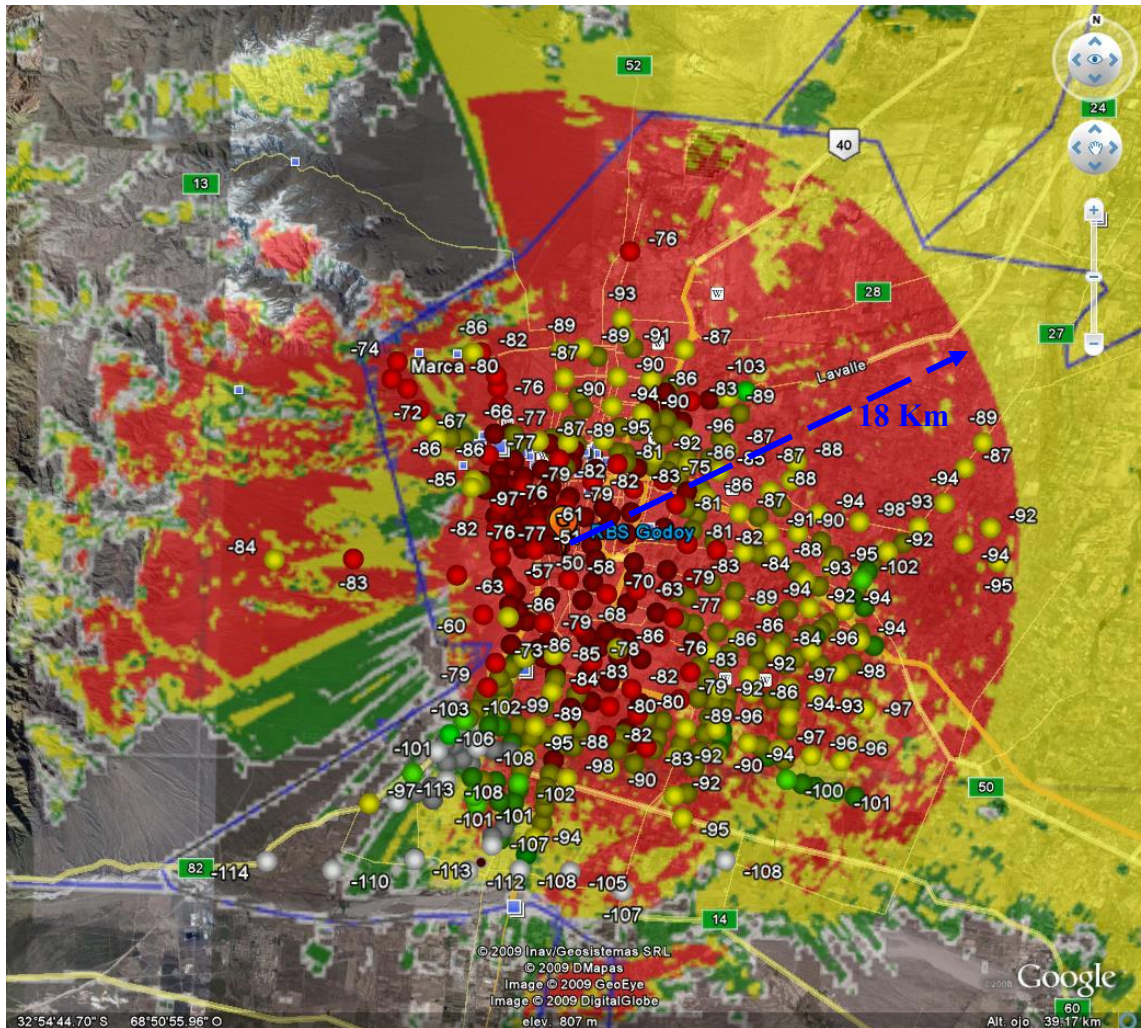
La gráfica siguiente permite observar el área de cobertura de la RBS hasta una distancia de 7 Km de la RBS, para niveles de señal mejor que -83 dBm, además se puede observar algunas zonas donde el nivel de señal es menor a -83 dBm, indicado por los puntos color amarillo:



El la figura siguiente se puede observar la totalidad de las mediciones realizadas hasta una distancia de 17 Km de la RBS, donde se puede observar las 3 zonas de cobertura calculadas de acuerdo con los 3 niveles de señal estipulados para el cálculo:



Finalmente en la figura siguiente se puede observar la totalidad de las mediciones realizadas, superpuesta con la proyección de cobertura realizada mediante el uso de un Soft de proyección. Este Soft tiene en cuenta las características del terreno alrededor de la radio base, pero considera a la zona que rodea la radio base del mismo tipo, en este caso se lo ha parametrizado como zona rural. Esta superposición permite comparar los valores obtenidos con los calculados en forma georeferenciados.



## 6. Comparación de los resultados obtenidos

a. **Comparación entre los valores calculados y los medidos:** Observando el resultado de los cálculos realizados para los dos tipos de zonas considerados para esta área, se obtiene para un nivel de señal de -83 dBm, una distancia de:

- Para un entorno suburbana: 5 Km
- Para un entorno de ciudad pequeña /mediana: 2,5 Km
- Según predicción en dirección Norte y Este: 18 Km



**b. Análisis de resultados obtenidos mediante las mediciones:** Observando las figuras con el resultado de las mediciones realizadas, se puede concluir lo siguiente:

- Las zonas de cobertura para los diferentes niveles de señal considerados no responden a una forma uniforme circular.
- La zona de cobertura para niveles de señal mejor que -83 dBm, cubre una distancia de entre 2 y 6 Km aproximadamente.
- Se observan puntos de señal igual o mejor que -83 dBm en alguna dirección a distancias mayores a 6 Km.
- Las distancias a las cuales se alcanza los distintos niveles de señal medidos resultan ser menores (en forma importante) que los indicados por las predicciones.

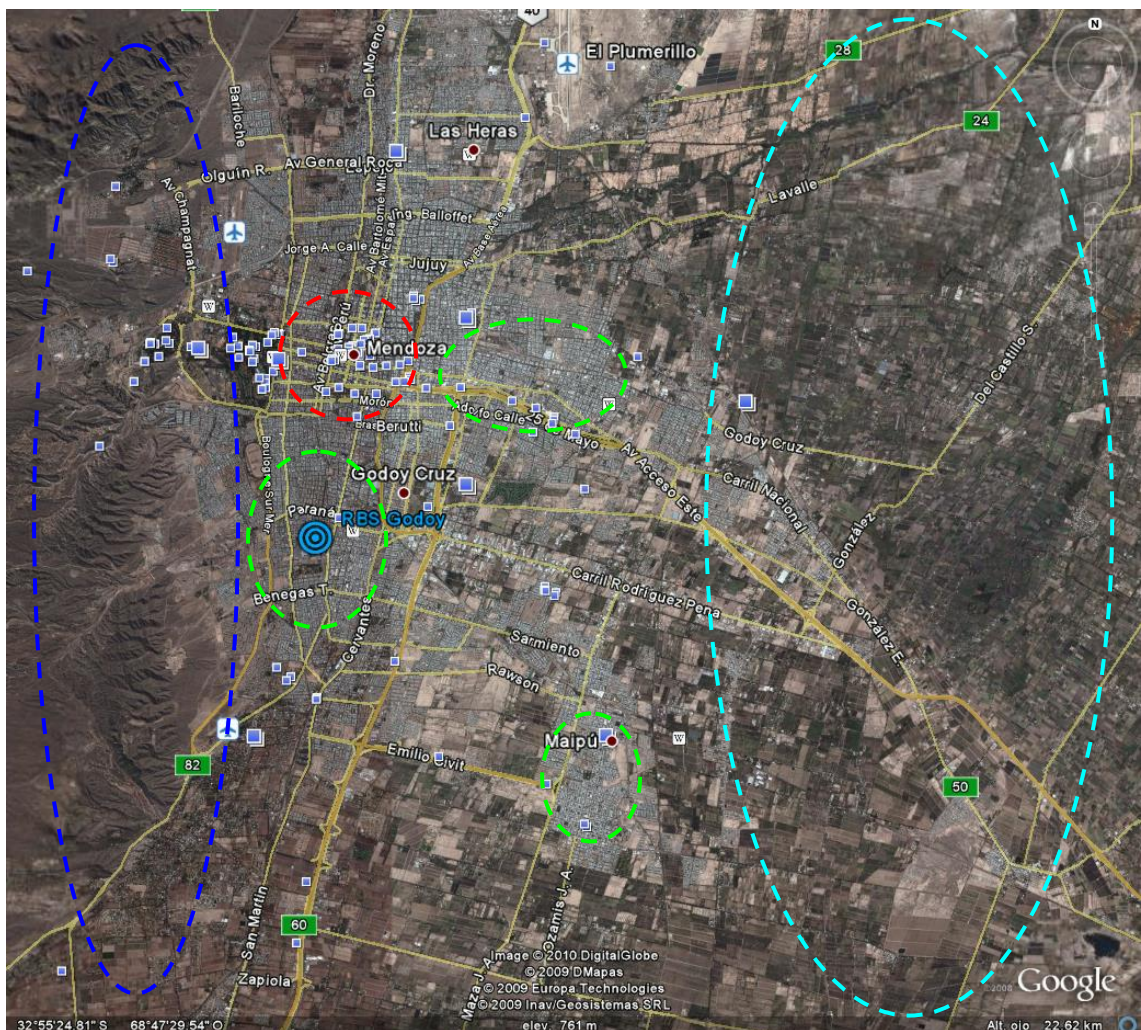
## **7. Conclusiones**

Visto el resultado de las mediciones realizadas y el análisis de estos, se pueden elaborar una serie de conclusiones que contribuyan a optimizar el soft de predicción utilizado para que éste se aproxime lo más posible a los valores reales, para esto se debe considerar lo siguiente:

- Por la similitud de la forma general del contorno de niveles para un determinado valor de señal, se puede asumir que el soft utilizado tiene en cuenta en forma adecuada el perfil de terreno donde se realiza la predicción de cobertura.
- Si se analiza el contorno para un nivel de señal de -83 dBm en forma detallada, se observa que ésta forma difiere de la predicción en algunas direcciones particulares, por ejemplo si se considera el azimut dirección Norte o dirección Este SurEste, o Sur SurOeste. Por ejemplo en la dirección Norte, se



observa una retracción de la distancia cubierta con niveles de señales igual o menor que -83 dBm. Se considera que estas disminuciones en los niveles de señal que afectan a la cobertura se debe a que en el soft se tipifica un tipo de entorno y se realizan los cálculos de igual forma para todas las direcciones. Para el caso en estudio en la dirección Norte se encuentra el centro de la ciudad, con edificación de 30 a 90m de altura, esto es, se debe considerar entre ciudad pequeña/mediana a ciudad grande. Hacia el Oeste se encuentra una zona que se puede considerar rural de pedemonte, donde de acuerdo con la altura de los cerros la cobertura se ve minimizada o incrementada, esto se puede ver en la figura siguiente:





Se han indicado con círculo color rojo la zona del microcentro de la Ciudad de Mendoza, donde se encuentran la edificación de más altura, que debe considerarse entre ciudad pequeña/mediana a ciudad grande. Los óvalos color verde indican edificación de menor altura, la que debería ser considerada entre ciudad pequeña/mediana y entorno suburbano. Lo indicado con el óvalo color azul, indica zona de pedemonte, donde las cotas del terreno son muy variables. El óvalo color celeste indica zona casi rural, con cotas del terreno relativamente planas y homogéneas y con arboleda de unos 30 metros de altura. Por este motivo la predicción da una distancia de cobertura bastante mayor que la medida, esto motivado casi seguramente en que el soft de predicción no ha tenido en cuenta fundamentalmente la arboleda y la densidad de la misma (cantidad de árboles y follaje), se debe tener en cuenta la atenuación que éstos provocan a la señal cuando son atravesados por ésta, efecto más notorio en épocas de verano, cuando el follaje se encuentra más verde y tupido. Esto último permite justificar el porque las distancias alcanzadas para los distintos niveles de señal considerados en dirección Nor Este, Este y Sur Este, que corresponden fundamentalmente a zonas consideradas rural, resultan ser en forma importante, menores a las determinadas por el soft utilizado.

### **Agradecimiento:**

Este trabajo ha sido desarrollado gracias a aportes parciales del proyecto “**Red de Comunicaciones Tetra para la Policía de Mendoza**” en etapa de implementación.





## **I. Bibliografía Disponible**

### **1. Libros:**

- 1) Hata M. "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service" IEEE 1980
- 2) Bertoni H.L. and Other, "UHF Propagation Prediction for Wireless communication Channels" IEEE Communications Magazine – 1995
- 3) Iskander M. F. And Z. Yun, "Propagation Prediction Models for Wireless Communication Systems" IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, Vol 50-2002
- 4) Leon W. Couch II, Sistemas de Comunicaciones Digitales y Analógicos, Pearson, 1997
- 5) Wayne Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Prentice Hall, 2003
- 6) Cardama, Jofre, Rius, Romeu, Blanch, Ferrandos, Antenas, Alfaomega - 2004
- 7) T. Rappaport, "Wireless Communications, 2º Ed" Prentice Hall, 2002
- 8) Bertoni H. L., Radio Propagation for Modern Wireless System, Prentice Hall, 2000, p(107-215).
- 9) William Stallings, Comunicaciones y Redes de Computadores, Prentice Hall, 2003
- 10) Alberto León García – Indra Widjaja, Redes de Comunicaciones, Mc Graw Hill, 2002
- 11) The ARRL Antenna Book - 1992
- 12) Lee/Miller-CDMA Systems Engineering Handbook-1998.

### **2. Artículos:**

- 1) ARRL Handbook for Radio – 2001
- 2) Project 231 (COST-231) Evolution of Land Mobile Radio Communications. Cooperation in the field of Scientific and Technical Research - 1999
- 3) Garcia A. P., Ortega H., Navarro A., Rodriguez H., "Efecto del terreno en la propagación electromagnética en un entorno urbano, usando el modelo Cost 231- Walfisch-Ikegami" (ICAP 2003)

**Ing. José Balaccco**

