

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**Estudio de los Fenómenos que afectan a la Capacidad
de los Sistemas HAPs y Terrestres**

Ricardo Valdivia Pérez

Marzo 2011

**Estudio de los Fenómenos que afectan a la
Capacidad de los Sistemas HAPs y
Terrestres**

AUTOR: Ricardo Valdivia Pérez

TUTOR: D. Bazil Taha Ahmed

**Grupo de Sistemas de Radiocomunicaciones y
Comunicaciones Ópticas**

**Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid**

Marzo 2011

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mi tutor, Bazil Taha, todo el ánimo y el apoyo que he recibido a lo largo de este trabajo. Durante la realización de este proyecto he podido comprobar que es un gran tutor y lo que es más importante una maravillosa persona. Muchas gracias Bazil por todo tu esfuerzo, tus ánimos y tu simpatía.

En segundo lugar me quiero acordar de toda mi familia; mis padres, hermanos, abuelos y una maravillosa sobrina que he visto nacer en poco más de 2 meses. A todos vosotros os quiero dar las gracias por apoyarme día a día, por estar cerca de mí, en definitiva por brindarme incondicionalmente todo vuestro cariño. Sin vuestra ayuda nunca lo hubiera conseguido. Os quiero.

Por último, me gustaría acordarme de todos los amigos que me llevo de la Universidad, Alex, Aero, Juanma, “Las Elenas”, Castro, Tato, Borja, Sergio, Nando. Dupa, Eva, Marta, Chus, Gustavo, Adrián etc. Son tantos los amigos que me llevo de esta etapa de mi vida que seguro que me dejo varios por nombrar. Hemos compartido alegrías, sufrimientos, anécdotas y todo tipo de experiencias increíbles (y lo que nos queda). Y por supuesto todos mis amigos que han permanecido cerca de mí desde mucho antes de iniciarme en esta carrera; Roberto, Óscar, Raúl, Marcos, Delgao, Elena, Cruz, Silvia, Lurdes, Sheila, Lucía. A todos vosotros espero que sigamos juntos muchos años más. MUCHAS GRACIAS CHICOS!

Resumen

Hoy en día muchos de los sistemas de telecomunicación trabajan a una frecuencia mayor que 10 GHz. Esta frecuencia es apropiada para servicios de banda ancha por el poco retraso de propagación, la reutilización de altas frecuencias, el gran ancho de banda disponible y poca cantidad de radiación. La desventaja es que todos estos sistemas se ven fuertemente afectados por muchos fenómenos climatológicos como la lluvia, la niebla, las nubes o los gases atmosféricos que interactúan con la señal de información. Además todas estas condiciones climatológicas son variantes dependiendo de la estación del año en la que estemos y de la parte de La Tierra que estemos considerando.

En el caso de los radioenlaces terrenales estos fenómenos perturban la onda electromagnética durante toda la trayectoria de enlace en la mayoría de los casos, algo que no sucede en los sistemas por satélite ya que a partir de una altura determinada no tienen efecto sobre la señal.

La ITU¹ (International Telecommunications Union) define HAPS² como un término referido a globos aerostáticos o aeronaves, en una altura entre 20 y 50 km del suelo y una banda de frecuencias a partir de los 10 GHz, que pueden ser usados para proporcionar servicios de telecomunicación, radiodifusión, acceso a redes digitales (Internet, ISDN³) y como centro de observación de La Tierra. En esencia un HAPS es un radio enlace en el cielo. Esta tecnología está ganando ventaja frente a los sistemas de comunicaciones terrestres tradicionales y sistemas de satélites. La principal ventaja es el rápido despliegue debido a la plataforma móvil. Además el HAPS podría usarse como terrestre para mejorar el sistema o como consecuencia a una catástrofe natural, algo que no se puede hacer en el caso de los satélites.

¹ La Unión Internacional de Telecomunicaciones es el organismo especializado de la Organización de las Naciones Unidas encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional entre las distintas administraciones y empresas operadoras.

² Con el acrónimo HAPS (High Altitude Platform Station), la UIT-R denomina a las estaciones radioeléctricas que pueden embarcarse en globos o aviones estratosféricos no tripulados o planeadores y, que pueden volar entre 20 y 50 Km. de altura sobre la superficie terrestre. Dichas estaciones cumplen funciones idénticas a las que hoy pueden realizar los equipamientos embarcados en satélites artificiales de la Tierra con lo que los sistemas basados en HAPS serán competidores directos de los sistemas satelitales de órbita baja (LEO).

³ ISDN; (Red Digital de Servicios Integrados) es la red que procede por evolución de la Red Digital Integrada (RDI) y que facilita conexiones digitales extremo a extremo para proporcionar una amplia gama de servicios, tanto de voz como de otros tipos, y a la que los usuarios acceden a través de un conjunto de interfaces normalizados.

Una de las tecnologías para poder dar servicios de banda ancha a las zonas de cobertura abarcadas por los HAPS es WiMAX. **WiMAX** son las siglas de **Worldwide Interoperability for Microwave Access** (Interoperabilidad mundial para acceso por microondas⁴). Es una norma de transmisión de datos usando ondas de radio. El protocolo en el que se basa esta tecnología es el IEEE 802.16⁵.

La principal ventaja de WiMAX con respecto a los HAPS, dentro de una banda de frecuencias mayor que 10 GHz donde la atenuación es tan significativa, es que dispone de modulación adaptativa con lo que dependiendo de las características del momento y la calidad de SNR que llegue al terminal de recepción utiliza una modulación u otra. Por tanto cuando el enlace tiene alta calidad es usado el esquema de modulación más alto dando al sistema mayor capacidad y cuando existen más pérdidas y se pierde robustez puede cambiarse a un esquema de modulación menor para mantener la calidad de conexión y estabilidad del enlace, lo cual permite al sistema superar los desvanecimientos selectivos en el tiempo⁶.

Palabras clave

- ▶ Ancho de banda.
- ▶ Microondas.
- ▶ Atenuación.
- ▶ Densidad.
- ▶ Región climática de lluvia.
- ▶ Polarización.
- ▶ Frecuencia.

⁴ Se denomina microondas a las ondas electromagnéticas definidas en un rango de frecuencias determinado; generalmente de entre 300 MHz y 300 GHz, que supone una longitud de onda en el rango de 1 m a 1 mm.

⁵ IEEE 802.16 es el nombre de un grupo de trabajo del comité IEEE 802 y el nombre se aplica igualmente a los trabajos publicados. Se trata de una especificación para las redes de acceso metropolitanas inalámbricas de banda ancha fijas (no móvil) publicada inicialmente el 8 de abril de 2002. En esencia recoge el estándar de facto WiMAX.

⁶ Con desvanecimientos selectivos en el tiempo nos referimos a la pérdida total de conexión entre emisor y receptor durante un periodo de tiempo.

- ▶ Longitud de onda.
- ▶ Radioenlace.
- ▶ Desvanecimiento.
- ▶ Antena.
- ▶ Aeronave.
- ▶ Intensidad de lluvia.
- ▶ Pérdidas de propagación.
- ▶ Modulación.
- ▶ FEC.
- ▶ Modulación Adaptativa.
- ▶ QAM.
- ▶ Eficiencia espectral.
- ▶ Subportadora.
- ▶ Shadowing.
- ▶ Usuario.
- ▶ Ángulo de elevación.
- ▶ Latitud.
- ▶ SNR.
- ▶ WiMAX.

Abstract

Nowadays many telecommunications Systems work at frequencies above 10 GHz. This frequency is suitable for broadband services by the low propagation delay, high frequency reuse, the high bandwidth available and a small amount of radiation. The disadvantage is that all these systems are strongly affected by many climate phenomena such as rain, fog, clouds and atmospheric gases interacting with the information signal. Besides all these weather conditions are variations depending on the season where we are and the part of Earth that we are considering.

In the case of terrestrial radio links these phenomena disturb the electromagnetic wave for the entire link path in most cases, is not the case in satellite systems because from a certain height to the satellite have no effect on the signal.

The ITU (International Telecommunications Union) defines HAPS as a term referring to balloons or aircraft at an altitude between 20 and 50 km off the ground and a band of frequencies from 10 GHz, which can be used to provide telecommunication services Broadcasting, digital network access (Internet, ISDN) and as center of Earth observation. Essentially a HAPS is a radio link to the sky. This technology is taking advantage over traditional terrestrial communications systems and satellite systems. The main advantage is the quickly deployment due to the mobile platform. Also the HAPS could be used as a ground station to improve the system or following a natural disaster, something that can not be done in the case of satellites.

One of the technologies to provide broadband services to areas covered by the HAPS coverage is WiMAX. WiMAX stands for Worldwide Interoperability for Microwave Access. It is a standard for transmitting data using radio waves. The protocol is based on this technology is the IEEE 802.16.

The main advantage of WiMAX over the HAPS, within a frequency band above 10 GHz where the attenuation is so significant, is that adaptive modulation can be used. So depending on the characteristics of timing and SNR to reach to the receiving terminal, it uses an appropriate modulation. So when the link has high quality it uses the highest modulation scheme giving the system more capacity and when there are more losses the system change to a lower modulation scheme to maintain the connection stability of the link, which allows the system to overcome the time selective fading.

Key words

- ▶ Bandwidth.
- ▶ Microwave.
- ▶ Attenuation.
- ▶ Density.
- ▶ Rain climatic zone.
- ▶ Polarization.
- ▶ Frequency.
- ▶ Wavelength.
- ▶ Radio link.
- ▶ Fading.
- ▶ Antenna.
- ▶ Aircraft.
- ▶ Rainfall intensity exceeded.
- ▶ Free space loss.
- ▶ Modulation.
- ▶ FEC.
- ▶ Adaptive modulation.
- ▶ QAM.
- ▶ Spectral efficiency.
- ▶ Subcarrier.
- ▶ Shadowing.
- ▶ User.
- ▶ Elevation angle.

- ▶ Latitude.
- ▶ SNR.
- ▶ WiMAX.

Índice de contenidos

1. INTRODUCCIÓN.....	-15-
1.1 MOTIVACIÓN.....	-16-
1.2 OBJETIVOS.....	-17-
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	-18-
2. FENÓMENOS DETERMINANTES EN LA TRANSMISIÓN.....	-19-
2.1 GASES Y VAPOR DE AGUA.....	-20-
2.2 NIEBLA.....	-23-
2.3 NUBES.....	-25-
2.4 LLUVIA.....	-26-
2.5 NIEVE.....	-30-
2.6 GRANIZO.....	-32-
3. RADIOENLACE TERRESTRE.....	-33-
3.1 INTRODUCCIÓN.....	-34-
3.2 EFECTO DE LOS GASES Y EL VAPOR DE AGUA.....	-37-
3.3 EFECTO DE LA NIEBLA.....	-39-
3.4 EFECTO DE LAS NUBES.....	-41-
3.5 EFECTO DE LA LLUVIA.....	-48-
3.6 EFECTO DE LA NIEVE.....	-54-
3.7 EFECTO DEL GRANIZO.....	-56-
3.8 PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN.....	-57-
3.9 DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA.....	-61-

Índice de contenidos

3.9.1 Modulación Adaptativa.....	-61-
3.9.2 Técnica de corrección de errores.....	-64-
3.9.3 Escenario.....	-65-
3.9.4 Enlace WiMAX terrestre en 13 GHz.....	-66-
3.9.4.1 Distancia entre estaciones de 4 km y P_{TX} de -30 dBW.....	-66-
3.9.4.1.1 Enlace ubicado en La Coruña.....	-66-
3.9.4.1.1 Enlace ubicado en Barcelona.....	-67-
3.9.4.1.1 Enlace ubicado en Madrid.....	-67-
3.9.4.1.1 Enlace ubicado en Sevilla.....	-68-
3.9.4.1.1 Enlace ubicado en Tenerife.....	-69-
3.9.4.2 Distancia entre estaciones de 10 km y P_{TX} de -25 dBW.....	-70-
3.9.4.2.1 Enlace ubicado en La Coruña.....	-70-
3.9.4.2.1 Enlace ubicado en Barcelona.....	-71-
3.9.4.2.1 Enlace ubicado en Madrid.....	-71-
3.9.4.2.1 Enlace ubicado en Sevilla.....	-72-
3.9.4.2.1 Enlace ubicado en Tenerife.....	-72-
3.9.5 Enlace WiMAX terrestre en 28 GHz.....	-73-
3.9.5.1 Distancia entre estaciones de 4 km y P_{TX} de -25 dBW.....	-73-
3.9.5.1.1 Enlace ubicado en La Coruña.....	-73-
3.9.5.1.1 Enlace ubicado en Barcelona.....	-74-
3.9.5.1.1 Enlace ubicado en Madrid.....	-74-
3.9.5.1.1 Enlace ubicado en Sevilla.....	-75-
3.9.5.1.1 Enlace ubicado en Tenerife.....	-75-
3.9.5.2 Distancia entre estaciones de 10 km y P_{TX} de -15 dBW.....	-76-
3.9.5.2.1 Enlace ubicado en La Coruña.....	-76-
3.9.5.2.1 Enlace ubicado en Barcelona.....	-77-

Índice de contenidos

3.9.5.2.1 Enlace ubicado en Madrid.....	-77-
3.9.5.2.1 Enlace ubicado en Sevilla.....	-78-
3.9.5.2.1 Enlace ubicado en Tenerife.....	-78-
3.9.6 Enlace WiMAX terrestre en 48 GHz.....	-79-
3.9.6.1 Distancia entre estaciones de 4 km y P_{tx} de -20 dBW	-79-
3.9.6.1.1 Enlace ubicado en La Coruña.....	-79-
3.9.6.1.1 Enlace ubicado en Barcelona.....	-80-
3.9.6.1.1 Enlace ubicado en Madrid.....	-80-
3.9.6.1.1 Enlace ubicado en Sevilla.....	-81-
3.9.6.1.1 Enlace ubicado en Tenerife.....	-81-
3.9.6.2 Distancia entre estaciones de 10 km y P_{tx} de -5 dBW.....	-82-
3.9.6.2.1 Enlace ubicado en La Coruña.....	-82-
3.9.6.2.1 Enlace ubicado en Barcelona.....	-83-
3.9.6.2.1 Enlace ubicado en Madrid.....	-83-
3.9.6.2.1 Enlace ubicado en Sevilla.....	-84-
3.9.6.2.1 Enlace ubicado en Tenerife.....	-84-
4. “HIGH ALTITUDE PLATFORM STATIONS”.....	-85-
4.1 INTRODUCCIÓN.....	-86-
4.2 ESCENARIO.....	-91-
4.3 EFECTO DE LOS GASES Y EL VAPOR DE AGUA.....	-92-
4.4 EFECTO DE LA NIEBLA.....	-95-
4.5 EFECTO DE LAS NUBES.....	-98-
4.6 EFECTO DE LA LLUVIA.....	-100-
4.6.1 Usuario 1.....	-102-
4.6.2 Usuario 2.....	-105-

Índice de contenidos

4.6.3 Usuario 3.....	-108-
4.7 EFECTO DE LA NIEVE.....	-113-
4.8 EFECTO DEL GRANIZO.....	-115-
4.9 PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN.....	-117-
4.9.1 Usuario 1.....	-118-
4.9.2 Usuario 2.....	-120-
4.9.3 Usuario 3.....	-122-
4.10 SHADOWING.....	-124-
4.10.1 HAPS sobre zona urbana.....	-128-
4.10.2 HAPS sobre zona suburbana.....	-130-
4.10.3 HAPS sobre zona rural.....	-132-
4.11 DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA.....	-134-
4.11.1 Enlace WiMAX HAPs-terrestre en 13 GHz.....	-136-
4.11.1.1 Enlace ubicado sobre La Coruña.....	-137-
4.11.1.2 Enlace ubicado sobre Barcelona.....	-138-
4.11.1.3 Enlace ubicado sobre Madrid.....	-139-
4.11.1.4 Enlace ubicado sobre Sevilla.....	-140-
4.11.1.5 Enlace ubicado sobre Tenerife.....	-141-
4.11.2 Enlace WiMAX HAPs-terrestre en 28 GHz.....	-142-
4.11.2.1 Enlace ubicado sobre La Coruña.....	-143-
4.11.2.2 Enlace ubicado sobre Barcelona.....	-144-
4.11.2.3 Enlace ubicado sobre Madrid.....	-145-
4.11.2.4 Enlace ubicado sobre Sevilla.....	-146-
4.11.2.5 Enlace ubicado sobre Tenerife.....	-147-

Índice de contenidos

4.11.3 Enlace WiMAX HAPs-terrestre en 48 GHz.....	-148-
4.11.3.1 Enlace ubicado sobre La Coruña.....	-149-
4.11.3.2 Enlace ubicado sobre Barcelona.....	-150-
4.11.3.3 Enlace ubicado sobre Madrid.....	-151-
4.11.3.4 Enlace ubicado sobre Sevilla.....	-152-
4.11.3.5 Enlace ubicado sobre Tenerife.....	-153-
5. CONCLUSIONES.....	-155-
REFERENCIAS.....	-157-
BIBLIOGRAFÍA.....	-158-
GLOSARIO.....	-159-
PRESUPUESTO.....	-161-
PLIEGO DE CONDICIONES.....	-162-

Índice de Figuras

Figura 2-1: Atenuación específica debido al vapor de agua en función de la frecuencia.....	20-
Figura 2-2: Atenuación específica debido al oxígeno de agua en función de la frecuencia.....	21-
Figura 2-3: Atenuación específica debido al vapor de agua y oxígeno en función de la frecuencia.....	22-
Figura 2-4: Atenuación específica debido a la niebla en función de la frecuencia.....	24-
Figura 2-5: Atenuación específica debido a las nubes en función de la frecuencia.....	25-
Figura 2-6: Regiones de lluvia para Europa y Norte de África.....	27-
Figura 2-7: Atenuación específica debido a la lluvia en función de la frecuencia para la Comunidad de Madrid.....	28-
Figura 2-8: Atenuación específica debido a la lluvia en función de la frecuencia para la ciudad de Sevilla.....	29-
Figura 2-9: Atenuación específica debido a la nieve en función de la frecuencia para la Comunidad de Madrid.....	31-
Figura 3-1: Atenuación debido al vapor de agua y oxígeno en un enlace de 10 Km. para distintos valores de densidad	37-
Figura 3-2: Atenuación debido al vapor de agua y oxígeno en un enlace de 5 Km. para distintos valores de densidad	38-
Figura 3-3: Atenuación debido a la niebla en un enlace de 10 Km. para distintos valores de temperatura	39-
Figura 3-4: Atenuación debido a la niebla en un enlace de 5 Km. para distintos valores de temperatura	40-
Figura 3-5: Escenario 1.....	41-
Figura 3-6: Escenario 2.....	41-
Figura 3-7: Atenuación debido a las nubes en el escenario 2 para un enlace de 10 Km.....	42-
Figura 3-8: Atenuación debido a las nubes en el escenario 2 para un enlace de 5 Km.....	43-
Figura 3-9: Escenario 3.....	43-
Figura 3-10: Atenuación debido a las nubes en el escenario 3 para un enlace de 10 Km.....	44-
Figura 3-11: Atenuación debido a las nubes en el escenario 3 para un enlace de 5 Km.....	45-

Índice de Figuras

Figura 3-12: Atenuación debido a las nubes en un enlace de 10 Km. para distintos valores de densidad	-46-
Figura 3-13: Atenuación debido a las nubes en un enlace de 5 Km. para distintos valores de densidad	-47-
Figura 3-14: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 10 Km. en Madrid para distintos valores de intensidad.....	-50-
Figura 3-15: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 5 Km. en Madrid para distintos valores de intensidad.....	-50-
Figura 3-16: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 10 Km. en Sevilla para distintos valores de intensidad.....	-51-
Figura 3-17: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 5 Km. en Sevilla para distintos valores de intensidad.....	-51-
Figura 3-18: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 10 Km. para distintos tipos de polarización.....	-52-
Figura 3-19: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 5 Km. para distintos tipos de polarización.....	-53-
Figura 3-20: Atenuación debido a la nieve en un enlace de 5 Km. para distintos valores de intensidad.....	-54-
Figura 3-21: Atenuación debido a la nieve en un enlace de 10 Km. para distintos valores de intensidad.....	-55-
Figura 3-22: Pérdidas de propagación totales para un enlace de 10Km.....	-59-
Figura 3-23: Pérdidas de propagación totales para un enlace de 5Km.....	-60-
Figura 3-24: Diagrama de constelaciones de algunas modulaciones digitales soportadas por WiMAX.....	-62-
Figura 3-25: Diagrama de la constelación 64 QAM ideal y con imperfecciones; interferencia, ruido y jitter.....	-62-
Figura 3-26: Sistemas montañosos que afectan a las ubicaciones de enlace de Coruña, Barcelona, Madrid, Sevilla y Tenerife.....	-65-
Figura 4-1: Esquema general HAPS.....	-87-
Figura 4-2: Configuración de red.....	-88-
Figura 4-3: Zonas de cobertura de la estación HAP; Rural (RAC), Suburbana (SAC) y Urbana (UAC).	-90-

Índice de Figuras

Figura 4-4: Escenario de comunicación HAPS.....	-91-
Figura 4-5: Atenuación por vapor de agua según el ángulo de elevación.....	-93-
Figura 4-6: Atenuación por oxígeno según el ángulo de elevación.....	-93-
Figura 4-7: Atenuación por vapor de agua y oxígeno según el ángulo de elevación.....	-94-
Figura 4-8: Atenuación por niebla según el ángulo de elevación.....	-95-
Figura 4-9: Atenuación por la capa de niebla de 80m. de altura según el ángulo de elevación...	-96-
Figura 4-10: Ejemplo de estación terrestre por encima de la niebla.....	-97-
Figura 4-11: Esquema de comunicación HAPS en relación a las nubes.....	-98-
Figura 4-12: Atenuación por nubes según el ángulo de elevación.....	-99-
Figura 4-13: Esquema de comunicación HAPS en relación a la lluvia.....	-100-
Figura 4-14: Atenuación por lluvia según el ángulo de elevación.....	-101-
Figura 4-15: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 85° en Madrid.....	-102-
Figura 4-16: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 85° en Sevilla.....	-103-
Figura 4-17: Atenuación por lluvia según polarización con tasa de 32 mm/h y ángulo de elevación de 85°.....	-104-
Figura 4-18: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 55° en Madrid.....	-105-
Figura 4-19: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 55° en Sevilla.....	-106-
Figura 4-20: Atenuación por lluvia según polarización con tasa de 32 mm/h y ángulo de elevación de 55°.....	-107-
Figura 4-21: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 23° en Madrid.....	-108-
Figura 4-22: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 23° en Sevilla.....	-109-
Figura 4-23: Atenuación por lluvia según polarización con tasa de 32 mm/h y ángulo de elevación de 23°.....	-110-

Índice de Figuras

Figura 4-24: Atenuación por lluvia según latitud para un ángulo de elevación de 20° en la región H.....	-111-
Figura 4-25: Atenuación por lluvia según latitud para un ángulo de elevación de 20° en la región K.....	-112-
Figura 4-26: Esquema de comunicación HAPS en relación a la nieve.....	-113-
Figura 4-27: Atenuación por nieve según el ángulo de elevación.....	-114-
Figura 4-28: Esquema de comunicación HAPS en relación al granizo.....	-115-
Figura 4-29: Pérdidas de propagación totales para un ángulo de elevación de 85°.....	-119-
Figura 4-30: Pérdidas de propagación totales para un ángulo de elevación de 55°.....	-121-
Figura 4-31: Pérdidas de propagación totales para un ángulo de elevación de 23°.....	-123-
Figura 4-32: Escenario Shadowing.....	-124-
Figura 4-33: Atenuación por Shadowing en la zona Urbana.....	-125-
Figura 4-34: Atenuación por Shadowing en la zona Suburbana.....	-126-
Figura 4-35: Atenuación por Shadowing en la zona Rural.....	-127-
Figura 4-36: Escenario de HAPS sobre zona Urbana.....	-128-
Figura 4-37: Escenario de HAPS sobre zona Suburbana.....	-130-
Figura 4-38: Escenario de HAPS sobre zona Rural.....	-132-

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Coeficientes para determinar la atenuación específica por lluvia.....	-26-
Tabla 2-2: Valores de atenuación específica debido al granizo en función de la frecuencia y diámetro de sus partículas.....	-32-
Tabla 3-1: Intensidad de lluvia para regiones climáticas.....	-48-
Tabla 3-2: Valores de atenuación debido al granizo en un enlace de 5 Km. dependiendo de la frecuencia y diámetro de sus partículas.....	-56-
Tabla 3-3: Valores de atenuación debido al granizo en un enlace de 10 Km. dependiendo de la frecuencia y diámetro de sus partículas.....	-56-
Tabla 3-4: Atenuación total para un enlace de 10 Km. en función de la frecuencia.....	-58-
Tabla 3-5: Atenuación total para un enlace de 5 Km. en función de la frecuencia.....	-60-
Tabla 3-6: Modulaciones y valores de codificación posibles en WiMAX.....	-63-
Tabla 3-7: Capacidad de la subportadora y valor de SINR mínimo para cada valor de FEC dependiendo de la modulación.....	-63-
Tabla 3-8: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 13 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -30 dBW.....	-66-
Tabla 3-9: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 13 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -30 dBW.....	-67-
Tabla 3-10: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 13 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -30 dBW.....	-68-
Tabla 3-11: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 13 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -30 dBW.....	-68-
Tabla 3-12: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 13 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -30 dBW.....	-69-
Tabla 3-13: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 13 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -25 dBW.....	-70-
Tabla 3-14: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 13 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -25 dBW.....	-71-
Tabla 3-15: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 13 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -25 dBW.....	-71-

Índice de Tablas

Tabla 3-16: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 13 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -25 dBW.....	-72-
Tabla 3-17: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 13 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -25 dBW.....	-72-
Tabla 3-18: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -25 dBW.....	-73-
Tabla 3-19: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -25 dBW.....	-74-
Tabla 3-20: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -25 dBW.....	-74-
Tabla 3-21: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -25 dBW.....	-75-
Tabla 3-22: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -25 dBW.....	-75-
Tabla 3-23: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -15 dBW.....	-76-
Tabla 3-24: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -15 dBW.....	-77-
Tabla 3-25: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -15 dBW.....	-77-
Tabla 3-26: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -15 dBW.....	-78-
Tabla 3-27: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -15 dBW.....	-78-
Tabla 3-28: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -20 dBW.....	-79-
Tabla 3-29: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -20 dBW.....	-80-
Tabla 3-30: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -20 dBW.....	-80-
Tabla 3-31: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -20 dBW.....	-81-

Índice de Tablas

Tabla 3-32: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -20 dBW.....	-81-
Tabla 3-33: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -5 dBW.....	-82-
Tabla 3-34: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -5 dBW.....	-83-
Tabla 3-35: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -5 dBW.....	-83-
Tabla 3-36: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -5 dBW.....	-84-
Tabla 3-37: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -5 dBW.....	-84-
Tabla 4-1: Atenuación por lluvia para ángulos de elevación de 85°, 55° y 23° en Madrid.....	-109-
Tabla 4-2: Atenuación por lluvia para ángulos de elevación de 85°, 55° y 23° en Sevilla.....	-110-
Tabla 4-3: Atenuación por granizo para el usuario 1 y distintos diámetros de partícula.....	-116-
Tabla 4-4: Atenuación por granizo para el usuario 2 y distintos diámetros de partícula.....	-116-
Tabla 4-5: Atenuación por granizo para el usuario 3 y distintos diámetros de partícula.....	-116-
Tabla 4-6: Pérdidas de propagación totales para el usuario 1.....	-118-
Tabla 4-7: Pérdidas de propagación totales para el usuario 2.....	-120-
Tabla 4-8: Pérdidas de propagación totales para el usuario 3.....	-122-
Tabla 4-9: Pérdidas por Shadowing y totales según ángulo de elevación con HAPS sobre zona Urbana.....	-129-
Tabla 4-10: Pérdidas totales según ángulo de elevación con HAPS sobre zona Urbana.....	-129-
Tabla 4-11: Pérdidas por Shadowing y totales según ángulo de elevación con HAPS sobre zona Suburbana.....	-131-
Tabla 4-12: Pérdidas totales según ángulo de elevación con HAPS sobre zona Suburbana.....	-131-
Tabla 4-13: Pérdidas por Shadowing y totales según ángulo de elevación con HAPS sobre zona Rural.....	-133-
Tabla 4-14: Pérdidas totales según ángulo de elevación con HAPS sobre zona Rural.....	-133-

Índice de Tablas

Tabla 4-15: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13 GHz sobre La Coruña.....	-137-
Tabla 4-16: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13 GHz sobre Barcelona.....	-138-
Tabla 4-17: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13 GHz sobre Madrid.....	-139-
Tabla 4-18: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13 GHz sobre Sevilla.....	-140-
Tabla 4-19: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13 GHz sobre Tenerife.....	-141-
Tabla 4-20: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz sobre La Coruña.....	-143-
Tabla 4-21: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz sobre Barcelona.....	-144-
Tabla 4-22: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz sobre Madrid.....	-145-
Tabla 4-23: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz sobre Sevilla.....	-146-
Tabla 4-24: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz sobre Tenerife.....	-147-
Tabla 4-25: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz sobre La Coruña.....	-149-
Tabla 4-26: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz sobre Barcelona.....	-150-
Tabla 4-27: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz sobre Madrid.....	-151-
Tabla 4-28: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz sobre Sevilla.....	-152-
Tabla 4-29: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz sobre La Tenerife.....	-153-

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1. Introducción

1.1. Motivación

Existe una gran demanda del espectro de radio-frecuencia por todas las naciones del mundo debido a la explosión de intercambio de información que se ha producido en nuestra sociedad. Por varias razones el espectro más deseado para proveer ancho de banda es la banda de frecuencias entre 1 y 10 GHz. Una es que el ruido galáctico (radiación solar) y el ruido proveniente del “Ser humano” (motores eléctricos, líneas de alta tensión, etc.) es mínimo. Otra es que la pérdida de señal debido a la absorción atmosférica y la lluvia puede ser generalmente despreciada. Por último hay una tecnología madura con precios competitivos de los equipos.

Por otro lado la banda expuesta anteriormente está altamente congestionada en la mayoría de países del mundo por las razones ya citadas, con lo cual nos vemos forzados a pasar a frecuencias a partir de 10 GHz a pesar de sufrir una mayor atenuación por los fenómenos climatológicos como consecuencia de disminuir la longitud de onda.

Para frecuencias mayores a 10 GHz la atenuación debido a la lluvia y a la absorción de gases atmosféricos puede cobrar una gran importancia en el diseño de sistemas radio de telecomunicaciones. De hecho ciertas bandas de frecuencia muestran una gran absorción de gases y son inútiles para muchas aplicaciones.

La motivación de este proyecto es el uso de las frecuencias en la banda del espectro citada y el diseño de enlaces radio de visión directa (line-of-sight, LOS) de microondas que operen en frecuencias a partir de 10 GHz. Para ello se estudiarán radioenlaces Tierra-Tierra así como radioenlaces Tierra-HAPS-Tierra.

1. Introducción

1.2. Objetivos

El objetivo que se pretende alcanzar con este proyecto es realizar un estudio exhaustivo de como afectan los factores climáticos y meteorológicos en radio enlaces terrestres y en sistemas HAP (High Altitude Platform) para frecuencias superiores a 10 GHz. En esas condiciones además de las pérdidas por espacio libre tendremos pérdidas por fenómenos como son la absorción debido al oxígeno y vapor de agua y atenuaciones por nubes, niebla, lluvia, granizo, etc. Por otro lado la señal también se verá afectada por fenómenos físicos como pueden ser la vegetación y los edificios u obstáculos que se puedan encontrar en la trayectoria entre emisor y receptor, aunque esto no será objetivo de este proyecto.

El trabajo se divide en dos partes diferenciadas. La primera estudiaremos como afectan todos estos fenómenos climatológicos en un enlace terrestre punto a punto. Parámetros como son la distancia de enlace, potencia de transmisión o ganancia de las antenas variarán el diseño del sistema. En la segunda parte el sistema será HAPs-terrestre y el enlace se producirá entre un usuario y la estación localizada en una aeronave a unos 20 Km. de altura, justo por encima del espacio aéreo reservado para los aviones militares. En este caso además de los parámetros citados anteriormente, el ángulo de elevación y el factor de Shadowing serán características a tener en cuenta en el diseño de la red de comunicación.

El estudio se hará en varias ubicaciones dentro de España para contemplar diferentes escenarios donde cambian tanto las condiciones climáticas como las características físicas.

La tecnología utilizada en este trabajo es WIMAX preparada para trabajar en un rango de frecuencias de hasta 66 GHz y con adaptación del orden de modulación en función a la calidad de señal a ruido que tengamos en el terminal de recepción.

Como resultado, se obtendrán datos concretos acerca de los patrones de radio atenuación troposférica que permitan efectuar diseños y planificación de redes de comunicación con parámetros reales.

1.3. Organización de la memoria

El informe del trabajo se divide en cinco capítulos. El primer Capítulo es el de introducción, en el que nos encontramos inmersos. El Capítulo dos muestra los fenómenos determinantes en la transmisión como son el oxígeno, vapor de agua, nubes, niebla, lluvia, nieve y granizo, y los efectos que producen respecto a la atenuación en la banda de frecuencias en cuestión.

En el tercer Capítulo se diseña un enlace WiMAX punto a punto terrestre para reflejar el impacto que tiene estos fenómenos sobre él. Se han considerado tres frecuencias de trabajo (13, 28 y 48 GHz) así como dos distancias de enlace (5 y 10 Km.) y varias ubicaciones del sistema (La Coruña, Barcelona, Madrid, Sevilla y Tenerife) donde cambian las características físicas y del clima.

El Capítulo cuatro es una introducción a los sistemas HAP mostrando sus características, funcionalidades y posibilidades. En este capítulo se simula un enlace HAPs-terrestre, donde se observan las pérdidas que producen los mismos fenómenos sobre usuarios con diferente ángulo de elevación y en diferente localización (zona urbana, suburbana y rural). Los escenarios sobre los que se ha estudiado la disponibilidad del sistema son iguales al capítulo tres, con las mismas tres frecuencias de operación y las cinco mismas ciudades.

El Capítulo cinco aporta las conclusiones generales de este proyecto y los posibles trabajos futuros.

Por último nos quedan los apartados de referencias y bibliografía usada a lo largo del desarrollo del proyecto, el glosario con los acrónimos que aparecen en la memoria, el presupuesto y el pliego de condiciones.

Capítulo 2

Fenómenos Determinantes en la Transmisión

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

La propagación de las ondas de radio a través de la atmósfera por encima de los 10 GHz supone que no solo haya pérdidas de la señal por “espacio libre” sino también pérdidas importantes por otros factores. La interacción de las ondas electromagnéticas con las partículas de la atmósfera tales como la lluvia, nieve o granizo degrada la calidad de señal con una atenuación adicional. Los fenómenos físicos implicados en la atenuación son dos, la **absorción** de energía incidente y la **dispersión** (scattering) de esta energía.

2.1 Gases y vapor de agua

Además del vapor de agua la atmósfera está constituida por los siguientes gases; N₂ (78.08 %), O₂ (20.95 %), Ar (0.93 %), CO₂ (0.0345 %), Ne (0.0018), He (0.00052), CH₄ (0.00014), Kr (0.0001), H₂ (0.00005), y trazas de SO₂, O₃, NO y NO₂. Cada una de estas moléculas interactúa con la onda milimétrica y provoca pérdida de transmisión, especialmente en las frecuencias de resonancia molecular. En la figura 2-1 se ilustra la atenuación específica del vapor de agua para frecuencias entre 10 y 100 GHz.

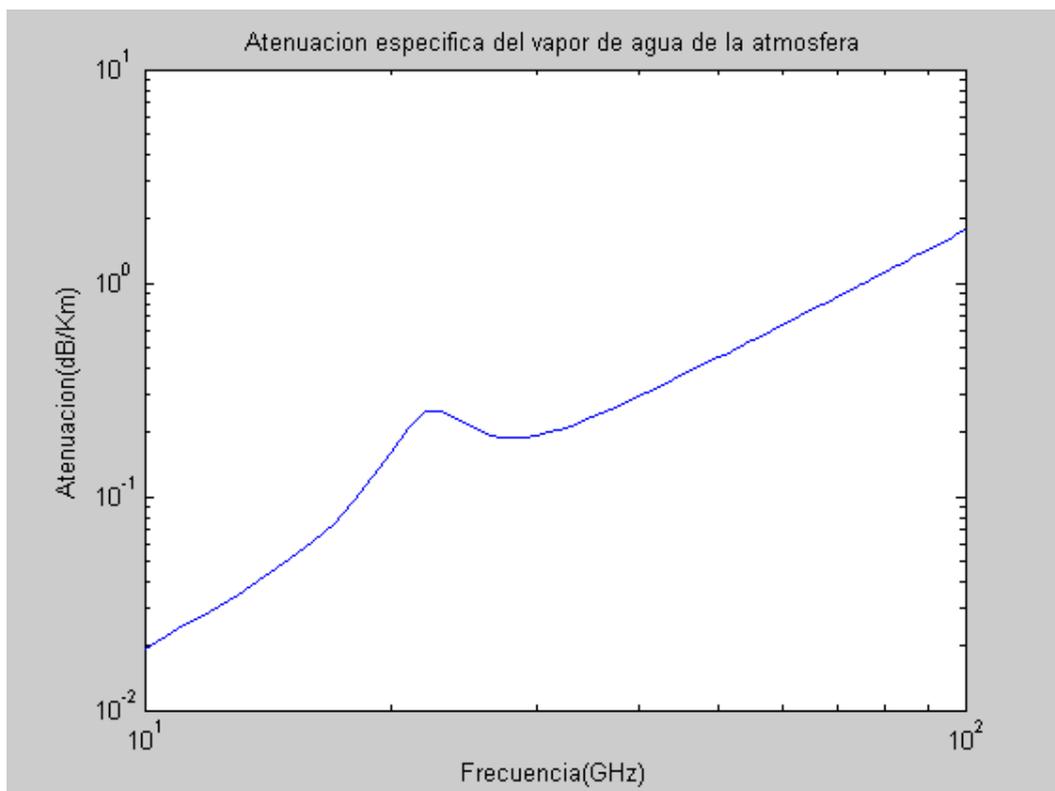


Figura 2-1: Atenuación específica debido al vapor de agua en función de la frecuencia.

En la gráfica se aprecia que la frecuencia de resonancia en el caso del vapor de agua se encuentra en 22 GHz. Aunque no se observa en la gráfica también existe otro pico de absorción en 183 GHz.

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

En el caso del oxígeno las frecuencias de resonancia están en 60 y 119 GHz aproximadamente. Esta atenuación en estos puntos es especialmente importante ya que al nivel del mar está por el orden de los 15 dB/km imposibilitando las comunicaciones a grandes distancias en estas frecuencias. Esto puede ser útil por ejemplo en un sistema celular para dar servicio a una celda (estación base) y que la señal no interfiera en las células contiguas o cercanas.

En la Figura 2-2 se ilustra la atenuación específica del oxígeno para frecuencias entre 10 y 100 GHz.

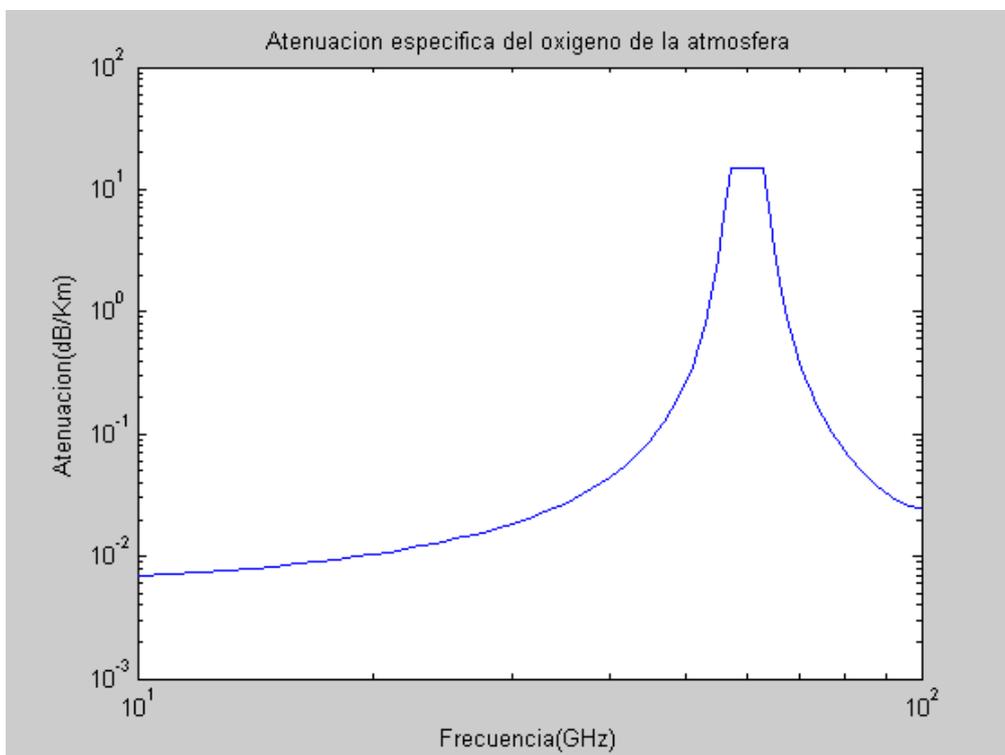


Figura 2-2: Atenuación específica debido al oxígeno en función de la frecuencia.

Como se puede ver en la Figura 2-2 para la mayoría de frecuencias la atenuación debido al oxígeno es inferior a 0,1 dB/Km. Sin embargo alrededor de 60 GHz puede alcanzar un valor de hasta 15 dB/Km.

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

Otros gases de los nombrados anteriormente muestran también líneas resonantes pero debido a su baja densidad en la atmósfera tienen un efecto insignificante en la propagación. Por tanto los factores que pueden provocar pérdida de la señal de información son vapor de agua y oxígeno.

En la Figura 2-3 se ilustra la aportación del oxígeno y el vapor de agua en la atenuación de la señal.

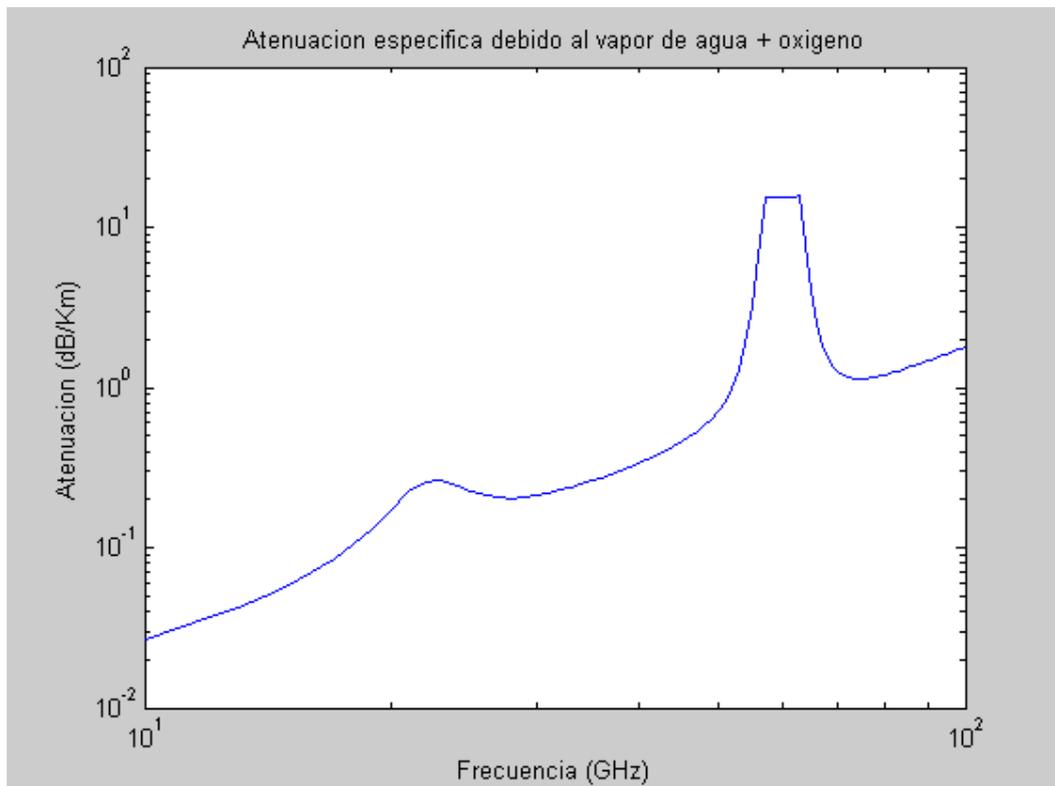


Figura 2-3: Atenuación específica debido al vapor de agua y oxígeno en función de la frecuencia.

Como se puede apreciar en la curva de la Figura 2-3 además de ser creciente con la frecuencia, hay dos picos de absorción que resaltan en la banda de 10 a 100 GHz, el primero es provocado por el vapor de agua en 22 GHz y el segundo es provocado por el oxígeno en la frecuencia de trabajo de 60 GHz.

Todos los cálculos y ecuaciones necesarias para obtener estos datos han sido extraídos de [7].

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

2.2 Niebla

La niebla es un fenómeno meteorológico consistente en nubes muy bajas, a nivel del suelo y formadas por partículas de agua muy pequeñas en suspensión. La mayor parte de las nieblas se producen al evaporarse la humedad del suelo, lo que provoca el ascenso de aire húmedo que al enfriarse se condensa dando lugar a la formación de estas nubes bajas.

El efecto de la niebla varía al igual que los demás fenómenos, de la región del mundo en la que nos encontremos y la estación del año en la que tenga lugar. De hecho se puede hacer una clasificación de los tipos de niebla según el origen del enfriamiento que dio origen a la condensación;

- **Niebla de radiación:** ocurre tras la puesta del sol, cuando el suelo pierde calor a través de la emisión de radiación infrarroja en una noche sin nubes. Entonces, el suelo enfriado produce condensación en el aire cercano al suelo, a través del proceso de conducción de calor. Este tipo de niebla es común en otoño en los países de clima templado, usualmente tiene un espesor de 1 metro aunque la turbulencia puede hacer que se eleve, y es de corta duración.
- **Niebla de viento o de advección:** toma lugar cuando masas de aire cargadas de humedad pasan sobre suelos fríos, lo cual enfría el aire mismo. Este fenómeno es común en las costas, cuando el tibio aire tropical se encuentra con aguas de latitudes mayores. También es común cuando un frente cálido se mueve sobre un área con una cantidad considerable de nieve.
- **Niebla de vapor:** se da cuando aire frío se mueve sobre aguas más cálidas. El vapor del agua entra en la atmósfera por procesos de evaporación, y la condensación se da cuando se alcanza el punto de rocío. Este suceso es común en regiones polares, lagos de tamaño considerable, y al final del otoño y principio del invierno.
- **Niebla de precipitación:** se produce cuando llueve y el aire bajo la nube se halla relativamente seco. Esto hace que las gotas de lluvia se evaporen y formen vapor de agua, que se enfría, y al alcanzar el punto de rocío, se convierte en niebla.
- **Niebla de ladera:** se forma cuando el viento sopla contra la ladera de una montaña u otra formación geológica análoga. Al ascender en la atmósfera, la humedad se condensa. Es por esto que muchas veces las cumbres montañosas aparecen nubladas.
- **Niebla de valle:** se forma en los valles, usualmente durante el invierno. Es resultado de la inversión de temperatura, causada por aire frío que se asienta en el valle, mientras que el aire caliente pasa por encima de éste y de las montañas. Se trata básicamente de niebla de radiación confinada por un accidente orográfico, y puede durar varios días, si el clima está calmado.

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

- **Niebla de hielo:** es cualquier tipo de niebla en la cual las gotas de agua se hallan congeladas en forma de cristales de hielo minúsculos. Usualmente, esto requiere de temperaturas bastante por debajo del punto de congelamiento, lo cual hace que sean comunes a regiones árticas y antárticas.

A efectos de cálculo en este proyecto únicamente se han considerado los tipos de niebla de radiación y advección que son los más comunes evaluando toda la superficie terrestre y considerando como puntos de mayor interés las áreas pobladas donde hay mayor potencial de usuarios.

La atenuación debido a la niebla suspendida en la atmósfera viene determinada por la cantidad de agua por unidad de volumen, tamaño de las gotas y frecuencia de la onda de radio. Como las gotas de agua que componen la niebla son menores que 0.01 cm de diámetro podemos calcular esta atenuación por una aproximación Rayleigh para frecuencias de hasta 100 GHz. Mediante la fórmula (2.1) la atenuación específica sería:

$$\gamma_c \text{ (dB/Km)} = K_1 M \quad (2.1)$$

Siendo K_1 el coeficiente de atenuación específica (dB/Km.)(g/m³) y M la densidad de agua líquida para la niebla (g/m³).

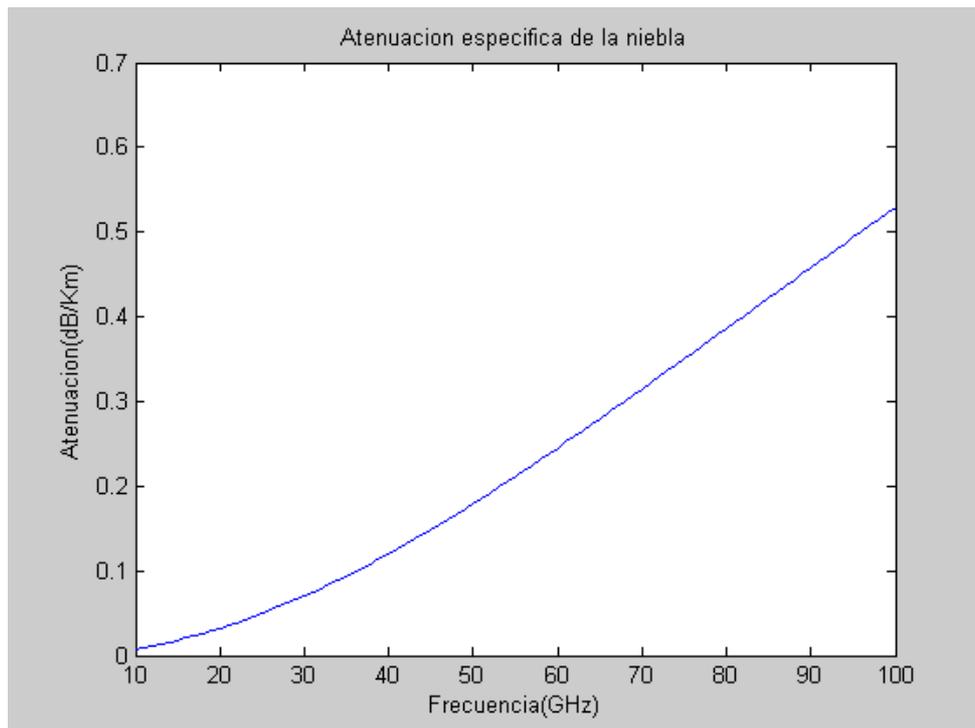


Figura 2-4: Atenuación específica debido a la niebla en función de la frecuencia.

Como se observa en la Figura 2-4 la atenuación es directamente proporcional a la frecuencia aunque los valores de atenuación son pequeños ya que en esta banda entre 10 y 100 GHz los valores de atenuación específica oscilan entre 0,01 y 0,52 dB/Km.

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

2.3 Nubes

La atenuación debido a las nubes es una función compleja de la distribución del tamaño de la partícula, temperatura, densidad, índice de refracción, extensión de la nube, y longitud de onda.

Hay que tener cuidado cuando se hace una estimación de la atenuación que provocan las nubes al diseñar enlaces. Para empezar hay diferentes tipos de nubes según su densidad (g/m^3) que generalmente se encuentran a diferente altura de la superficie terrestre. Además las nubes no son masas de aire homogéneas que contienen gotas de agua distribuidas homogéneamente. De hecho el contenido de agua de una nube puede variar ampliamente dentro de una misma nube. Incluso las diferentes formas de las nubes (variantes en el tiempo) hacen muy complicado hacer un cálculo exacto de la atenuación debido a este fenómeno.

Existen muchos modelos para el cálculo de esta atenuación. Aquí se ha considerado un modelo de nubes mixtas dado por [1]. En la Figura 2-5 se representa la atenuación específica provocada por las nubes en función de la frecuencia de operación.

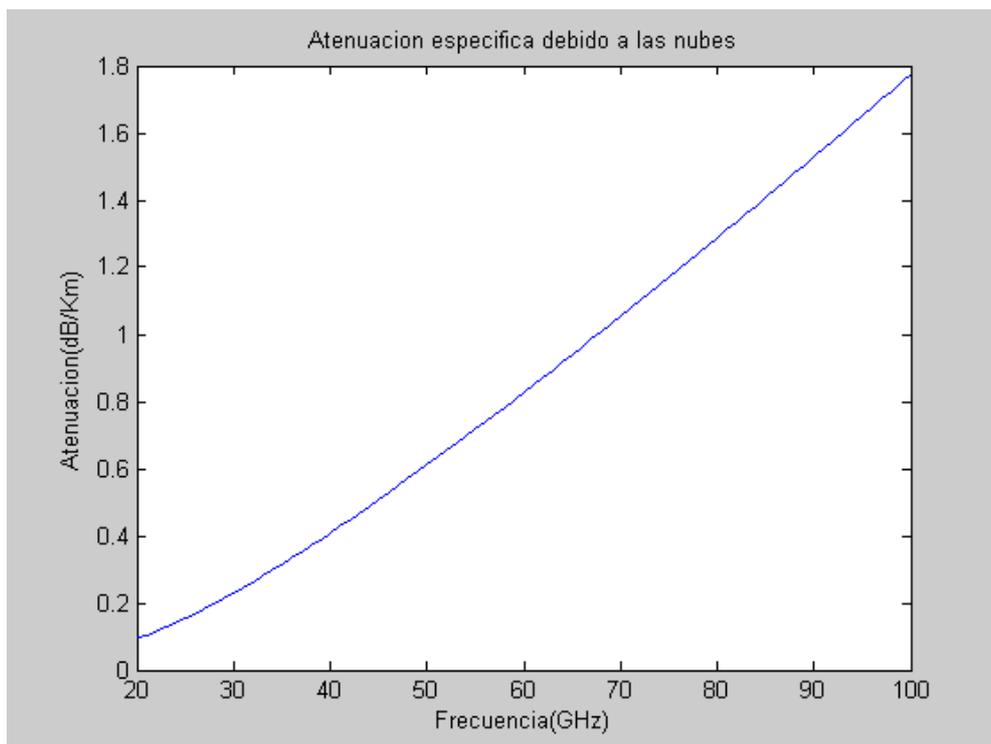


Figura 2-5: Atenuación específica debido a las nubes en función de la frecuencia.

Como se observa en la Figura 2-5 la atenuación es casi una función lineal creciente frente a la frecuencia.

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

2.4 Lluvia

La atenuación debido a las gotas de lluvia es mayor que las debidas a otras formas de precipitación (nieve o granizo). Esta atenuación es producida por absorción, en la cual la gota de lluvia actúa como un dieléctrico pobre, absorbe potencia de la onda de radio y la disipa como dispersión o pérdida de calor. Las gotas de lluvia provocan mayor atenuación por dispersión que por absorción por encima de los 100 MHz.

La atenuación específica debida a la lluvia puede calcularse a partir de la Recomendación UIT-R 838. La atenuación específica γ (dB/km) se obtiene a partir de la intensidad de lluvia R (mm/h) [2] mediante la expresión (2.2);

$$\gamma = kR^\alpha \quad (2.2)$$

Donde;

γ , Atenuación específica debido a la lluvia (dB/Km)

R, Intensidad de lluvia (mm/h)

K y α son unas constantes que dependen de la frecuencia, de la temperatura de la lluvia y de la polarización de la onda electromagnética.

Algunos valores de K y α para distintas frecuencias y polarizaciones (horizontal y vertical) se muestran en la Tabla 2-1, tomados de la Recomendación ITU 838 [2]. Para obtener valores a frecuencias intermedias se recomienda utilizar interpolación, utilizando una escala logarítmica para la frecuencia y para k, y una escala lineal para α .

Tabla 2-1: Coeficientes para determinar la atenuación específica de la lluvia.

Frec.(GHz)	k_H	k_V	α_H	α_V
10	0,01006	0,008853	1,2747	1,2636
20	0,07504	0,06898	1,0995	1,0663
25	0,1237	0,1125	1,0604	1,0308
30	0,1864	0,1673	1,0202	0,9974
45	0,4426	0,3922	0,9040	0,8981
60	0,7039	0,6347	0,8266	0,8263

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

De la Tabla 2-1 se deduce que la atenuación es ligeramente superior para polarización horizontal que para vertical. Esto se debe simplemente a la forma que adquieren las gotas de lluvia por el rozamiento experimentado durante la caída.

Para la predicción de la atenuación producida por la lluvia se necesita información sobre las estadísticas de intensidad de precipitación. En la Rec. UIT-R PN.837-1 se proporcionan valores de intensidad de lluvia excedidos durante determinados porcentajes de tiempo y para distintas zonas hidrometeorológicas mundiales.

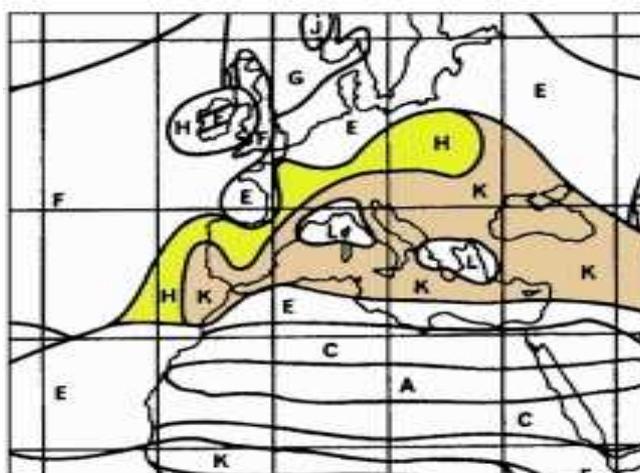


Figura 2-6: Regiones de lluvia para Europa y Norte de África.

En el caso de la península ibérica, éstas son las llamadas zonas H y K. Por ejemplo, Madrid se encuentra en la zona H, mientras que Sevilla se encuentra en la zona K. La Rec. UIT-R P.530-7 establece el procedimiento para calcular la atenuación producida por la lluvia a largo plazo.

En la Figura 2-7 se muestra la atenuación específica debido a la lluvia en un rango de frecuencias de 10 a 100 GHz para una tasa de 32 mm/h que es la que se registra en Madrid para una probabilidad del 0.01 % del tiempo.

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

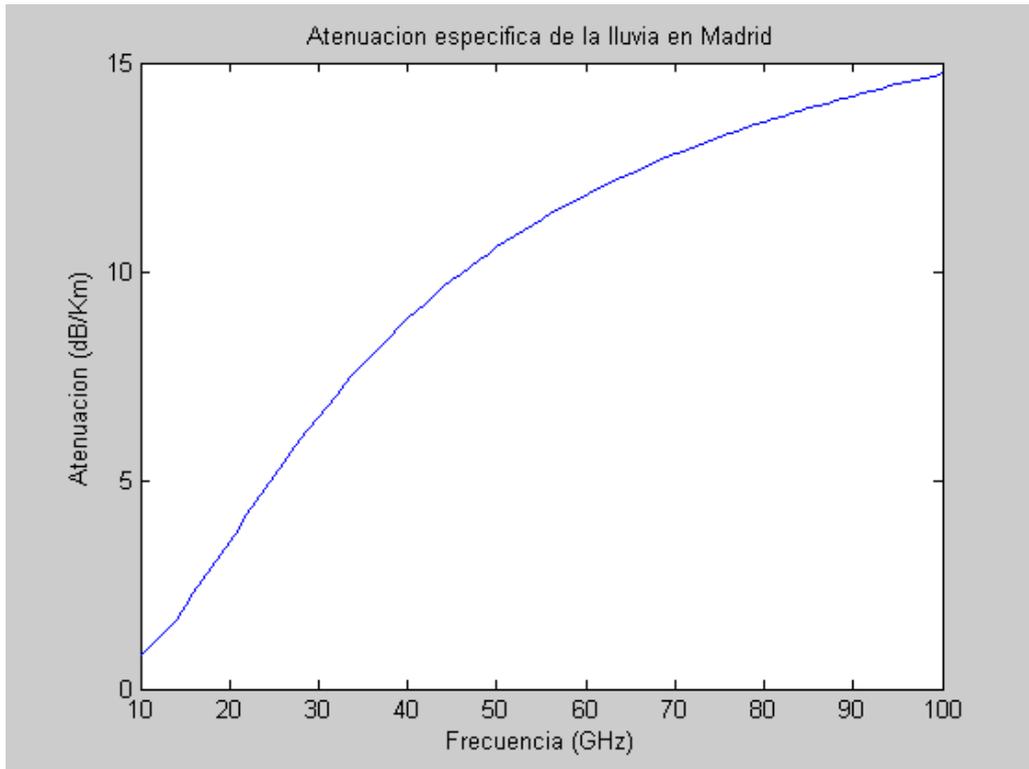


Figura 2-7: Atenuación específica debido a la lluvia en función de la frecuencia para la Comunidad de Madrid.

El efecto de la lluvia es el más influyente de todos los citados anteriormente. Fijando una frecuencia, por ejemplo 22 GHz (donde existe un pico en la atenuación del vapor de agua), la atenuación por los gases atmosféricos no llega a 1 dB/Km al igual que la atenuación por las nubes o la niebla. Sin embargo en este caso la atenuación debido a la lluvia para 22 GHz es mayor que 4 dB/Km.

En el ejemplo anterior se observa el efecto de la lluvia en el caso de que nos encontremos en la región H (Figura 2-7). Ahora vamos a ver cuál sería la atenuación específica en Sevilla que se encuentra en la región K.

La Figura 2-7 representa la atenuación específica debido a la lluvia en un rango de frecuencias de 10 a 100 GHz para una tasa de 42 mm/h que es la que se registra en Sevilla para una probabilidad del 0.01 % del tiempo.

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

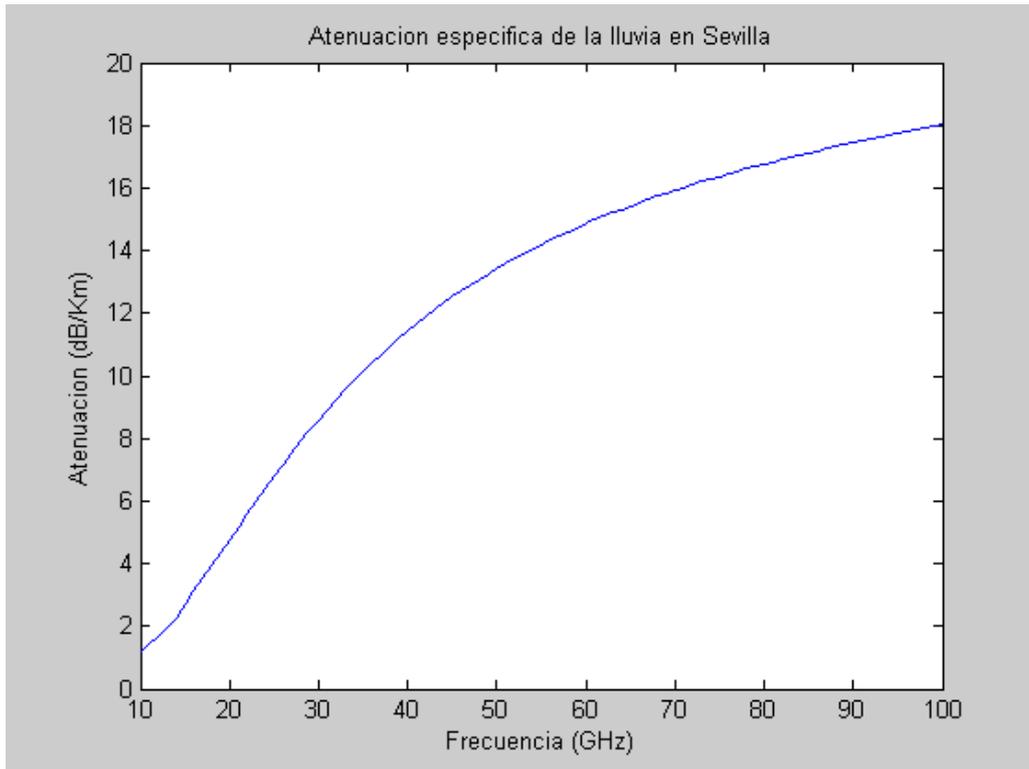


Figura 2-8: Atenuación específica debido a la lluvia en función de la frecuencia para la ciudad de Sevilla.

Como se puede observar para el mismo porcentaje de tiempo que teníamos anteriormente (0,01 %) en la región H teníamos 4 dB/Km. de atenuación en la frecuencia de trabajo de 22 GHz y ahora en esa misma frecuencia para la región K tenemos casi 6 dB/Km. de atenuación.

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

2.5 Nieve

La nieve es agua, pero agua sólida, comúnmente llamada hielo, y ella no es otra cosa que finos cristales de hielo aprisionando aire. Sus propiedades particulares provienen de esa mezcla, donde los componentes van evolucionando con el transcurso del tiempo.

El cristal de nieve está estrechamente ligado al desequilibrio que experimenta el agua en sus estados, gaseoso (aire saturado en vapor de agua), líquido y sólido (hielo). La transformación de un estado a otro se efectúa liberando o absorbiendo calor. La nieve es el resultado de la combinación de los tres estados del agua en distintas proporciones y a determinadas temperaturas.

La influencia de la temperatura del aire en la nieve se manifiesta desde su formación, ya que regula desde el crecimiento de los cristales, hasta la forma en que cae, ya sea como nieve seca donde las temperaturas por las que cae son inferiores -3°C , o como nieve húmeda si estas temperaturas son cercanas al 0°C .

La atenuación de las microondas al atravesar nieve “seca” es al menos un orden de magnitud inferior que para la lluvia considerando la misma tasa de precipitación.

Para la propagación de ondas milimétricas el efecto de la nieve produce una atenuación reducida por debajo de los 30 GHz. Un índice de lluvia en forma de nieve de 10 mm/h produce una atenuación específica de 3 dB/Km.

La nieve al igual que el hielo tiene un menor contenido de agua por unidad de volumen que en el caso de la lluvia.

Debido a la gran cantidad de variables involucradas, en particular el contenido de agua relativo, resulta difícil especificar la atenuación en función de la tasa de precipitación de una forma simple, aunque asumiendo un copo de nieve esférico y una densidad de 1 g/m^3 , podemos considerar una aproximación tal como [8];

$$L_s \text{ (dB/Km)} = 3.5 * 10^{-2} * R^2 / \lambda^4 + 2.2 * 10^{-2} * R / \lambda \quad (2.3)$$

Siendo;

R ; tasa de lluvia en forma de nieve en mm/h.

λ ; longitud de onda en cm.

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

En la Figura 2-9 se puede observar la curva de la atenuación producida por la nieve en el rango de frecuencias de 10 a 100 GHz para una tasa de precipitación en forma de nieve de 4 mm/h.

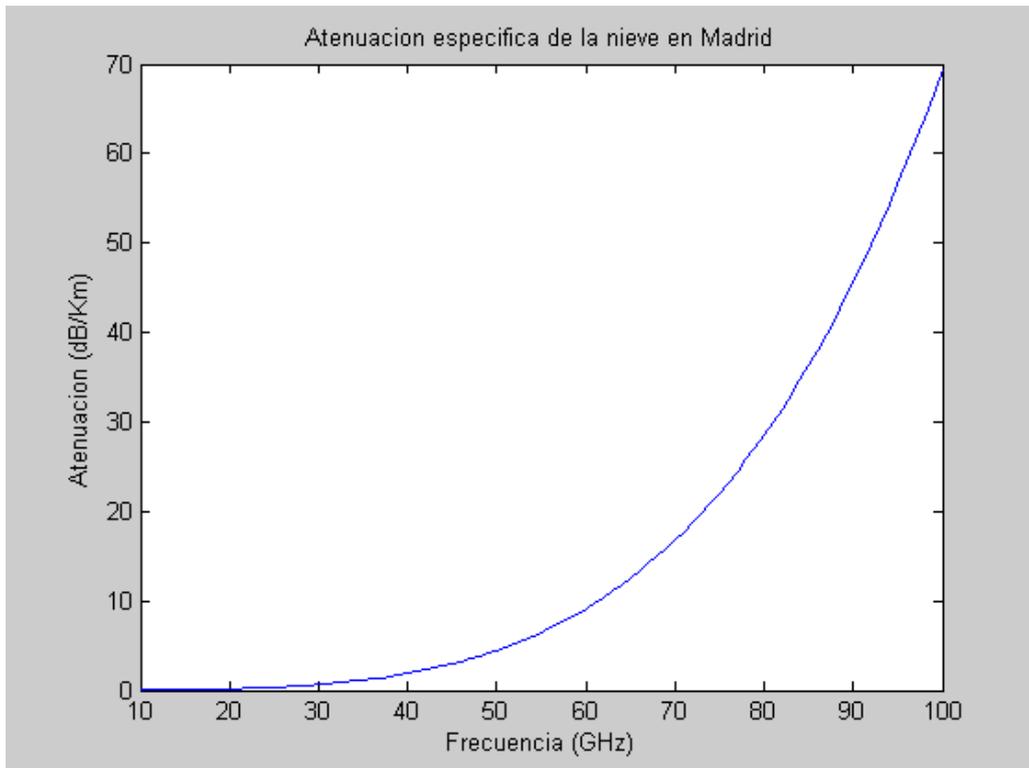


Figura 2-9: Atenuación específica debido a la nieve en función de la frecuencia para la Comunidad de Madrid.

Como se puede observar la nieve no tiene efectos en la atenuación hasta prácticamente los 30 GHz. A partir de ahí va aumentando exponencialmente hasta alcanzar prácticamente los 70 dB/Km. para una frecuencia de trabajo de 100 GHz.

2. Fenómenos Determinantes en la Transmisión

2.6 Granizo

El granizo o pedrisco es un tipo de precipitación que consiste en partículas irregulares de hielo. El granizo se produce en tormentas intensas en las que se producen gotas de agua sobre enfriadas, es decir, aún líquidas pero a temperaturas por debajo de su punto normal de congelación (0°C), y ocurre tanto en verano como en invierno, aunque el caso se da más cuando está presente la canícula, días del año en los que es más fuerte el calor.

Debido a que las bolas de granizo no son completamente esféricas, y cada una de ellas puede tener diferente orientación, rotación, dureza y composición es imposible conocer la atenuación exacta producida por el granizo. No obstante en las longitudes de onda utilizadas en los sistemas rádar se han observado distintos valores de atenuación considerando partículas esféricas [9].

En la Tabla 2-2 se muestran los valores de atenuación específica en función de la longitud de onda o frecuencia y diámetro de la partícula de hielo.

Tabla 2-2: Valores de atenuación específica debido al granizo en función de la frecuencia y diámetro de sus partículas.

FRECUENCIA (GHz)	ATENUACIÓN (dB/Km)	
	D = 0.97 cm	D = 1.93 cm
15	0.9	4.2
30	1.9	5
45	2.8	5.9
60	3	6

En esta Tabla se ha considerado una densidad de 1 g/m^3 .

A partir de 60 GHz la atenuación aumenta muy lentamente con la frecuencia. Para el rango de frecuencias mostrado en la Tabla las pérdidas son similares al caso de la nieve y también la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno es muy baja.

Capítulo 3

Radioenlace Terrestre

3. Radioenlace Terrestre

3.1 Introducción

Se denomina, en general, radioenlace a cualquier interconexión entre terminales de comunicación efectuada por ondas radioeléctricas. Cuando los terminales son fijos, se habla de radioenlaces del Servicio Fijo. Si algún terminal es móvil, se engloba al radioenlace dentro del amplio concepto de sistemas o Servicios Móviles. Si todos los terminales están en la Tierra, se califican los radioenlaces como radioenlaces terrenales, reservándose el término radioenlaces espacial o por satélite cuando en el enlace intervienen uno o más repetidores situados a bordo de un satélite. De acuerdo con esta nomenclatura, podemos definir los radioenlaces terrenales del servicio fijo como sistemas de radiocomunicaciones entre puntos fijos situados sobre la superficie terrestre, que proporcionan una capacidad de transmisión de información con unas características de disponibilidad y calidad determinadas.

Generalmente, los sistemas de radioenlaces se explotan entre unos 2 GHz y 50 GHz, dependiendo de su capacidad. En este proyecto se ha considerado la banda de 10 a 100 GHz. Como la mayoría de los sistemas de radioenlaces del servicio fijo utilizan frecuencias en la región de las microondas, se les llama también radioenlaces de microondas.

Aunque existen radioenlaces monocanales, lo usual es que transporten señales multiplexadas, constituyendo importantes arterias de transmisión. Por lo tanto, los radioenlaces guardan cierta similitud con los sistemas de transmisión múltiplex por línea, aunque el portador es radioeléctrico, en vez de metálico u óptico. Ello implica que no sean posibles, en radioenlaces, los sistemas de transmisión en banda base, sino que, necesariamente, deben ser sistemas con modulación de portadora.

Los radioenlaces establecen circuitos de telecomunicación de tipo dúplex, a 4 hilos equivalentes, por lo que deben transmitirse dos portadoras moduladas, una para cada sentido. Se denomina radiocanal a la pareja de portadoras de ida y de retorno. Puede caracterizarse un radioenlace por el número de radiocanales principales y de reserva habilitados para cursar el tráfico previsto.

Según el tipo de modulación, pueden clasificarse los radioenlaces en dos amplias categorías, cada una de las cuales utiliza una tecnología específica:

- *Radioenlaces analógicos.*

En estos radioenlaces la portadora se modula en frecuencia (FM).

- *Radioenlaces digitales.*

La modulación en la portadora es digital, de tipo binario o multinivel. Se utilizan muchas variantes de la modulación de fase coherente: PSK binaria, PSK cuaternaria, PSK diferencial, así como modulaciones multinivel mixtas de amplitud y fase del tipo MQAM ($M = 16, 64, 128$).

3. Radioenlace Terrestre

Los radioenlaces del servicio fijo hacen uso de la propagación troposférica en condiciones de visibilidad directa. En consecuencia, para salvar las limitaciones de alcance impuestas por la redondez de la Tierra y los obstáculos geográficos del terreno, se requiere la utilización de estaciones repetidoras intermedias o, simplemente, repetidores, a través de las cuales la señal transmitida efectúa un tránsito. En el caso que nos ocupa la longitud máxima de enlace va a ser de 10 Km. con lo que nuestro sistema va a constar únicamente de un terminal transmisor y otro receptor, sin repetidores entre medias.

En general en los radioenlace se emplean antenas muy directivas, con buena relación delante-atrás, lo que permite establecer cada radiocanal empleando únicamente dos frecuencias f_1 y f_2 , una para cada sentido de transmisión, las cuales se reutilizan en tramos de repetición sucesivos.

La limitación de los recursos espectrales exige que los radioenlaces deban atenerse a planes estrictos de canalización, aún a costa de sacrificar otras características (aumento de distorsión, interferencia entre símbolos, etc.), cuyo restablecimiento obliga a recurrir a técnicas especiales de tratamiento de la señal (codificación, ecualización).

Las ventajas generales de los radioenlaces en comparación con los sistemas de línea se pueden resumir en las siguientes:

- Volumen de inversión generalmente más reducido.
- Instalación más rápida y sencilla.
- Conservación generalmente más económica y de actuación rápida.
- Pueden superarse las irregularidades del terreno.
- La regulación sólo debe aplicarse al equipo, puesto que las características del medio de transmisión son esencialmente constantes en la anchura de banda de trabajo.

En cuanto a los inconvenientes, podemos citar los siguientes:

- Explotación restringida a tramos con visibilidad directa.
- Necesidad de acceso adecuado a las estaciones repetidoras en las que hay que disponer de energía y acondicionamiento para los equipos y establecer algún tipo de mantenimiento. En radioenlaces de baja capacidad (monocanales sobre todo), suelen utilizarse generadores autónomos y baterías de células solares.
- La segregación de canales, aunque es posible y se realiza, no es tan flexible como en los sistemas por cable.

3. Radioenlace Terrestre

- La gran linealidad requerida en los repetidores supone un importante problema de diseño en radioenlaces analógicos.

Los radioenlaces son sistemas de comunicación “en serie”, por lo que cualquier interrupción causada por avería o desvanecimiento en un tramo corta todo el radioenlace, dejando fuera de servicio muchas comunicaciones. Por ello se exige a los radioenlaces una elevada disponibilidad, lo cual requiere:

- a) La utilización de redundancia de equipos para mantener la continuidad frente a eventuales averías y el uso de técnicas de diversidad, como contramedida frente a los desvanecimientos.
- b) El establecimiento de sistemas de supervisión y control para la aplicación automática de las técnicas anteriores.

Como, además, la mayoría de las estaciones funcionan en régimen no atendido, para la ejecución de las funciones de supervisión y conmutación al equipo de reserva en caso de avería, junto con la información útil se transmite señales auxiliares de telecontrol, telemando y supervisión, así como canales telefónicos de servicio asociados a la banda base.

En los posteriores subcapítulos vamos a estudiar la influencia de todos los fenómenos ambientales citados en el capítulo anterior para los casos de radioenlace terrestre en los que haya una distancia de 10 Km. entre el emisor y el receptor y otro caso en que esa distancia sea 5 Km., todo ello para la banda de frecuencias de 10 a 100 GHz.

3. Radioenlace Terrestre

3.2 Efecto de los gases y el vapor de agua

La atmósfera terrestre contiene cantidades variables de agua en forma de vapor. La mayor parte del mismo se encuentra en los primeros 5 kilómetros del aire, dentro de la troposfera y es debido principalmente a la evaporación de los mares.

Para nuestro caso interesa destacar que la atenuación que provoca este fenómeno varía con la densidad de vapor de agua, con lo cual varía dependiendo de la zona donde se sitúe el enlace, es decir, la atenuación será mayor cerca de la costa, donde existe mayor humedad, que en una región interior en la que habrá menor concentración de agua en el aire.

El oxígeno es un elemento que se encuentra tanto en la troposfera (10 Km) como en la estratosfera (50 Km) donde se sitúa la capa de ozono (O_3).

Por tanto para cualquier enlace terrestre este elemento va a contribuir en la atenuación de la señal.

En la Figura 3-1 se puede observar la atenuación que sufriría la señal de un enlace terrestre de 10 Km. debido al oxígeno y al vapor de agua para un rango de frecuencias de 10 a 100 GHz tomando los valores de densidad de vapor de agua de 2, 5, 8 y 12 gramos por metro cúbico.

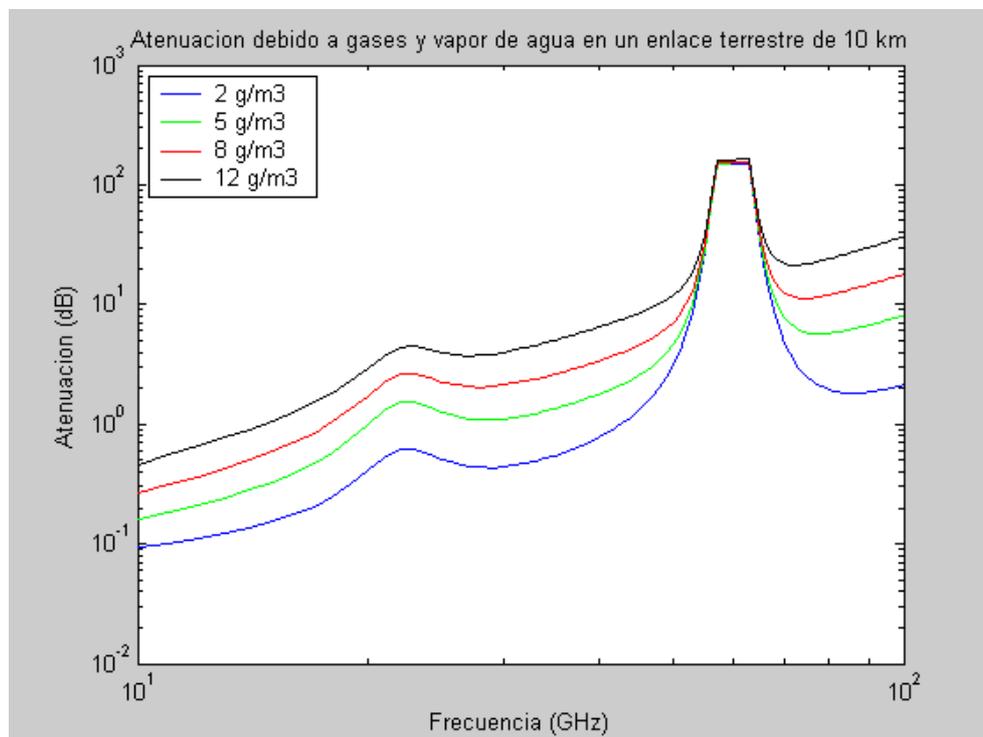


Figura 3-1: Atenuación debido a vapor de agua y oxígeno en un enlace de 10 Km. para distintos valores de densidad.

3. Radioenlace Terrestre

Como podemos observar en la Figura 3-1 cuanto mayor es la densidad existe mayor atenuación por estos factores. Además cuanto mayor sea la distancia de enlace más separadas estarán las curvas de densidad.

En la Figura 3-2 se representa la atenuación que sufriría la señal de un enlace terrestre de 5 Km. debido al oxígeno y al vapor de agua para un rango de frecuencias de 10 a 100 GHz tomando los valores de densidad de vapor de agua de 2, 5, 8 y 12 g/m³.

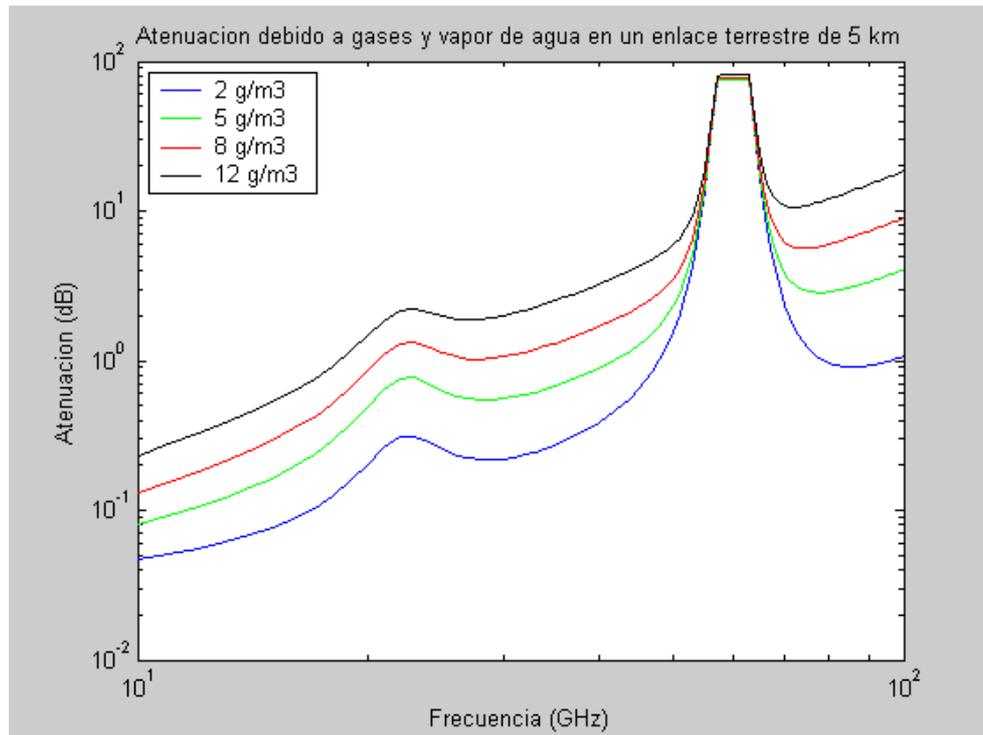


Figura 3-2: Atenuación debido a vapor de agua y oxígeno en un enlace de 5 Km. para distintos valores de densidad.

Hay que recordar que el primer pico de atenuación que se observa en las Figuras 3-1 y 3-2 se produce en 22 GHz y es consecuencia de ser frecuencia resonante del vapor de agua. El segundo pico se produce en 60 GHz que es la frecuencia resonante del oxígeno.

3. Radioenlace Terrestre

3.3 Efecto de la niebla

Hay que mencionar que para el enlace que estamos suponiendo no siempre que se forme niebla provocará pérdida de señal ya que depende de la altura de la capa de niebla. En el caso de que el transmisor y receptor se encuentren por encima de esa capa, la señal no sufrirá atenuación extra debido a este fenómeno, como por ejemplo las antenas en la azotea de edificios muy altos.

La temperatura ambiental es un aspecto significativo a tener en cuenta en este apartado. Por tanto el efecto de la niebla también variará con este factor con la estación en la que estemos y dependiendo del área de la Tierra donde nos encontremos.

En la Figura 3-3 se muestran las distintas curvas de atenuación de la niebla para el enlace de 10 km que estamos considerando en distintas frecuencias y para distintos valores de temperatura.

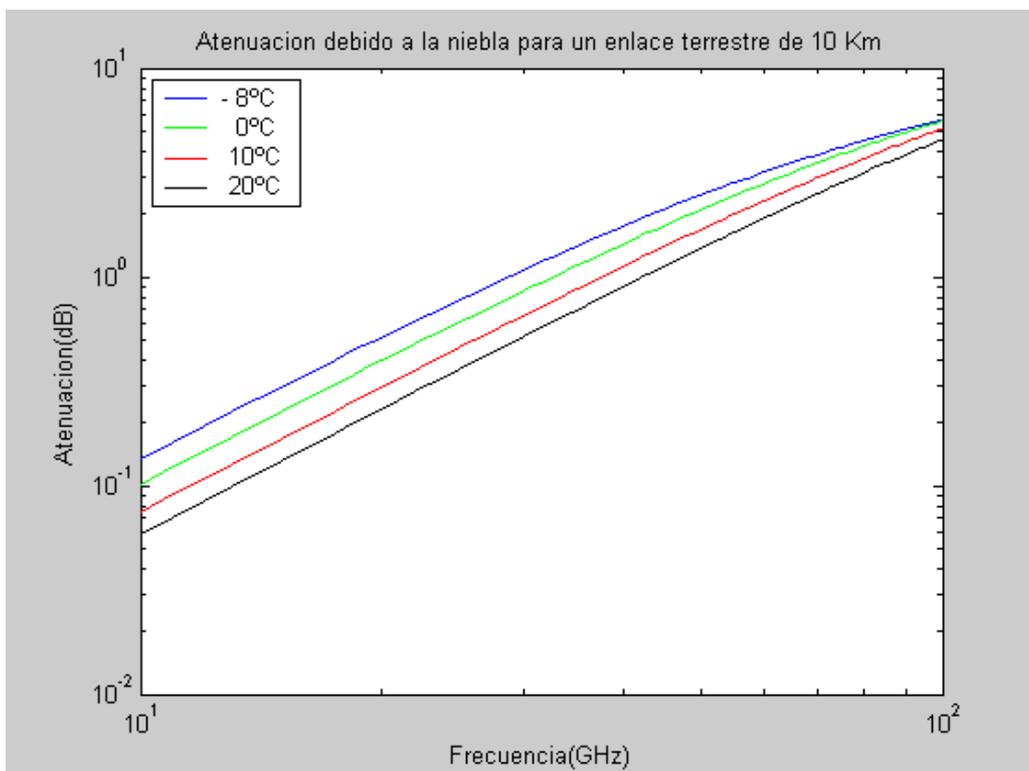


Figura 3-3: Atenuación debido a la niebla en un enlace de 10 Km. para distintos valores de temperatura.

Las pérdidas por niebla no son altas comparadas con lo demás fenómenos. Vemos que la atenuación debido a la niebla si tenemos una temperatura ambiente de 0° y una frecuencia de trabajo de 40 GHz. es aproximadamente 1 dB en una distancia de 10 Km. entre los terminales.

3. Radioenlace Terrestre

Vamos a ver ahora las curvas de atenuación de la niebla para el enlace de 5 km para el mismo rango de frecuencias y los mismos valores de temperatura.

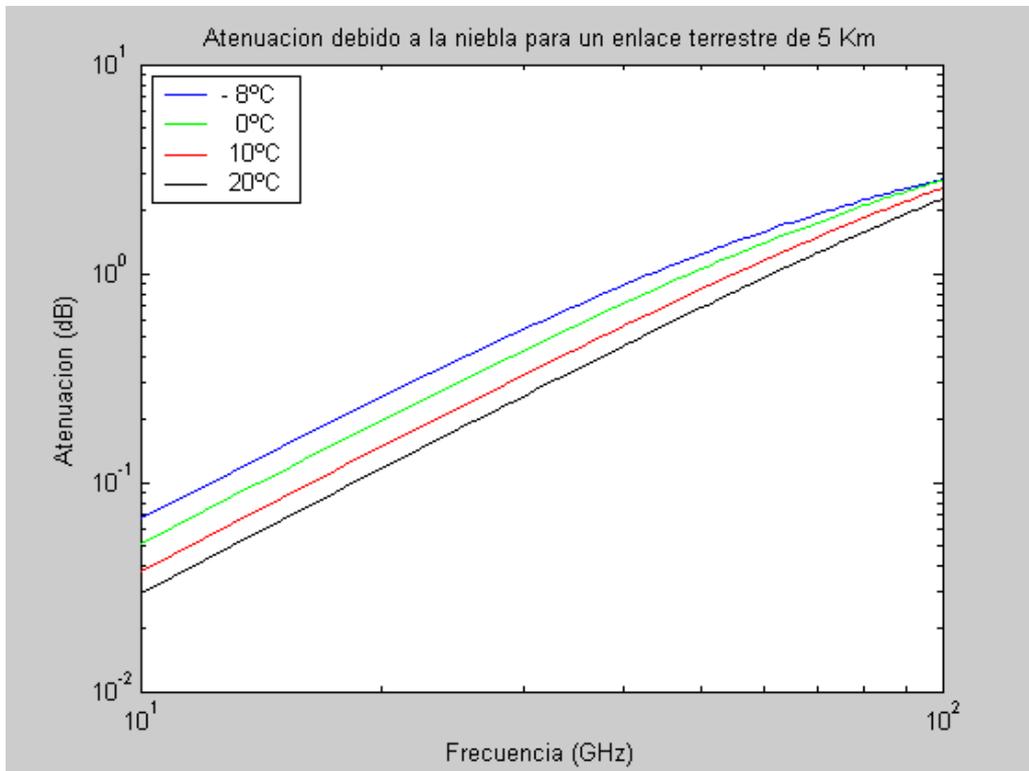


Figura 3-4: Atenuación debido a la niebla en un enlace de 5 Km. para distintos valores de temperatura.

Como se muestra tanto en la Figura 3-3 como en la Figura 3-4 la temperatura es inversamente proporcional a la atenuación, cuanto más baja sea la temperatura más pérdidas tendremos debido a la niebla.

3. Radioenlace Terrestre

3.4 Efecto de las nubes

Los diferentes tipos de nubes hacen que se forme una capa atenuante que conlleva pérdidas de potencia de señal. Para un radioenlace terrestre que es el caso que nos ocupa el límite superior de esta capa no es significativo ya que siempre se encontrará a una altura superior a la trayectoria del enlace. Sin embargo dependiendo de la altura del límite inferior de la capa atenuante podemos distinguir tres posibles escenarios;

1°. Emisor y receptor se encuentran por debajo de la altura mínima de las nubes.

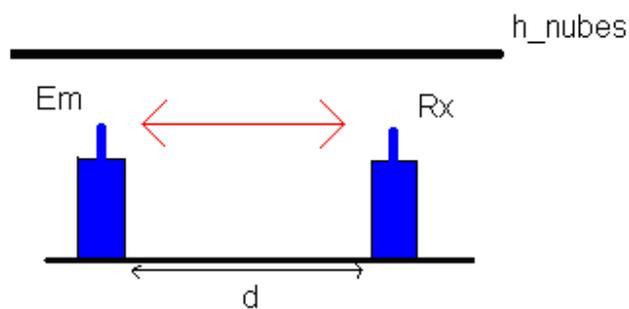


Figura 3-5: Escenario 1.

En este caso la señal no sufre atenuación por este efecto. Este escenario va a ser el más frecuente ya que casi todos los edificios o estructuras en cuya parte superior podrían colocarse antenas están a menor altura que las nubes más bajas.

2°. Emisor y receptor se encuentran por encima de la altura mínima de las nubes y por debajo de la altura máxima.

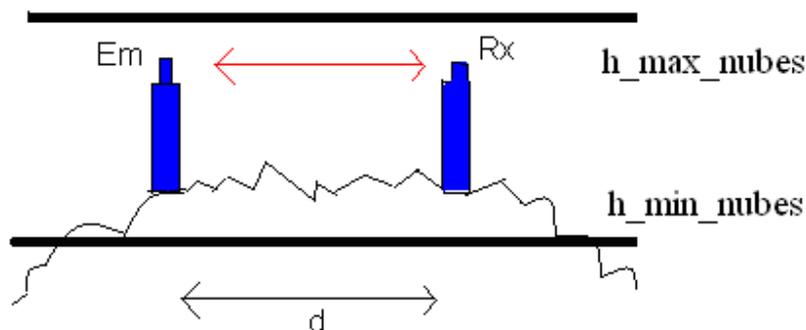


Figura 3-6: Escenario 2.

3. Radioenlace Terrestre

En este caso las pérdidas se producen durante toda la trayectoria del enlace. Éste es un caso típico en el que las antenas se encuentran en lo alto de una montaña. En Madrid capital podríamos poner este ejemplo con las “Cuatro Torres Business Area” (CTBA) del paseo de la Castellana que alcanzan una altura de alrededor de 250 metros.

En la Figura 3-7 se muestra la atenuación debido a las nubes en un enlace de 10 Km. en el cual el receptor y el transmisor se encuentren por encima de la altura límite donde comienza esta capa que puede ser de unos 150 metros y por debajo de la máxima. Por tanto durante los 10 Km. de trayectoria existe atenuación por este efecto.

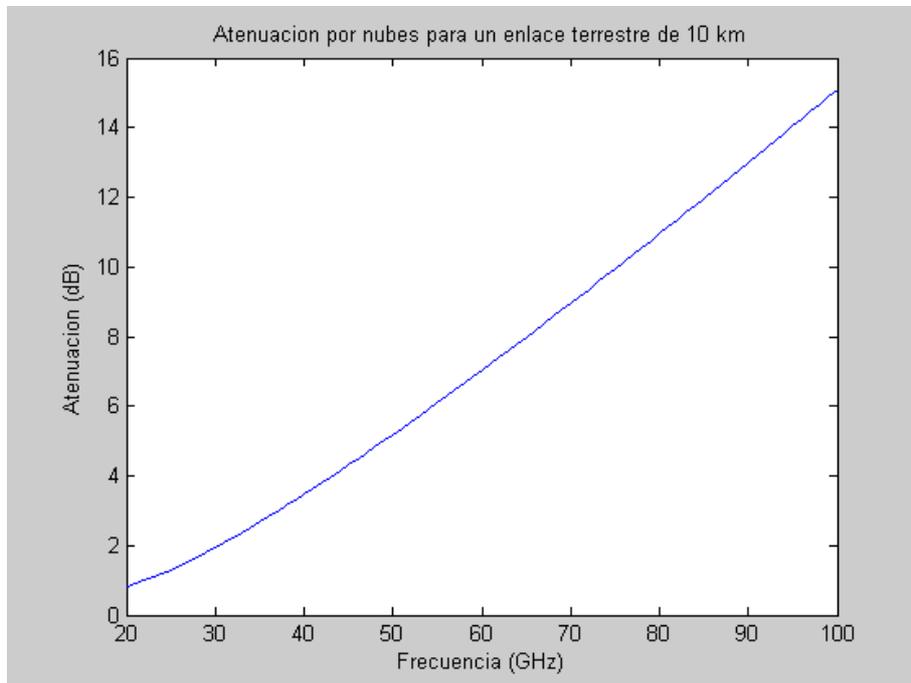


Figura 3-7: Atenuación debido a las nubes para un enlace de 10 Km.

En el caso de que la distancia entre emisor y receptor sea de 5 km. la curva de atenuación quedaría de la siguiente manera;

3. Radioenlace Terrestre

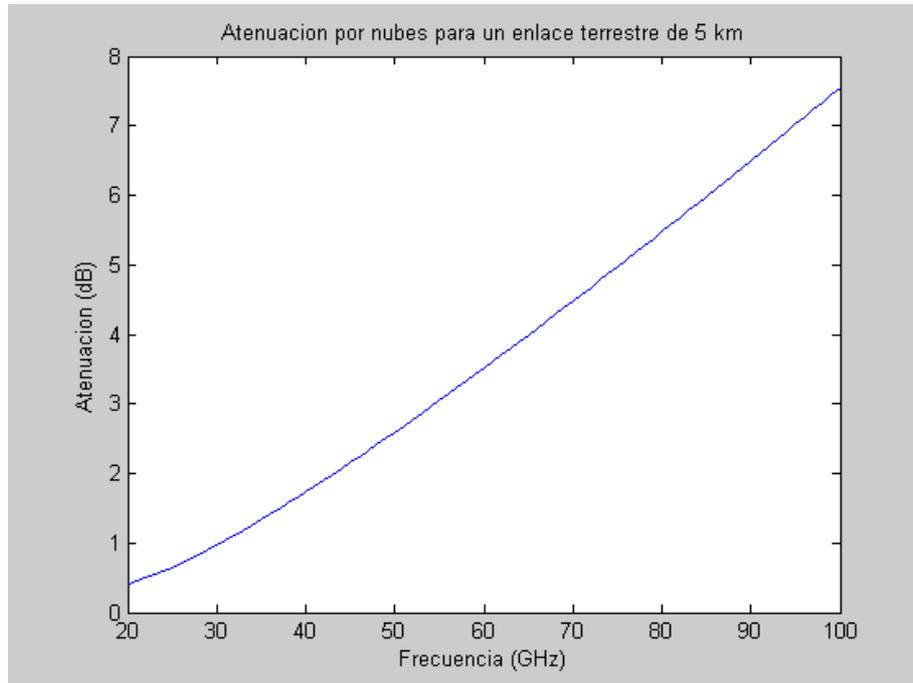


Figura 3-8: Atenuación debido a las nubes en el escenario 2 para un enlace de 5 Km.

3°. Uno de ellos (transmisor y receptor) se encuentra por encima de la altura mínima de las nubes y el otro no.

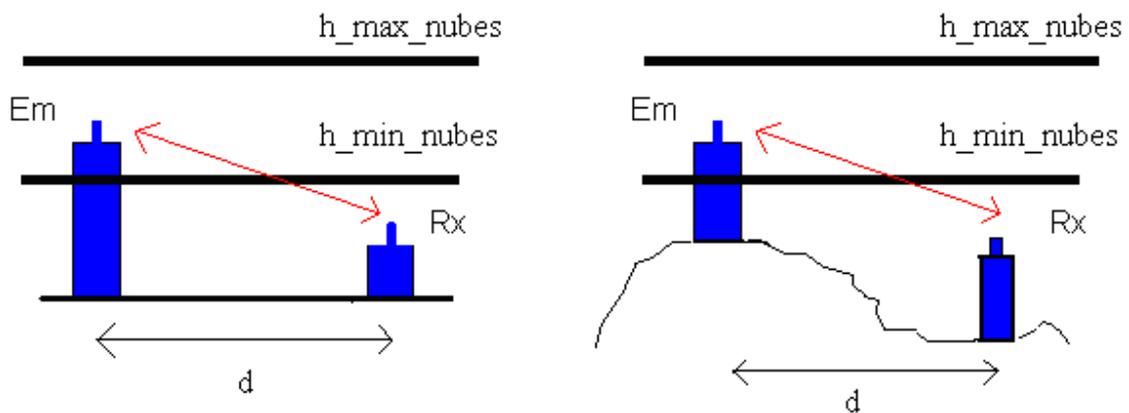


Figura 3-9: Escenario 3.

En este caso solo una parte de la trayectoria sufre atenuación, la que atraviesa la capa atenuante.

3. Radioenlace Terrestre

En la Figura 3-10 se ha considerado un enlace entre la Torre Caja Madrid y el hospital Doce de Octubre de Madrid que están separados por unos 10 kilómetros en línea recta. Se ha considerado que la antena de la Torre se encuentra a 250 metros de altura y la del hospital a 50 metros.

Suponiendo que la altura mínima donde empiezan a aparecer nubes es de 150 metros, en la Figura 3-10 se muestra el efecto de la atenuación para este caso para un rango de frecuencias de trabajo de 20 a 100 GHz.

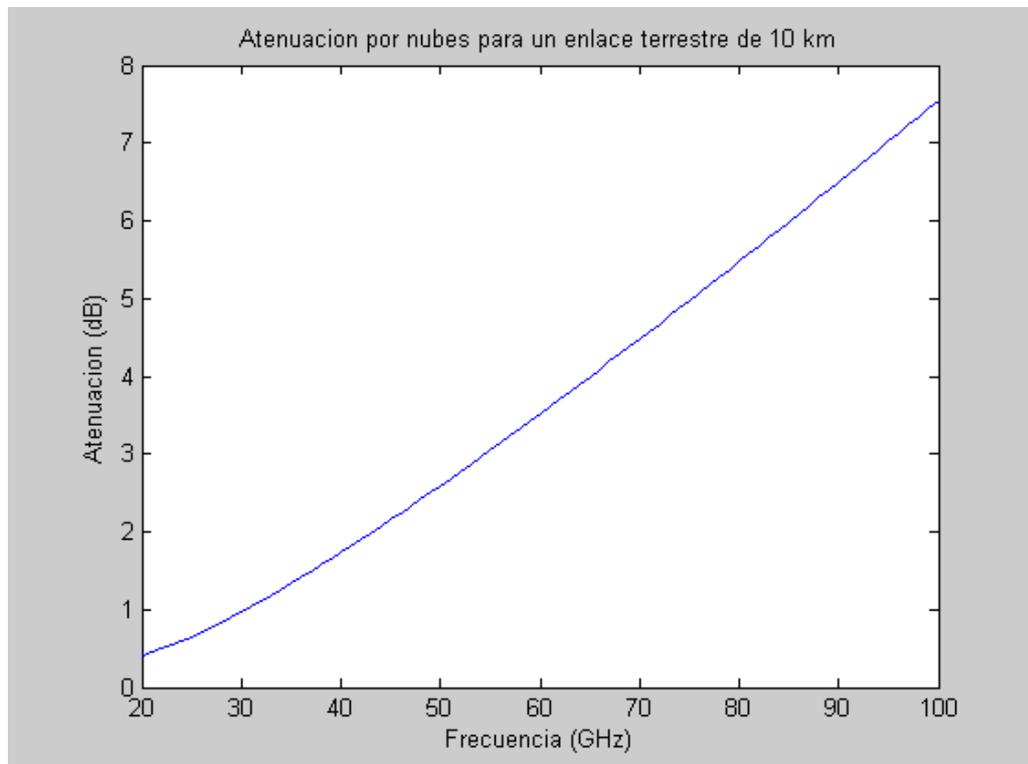


Figura 3-10: Atenuación debido a las nubes en el escenario 3 para un enlace de 10 Km.

Se ha considerado una densidad de 8 g/m^3 .

En este escenario concreto no todo el enlace sufre atenuación por nubes. Sólo existen pérdidas durante 5 kilómetros de los algo más de 10 kilómetros de los que consta la trayectoria entre emisor y receptor en visión directa.

3. Radioenlace Terrestre

Vamos a suponer ahora que el enlace entre emisor y receptor tiene una distancia horizontal de 5 km. La Figura 3-11 representa ésta atenuación considerando de nuevo que una antena se encuentra a 50 metros de altura y la otra a 250 metros, y que la capa atenuante de las nubes se encuentra a una altura mínima de 150 metros, de nuevo con una densidad de 8g/m^3 .

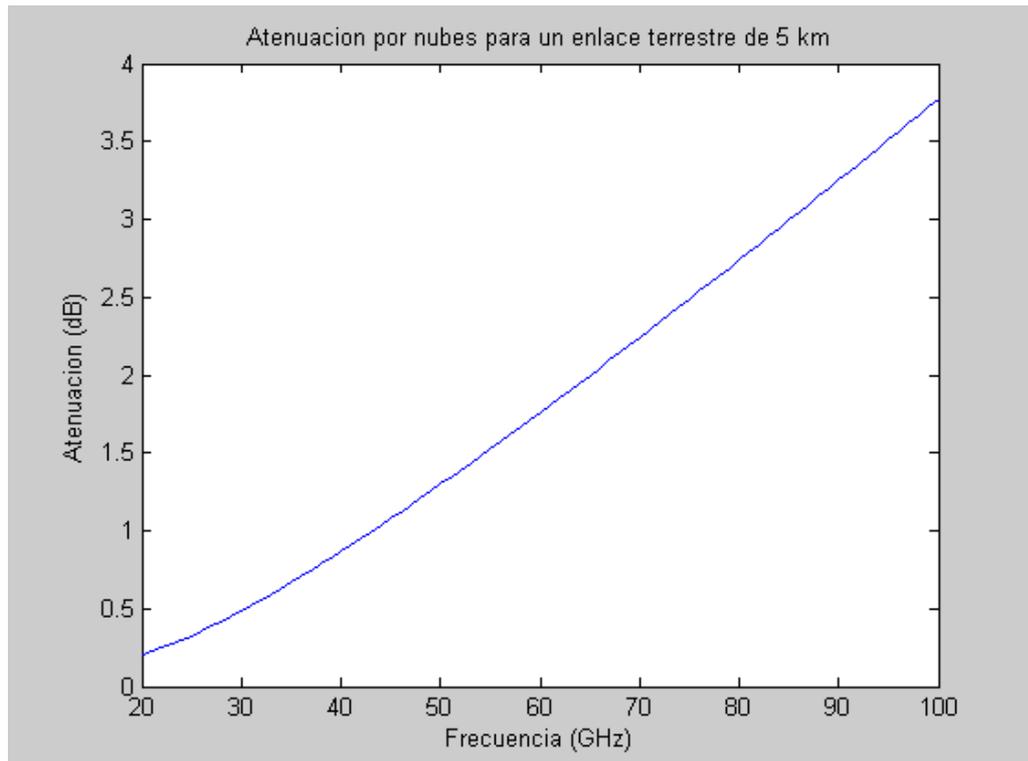


Figura 3-11: Atenuación debido a las nubes en el escenario 3 para un enlace de 5 Km

Ahora de los 5 km. que existen en horizontal entre las dos antenas sólo existen pérdidas durante 2,51 kilómetros aproximadamente de la trayectoria del enlace entre emisor y receptor.

3. Radioenlace Terrestre

Un parámetro muy importante en el caso de la nubosidad es la densidad ya que de ésta va a depender que se formen unas nubes más o menos cargadas y compactas y que la señal tenga más o menos dificultades para atravesarlas.

En la Figura 3-12 se representan las diferentes curvas de atenuación para el enlace de 10 km que hemos supuesto para los valores de densidad de vapor de agua de 2, 5, 8 y 12 gramos por metro cúbico.

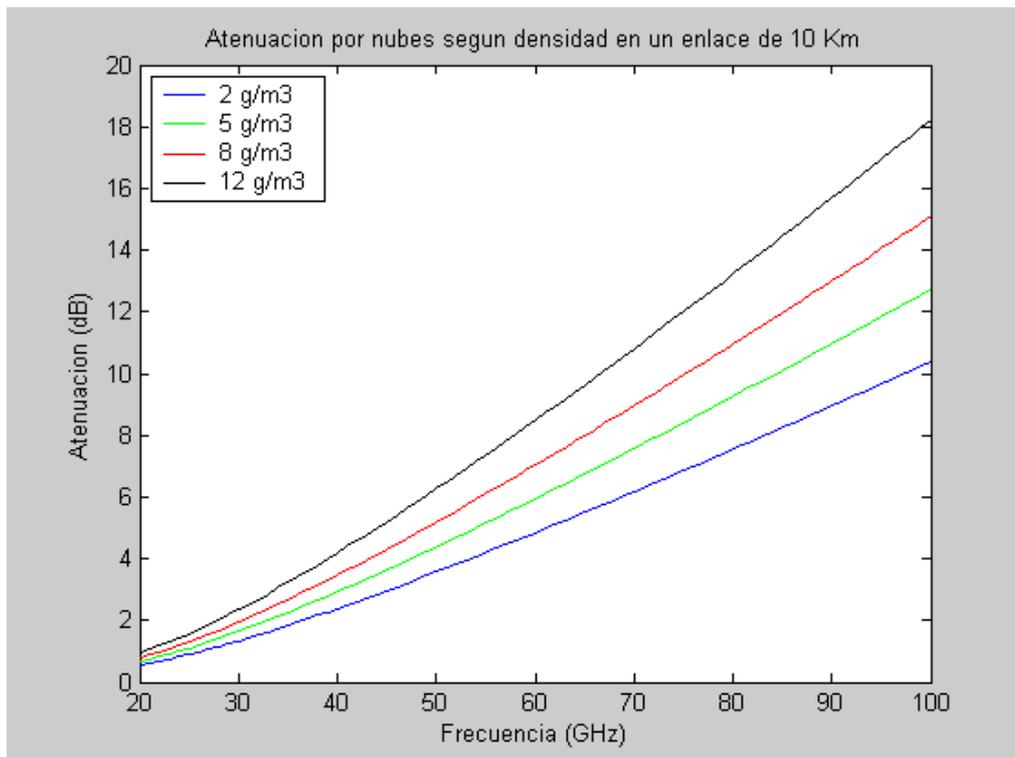


Figura 3-12: Atenuación debido a las nubes en un enlace de 10 Km. para distintos valores de densidad.

Como era predecible cuanto mayor sea la densidad provocará que se forme una nubosidad más espesa y se produzcan más pérdidas en el enlace. La diferencia de atenuación se hace más significativa cuanto más aumentemos la frecuencia de trabajo.

En la Figura 3-13 se representan las curvas de atenuación para los valores de 2, 5, 8 y 12 gramos por metro cúbico en el caso en el que el enlace tenga una distancia de 5 km.

3. Radioenlace Terrestre

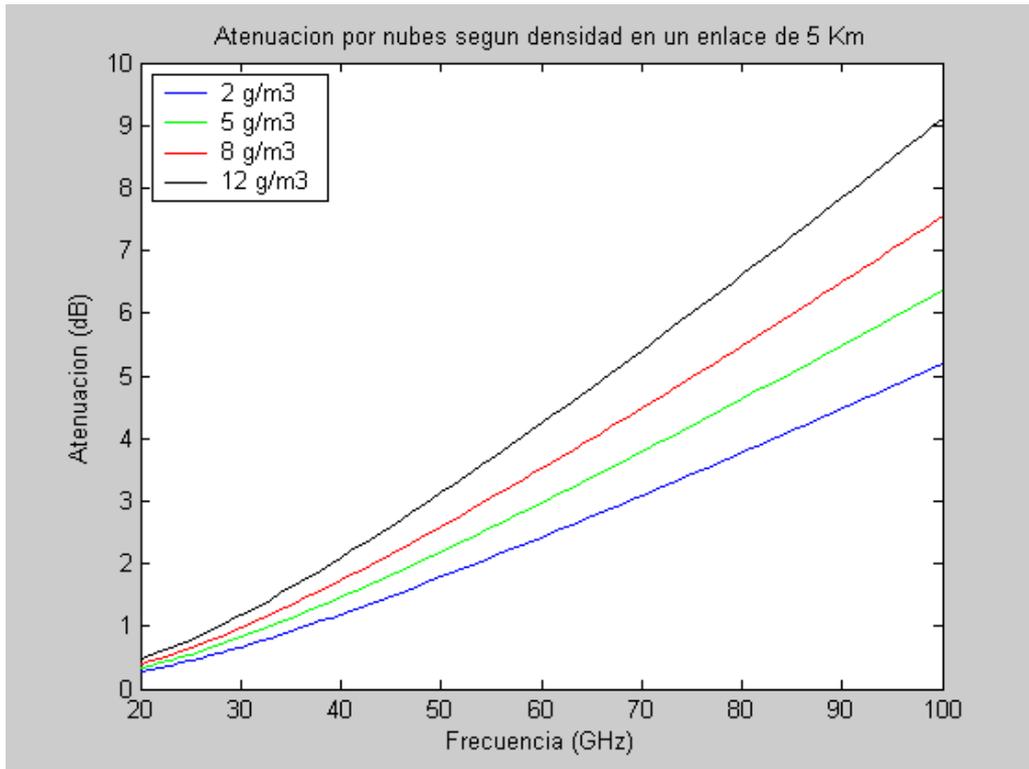


Figura 3-13: Atenuación debido a las nubes en un enlace de 5 Km. para distintos valores de densidad.

Lógicamente la atenuación es menor en este caso en el que la distancia entre emisor y receptor es más pequeña pero vuelve a quedar reflejado que la densidad de agua en el aire provoca mayor atenuación cuanto más alta sea ésta.

3. Radioenlace Terrestre

3.5 Efecto de la lluvia

Un inconveniente en el diseño de radio enlaces de microondas cuando la frecuencia de trabajo supera los 10 GHz es determinar un margen de trabajo razonable para compensar las pérdidas por lluvia. Por tanto es muy complicado modelar este fenómeno climático.

Cuando se habla de lluvia se habla de cantidad de agua caída por unidad de tiempo (mm/h). De la Recomendación ITU-R PN837-4 se ha sacado una tabla de las zonas climáticas en las que se divide la superficie de La Tierra según sus características de lluvia.

Tabla 3-1: Intensidad de lluvia por regiones climáticas.

TABLE 9.3 Rain Climatic Zones—Rainfall Intensity Exceeded (mm/h)
(See Figures 9.4, 9.5, and 9.6 for Rain Regions)

Percentage of Time (%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1.0	< 0.1	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12	24
0.3	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34	49
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	33	40	65	105	96
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

Source: Table 1, ITU-R Rec. PN.837-4 (Ref. 11).

Para cada región se facilitan valores medios de intensidad de lluvia caída (mm/h) para unos porcentajes de tiempo al año. Por ejemplo, para la Comunidad de Madrid que pertenece a la zona H durante el 1 % del tiempo caen 2 mm/h, es decir, que a efectos prácticos en el área de Madrid llueve con una intensidad de 2 mm/h durante 87,6 horas aproximadamente de media cada año.

En la Tabla 3-1 se observa la diferencia de intensidad entre unas regiones y otras. Es primordial conocer estos datos meteorológicos a la hora de diseñar enlaces de radiocomunicación. En algunas zonas del mundo como pueden ser Brasil o Filipinas, con un clima tropical, las lluvias de los monzones son muy fuertes y en el caso de un mal diseño del sistema de comunicación podría significar perder la conexión debido a la alta atenuación de la señal.

3. Radioenlace Terrestre

En el caso de la península ibérica ésta se divide en dos zonas climáticas (H y K). Vamos a ver el efecto que la lluvia tiene en la atenuación para la ciudad de Madrid (zona H) y para la ciudad de Sevilla (zona K). De la Tabla 3-1 se deduce que en Sevilla cae menos cantidad total de agua al año, es decir llueve con menos frecuencia, pero cuando llueve lo hace con mayor intensidad lo que provoca unas pérdidas mayores.

Por tanto fijándonos en la Tabla 3-1 para el 1% del tiempo la tasa de lluvia en la zona H es de 2 mm/h y en la zona K es de 1.5 mm/h. Sin embargo para el 0.001% del tiempo la tasa de lluvia en la zona H es de 83 mm/h y en la zona K es de 100 mm/h.

Es decir, experimentalmente sabemos que en la zona K (sur de España) cae una media de agua anual menor que en la zona H (norte de España) pero en momentos concretos lo hace con mayor intensidad.

El actual método para calcular las pérdidas que estamos aplicando no contempla este fenómeno y calcula la atenuación a partir de una tasa de referencia (la intensidad de lluvia en cada región para el 0.01% del tiempo) (2.4). Con lo cual si para ese porcentaje de tiempo la tasa de lluvia es mayor (como ocurre en Sevilla respecto a Madrid), con esta metodología obtendremos que todas las curvas de atenuación serán mayores en Sevilla que en Madrid independientemente de los porcentajes de tiempo. Es un fallo de este modelo de cálculo que aún está por solventar.

$$A_{0.01} \text{ (dB)} = A \text{ (dB/Km)} \times d \text{ (Km)} \times r \quad (3.4)$$

Donde 'A' es la atenuación específica, 'd' es la distancia de enlace y 'r' es el factor reductor que se obtiene mediante (2.5).

$$r = 1 / (1 + d/d_0) \quad (3.5)$$

Donde 'd₀' es calculada mediante (2.6);

$$d_0 = 35e^{-0.015 R_{0.01}} \quad (3.6)$$

Siendo R_{0.01} la tasa de lluvia para el 0.01 % del tiempo (Tabla 3-1). A partir de la atenuación para dicho porcentaje de tiempo se calculan las atenuaciones para otros porcentajes de acuerdo a la siguiente ecuación;

$$A_p / A_{0.01} = 0.12 p^{-(0.546 + 0.043 \log_{10} p)} \quad (3.7)$$

De esta manera podemos calcular la atenuación para el 1 %, 0.1 %, 0.01 %, 0.001 %.

En las Figuras 3-14 y 3-15 se muestra la atenuación debido a la lluvia en un enlace de 10 y 5 Km. respectivamente situado en **Madrid** para diferentes tasas de lluvia.

3. Radioenlace Terrestre

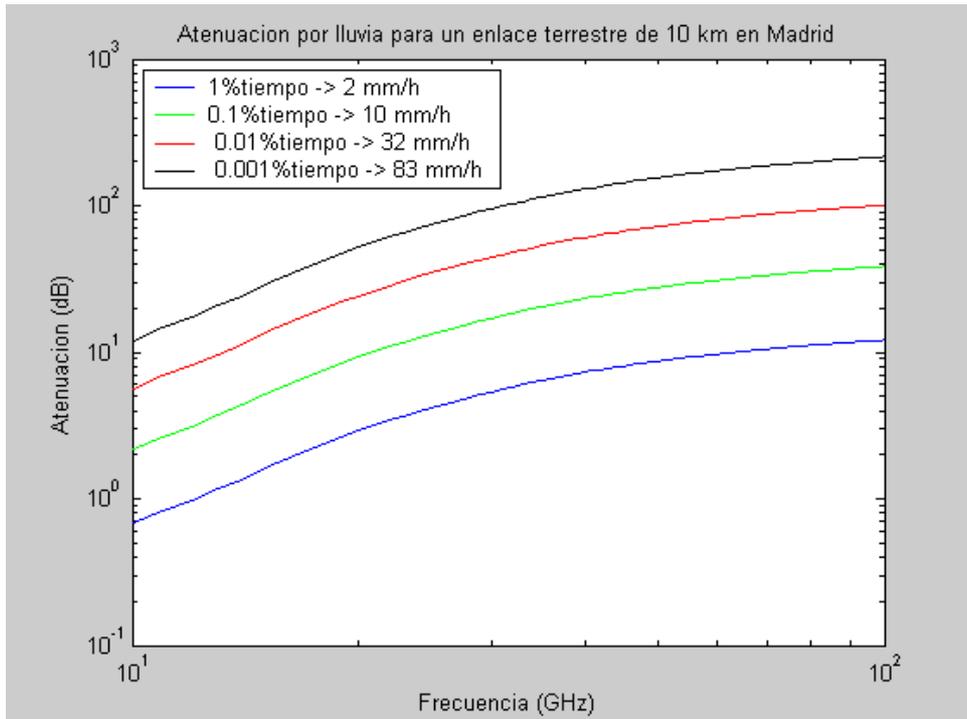


Figura 3-14: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 10 Km. en Madrid para distintos valores de intensidad.

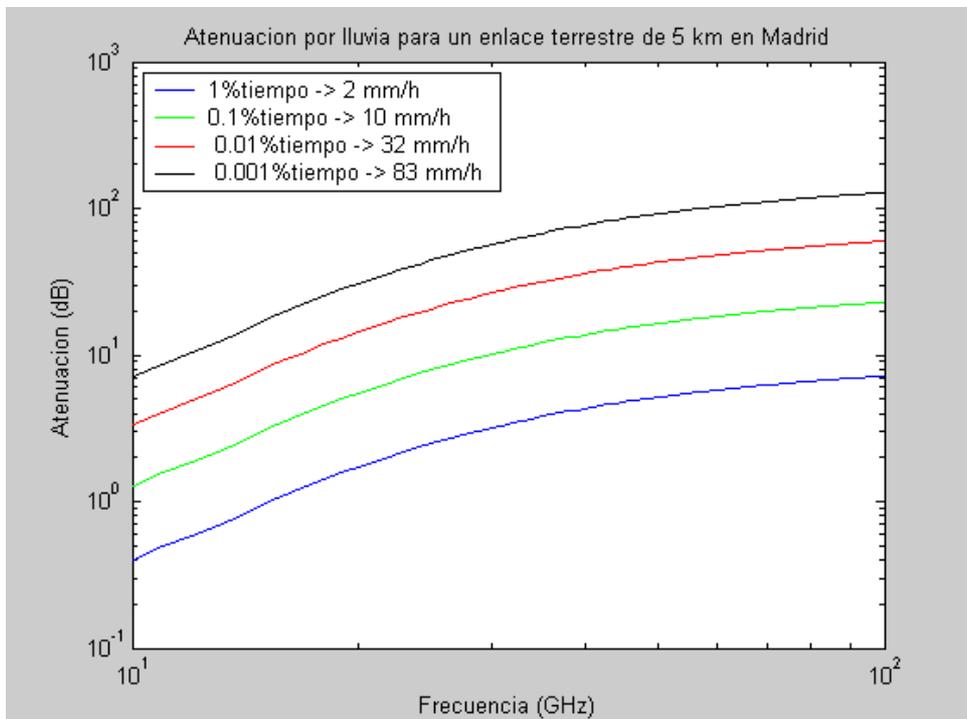


Figura 3-15: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 5 Km. en Madrid para distintos valores de intensidad.

3. Radioenlace Terrestre

Las Figuras 3-16 y 3-17 muestran la atenuación por lluvia para los mismos enlaces de 10 y 5 Km. respectivamente pero ahora situados en **Sevilla** para diferentes tasas de lluvia.

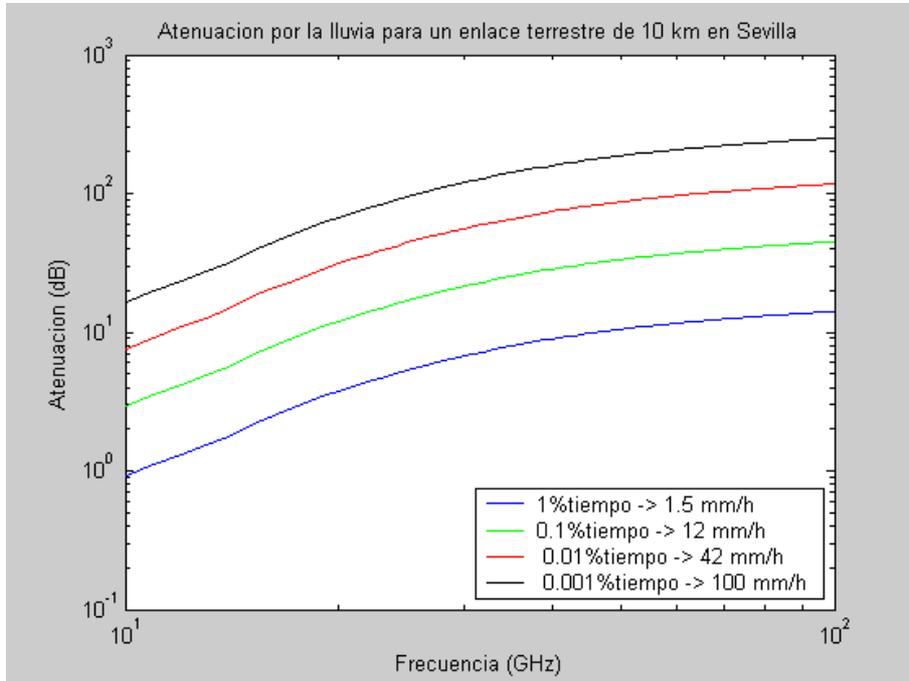


Figura 3-16: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 10 Km. en Sevilla para distintos valores de intensidad.

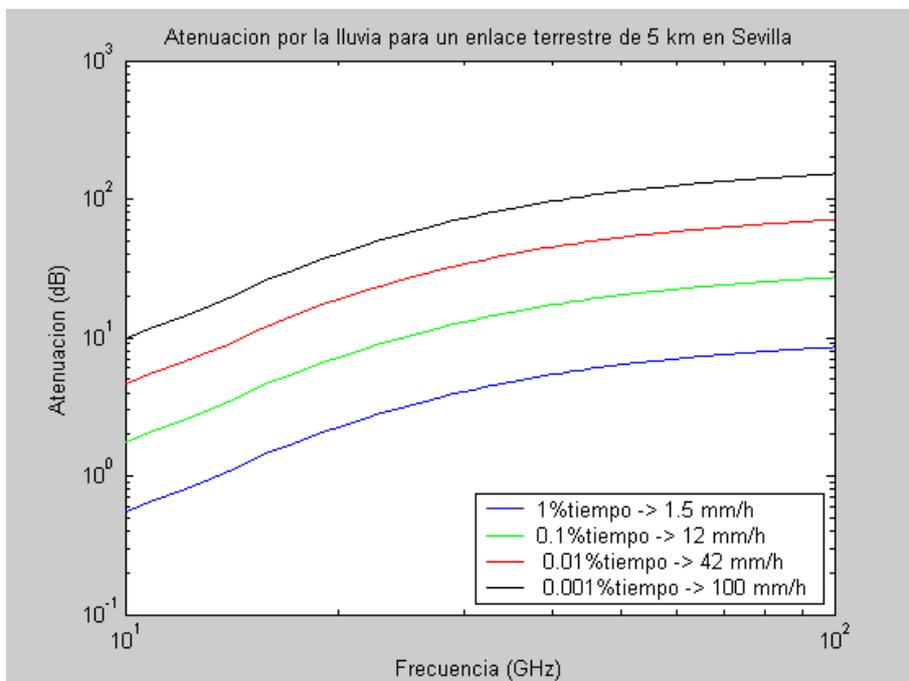


Figura 3-17: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 5 Km. en Sevilla para distintos valores de intensidad.

3. Radioenlace Terrestre

Otro parámetro variable es la polarización. En la Figura 3-18 se ve como afecta el estado de polarización a la atenuación.

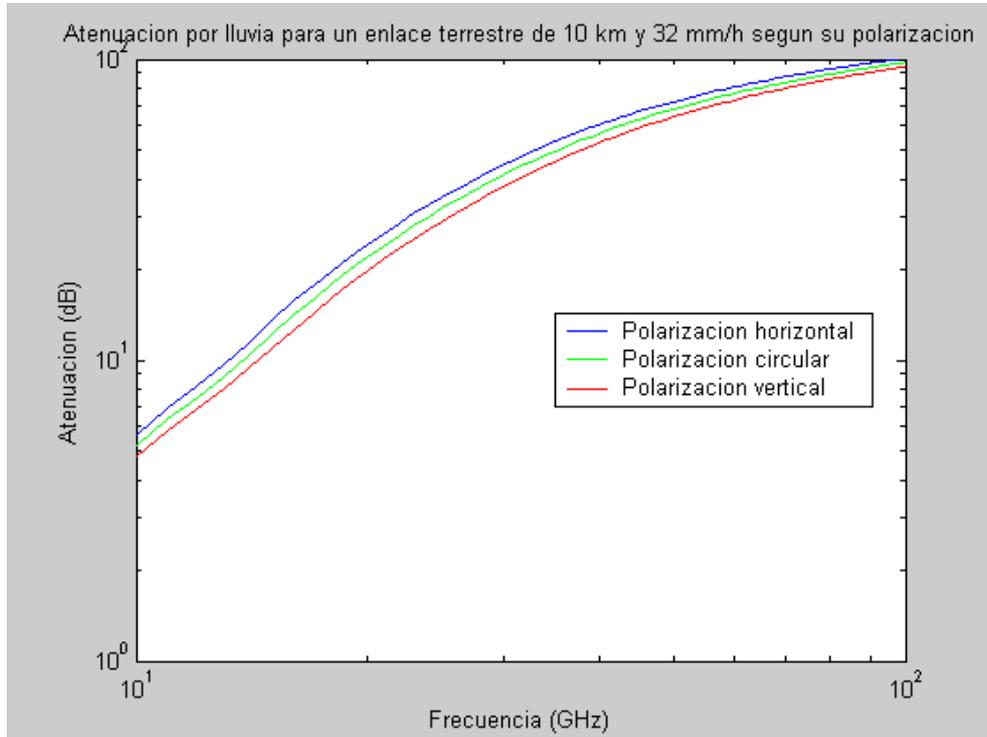


Figura 3-18: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 10 Km. para distintos tipos de polarización.

Se puede observar que para una polarización horizontal la atenuación es ligeramente superior aunque la diferencia de las tres curvas se va reduciendo conforme aumenta la frecuencia hasta ser casi mínima en los 100 GHz.

Hay que recordar que hemos fijado una tasa alta de lluvia (32 mm/h) para que podamos ver bien las diferencias entre polarizaciones que afectan a la atenuación de la señal debido a este fenómeno climatológico.

Ahora vamos a ver este efecto con los mismos parámetros pero cambiando la longitud del enlace a 5 Km. en la Figura 3-19.

3. Radioenlace Terrestre

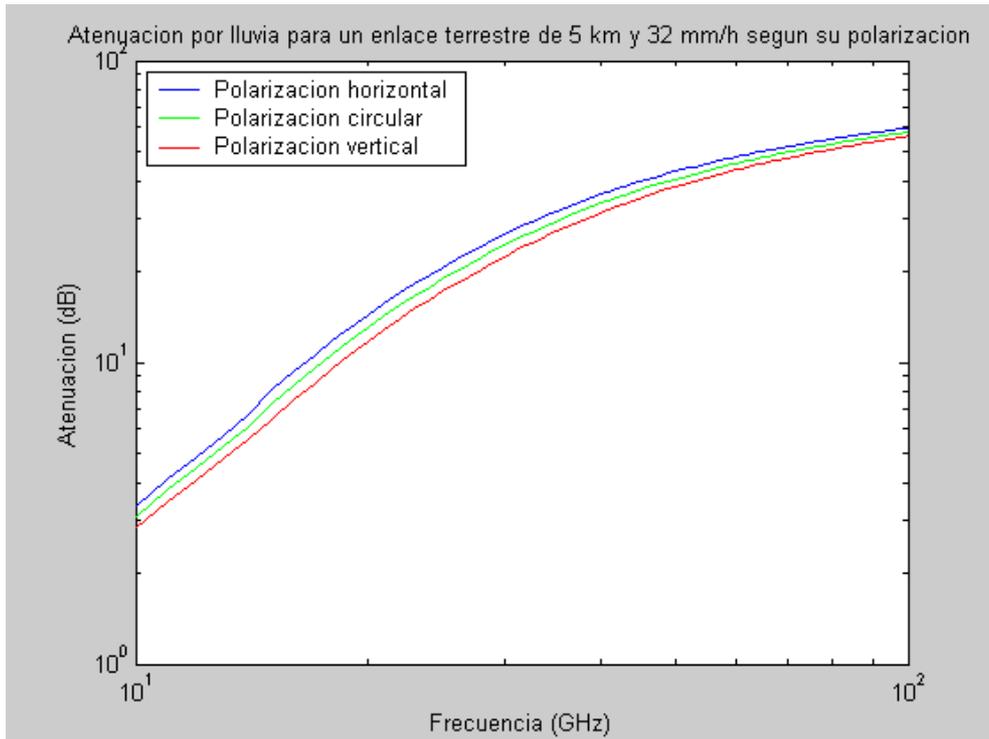


Figura 3-19: Atenuación debido a la lluvia en un enlace de 5 Km. para distintos tipos de polarización.

Comparando las Figuras 3-18 y 3-19 podemos ver que la diferencia entre los tres tipos de polarización es menor en este caso debido a que la distancia es menor. Cuanto más aumentemos la distancia entre emisor y receptor más importancia cobra el tipo de polarización.

3. Radioenlace Terrestre

3.6 Efecto de la nieve

Para la nieve hay que considerar que no todo el copo contiene agua, de hecho se diferencian a grandes rasgos dos tipos de nieve según la concentración de agua y aire que conforman los copos, nieve seca y nieve húmeda. Por tanto generalmente la tasa de nieve que equivale a lluvia suele ser menor que en el caso de la caída de gotas de agua líquida.

En la Figura 3-20 se representa la atenuación sufrida por la nieve para un rango de frecuencias de trabajo de 10 a 50 GHz y un enlace terrestre de 5 km. de trayectoria entre emisor y receptor, considerando varios índices de lluvia en forma de nieve (2, 5, 8 y 12 mm/h).

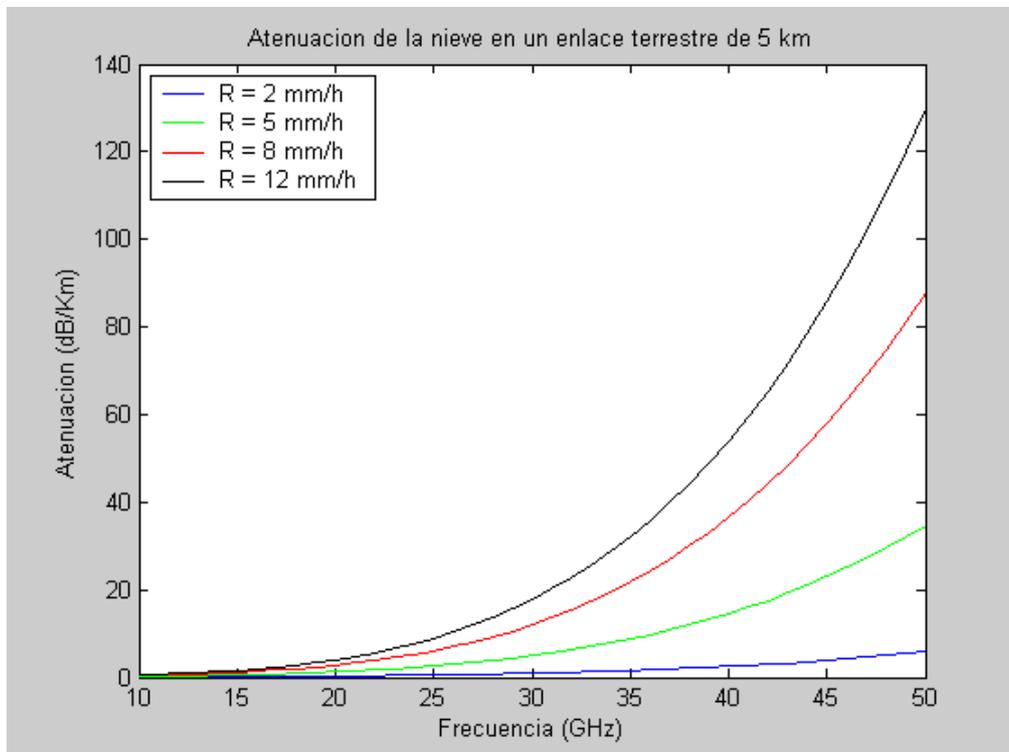


Figura 3-20: Atenuación debido a la nieve en un enlace de 5 Km. para distintos valores de intensidad.

Como se puede apreciar hasta los 20 GHz la señal no sufre apenas atenuación. Sin embargo una vez sobrepasado este valor las pérdidas aumentan exponencialmente con significantes diferencias entre las tasas de lluvia.

3. Radioenlace Terrestre

Con las mismas hipótesis que en el caso anterior en la siguiente Figura 3-21 se aprecia cual sería la atenuación por nieve si aumentamos la longitud del enlace a 10 Km. en un rango de 10 a 50 GHz.

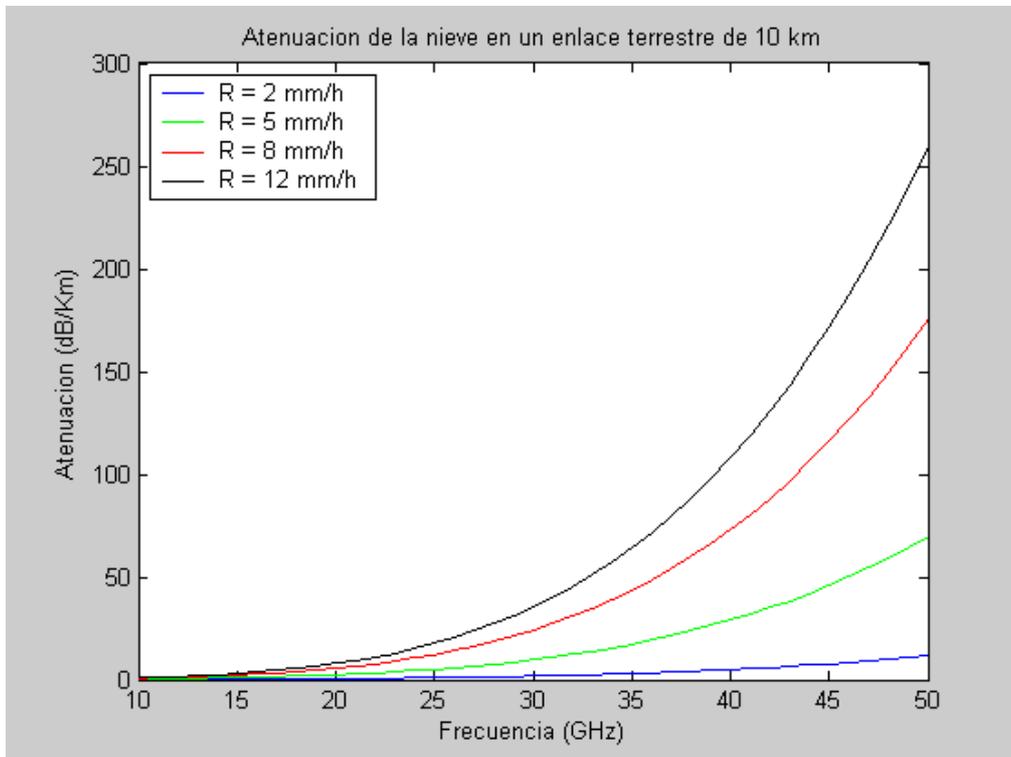


Figura 3-21: Atenuación debido a la nieve en un enlace de 10 Km. para distintos valores de intensidad.

3. Radioenlace Terrestre

3.7 Efecto del granizo

Como hemos comentado anteriormente es muy difícil cuantificar la atenuación producida por el granizo en un radio enlace ya que la precipitación es muy variable en duración, extensión e intensidad (cantidad de granos y distribución de tamaños).

Sin embargo fijando el diámetro de la partícula de hielo en 0.97 y 1.93 centímetros podemos calcular los valores de atenuación en el caso de un enlace radio terrestre de 5 y 10 km. de longitud para distintos valores de frecuencia.

Tabla 3-2: Valores de atenuación debido al granizo en un enlace de 5 Km. dependiendo de la frecuencia y diámetro de sus partículas.

ATENUACIÓN DEL GRANIZO PARA UN ENLACE TERRESTRE DE 5 KM.		
FRECUENCIA (GHz)	ATENUACIÓN (dB)	
	D = 0.97 cm	D = 1.93 cm
15	4.5	21
30	9.5	25
45	14	29.5
60	15	30

Tabla 3-3: Valores de atenuación debido al granizo en un enlace de 10 Km. dependiendo de la frecuencia y diámetro de sus partículas.

ATENUACIÓN DEL GRANIZO PARA UN ENLACE TERRESTRE DE 10 KM.		
FRECUENCIA (GHz)	ATENUACIÓN (dB)	
	D = 0.97 cm	D = 1.93 cm
15	9	42
30	19	50
45	28	59
60	30	60

En estas tablas se ha considerado una densidad de 1 g/m^3 .

Es evidente que la atenuación de una esfera de granizo con un alto contenido en agua es mucho mayor que una esfera casi seca. También será mayor la atenuación en una partícula cuanto mayor sea su diámetro.

3. Radioenlace Terrestre

3.8 Pérdidas de propagación

Vamos a calcular las pérdidas por propagación que tendríamos en nuestro enlace terrestre de 10 km. de separación entre emisor y receptor. Debido a que estamos considerando un enlace terrestre entre dos antenas situadas en dos puntos relativamente altos como para que exista LOS podemos aplicar la ecuación de las pérdidas por espacio libre;

$$L_{fs} \text{ (dB)} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} \quad (3.8)$$

Siendo;

f ; frecuencia en giga hertzios.

d ; distancia en kilómetros.

L_{fs} ; Atenuación por espacio libre en decibelios.

En el enlace terrestre que estamos considerando además de las pérdidas por propagación habría que añadir en el peor de los casos todas las pérdidas extras (gases, niebla, nubes y lluvia) que estamos estudiando. Si existen pérdidas por lluvia no existirían las pérdidas por nieve o granizo y viceversa ya que los dos fenómenos no pueden ocurrir simultáneamente. Se analizarán las pérdidas totales con lluvia en lugar de nieve o granizo ya que tiene una mayor probabilidad de ocurrencia.

Por tanto la fórmula a aplicar sería de la siguiente;

$$L_{\text{TOTAL}} \text{ (dB)} = L_{fs} + L_v + L_o + L_n + L_f + L_{ll} \quad (3.9)$$

Siendo;

L_v ; Atenuación por vapor de agua en dB.

L_o ; Atenuación por oxígeno en dB.

L_n ; Atenuación por nubes en dB.

L_f ; Atenuación por niebla en dB.

L_{ll} ; Atenuación por lluvia en dB.

3. Radioenlace Terrestre

Por ejemplo, para nuestro enlace de **10 Km.** si fijamos la frecuencia de trabajo a 30 GHz sustituyendo en la fórmula (4) nos quedaría;

$$L_{\text{TOTAL}} (\text{dB}) = 141,98 + 1,93 + 0,18 + 1,94 + 0,65 + 44,6 = 191,28 \text{ dB}$$

Si en vez de lluvia tuviésemos nieve no habría que contar con los 44,6 dB de atenuación que produce ésta y habría que añadir 9,85 dB de atenuación producida por la nieve en 30 GHz con lo que tendríamos unas pérdidas totales de 156,53 dB.

En este caso si hubiera nieve se comportaría mejor el medio de propagación ya que hay una diferencia de unos 35 dB. Sin embargo, debido a su curva exponencial, para frecuencias más altas las pérdidas por nieve son mayores que en el caso de la lluvia. Por ejemplo, a 60 GHz tenemos una atenuación por lluvia de 80 dB y por nieve 142 dB y conforme subimos la frecuencia de operación todavía se alejan más.

Si en vez de lluvia tuviésemos granizo habría que añadir 19 dB de atenuación producida por este fenómeno en 30 GHz, en vez de los 44,6 dB que produce la lluvia, con lo que las pérdidas totales serían de 165.68 dB. Mejoraríamos la intensidad de señal en 25.6 dB.

En este caso el granizo, a diferencia de la nieve, se comporta mejor que la lluvia en todas las frecuencias.

Por tanto ya que la nieve y el granizo tienen una baja probabilidad de ocurrencia analizaremos las pérdidas totales considerando la lluvia.

En la Tabla 3-4 se muestran valores de atenuación total de las ondas milimétricas para algunas frecuencias de trabajo con una distancia de enlace de 10 Km.

Tabla 3-4: Atenuación total para un enlace de 10 Km. en función de la frecuencia.

Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
15	150,9
30	191,28
48	228,32
60	393,57
80	269,86
100	291,16

En general de la Tabla 3-4 se deduce que la atenuación se va incrementando a medida que aumentamos la frecuencia de trabajo. El pico de decibelios que se produce en 60 GHz es debido a que en ese punto se encuentra la frecuencia de resonancia del oxígeno.

3. Radioenlace Terrestre

En la Figura 3-22 podemos observar la gráfica de la atenuación total que sufre la señal electromagnética en la propagación para un rango de frecuencias de 10 a 100 GHz. suponiendo que se producen todos los fenómenos al mismo tiempo y con las condiciones iniciales ambientales de 8 g/m^3 de densidad de agua en el aire y una tasa de lluvia de 32 mm/h.

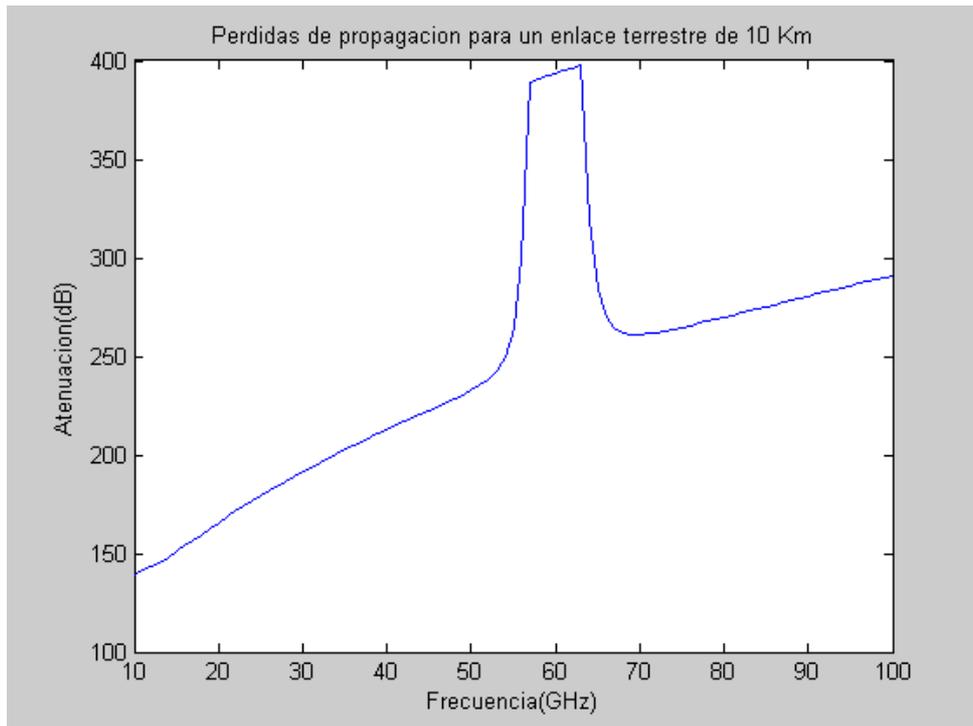


Figura 3-22: Pérdidas de propagación totales para un enlace de 10Km.

Hay que recordar que esta gráfica corresponde a las pérdidas de propagación con las condiciones ambientales concretas supuestas anteriormente y para el enlace especificado, es decir, puede variar según la zona geográfica donde consideremos el enlace terrestre, fenómenos meteorológicos que puedan afectar, y longitud entre emisor y receptor.

Como ya hemos anticipado anteriormente en la frecuencia de trabajo de 60 GHz se produce un pico importante de atenuación ya que coincide con la frecuencia de resonancia del oxígeno que provoca una gran absorción de energía de la señal en ese punto.

En el otro supuesto que también estamos considerando donde la distancia entre emisor y receptor es de 5 km. las pérdidas totales para los valores de frecuencia de referencia que hemos considerado se muestran en la Tabla 3-5.

3. Radioenlace Terrestre

Tabla 3-5: Atenuación total para un enlace de 5 Km. en función de la frecuencia.

Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
15	138,68
30	164,79
48	187,75
60	272,35
80	212,85
100	225,22

Comparando las dos Tablas (3-4 y 3-5) la atenuación total se reduce considerablemente al disminuir la trayectoria del enlace a la mitad. No obstante la mayoría de las pérdidas que sufre la señal se producen durante el primer kilómetro del enlace.

A continuación, en la Figura 3-23 se representa la curva de las pérdidas de propagación totales con una distancia entre emisor y receptor de 5 km.

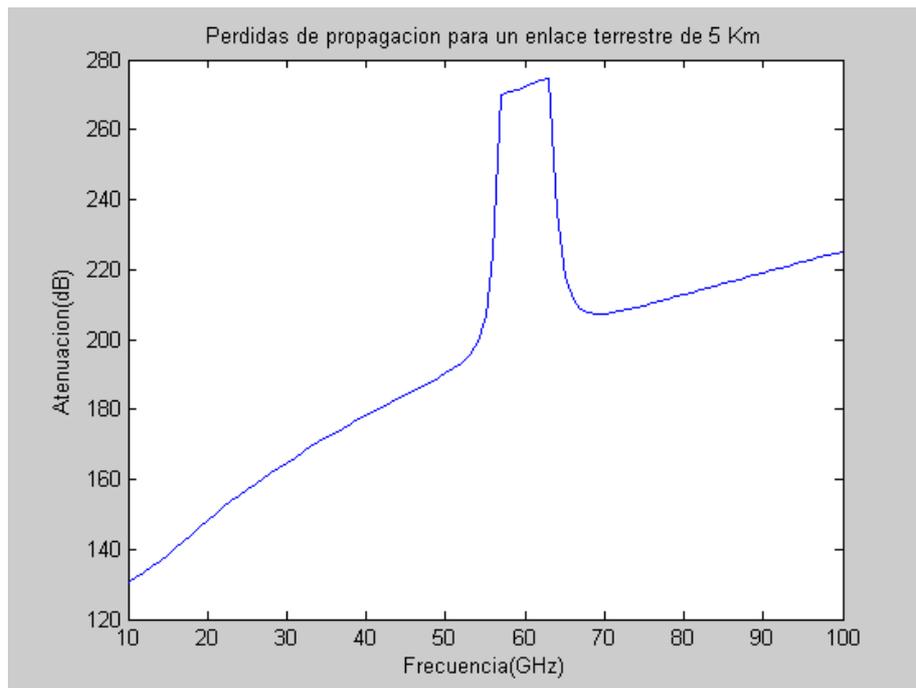


Figura 3-23: Pérdidas de propagación totales para un enlace de 5Km.

En la Figura 3-23 vuelve a aparecer el pico de absorción en 60 GHz pero menos atenuado que en la Figura 3-24 ya que la distancia de enlace es menor.

Para hacer un buen diseño del sistema de telecomunicaciones habría que considerar los peores casos para asegurar que no haya caídas de las comunicaciones en ningún momento o en los mínimos posibles. Esto determinará la calidad del servicio y el grado de satisfacción de los usuarios.

3. Radioenlace Terrestre

3.9 Disponibilidad del sistema

Vamos a diseñar nuestro sistema para un enlace WiMAX entre dos estaciones terrestres con antenas directivas en varios escenarios y estudiar su disponibilidad en cada caso. Más adelante supondremos un enlace HAPS-terrestre y estudiaremos la comparación.

Hemos elegido la tecnología WiMAX debido a que dispone de modulación adaptativa, en la que se utilizan distintos tipos de modulación dependiendo del factor de señal a ruido que tengamos en cada momento, optimizando así la capacidad del sistema.

Además, en principio, el estándar 802.16 se enfocaba específicamente en el uso eficiente del ancho de banda, en la región comprendida entre los 10 GHz y los 66 GHz lo cual se adapta a las ondas milimétricas que estamos estudiando en este proyecto. Utilizaremos varias frecuencias de trabajo comparando las prestaciones y características del sistema dependiendo de la longitud de onda, así como en varias localizaciones geográficas con diferentes condiciones meteorológicas.

3.9.1 Modulación adaptativa

WiMAX soporta varios tipos de modulaciones y codificaciones, las cuales pueden modificarse dinámicamente para cada enlace, dependiendo de las condiciones del canal, usando un indicador de “calidad de canal”. El planificador 28 de la estación transmisora puede tener en cuenta la calidad del canal en cada momento y asignar así el esquema de modulación y codificación que maximice el throughput en función de la relación señal-ruido existente. La modulación y codificación adaptativa puede aumentar sensiblemente la capacidad global del sistema, como así también compensar, en tiempo real y para cada enlace, el throughput por robustez.

La clave de la familia de estándares 802.16 radica en las técnicas de modulación adaptativa que utilizan, principalmente QAM (Modulación de amplitud en cuadratura).

Las modulaciones son automáticamente adaptadas en función de la distancia y condiciones del canal, siendo utilizadas técnicas QAM para el corto alcance y PSK para mayores distancias. La modulación 64 QAM brinda la mayor densidad de información por símbolo (lo cual se traduce como mayor throughput) mientras que BPSK da la mayor robustez (menor throughput). Así, para estaciones cercanas entre sí con una buena señal probablemente se tendrá una modulación 64 QAM, pero para estaciones más lejanas probablemente se use la modulación BPSK. En la Figura 3-24 se muestran los diagramas de las modulaciones digitales utilizadas en WiMAX.

3. Radioenlace Terrestre

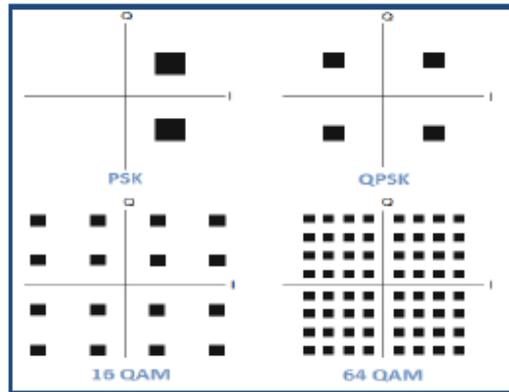


Figura 3-24: Diagrama de constelaciones de algunas modulaciones digitales soportadas por WiMAX.

En WiMAX, los diferentes órdenes de modulación permiten enviar más bits por símbolo y, por tanto, alcanzar un mayor throughput y eficiencia espectral. A pesar de ello, utilizar técnicas de modulación como 64-QAM, implica que sea necesaria una mayor relación señal a ruido (SNR) para evitar las interferencias y mantener una tasa de error de bit moderada.

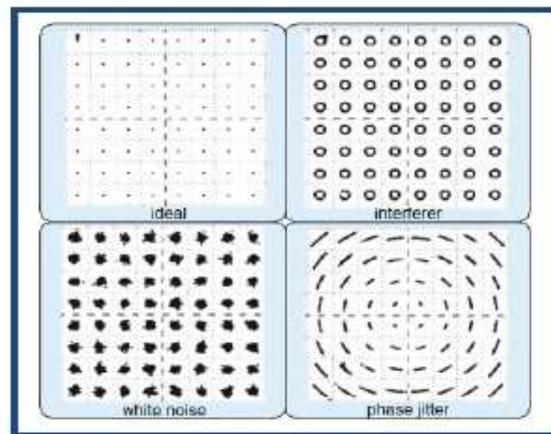


Figura 3-25: Diagrama de la constelación de 64 QAM ideal y con imperfecciones; interferencia, ruido y jitter.

En la capa física, se definen siete combinaciones posibles de modulación y codificación dependiendo de las condiciones del canal y de interferencias que imponen limitaciones a la tasa y robustez del sistema tal y como se puede observar en la Tabla 3-6.

3. Radioenlace Terrestre

Tabla 3-6: Modulaciones y valores de codificación posibles en WiMAX.

Modulation rate	Coding	Information bits/symbol	Information bits/OFDM symbol	Peak data rate in 5 MHz (Mb/s)
BPSK	1/2	0.5	88	1.89
QPSK	1/2	1	184	3.95
QPSK	3/4	1.5	280	6.00
16QAM	1/2	2	376	8.06
16QAM	3/4	3	568	12.18
64QAM	2/3	4	760	16.30
64QAM	3/4	4.5	856	18.36

Los protocolos de WiMAX son altamente adaptativos, permiten que la estación base ajuste sus parámetros de operación y niveles de potencia con el fin de brindar un óptimo nivel de señal al terminal de abonado (CPE: Customer Premises Equipment). En la Tabla 3-7 se detalla los distintos tipos de modulación y codificación soportado por WiMAX, así como el valor de SINR permitido para cada modulación según la tasa de código utilizada.

Tabla 3-7: Capacidad de la subportadora y valor de SINR mínimo para cada valor de FEC dependiendo de la modulación.

Modulación	Capacidad [bit/subportadora]	Tasa de código	SINR (dB)
BPSK	1	1/2	6,4
QPSK	2	1/2	9,4
		3/4	11,2
16QAM	4	1/2	16,4
		3/4	18,2
64QAM	6	2/3	22,7
		3/4	24,4

3. Radioenlace Terrestre

3.9.2 Técnicas de corrección de errores

Las técnicas de corrección de errores (FEC) han sido incorporadas a WiMAX para reducir los requisitos del sistema en cuanto a la relación señal a ruido. El Strong Reed Solomon FEC, la codificación convolucional y los algoritmos de entrelazado se utilizan para detectar y corregir errores y mejorar el throughput. Estas técnicas de corrección robustas ayudan a recuperar los errores que puedan ocurrir por pérdidas de señal a frecuencias determinadas o errores de ráfaga.

Los códigos Reed Solomon se basan en la transmisión extra de símbolos para permitir la detección de errores. Estas características hacen que se adapten muy bien a errores en portadoras. Esto se debe a que no le afecta el número de bits erróneos que hay en cada símbolo, ya que los toma como un único error. Para casos donde los errores no se caracterizan por esto es preferible recurrir a codificaciones convolucionales.

Los códigos convolucionales son un tipo de códigos de corrección de errores, en los cuales un símbolo original de longitud m bits, se transforma en uno de n , siendo $n > m$, siendo la transformación función de los últimos k símbolos de información, con k la longitud del código.

Existen varios algoritmos para la decodificación de los códigos convolucionales. Para valores de k relativamente pequeños, la mejor opción es el algoritmo Viterbi, que provee una solución de máxima verosimilitud. Para valores de k elevados, este algoritmo se vuelve impracticable por lo que se suele recurrir a otros, como el algoritmo Fano. Este tipo de códigos se suele concatenar, como en el caso de WiMAX (en el 802.16-2004), con códigos Reed Solomon.

En WiMAX también se contempla la utilización de otra serie de códigos, pero de manera opcional, como son los turbocódigos, turbo product codes o, en el caso 802.16e, códigos de control de paridad de baja densidad.

Por otro lado, Automatic Repeat Request (ARQ) se utiliza para corregir los errores que no resuelve el FEC, mediante el reenvío de la información con errores. El estándar WiMAX incorpora la variante llamada H-ARQ (híbrido). Esto mejora de manera significativa la tasa de error de bit (BER) del sistema. Existen diferentes métodos de implementar H-ARQ: chase combining, rate compatible punctured turbocodes y redundancia incremental. Este último, también llamado H-ARQ tipo II, en lugar de simples reenvíos de la señal, se envía información redundante adicional para facilitar la decodificación. H-ARQ tipo III es otra técnica de redundancia incremental, pero en la cual cada retransmisión es auto decodificable, cosa que no ocurría en el anterior. Chase combining implica la retransmisión del mismo paquete codificado. El receptor se encarga de tratar las múltiples copias del paquete, ponderándolas por la SNR de cada momento de transmisión. Es una técnica de diversidad temporal.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.3 Escenario

El escenario es un enlace entre dos estaciones que se encuentran en dos puntos que cumplen la condición “LOS”. Utilizaremos para ambas antenas una ganancia fija de 30 dB según [4] y una potencia de transmisión fija de -30, -25 y -20 dBW para las frecuencias de 13, 28 y 48 GHz respectivamente en una distancia de 4 Km. entre antenas y -25, -15 y -5 dBW en el caso de una separación de 10 Km. entre emisor y receptor.

En las cinco ubicaciones del enlace propuestas (La Coruña, Barcelona, Madrid, Sevilla y Tenerife) puede existir atenuación por cualquier fenómeno de los citados anteriormente ya que en todas estas comunidades se localizan zonas de mayor altitud a la altura mínima de las nubes con lo que el enlace puede verse afectado por pérdidas debido a las nubes así como para las demás situaciones.

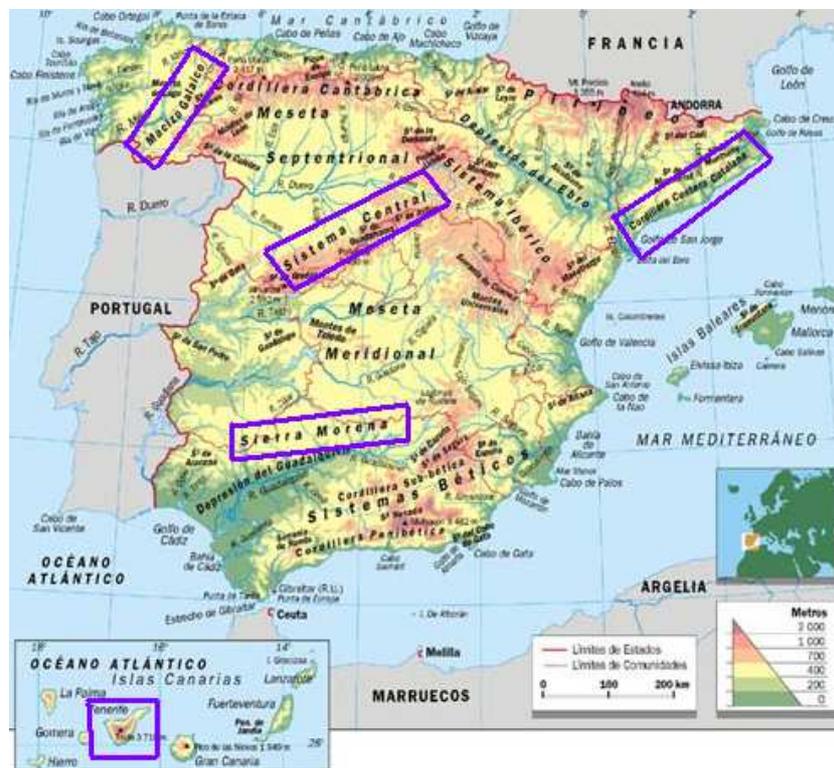


Figura 3-26: Sistemas montañosos que afectan a las ubicaciones de enlace de Coruña, Barcelona, Madrid, Sevilla y Tenerife.

En la Figura 3-26 se muestran los sistemas montañosos que afectan a las cinco ciudades en cuestión. En la Coruña se localiza parte del Macizo Galaico, Barcelona se ve afectada por la cordillera costera Catalana y la mayoría del sistema Central se encuentra en la comunidad de Madrid. Algunos municipios de Sevilla como son el de Cazalla de la Sierra o Guadalcanal llegan a alcanzar alturas de hasta 968 metros sobre el nivel del mar en el punto más alto de la Sierra Norte de Sevilla (Sierra Morena). Por último en la parte central de la isla de Tenerife se ubica el Teide que es el pico más alto de España con 3.718 metros.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.4 Enlace WiMAX terrestre en 13GHz

3.9.4.1 Distancia entre estaciones de 4 km y P_{tx} de -30 dBW

Independientemente de las condiciones meteorológicas que se produzcan en el momento de la transmisión siempre tendremos pérdidas por espacio libre y atenuación debido al oxígeno y vapor de agua, aunque ésta última dependerá de la densidad de vapor de agua en cada localización. Por tanto;

$$L_{fs} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{GHz} + 20\log_{10}(d)_{km} = 92,44 + 20\log_{10}(13) + 20\log_{10}(4) = 126,76 \text{ dB.}$$

La potencia de ruido [x2] tomando un ancho de banda de 10 MHz y un factor de ruido de 6 dB sería;

$$N_0 = -114 + 10\log_{10}(B_{MHz}) + NF = -98 \text{ dBm} = -128 \text{ dBW}$$

3.9.4.1.1 Enlace ubicado en La Coruña

Asumiendo una densidad de vapor de agua de 8 g/m^3 para esta ciudad vamos a tener una atenuación fija debido al vapor de agua de la atmósfera de 0.14 dB y debido al oxígeno de 0.032 dB. Por tanto la relación señal a ruido en condiciones de cielo despejado sería;

$$SNR = P_{tx} + G_{tx} - L + G_{rx} - N_0 = -30 \text{ dBW} + 30 \text{ dB} - 126,76 \text{ dB} + 30 - (-128 \text{ dBW}) = \mathbf{31,07 \text{ dB}}$$

De acuerdo a [6] los datos meteorológicos recogidos en el año 2009 en esta región en porcentajes de tiempo fueron;

Tabla 3-8: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 13GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -30 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
22,5 %	Soleado	31,07	64 QAM / 3/4
73,66 %	Nublado	30,76	64 QAM / 3/4
2,5 %	Niebla	30,70	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	30,19	64 QAM / 3/4
0,2 %	Nieve	30,53	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	28,93	64 QAM / 3/4
0,03 %	Granizo	30,21	64 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	25,89	64 QAM / 3/4
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	20,54	16 QAM / 3/4

Hay que tener en cuenta que cuando llueve, nieva o graniza también hay atenuación por nubes.

El sistema funciona con la máxima modulación para todos los casos excepto para el 0,001 % que lo hace con 16 QAM y un FEC de 3/4.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.4.1.2 Enlace ubicado en Barcelona

Asumiendo una densidad de vapor de agua de 7 g/m^3 para esta ciudad vamos a tener una atenuación fija debido al vapor de agua de la atmósfera de 0.11 dB y debido al oxígeno de 0.032 dB.

De acuerdo a [6] los datos meteorológicos recogidos en el año 2009 en esta región en porcentajes de tiempo fueron;

Tabla 3-9: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 13GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -30 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
29 %	Soleado	31,13	64 QAM / 3/4
69,19 %	Nublado	30,84	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	30,29	64 QAM / 3/4
0,6 %	Niebla	30,78	64 QAM / 3/4
0,1 %	Nieve	30,61	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	29,09	64 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	26,59	64 QAM / 3/4
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	20,97	16 QAM / 3/4
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona con máxima modulación para todos los casos excepto en el 0,001 % del tiempo que lo hace con 16 QAM y el mismo FEC que en los demás.

3.9.4.1.3 Enlace ubicado en Madrid

Asumiendo una densidad de vapor de agua de 4 g/m^3 para esta ciudad vamos a tener una atenuación fija debido al vapor de agua de la atmósfera de 0.05 dB y debido al oxígeno de 0.032 dB.

La atenuación por niebla varía con la temperatura y en invierno son más bajas en Madrid que cerca de la costa como puede ser Barcelona o La Coruña. Existe más atenuación cuanto menor es la temperatura, aunque la diferencia son centésimas de decibelio por kilómetro, lo que no es muy significativo.

De acuerdo a [6] los datos meteorológicos recogidos en el año 2009 en esta región en porcentajes de tiempo fueron;

3. Radioenlace Terrestre

Tabla 3-10: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 13GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -30 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
30 %	Soleado	31,19	64 QAM / 3/4
67,19 %	Nublado	30,91	64 QAM / 3/4
1 %	Niebla	30,83	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	30,33	64 QAM / 3/4
0,7 %	Nieve	30,62	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	29,11	64 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	26,41	64 QAM / 3/4
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	20,93	16 QAM / 3/4
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona con la máxima modulación para todos los casos excepto para el 0,001 % que lo hace con 16 QAM y un FEC de 3/4.

3.9.4.1.4 Enlace ubicado en Sevilla

Asumiendo una densidad de vapor de agua de 6 g/m^3 para esta ciudad vamos a tener una atenuación fija debido al vapor de agua de la atmósfera de 0.09 dB y debido al oxígeno de 0.032 dB.

De acuerdo a [6] los datos meteorológicos recogidos en el año 2009 en esta región en porcentajes de tiempo fueron;

Tabla 3-11: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 13GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -30 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
33 %	Soleado	31,15	64 QAM / 3/4
64,59 %	Nublado	30,87	64 QAM / 3/4
1,3 %	Niebla	30,36	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (1,5 mm/h)	30,10	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (12 mm/h)	28,41	64 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (42 mm/h)	24,45	64 QAM / 3/4
0,001 %	Lluvia (100 mm/h)	17,11	16 QAM / 1/2
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona utilizando la máxima modulación para todos los casos excepto para el 0,001 % del tiempo que utiliza 16 QAM con una tasa de código de corrección de 1/2.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.4.1.5 Enlace ubicado en Tenerife

Asumiendo una densidad de vapor de agua de 7 g/m^3 para esta ciudad vamos a tener una atenuación fija debido al vapor de agua de la atmósfera de 0.11 dB y debido al oxígeno de 0.008 dB.

De acuerdo a [6] los datos meteorológicos recogidos en el año 2009 en esta región en porcentajes de tiempo fueron;

Tabla 3-12: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 13GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -30 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
34 %	Soleado	31,13	64 QAM / 3/4
64,84 %	Nublado	30,84	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (0,6 mm/h)	30,47	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (6 mm/h)	29,65	64 QAM / 3/4
0,05 %	Niebla	30,79	64 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (22 mm/h)	27,72	64 QAM / 3/4
0,001 %	Lluvia (70 mm/h)	24,16	16 QAM / 3/4
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona con la máxima modulación para todos los casos excepto para el 0,001 % que lo hace con 16 QAM y un FEC de 3/4.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.4.2 Distancia entre estaciones de 10 km y P_{tx} de -25 dBW

Al aumentar la distancia entre las antenas a 10 km. las pérdidas por espacio libre se verán incrementadas respecto al caso anterior.

$$L_{fs} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(13) + 20\log_{10}(10) = 134,72 \text{ dB.}$$

3.9.4.2.1 Enlace ubicado en La Coruña

En este caso la atenuación por el vapor de agua sería de 0.35 dB y debido al oxígeno 0.08 dB. Por tanto la relación señal a ruido en condiciones de cielo despejado sería;

$$\text{SNR} = P_{tx} + G_{tx} - L + G_{rx} - N_0 = -25 \text{ dBW} + 30 \text{ dB} - 135,15 \text{ dB} + 30 - (-128 \text{ dBW}) = \mathbf{27,85 \text{ dB}}$$

La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-13: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 13GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -25 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
22,5 %	Soleado	27,85	64 QAM / 3/4
73,66 %	Nublado	27,73	64 QAM / 3/4
2,5 %	Niebla	27,60	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	26,57	64 QAM / 3/4
0,2 %	Nieve	26,18	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	24,03	64 QAM / 2/3
0,03 %	Granizo	18,73	16 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	18,07	16 QAM / 1/2
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	7,04	BPSK / 1/2

3. Radioenlace Terrestre

3.9.4.2.2 Enlace ubicado en Barcelona

En este caso la atenuación por el vapor de agua sería de 0.30 dB y debido al oxígeno 0.08 dB.

La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-14: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 13GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -25 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
29 %	Soleado	27,90	64 QAM / 3/4
69,19 %	Nublado	27,78	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	26,62	64 QAM / 3/4
0,6 %	Niebla	27,65	64 QAM / 3/4
0,1 %	Nieve	26,23	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	24,08	64 QAM / 2/3
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	18,12	16 QAM / 1/2
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	7,09	BPSK / 1/2
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

3.9.4.2.3 Enlace ubicado en Madrid

En este caso la atenuación por el vapor de agua sería de 0.12 dB y debido al oxígeno 0.08 dB.

La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-15: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 13GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -25 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
30 %	Soleado	28,08	64 QAM / 3/4
67,19 %	Nublado	27,97	64 QAM / 3/4
1 %	Niebla	27,73	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	26,81	64 QAM / 3/4
0,7 %	Nieve	26,43	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	24,27	64 QAM / 2/3
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	18,31	16 QAM / 3/4
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	7,28	BPSK / 3/4
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

3. Radioenlace Terrestre

3.9.4.2.4 Enlace ubicado en Sevilla

Ahora la atenuación por el vapor de agua es de 0.22 dB y por oxígeno es de 0.08 dB.

La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-16: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 13GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -25 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
33 %	Soleado	27,98	64 QAM / 3/4
64,59 %	Nublado	27,85	64 QAM / 3/4
1,3 %	Niebla	27,71	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (1,5 mm/h)	26,32	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (12 mm/h)	22,99	64 QAM / 2/3
0,01 %	Lluvia (42 mm/h)	15,15	QPSK / 3/4
0,001 %	Lluvia (100 mm/h)	0,65	No funciona
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

Para el 0,001 % del tiempo el sistema no funciona.

3.9.4.2.5 Enlace ubicado en Tenerife

Para la isla de Tenerife la atenuación por el vapor de agua es de 0.30 dB y por oxígeno es de 0.08 dB.

La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-17: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 13GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -25 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
34 %	Soleado	27,90	64 QAM / 3/4
64,84 %	Nublado	27,82	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (0,6 mm/h)	27,04	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (6 mm/h)	25,34	64 QAM / 3/4
0,05 %	Niebla	27,71	64 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (22 mm/h)	21,35	16 QAM / 3/4
0,001 %	Lluvia (70 mm/h)	13,96	QPSK / 3/4
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

3. Radioenlace Terrestre

3.9.5 Enlace WiMAX terrestre en 28 GHz

3.9.5.1 Distancia entre estaciones de 4 km y P_{tx} de -25 dBW

Al aumentar la frecuencia de trabajo la longitud de onda será más pequeña y la atenuación de la señal al interactuar con todas las partículas que estamos estudiando será mayor.

Las pérdidas por “free space” ahora son;

$$L_{fs} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{GHz} + 20\log_{10}(d)_{km} = 92,44 + 20\log_{10}(28) + 20\log_{10}(4) = \mathbf{133,42 \text{ dB}}$$

La potencia de ruido con el mismo ancho de banda anterior seguirá siendo igual, **-128 dBW**

3.9.5.1.1 Enlace ubicado en La Coruña

Contando la pérdida de potencia por el vapor de agua (0,75 dB) y oxígeno (0,08 dB) la relación señal a ruido en condiciones de cielo despejado quedaría;

$$SNR = P_{tx} + G_{tx} - L + G_{rx} - N_0 = -25 \text{ dBW} + 30 \text{ dB} - 134,25 \text{ dB} + 30 - (-128 \text{ dBW}) = \mathbf{28,75 \text{ dB}}$$

El cuadro de disponibilidad en La Coruña sería;

Tabla 3-18: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -25 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
22,5 %	Soleado	28,75	64 QAM / 3/4
73,66 %	Nublado	27,96	64 QAM / 3/4
2,5 %	Niebla	27,71	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	25,51	64 QAM / 3/4
0,2 %	Nieve	25,93	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	20,24	16 QAM / 3/4
0,03 %	Granizo	24,08	64 QAM / 2/3
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	7,81	BPSK / 1/2
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 15,21	No funciona

Para el 0,001 % del tiempo el sistema no funciona.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.5.1.2 Enlace ubicado en Barcelona

En esta ciudad tenemos una atenuación fija debido al vapor de agua de la atmósfera de 0.61 dB y debido al oxígeno de 0.08 dB.

Por tanto tenemos;

Tabla 3-19: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -25 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
29 %	Soleado	28,89	64 QAM / 3/4
69,19 %	Nublado	28,14	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	25,74	64 QAM / 3/4
0,6 %	Niebla	27,89	64 QAM / 3/4
0,1 %	Nieve	26,11	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	20,59	16 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	8,25	BPSK / 1/2
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 14,71	No funciona
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema no funciona para el 0,001 % del tiempo.

3.9.5.1.3 Enlace ubicado en Madrid

Asumiendo una densidad de vapor de agua de 4 g/m^3 para esta ciudad vamos a tener una atenuación fija en 28 GHz debido al vapor de agua de la atmósfera de 0,27 dB y debido al oxígeno de 0.08 dB. Fijándonos en [6], los datos meteorológicos recogidos en el año 2009 en esta región en porcentajes de tiempo fueron;

Tabla 3-20: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -25 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
30 %	Soleado	29,23	64 QAM / 3/4
67,19 %	Nublado	28,61	64 QAM / 3/4
1 %	Niebla	28,35	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	26,17	64 QAM / 3/4
0,7 %	Nieve	26,51	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	20,96	16 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	8,59	BPSK / 1/2
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 27,05	No funciona
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema no funciona para el 0,001 % del tiempo.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.5.1.4 Enlace ubicado en Sevilla

En este caso tenemos una densidad de vapor de agua de 6 g/m^3 con lo que existen unas pérdidas de 0,48 dB por vapor de agua y de 0,08 dB por oxígeno.

De acuerdo a [6] los datos meteorológicos recogidos en el año 2009 en esta región en porcentajes de tiempo fueron;

Tabla 3-21: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -25 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
33 %	Soleado	29,02	64 QAM / 3/4
64,59 %	Nublado	28,32	64 QAM / 3/4
1,3 %	Niebla	28,05	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (1,5 mm/h)	25,20	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (12 mm/h)	18,37	16 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (42 mm/h)	2,34	No funciona
0,001 %	Lluvia (100 mm/h)	- 27,34	No funciona
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema no funciona para el 0,01 % del tiempo.

3.9.5.1.5 Enlace ubicado en Tenerife

Asumiendo una densidad de vapor de agua de 7 g/m^3 para esta ciudad vamos a tener una atenuación fija debido al vapor de agua de 0,61 dB y debido al oxígeno de 0,08 dB.

De acuerdo a [6] los datos meteorológicos recogidos en el año 2009 en esta región en porcentajes de tiempo fueron;

Tabla 3-22: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -25 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
34 %	Soleado	28,89	64 QAM / 3/4
64,84 %	Nublado	28,14	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (0,6 mm/h)	26,45	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (6 mm/h)	22,77	64 QAM / 3/4
0,05 %	Niebla	27,94	64 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (22 mm/h)	14,12	QPSK / 3/4
0,001 %	Lluvia (70 mm/h)	- 1,9	No funciona
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema no funciona en el 0,001 % del tiempo.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.5.2 Distancia entre estaciones de 10 km y P_{tx} de -15 dBW

Aumentando la distancia entre las antenas a 10 km. las pérdidas por espacio libre se verán incrementadas respecto al caso anterior.

$$L_{fs} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(28) + 20\log_{10}(10) = 141,38 \text{ dB.}$$

3.9.5.2.1 Enlace ubicado en La Coruña

En este caso la atenuación por el vapor de agua sería de 1,55 dB y debido al oxígeno 0,16 dB. Por tanto la relación señal a ruido en condiciones de cielo despejado sería;

$$\text{SNR} = P_{tx} + G_{tx} - L + G_{rx} - N_0 = -15 \text{ dBW} + 30 \text{ dB} - 143,09 \text{ dB} + 30 - (-128 \text{ dBW}) = \mathbf{29,91 \text{ dB}}$$

La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-23: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -15 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
22,5 %	Soleado	29,91	64 QAM / 3/4
73,66 %	Nublado	27,91	64 QAM / 3/4
2,5 %	Niebla	27,31	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	23,00	64 QAM / 2/3
0,2 %	Nieve	20,21	16 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	12,28	QPSK / 3/4
0,03 %	Granizo	8,91	BPSK / 1/2
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	- 12,91	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 59,58	No funciona

El sistema opera con la máxima modulación el 99 % del tiempo. Durante un 0,02 % utiliza 16 QAM con un FEC de 3/4 . Para un 0,1 % la modulación es QPSK con un factor de 3/4 de FEC y durante un 0,03 % BPSK y 1/2 de FEC.

Para el 0,01 % restante no funciona, es decir, el sistema se cae en media durante 52 minutos al año.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.5.2.2 Enlace ubicado en Barcelona

En este caso la atenuación por vapor de agua es de 1,50 dB y debido al oxígeno 0,16 dB. La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-24: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -15 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
29 %	Soleado	29,96	64 QAM / 3/4
69,19 %	Nublado	28,06	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	23,15	64 QAM / 2/3
0,6 %	Niebla	27,46	64 QAM / 3/4
0,1 %	Nieve	20,36	16 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	12,43	QPSK / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	- 12,76	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 59,43	No funciona
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

Para el 0,01 % del tiempo el sistema no funciona.

3.9.5.2.3 Enlace ubicado en Madrid

En este caso la atenuación por vapor de agua es de 0,74 dB y debido al oxígeno 0,16 dB.

La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-25: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -15 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
30 %	Soleado	30,72	64 QAM / 3/4
67,19 %	Nublado	29,31	64 QAM / 3/4
1 %	Niebla	28,61	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	24,40	64 QAM / 3/4
0,7 %	Nieve	21,61	16 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	13,68	QPSK / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	-11,51	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	-58,18	No funciona
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona con la máxima modulación para el 99 %. En un 0,7 % utiliza 16 QAM con el mismo FEC y en un 0,1 % opera con QPSK y 3/4 de FEC también. Para el 0,01 % del tiempo el sistema no funciona.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.5.2.4 Enlace ubicado en Sevilla

Ahora la atenuación por el vapor de agua es de 1,16 dB y por oxígeno es de 0,16 dB. La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-26: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -15 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
33 %	Soleado	30,30	64 QAM / 3/4
64,59 %	Nublado	28,50	64 QAM / 3/4
1,3 %	Niebla	28,00	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (1,5 mm/h)	22,33	16 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (12 mm/h)	8,85	BPSK / 1/2
0,01 %	Lluvia (42 mm/h)	- 22,84	No funciona
0,001 %	Lluvia (100 mm/h)	- 81,51	No funciona
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona con la máxima modulación para el 98,89 % del tiempo. En un 1 % utiliza 16 QAM con el mismo FEC y en un 0,1 % opera con BPSK y un FEC de 1/2. Para el 0,011 % del tiempo el sistema no funciona.

3.9.5.2.5 Enlace ubicado en Tenerife

Para la isla de Tenerife la atenuación por el vapor de agua es de 1,55 dB y por oxígeno es de 0,16 dB. La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-27: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 28 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -15 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
34 %	Soleado	29,91	64 QAM / 3/4
64,84 %	Nublado	28,01	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (0,6 mm/h)	24,51	64 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (6 mm/h)	16,88	16 QAM / 1/2
0,05 %	Niebla	27,35	64 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (22 mm/h)	- 1,06	No funciona
0,001 %	Lluvia (70 mm/h)	- 34,29	No funciona
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona con la máxima modulación para el 99,89 % del tiempo. En un 0,1 % utiliza 16 QAM con un FEC de 1/2 y para el 0,01 % del tiempo el sistema no funciona por no tener suficiente potencia de señal a ruido.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.6 Enlace WiMAX terrestre en 48 GHz

3.9.6.1 Distancia entre estaciones de 4 km y P_{tx} de -20 dBW

Como la frecuencia de operación es ahora 48 GHz la atenuación de la señal en todos estos casos será aún mayor al decrementar la longitud de onda.

Las pérdidas por espacio libre son;

$$L_{fs} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{GHz} + 20\log_{10}(d)_{km} = 92,44 + 20\log_{10}(48) + 20\log_{10}(1) = \mathbf{138,10 \text{ dB}}$$

La potencia de ruido con el mismo ancho de banda anterior seguirá siendo igual, **-128 dBW**.

3.9.6.1.1 Enlace ubicado en La Coruña

Contando la pérdida de potencia por el vapor de agua (1,65 dB) y oxígeno (0,63 dB) la relación señal a ruido en condiciones de cielo despejado quedaría;

$$SNR = P_{tx} + G_{tx} - L + G_{rx} - N_0 = -20 \text{ dBW} + 30 \text{ dB} - 140,38 \text{ dB} + 30 - (-128 \text{ dBW}) = \mathbf{27,62 \text{ dB}}$$

La disponibilidad en La Coruña del sistema sería;

Tabla 3-28: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -20 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
22,5 %	Soleado	27,62	64 QAM / 3/4
73,66 %	Nublado	25,35	64 QAM / 3/4
2,5 %	Niebla	24,68	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	21,19	16 QAM / 3/4
0,2 %	Nieve	10,11	QPSK / 1/2
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	12,10	QPSK / 3/4
0,03 %	Granizo	1,71	No funciona
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	- 9,28	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 48,85	No funciona

El sistema funciona con la máxima modulación para el 98,66 % del tiempo. Para un 1 % baja a 16 QAM y un FEC de 3/4. Cuando nieva, es decir durante un 0,2 % la modulación es QPSK con 1/2 de FEC y para un 0,1 % también utiliza QPSK pero esta vez con un FEC de 3/4. El sistema no funciona para un 0,041 % del tiempo, es decir 3,6 horas al año.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.6.1.2 Enlace ubicado en Barcelona

Debido al vapor de agua vamos a tener en este caso una atenuación de 1,31 dB y las mismas pérdidas que anteriormente por el oxígeno (0,63 dB).

Por tanto tenemos;

Tabla 3-29: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -20 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
29 %	Soleado	27,96	64 QAM / 3/4
69,19 %	Nublado	25,80	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	21,80	16 QAM / 3/4
0,6 %	Niebla	25,14	64 QAM / 3/4
0,1 %	Nieve	10,56	QPSK / 1/2
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	12,75	QPSK / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	- 8,32	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 47,82	No funciona
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema no funciona para un 0,011 % del tiempo.

3.9.6.1.3 Enlace ubicado en Madrid

Con una media de densidad de vapor de agua de 4 g/m^3 para Madrid vamos a tener una atenuación fija en 48 GHz debido al vapor de agua de la atmósfera de 0,51 dB. La atenuación debido al oxígeno sigue siendo 0,63 dB. Por tanto;

Tabla 3-30: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Madrid con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -20 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
30 %	Soleado	28,76	64 QAM / 3/4
70 %	Nublado	26,96	64 QAM / 3/4
1 %	Niebla	26,27	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	22,86	64 QAM / 2/3
0,7 %	Nieve	10,56	QPSK / 1/2
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	13,81	QPSK / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	- 7,51	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 47,05	No funciona
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema no funciona en el 0,011 % del tiempo.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.6.1.4 Enlace ubicado en Sevilla

Ahora tenemos unas pérdidas de 1 dB por vapor de agua, además de 0,63 dB de oxígeno. De acuerdo a [6] el cuadro de disponibilidad quedaría de la siguiente manera;

Tabla 3-31: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -20 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
33 %	Soleado	28,27	64 QAM / 3/4
64,59 %	Nublado	26,23	64 QAM / 3/4
1,3 %	Niebla	25,51	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (1,5 mm/h)	21,06	16 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (12 mm/h)	9,77	QPSK / 1/2
0,01 %	Lluvia (42 mm/h)	- 16,78	No funciona
0,001 %	Lluvia (100 mm/h)	- 65,94	No funciona
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona con la máxima modulación y FEC para el 98,89 % del tiempo. Para un 1 % baja la modulación a 16 QAM con 3/4 de FEC y para un 0,1 % baja a QPSK con 1/2 de FEC. En el 0,011 % del tiempo el sistema no funciona por no haber suficiente potencia de señal a ruido.

3.9.6.1.5 Enlace ubicado en Tenerife

La disponibilidad del sistema en este caso con una atenuación de 1,31 dB por vapor de agua y 0,63 dB por el oxígeno sería;

Tabla 3-32: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 4 Km. y P_{tx} de -20 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
34 %	Soleado	27,96	64 QAM / 3/4
64,84 %	Nublado	25,80	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (0,6 mm/h)	22,75	64 QAM / 2/3
0,1 %	Lluvia (6 mm/h)	16,09	QPSK / 3/4
0,05 %	Niebla	25,12	64 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (22 mm/h)	0,43	No funciona
0,001 %	Lluvia (70 mm/h)	- 28,56	No funciona
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema no funciona para el 0,011 % del tiempo.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.6.2 Distancia entre estaciones de 10 km y P_{tx} de -5 dBW

Ahora aumentando la distancia entre estaciones a 10 Km. con lo que las pérdidas por espacio libre serán mayores respecto al caso anterior.

$$L_{fs} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(48) + 20\log_{10}(10) = 146,06 \text{ dB.}$$

3.9.6.2.1 Enlace ubicado en La Coruña

En este caso la atenuación por el vapor de agua sería de 4,13 dB y debido al oxígeno 1,57 dB. Por tanto la relación señal a ruido en condiciones de cielo despejado sería;

$$\text{SNR} = P_{tx} + G_{tx} - L + G_{rx} - N_0 = -5 \text{ dBW} + 30 \text{ dB} - 151,76 \text{ dB} + 30 - (-128 \text{ dBW}) = \mathbf{31,24 \text{ dB}}$$

La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-33: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -5 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
22,5 %	Soleado	31,24	64 QAM / 3/4
73,66 %	Nublado	25,55	64 QAM / 3/4
2,5 %	Niebla	23,64	64 QAM / 2/3
1 %	Lluvia (2 mm/h)	17,12	16 QAM / 1/2
0,2 %	Nieve	- 33,55	No funciona
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	- 1,31	No funciona
0,03 %	Granizo	- 2,95	No funciona
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	- 44,61	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 124,79	No funciona

El sistema opera con 64 QAM y FEC 3/4 el 96,16 % del tiempo. Durante un 2,5 % baja a un FEC de 2/3 y para un 1 % utiliza 16 QAM con un FEC de 1/2. El resto del tiempo (0,341 %) existe demasiada atenuación y el sistema no funciona, es decir, durante 29,87 horas al año de media no existe comunicación entre las estaciones.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.6.2.2 Enlace ubicado en Barcelona

En este caso la atenuación por el vapor de agua sería de 3,27 dB y debido al oxígeno 1,57 dB. La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-34: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Barcelona con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -5 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
29 %	Soleado	32,10	64 QAM / 3/4
69,19 %	Nublado	26,71	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	18,28	16 QAM / 3/4
0,6 %	Niebla	24,80	64 QAM / 3/4
0,1 %	Nieve	- 32,39	No funciona
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	- 0,15	No funciona
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	- 43,45	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 123,63	No funciona
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona con la máxima modulación para el 98,79 % del tiempo. En un 1 % utiliza 16 QAM con el mismo FEC (2/3) y para el 0,111 % (9,72 horas al año) el sistema no funciona.

3.9.6.2.3 Enlace ubicado en Madrid

En este caso la atenuación por vapor de agua sería de 1,29 dB y debido al oxígeno 1,57 dB. Por tanto;

Tabla 3-35: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en La Coruña con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -5 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
30 %	Soleado	34,08	64 QAM / 3/4
67,19 %	Nublado	29,57	64 QAM / 3/4
1 %	Niebla	27,75	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	21,14	16 QAM / 3/4
0,7 %	Nieve	- 29,53	No funciona
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	7,29	BPSK / 1/2
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	- 40,59	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	- 120,77	No funciona
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema aplica la máxima modulación para el 97,29 % del tiempo. Durante un 1 % baja de modulación a 16 QAM con un FEC también de 3/4 y en un 0,1 % utiliza BPSK con un FEC de 1/2. Para el 0,711 % restante (62,28 horas/año) no funciona.

3. Radioenlace Terrestre

3.9.6.2.4 Enlace ubicado en Sevilla

Ahora la atenuación por el vapor de agua es de 2,51 dB y por oxígeno sigue siendo 1,57 dB. La disponibilidad del sistema quedaría;

Tabla 3-36: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Sevilla con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -5 dBW.

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
33 %	Soleado	32,86	64 QAM / 3/4
64,59 %	Nublado	27,76	64 QAM / 3/4
1,3 %	Niebla	25,86	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (1,5 mm/h)	17,54	16 QAM / 1/2
0,1 %	Lluvia (12 mm/h)	- 4,78	No funciona
0,01 %	Lluvia (42 mm/h)	- 57,24	No funciona
0,001 %	Lluvia (100 mm/h)	- 154,39	No funciona
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona con la máxima modulación cuando durante el 98,89 % del tiempo. En un 1 % utiliza la modulación 16 QAM con un FEC de 1/2 y para un 0,111 % del tiempo no hay suficiente potencia de señal a ruido.

3.9.6.2.5 Enlace ubicado en Tenerife

Para la isla de Tenerife la atenuación por el vapor de agua es de 3,27 dB y por oxígeno es de 1,57 dB. La disponibilidad del sistema sería;

Tabla 3-37: Modulación y FEC para cada fenómeno climático en Tenerife con una frecuencia de 48 GHz, distancia de 10 Km. y P_{tx} de -5 dBW

Porcentaje de tiempo	Fenómeno	SNR (dB)	Modulación / FEC
34 %	Soleado	32,10	64 QAM / 3/4
64,84 %	Nublado	26,71	64 QAM / 3/4
1 %	Lluvia (0,6 mm/h)	20,39	16 QAM / 3/4
0,1 %	Lluvia (6 mm/h)	6,57	BPSK / 1/2
0,05 %	Niebla	24,81	64 QAM / 3/4
0,01 %	Lluvia (22 mm/h)	- 25,89	No funciona
0,001 %	Lluvia (70 mm/h)	- 86,00	No funciona
0 %	Nieve	No aplicable	No aplicable
0 %	Granizo	No aplicable	No aplicable

El sistema funciona con la modulación 64 QAM y una tasa de FEC de 3/4 para el 98,89 %. En un 0,1 % utiliza BPSK con un FEC de 1/2 y para el 0,11 % del tiempo el sistema no funciona.

Capítulo 4

“HAPS: HIGH-ALTITUDE PLATFORM STATIONS”

4.1 Introducción

Unas nuevas alternativas tecnológicas para ayudar a resolver el problema de acceso que plantean las redes de banda ancha en este siglo son los sistemas basados en “HAPS” (High Altitude Platform Stations) que pueden además facilitar la TV digital.

Con el acrónimo HAPS la UIT-R [1] denomina a las estaciones radioeléctricas que pueden embarcarse en globos ó aviones estratosféricos no tripulados ó planeadores y, que pueden volar entre 20 y 50 Km. de altura sobre la superficie terrestre. Dichas estaciones cumplen funciones idénticas a las que hoy pueden realizar los equipamientos embarcados en satélites artificiales de la Tierra con lo que los sistemas basados en HAPS serán competidores directos de los sistemas satelitales de órbita baja (LEO).

Durante algún tiempo se presentaron en la literatura técnica dos alternativas de aeronaves HAP: las de uso puntual en el tiempo y las fijas.

Las primeras pueden dar servicio por un período corto de tiempo, y están basadas en aeronaves convencionales (tripuladas) (el vuelo no se lleva a cabo en las alturas antedichas) fue el caso del sistema americano Halo, explotado por la empresa Angel Technologies en 1999 y basada en unos antiguos aviones militares. En esta red cada aeronave podía dar servicio a un área de un diámetro de unos 120 Km y facilitar transmisiones de banda ancha. Esta experiencia se llevó a cabo en USA. Por el contrario, las plataformas fijas constituidas por planeadores son las que están conllevando mayor actividad de I+D+i .Su rentabilidad comercial pasa por disponer de aeronaves no tripuladas capaces de efectuar largas misiones sin necesidad de retorno a tierra y son de dos tipos: HALE (High Altitude Long Endurance) si el tiempo de misión es del orden de varios días o semanas y HAVE (High Altitude Very-long Endurance) si se llega a los meses en la duración de la misión.

Si bien la idea de usar aeronaves para portar sencillos transceptores o radiodifusores de señales radio ya ha sido explotada en el pasado mediante globos atmosféricos, lo novedoso de los actuales proyectos se debe a tres razones; la necesidad de que estén fuera de las rutas aéreas comerciales; la de una mayor continuidad del servicio y precisión de la posición de las aeronaves y, la de proporcionar servicios de banda ancha y/o radiodifusión.

Las primeras razones conllevan la necesidad de que las aeronaves no lleven tripulación, es decir, que sean controladas remotamente; la última al uso de bandas de frecuencia milimétricas con la consiguiente problemática planteada por la atmósfera (lluvias y gases atmosféricos) y la derivada de las variaciones del ángulo de elevación de las estaciones/terminales de tierra.

Otros aspectos que presentan complicaciones son los vientos estratosféricos que desplazan la plataforma en distintas direcciones, afectando al enlace entre la estación HAPS y el usuario, y las señales reflejadas junto con las sombras radioeléctricas. Quizás las aeronaves estratosféricas sean mas fiables que otras alternativas y son una de las razones del diseño de nuevas redes de telecomunicaciones basadas en vehículos no tripulados.

4. HAPS

Desde el punto de vista de la ITU-R estas aeronaves HAPS no deben superar los 25 km. de altura. El vuelo debe de ser estratosférico. Las características principales son:

- Funcionamiento continuo durante 24 hrs. del día.
- Cobertura tipo celular en tierra.
- Número limitado de señales transmitidas desde tierra hacia la estación HAPS.
- Alimentación de la HAPS con celdas fotovoltaicas solares durante el día y de combustible regenerado por la noche.
- Unidad de comunicaciones embarcada en la HAPS, equipada con conmutación a bordo y multiplexores del tipo ATM.
- Antena de haces a bordo de la HAPS y cobertura tipo celular en tierra, para optimizar la utilización del espectro de frecuencias disponible.
- Transmisión (síncrona TDM) y conexión a las redes públicas telefónicas y de datos (RTPC e Internet);



Figura 4-1: Esquema general HAPS.

En el Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT (Nota S1.66^a) se estipula que las aeronaves HAPS deberán estar situadas a una altura sobre la superficie terrestre limitada entre 20 y 50 Km. La limitación inferior de 20 Km. trata de evitar choques con ciertas aeronaves de tipo comercial o científico, mientras que el límite superior obedece a la multitud de meteoritos existentes que podrían alterar la configuración de la plataforma e incluso dañar seriamente su carga útil.

Los dos sistemas HAPS actualmente especificados han fijado la altitud entre 21 Km y un máximo en 25 Km. Ello se debe principalmente a la velocidad del viento que es mínima para ese margen de alturas. Altitudes superiores permitirían una mayor zona de cobertura e incluso obtener un mayor aporte de energía solar al estar más altas y próximas al Sol, pero dificultarían el mantenimiento en posición de la plataforma e incrementaría la energía necesaria para su funcionamiento (mayor potencia de transmisión necesaria) al estar más alejada.

4. HAPS

El sistema central comprende una plataforma de gran altitud situada en la estratosfera, en un emplazamiento fijo con respecto a la Tierra, que funciona como estación repetidora (HAPS), como se indica en la Figura 4-1.



Figura 4-2: Configuración de la red.

Una red HAPS está compuesta por los siguientes subsistemas:

a) La plataforma HAPS es el globo ubicado en la estratosfera que contiene el repetidor de radiocomunicaciones o carga útil. Toda conmutación de comunicaciones entre usuarios se realiza directamente en la carga útil, que contiene una gran unidad de conmutación normalizada del tipo “módulo de transferencia asíncrona” (ATM Asynchronous Transfer Module) normalizado por el UIT-T; no está prevista la interconexión directa entre los terminales sino solo mediante esta plataforma HAPS o, a su través, con la red pública de telecomunicaciones.

b) Las estaciones terminales de usuario se encuentran distribuidas en tierra, en una disposición de tipo celular que permite una mejor reutilización de frecuencias. Los terminales de usuario son dispositivos portátiles que comunican directamente con la carga útil del HAPS. Inicialmente no está prevista la interconexión directa de los terminales de usuario entre sí porque complicaría excesivamente la complejidad de la carga útil en la HAPS.

c) Las estaciones de cabecera, situadas también en tierra, facilitan la interconexión con la red pública de telecomunicaciones (RTPC, Red Telefónica Pública Conmutada, o de Datos con Conmutación de Paquetes, RDCP o Internet). La mayoría de las estaciones de cabecera se diseñan como unidades no atendidas y autónomas que funcionan por control a distancia desde los centros de control de las HAPS.

Con las estaciones de cabecera los usuarios pueden acceder a las actuales redes públicas tales como la RTPC y a Internet. El sistema se ha diseñado de forma que las estaciones de cabecera puedan estar situadas básicamente en cualquier punto de la zona de cobertura, a fin de minimizar los requisitos de infraestructura en el suelo.

4. HAPS

Normalmente se situarán en una instalación central de operador o en un punto de presencia de proveedor de servicio de Internet para minimizar el coste. Pueden añadirse estaciones de cabecera en tierra, a medida que la operación lo exija, en cualquier momento.

d) Centros de control (CC) del sistema son necesarios para efectuar diversos tipos de tareas, tales como:

CC de recursos que se encarga del control en tiempo real de todos los recursos de la red HAPS. Los CC de recursos efectúan tareas tales como la autenticación del usuario, control de la llamada, gestión del recurso radioeléctrico, gestión del tráfico y la recogida de datos de utilización a efectos de facturación y contabilidad.

CC de configuración para el seguimiento, teledirigida y las instrucciones de la plataforma y carga útil. Son funciones parecidas a la de los centros de operaciones de satélites con funcionamiento durante las 24 horas del día.

CC comercial regional que se encarga del control comercial y financiero local, incluyendo la facturación a los abonados, la contabilidad del operador, los análisis de tendencias, etc. Un centro comercial regional puede ocuparse de un grupo de sistemas HAPS.

Las redes de HAPS poseen una configuración en estrella, dando servicio a la plataforma HAPS en el nodo principal. La estación de abordaje proyecta múltiples haces puntuales en el suelo y da una cobertura circular radioeléctrica que puede subdividirse en tres zonas para garantizar un servicio de banda ancha a los usuarios a lo largo de toda la huella en el suelo procedente de la HAPS.

Dichas zonas son:

a) Zona de cobertura urbana

Esta zona comprende el área donde hay mayor concentración de edificios de gran altura. Los ángulos de elevación de los usuarios serán altos llegando a los 90° en el caso de que la estación HAP se encuentre justo encima de la antena del usuario/s. En esta zona la iluminación de los sistemas en tierra es favorable; de manera que posee menos zonas de sombras (shadowing por edificios) y una baja probabilidad de presentar señales reflejadas (multipath). En esta zona el medio produce señales reflejadas y existe presencia de señal LOS.

b) Zona de cobertura suburbana

Esta zona comprende el área donde la concentración de edificios es bastante menor que en plena ciudad (polígonos industriales, localidades del extrarradio, etc). Los ángulos de elevación de los usuarios disminuirán con respecto a los de la zona urbana.

4. HAPS

Esta zona comienza a presentar una mayor cantidad de sombras y señales reflejadas, y la distancia que recorrerá la señal es mayor que en el caso “zona UAC”. A esto debe agregarse que el desvanecimiento provocado por las señales reflejadas comienza a ser más significativo con respecto al rayo principal. La probabilidad de tiempo compartido con sombras estará entre 20 a 25% del tiempo según las condiciones del terreno.

c) Zona de cobertura rural

La superficie es exterior a la de la zona b) donde hay grandes distancias de campo abierto y las casas son bajas y con mayor separación entre ellas que en los casos anteriores. Los ángulos de elevación en esta zona ya son muy pequeños según nos vamos alejando del centro de la ciudad. La cantidad de sombra en esta posición es considerable, ya que con un ángulo del orden de 13° , la probabilidad de tiempo compartido con sombras será del orden del 89% y la distancia que recorre la señal es mayor que en todas las zonas anteriores, provocando un aumento en la atenuación por la distancia.

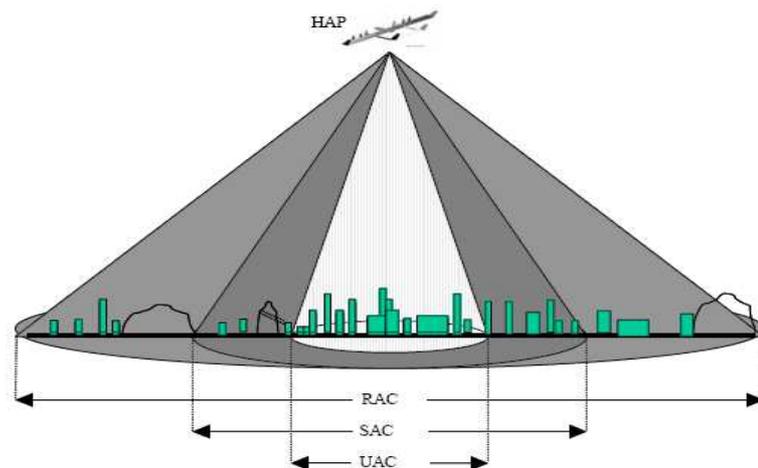


Figura 4-3: Zonas de cobertura HAP; Rural (RAC), Suburbana (SAC) y Urbana (UAC).

Un aspecto importante en toda red radioeléctrica es la banda de frecuencias que puede utilizar. En el caso de las HAPS existe un debate importante en el seno de la UIT-R. No obstante, existen propuestas para el uso de las bandas 28/31 GHz y 47/48 GHz.

La tecnología HAPS se empieza a denominar de 4ª y 5ª generación para los accesos radioeléctricos terrestres.

4.2 Escenario

El esquema general de este escenario sería el siguiente (Figura 4-4);

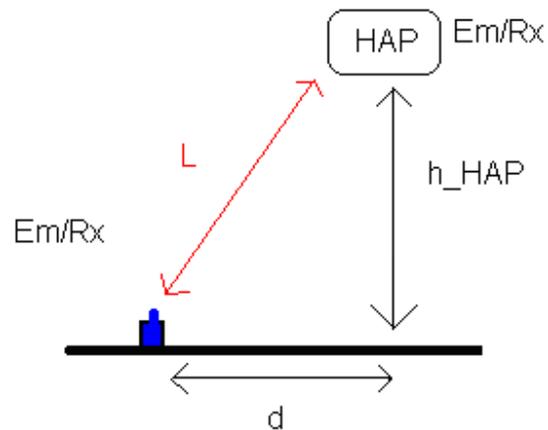


Figura 4-4: Escenario de comunicación HAPS

Vamos a estudiar la influencia de todos estos fenómenos físicos para el caso de un enlace terrestre-HAPS en el que la aeronave se encuentre a una altura de 22 km en dirección vertical del centro de la ciudad.

Hemos despreciado la altura a la que se encuentre la antena terrestre debido a que en comparación a la altura del HAP es insignificante.

Se hará una comparación dependiendo donde se encuentre el usuario del sistema y su ángulo de elevación con respecto a la estación HAP.

4.3 Efecto de los gases y vapor de agua

En este apartado vamos a comparar como afectan los gases de la atmósfera en la atenuación del enlace HAP.

Vamos a comparar las pérdidas existentes de los usuarios dependiendo de su localización. Suponiendo una zona llana la atenuación varía enormemente de un usuario que se encuentre justo debajo del HAPS a otro que se encuentre a 80 km de radio de la circunferencia imaginaria dibujada con centro en la aeronave.

Hemos supuesto que el HAPS se encuentra a una altura de 22 km. y vamos a clasificar a tres tipos de usuario.

El *usuario 1* se encuentra en un radio cercano a la proyección vertical del HAPS. Podría estar a unos 2 km del centro de la circunferencia por tanto tendría un ángulo de elevación de 85 grados.

El *usuario 2* se encuentra en una ‘media distancia’ respecto a la proyección vertical del HAPS y podría estar a unos 15 km del centro por tanto tendría un ángulo de elevación de 55 grados.

El *usuario 3* se encuentra en un radio lejano a la proyección vertical del HAPS. Podría estar a unos 50 km del centro de la circunferencia por tanto tendría un ángulo de elevación de 23 grados.

En los dos gráficos siguientes (Figura 4-5 y Figura 4-6) se muestra como afecta el vapor de agua y el oxígeno a la señal entre emisor y receptor en los tres casos citados anteriormente.

4. HAPS

En 22 GHz (frecuencia de resonancia del vapor de agua) aparece un pico de atenuación (Figura 4-5).

En la frecuencia de resonancia del oxígeno (60 GHz) la atenuación aumenta hasta 3 órdenes de magnitud respecto a otras frecuencias.

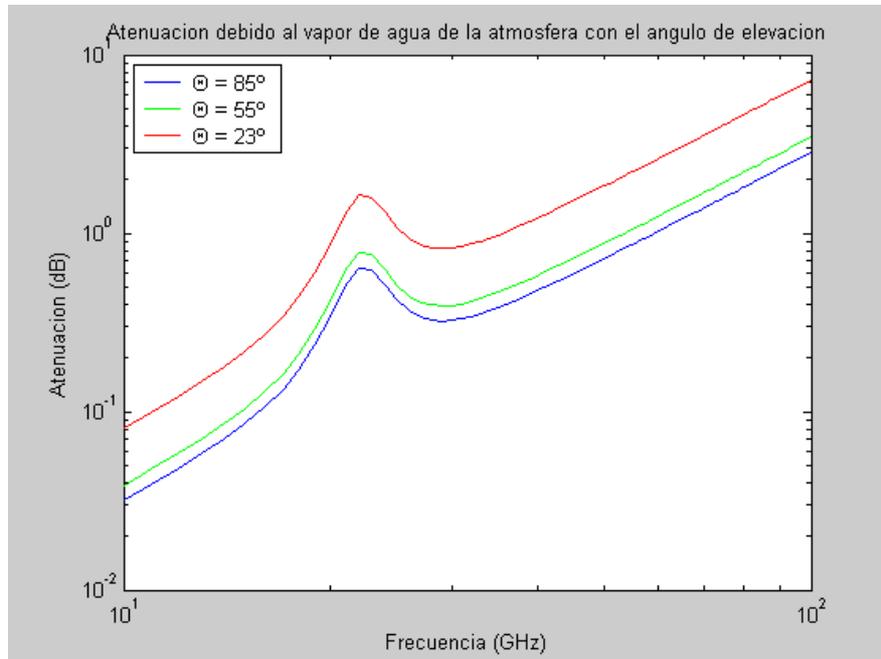


Figura 4-5: Atenuación por vapor de agua según el ángulo de elevación.

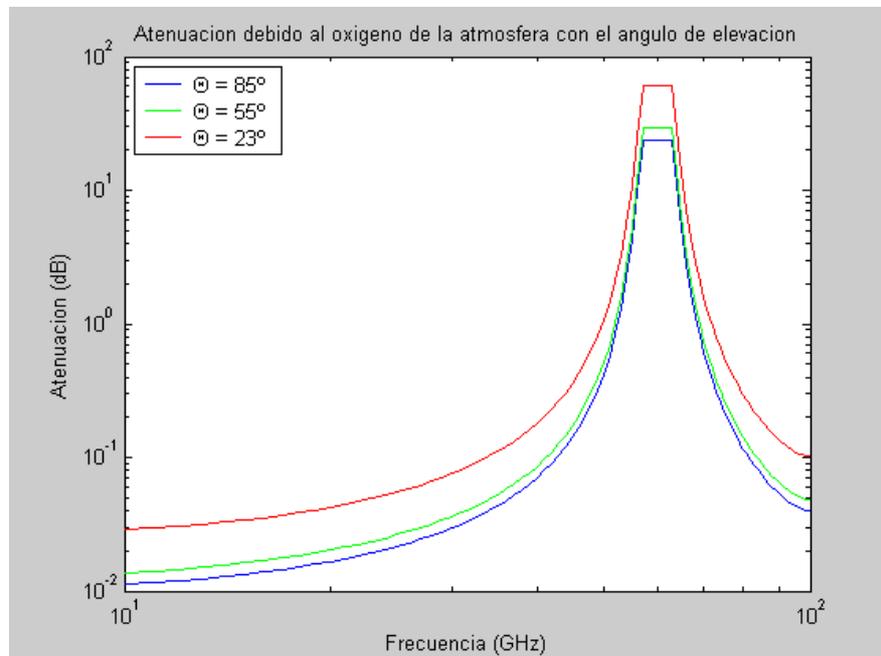


Figura 4-6: Atenuación por oxígeno según el ángulo de elevación.

4. HAPS

Por tanto la atenuación total que se produce debido a los gases y vapor de agua se refleja en la Figura 4-7.

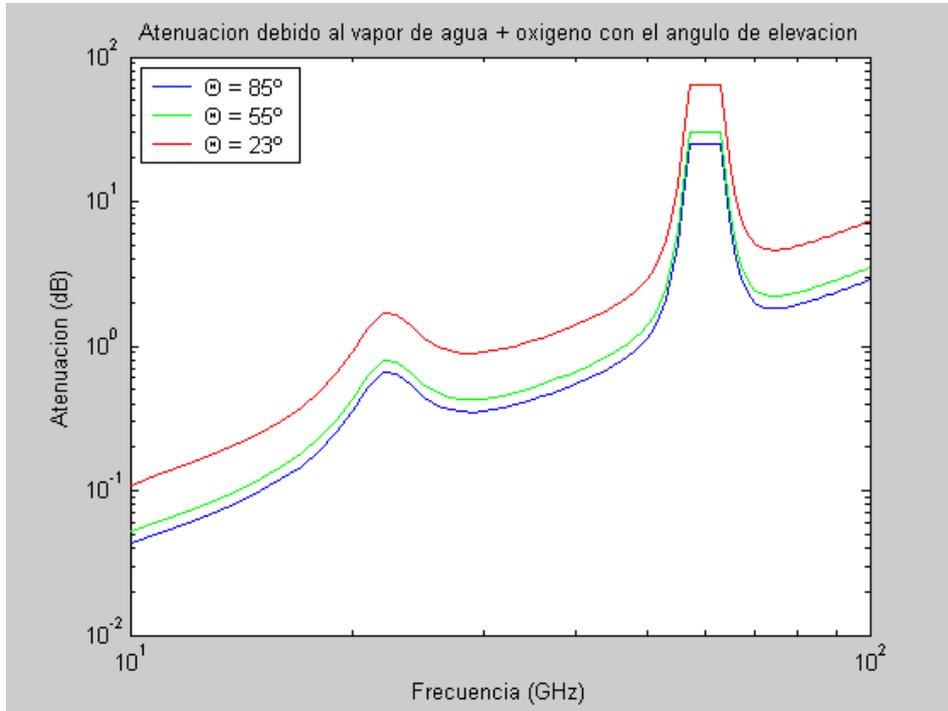


Figura 4-7: Atenuación por vapor de agua y oxígeno según el ángulo de elevación.

Lógicamente a medida que disminuye el ángulo de elevación del usuario respecto a la estación de alta altitud la distancia que tiene que recorrer la señal a través de la capa atenuante es mayor y consecuentemente sufrirá una mayor atenuación total.

4.4 Efecto de la niebla

El caso de la niebla es particular ya que no está muy claro que altura puede alcanzar esta capa aunque la típica suele ser de unos 50 metros con lo cual la atenuación en este tipo de enlaces será mínima.

Como en el apartado anterior el ángulo de elevación va a ser importante para poder calcular las pérdidas.

Primeramente vamos a suponer que la altura de la niebla es de 50 metros con lo cual las pérdidas se producirán hasta el momento que desaparezca esta capa atenuante.

En la Figura 4-8 se puede observar la atenuación producida por la niebla para los tres tipos de usuarios definidos anteriormente dependiendo de su ubicación.

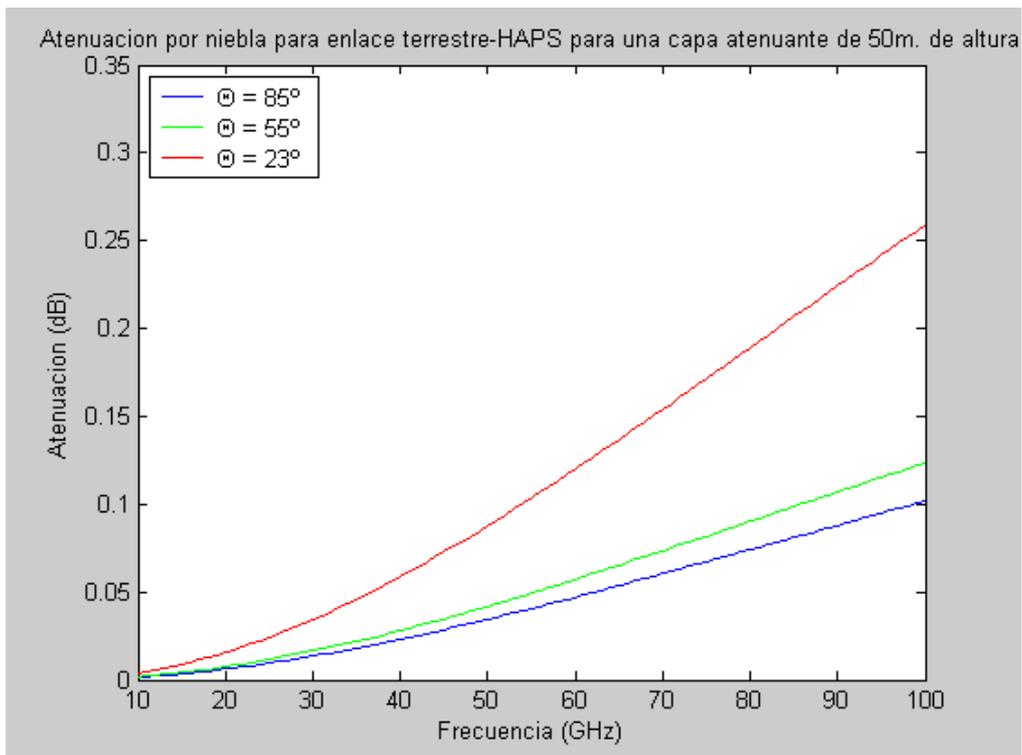


Figura 4-8: Atenuación por niebla según el ángulo de elevación.

4. HAPS

Vamos a ver un caso un poco más extremo y vamos a considerar que la altura a la que llega la niebla es de 80 metros.

En la Figura 4-9 se muestra la atenuación que se produce en el enlace terrestre HAPS considerando que la altura de la niebla es de 80 metros.

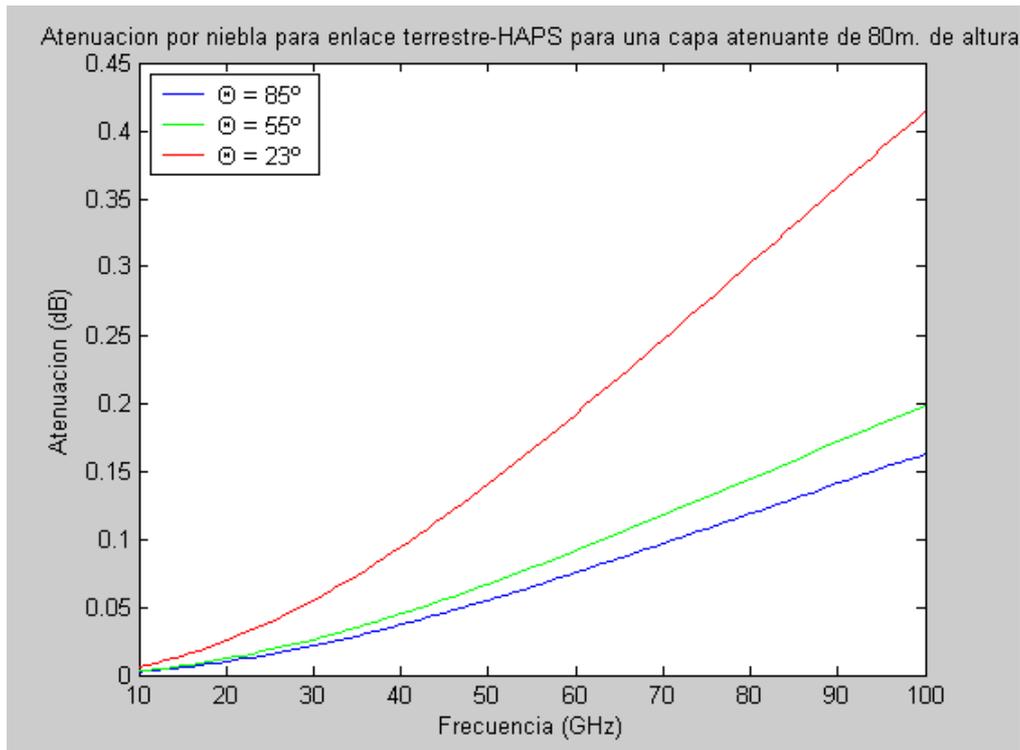


Figura 4-9: Atenuación por una capa de niebla de 80 m. de altura según el ángulo de elevación.

Hay que recalcar que la niebla se compone de diminutas partículas de agua suspendidas en el aire que se generan alrededor de la superficie Terrestre con los contrastes de temperatura con lo cual la altura de esta capa será típicamente de menos de 100 metros.

En efecto para un espesor de niebla de 80 metros y un ángulo de elevación de 23° habría solo una extensión a través de la niebla de 205 metros produciendo una atenuación en 95 GHz que no supera los 0.4 dB. Por lo general el resultado es que la atenuación debido a la niebla es despreciable para los enlaces por satélite y en nuestro caso también se puede considerar así.

En todos los casos anteriores suponemos que la estación terrestre está muy cercana a la superficie con lo cual la atenuación se produce desde 0 metros hasta la altura equivalente de la capa de la niebla.

4. HAPS

Hay que considerar que en el caso en el que la estación terrestre se encuentre en la azotea de un edificio alto como puede ser un rascacielos se puede dar el caso en que la niebla esté por debajo de este punto y el enlace no sufra atenuación a causa de este efecto. En la Figura 4-10 se muestra el esquema de este escenario.

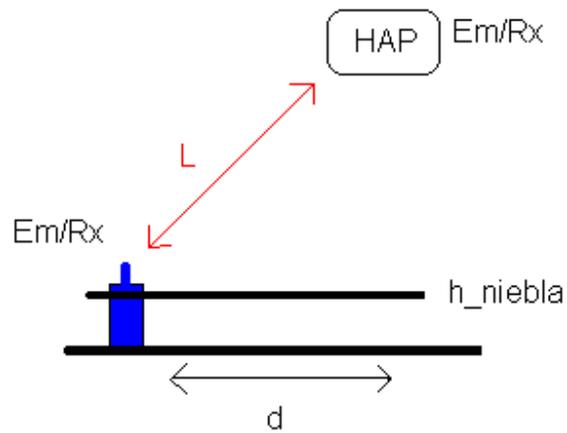


Figura 4-10: Ejemplo de estación terrestre por encima de la niebla.

En este caso la niebla no afectaría al enlace HAPS.

4.5 Efecto de las nubes

En el caso de las nubes la capa atenuante también puede variar. La altura mínima está a unos metros del suelo y la capa máxima depende de la densidad y viene determinada por la ecuación

$$h = 6,35 - 0,302\rho \text{ (Km)} \tag{4.1}$$

Siendo ρ la densidad de agua en el aire (g/m^3).

Por tanto el escenario general en esta ocasión sería el siguiente;

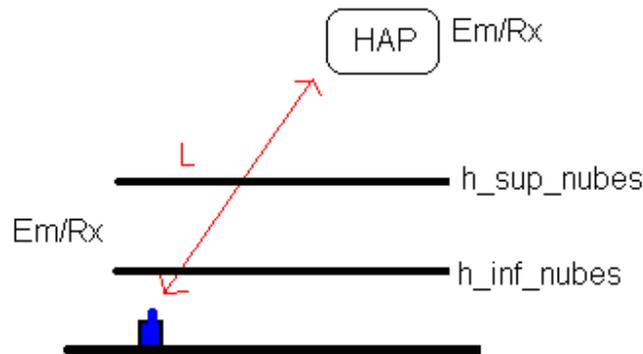


Figura 4-11: Esquema de comunicación HAPS en relación a las nubes.

Hay que mencionar que la altura de la capa inferior de las nubes podría estar por debajo de la antena terrestre, aunque es poco probable. En ese caso para calcular la atenuación debemos considerar la distancia entre la antena y el HAPS en vez de la distancia entre los dos límites de la capa atenuante como ocurre en la mayoría de los casos.

Para mostrar el efecto que las nubes provocan en la atenuación vamos a suponer una densidad de 6 g/m^3 , con lo cual la altura máxima de la capa atenuante sería de 4.538 metros. A efectos de cálculo hemos considerado que la altura mínima es de 200 metros y que la altura de la antena es despreciable respecto a las demás cantidades.

4. HAPS

En la Figura 4-12 se muestra la atenuación del enlace HAPS–Terrestre provocada por las nubes para un usuario cuyo ángulo de elevación sea 85° , otro con ángulo de 55° y otro con un ángulo de 23° .

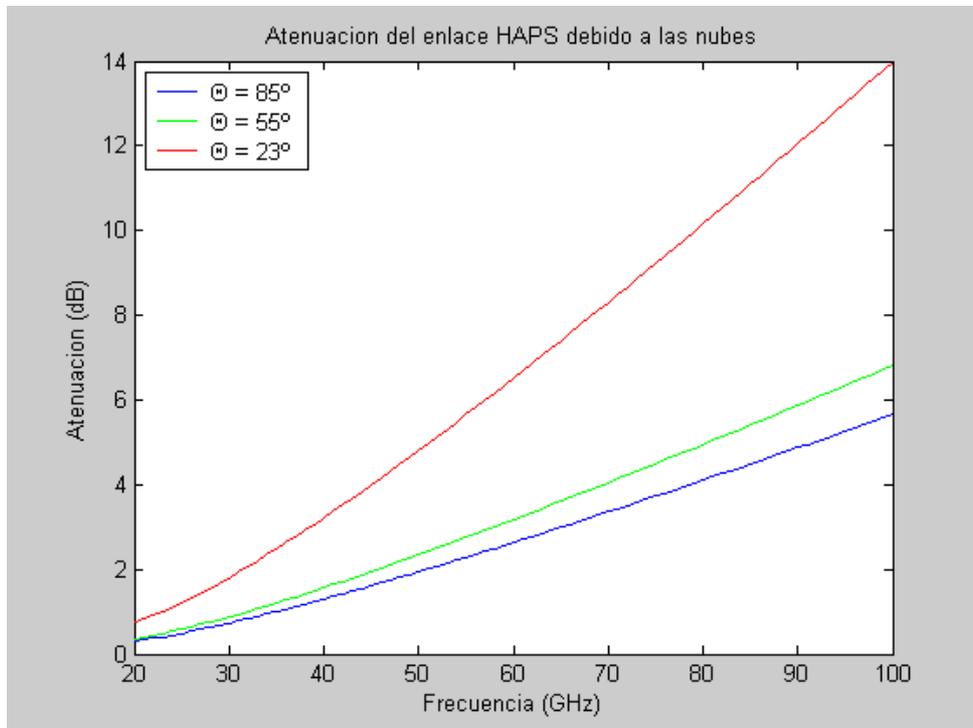


Figura 4-12: Atenuación por nubes según el ángulo de elevación..

De nuevo cuánto menor sea el ángulo de elevación más parte de trayectoria se encuentra dentro de la capa atenuante de las nubes y en consecuencia tendremos más pérdidas.

4.6 Efecto de la lluvia

Un enlace HAPS se puede aproximar a un enlace por satélite y con respecto a las precipitaciones se diferencia de un enlace de microondas LOS en el ángulo de elevación. Cuanto menor sea el ángulo más se aproxima el sistema a las condiciones de visión directa.

En nuestro caso la lluvia no afectará a todo el recorrido de la señal sino que a partir de una altura concreta en la que ya no puede haber precipitaciones hasta la estación HAP no existirá atenuación por lluvia. Podemos calcular la altura efectiva de la lluvia a partir de la latitud de la región del mundo en la que nos encontremos según la siguiente relación [2];

$$h_r \text{ (Km)} = 3 + 0.028\varphi \quad \text{si } 0 \leq \varphi < 36^\circ \quad (4.2)$$

$$h_r \text{ (Km)} = 4 - 0.075(\varphi - 36) \quad \text{si } \varphi \geq 36^\circ \quad (4.3)$$

Se van a hacer los cálculos con una latitud φ de 40° , que es el caso de la Comunidad de Madrid. Por lo tanto la altura efectiva de la lluvia en este caso sería 3.7 Km. Hay que tener en cuenta que Madrid tiene una altitud media de 650 metros sobre el nivel del mar.

Habría que calcular la longitud del camino inclinado del radio enlace desde la estación de Tierra hasta el límite superior de la capa atenuante y a partir de ahí la metodología es la misma que en el caso del enlace LOS terrestre.

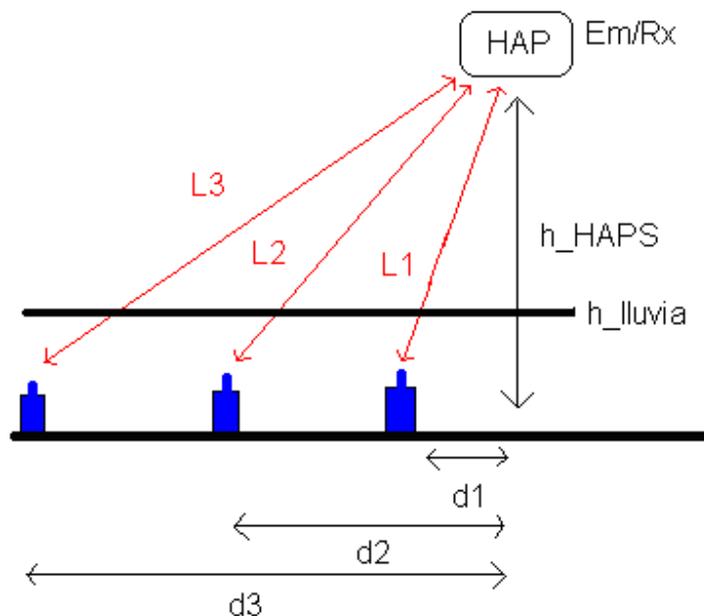


Figura 4-13: Esquema de comunicación HAPS en relación a la lluvia.

4. HAPS

En la Figura 4-14 se representa la atenuación del radioenlace producida por la lluvia para las tres estaciones caracterizadas por su ángulo de elevación.

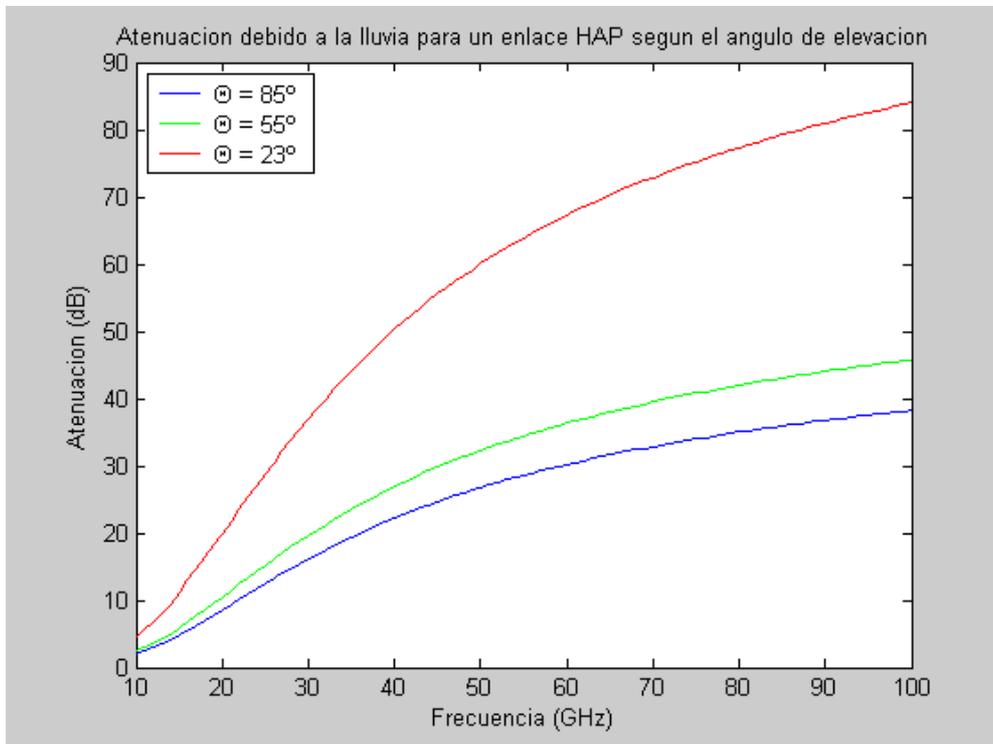


Figura 4-14: Atenuación por lluvia según el ángulo de elevación.

Como se observa en la Figura 4-14 las pérdidas por lluvia para el usuario con ángulo de elevación de 23° son el doble que para el usuario con ángulo de elevación de 55° .

Por lo tanto los factores más significativos que influyen directamente en la atenuación en un enlace HAPS-terrestre son el ángulo de elevación y la tasa de lluvia, y en menor medida la polarización.

Vamos a ver que efecto tienen estos parámetros para los tres tipos de usuarios clasificados según el radio de proximidad a la vertical de la estación aérea, es decir según su ángulo de elevación.

4. HAPS

4.6.1 Usuario 1

El usuario 1 está caracterizado con un ángulo de elevación cercano a los 90°. Vamos a suponer un ángulo de 85°, lo que significa que la estación se encuentra a unos 2 km de la vertical del HAPS.

El factor más determinante es la tasa de lluvia que hace incrementar la atenuación a medida que llueve con mayor intensidad.

En la Figura 4-15 se muestra la atenuación producida por diferentes intensidades de lluvia para el área de Madrid y un ángulo de elevación de 85°. Suponemos también una polarización horizontal (por ejemplo).

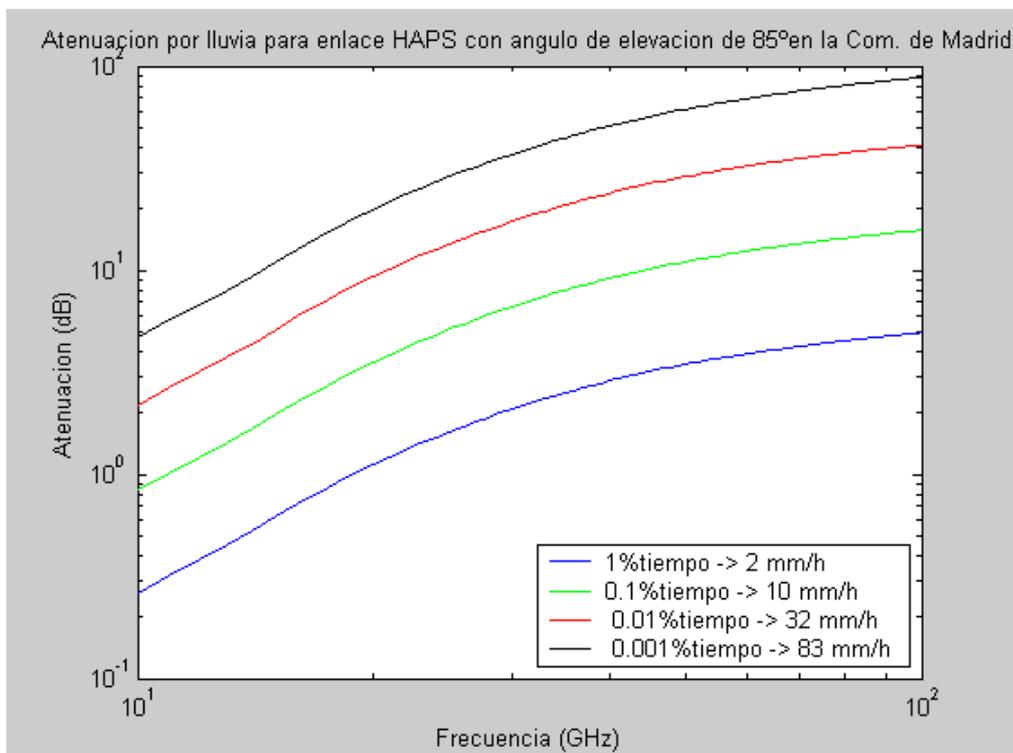


Figura 4-15: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 85° en Madrid.

Como hemos visto en apartados anteriores las tasas de lluvia medidas empíricamente varían dependiendo de la zona geográfica. Al igual que hemos hecho antes vamos a aplicar lo mismo para la ciudad de Sevilla que tiene otros datos meteorológicos distintos a los de Madrid según indica el mapa hidrológico.

4. HAPS

Además su latitud es de 37° en lugar de los 40° de Madrid con lo que también varía la altura efectiva de la lluvia que aplicando la fórmula anterior ahora es de 3.925 km en vez de 3.4 km.

Por otro lado la altitud de Sevilla es de 10 metros sobre el nivel del mar (Madrid tiene 650 metros) con lo que la distancia de las ondas electromagnéticas a través de la capa atenuante es mayor.

En la Figura 4-16 se muestra la atenuación en la ciudad de Sevilla para los mismos porcentajes de tiempo con sus respectivas tasas de lluvia, ángulo de elevación y polarización que en el caso anterior.

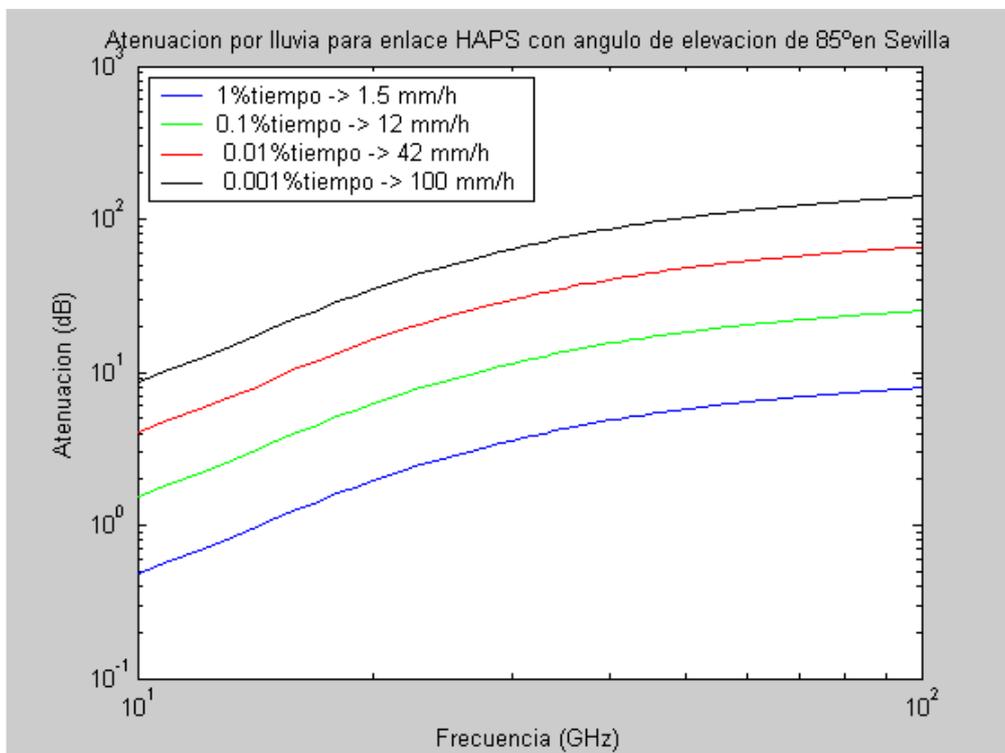


Figura 4-16: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 85° en Sevilla.

Como se puede observar la atenuación en esta región climática es mayor que en la región a la que pertenece la Comunidad de Madrid ya que para el 0,01 % del tiempo (tasa de referencia). la tasa de precipitación es de 42 mm/h frente a los 32 mm/h de Madrid.

4. HAPS

Para terminar este apartado vamos a comparar el efecto de la polarización en términos de atenuación en nuestro enlace HAPS-terrestre para el usuario número 1.

En la Figura 4-17 hemos considerado la polarización horizontal, vertical y circular para el ángulo de elevación de 85° .

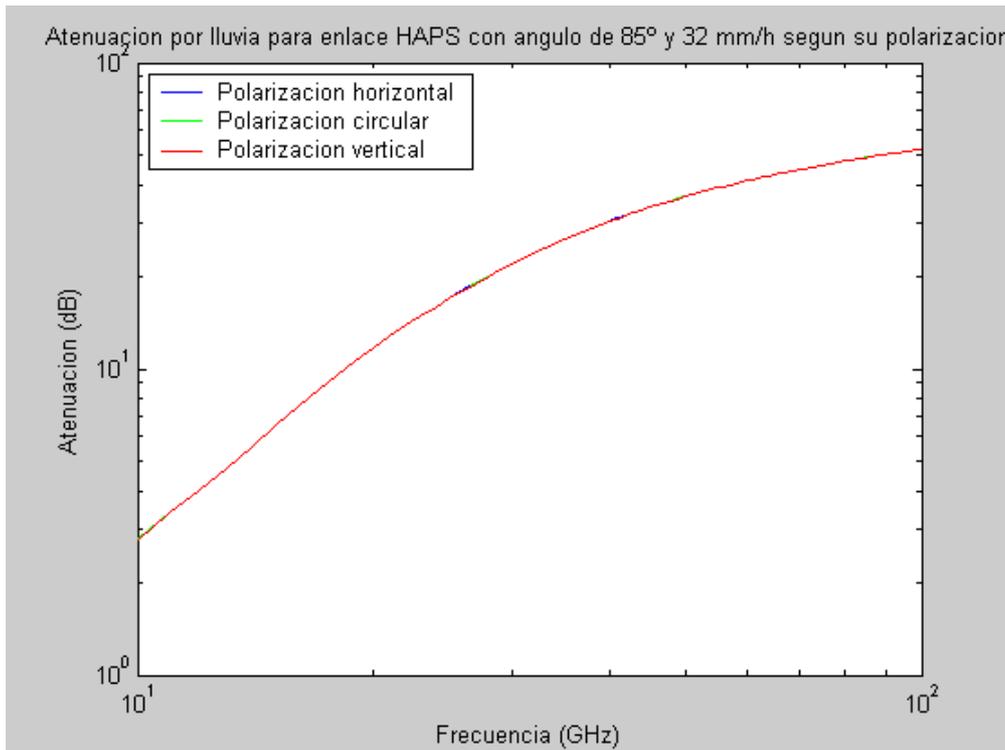


Figura 4-17: Atenuación por lluvia según polarización con tasa de 32 mm/h y ángulo de elevación de 85° .

Se puede observar que en este caso la atenuación es la misma para las tres polarizaciones ya que al ser el ángulo de elevación tan alto, cercano a los 90° el enlace solo se ve afectado por las precipitaciones en una distancia que no llega a los 4 km con lo que no es suficiente para que se marquen diferencias con respecto a la polarización.

4. HAPS

4.6.2 Usuario 2

Este usuario tiene un ángulo de elevación menor que en el caso anterior con lo que la distancia inclinada que une emisor y receptor en la que se produce la atenuación por precipitaciones es mayor. En este caso hemos considerado un ángulo de elevación de 55° que equivale a una proyección horizontal de 15 km aproximadamente desde el usuario hasta la proyección vertical de la estación HAP.

En la Figura 4-18 se muestra la atenuación producida por diferentes intensidades de lluvia para la Comunidad de Madrid y un ángulo de elevación de 55° . Suponemos de nuevo una polarización horizontal.

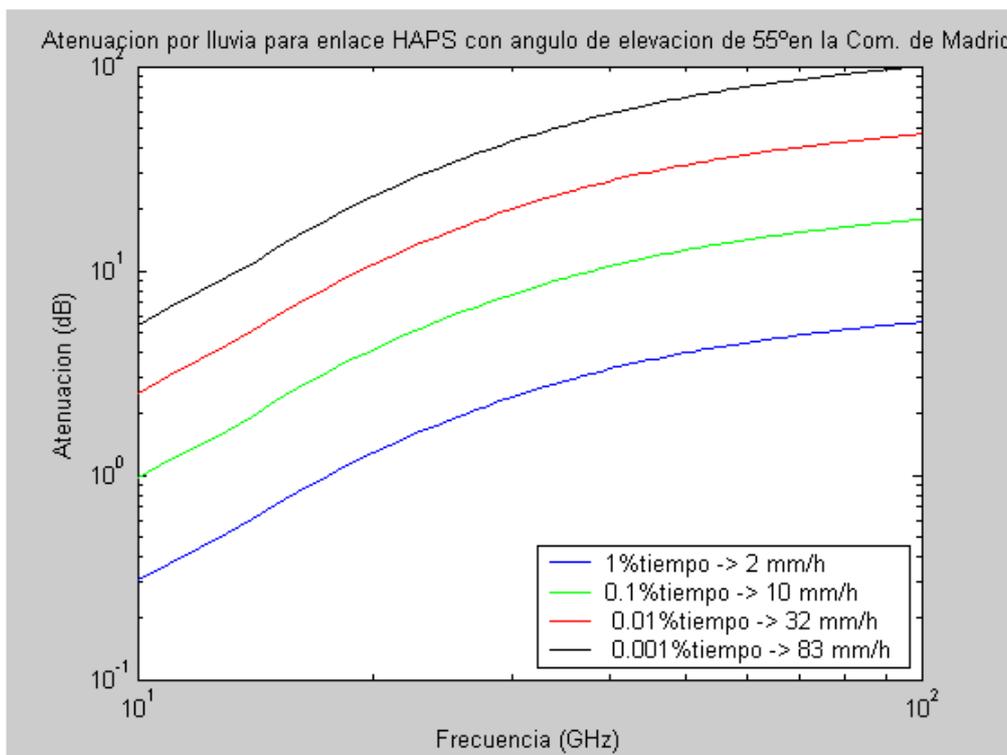


Figura 4-18: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 55° en Madrid.

Vemos que efectivamente existe más atenuación total que la sufrida por el usuario 1. Por ejemplo a una frecuencia de 30 GHz y para una tasa de 32 mm/h la atenuación del usuario número 1 es de 17,3 dB y ahora en la zona de cobertura suburbana es de 20 dB. Hay una diferencia de 2,7 dB que hay que tener en cuenta en el diseño del sistema de telecomunicaciones.

4. HAPS

Al igual que en el apartado anterior vamos a repetir la simulación cambiando el escenario, refiriéndonos ahora a la ciudad de Sevilla.

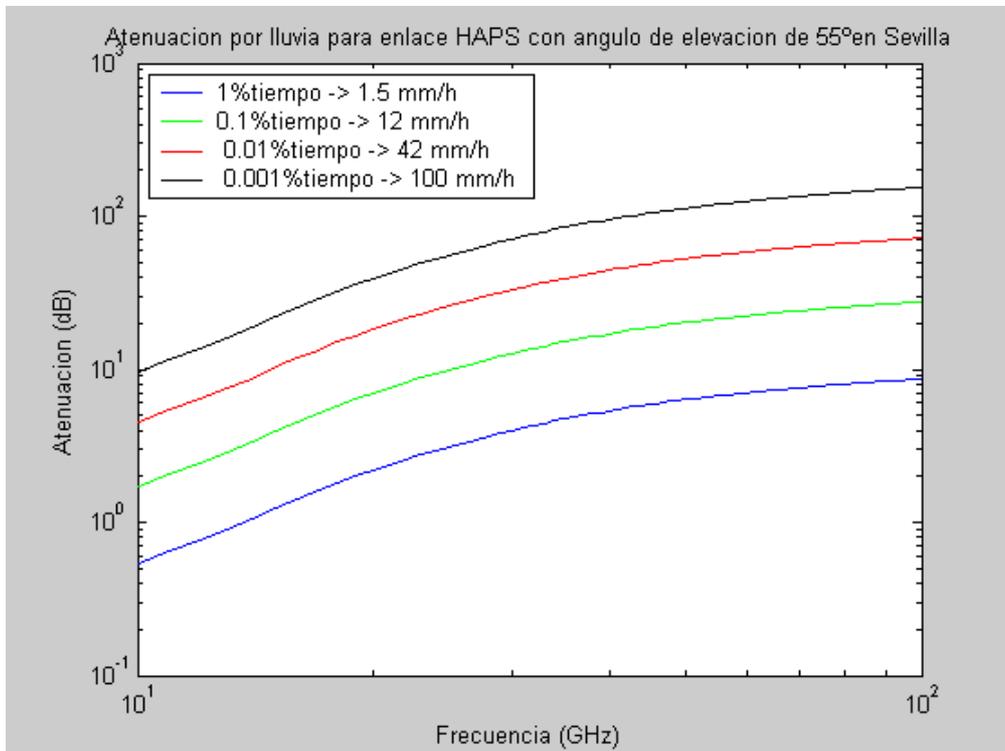


Figura 4-19: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 55 ° en Sevilla.

En Madrid teníamos que durante el 0.01 % del tiempo llueve 32 mm/h y la atenuación a 30 GHz en esos momentos es de 20 dB.

En Sevilla durante el 0.01 % del tiempo llueve con una intensidad media de 42 mm/h, con lo cual la atenuación con una frecuencia de trabajo de 30 GHz se eleva hasta los 33 dB.

Vamos ahora a comparar para el usuario 2 las diferentes curvas que se dibujan para los tres tipos de polarización anteriormente citados.

En la Figura 4-20 podemos ver la atenuación para la polarización horizontal, circular y vertical suponiendo un ángulo de elevación de 55°.

4. HAPS

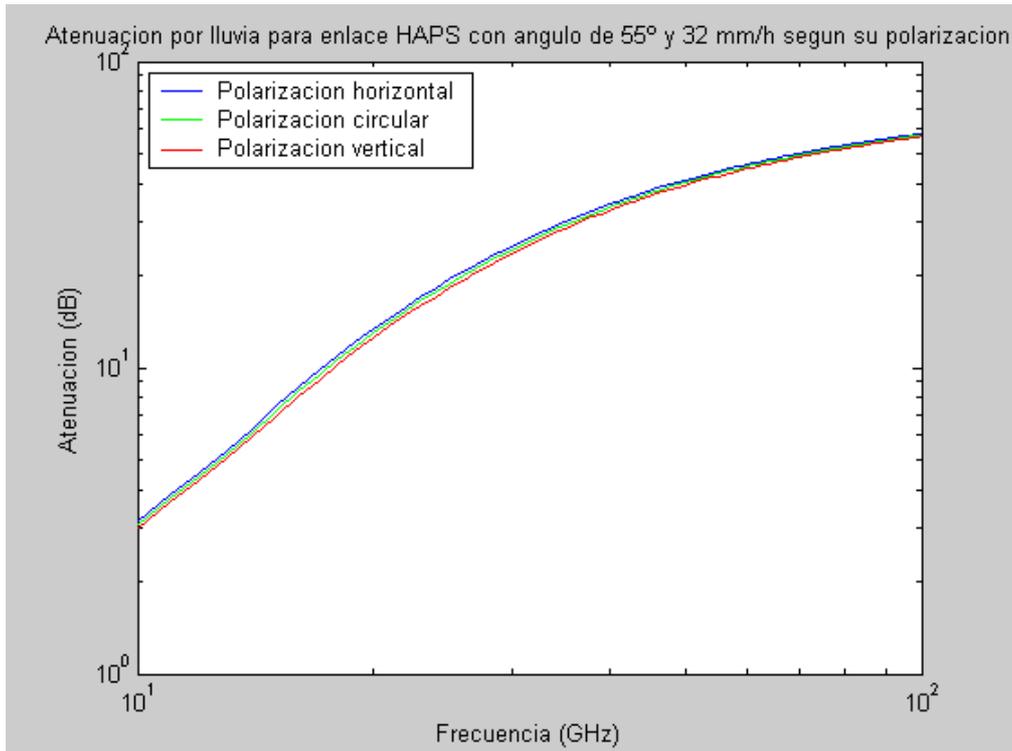


Figura 4-20: Atenuación por lluvia según polarización con tasa de 32 mm/h y ángulo de elevación de 55°.

Se puede observar en la Figura 4-20 que ya se separan un poco las tres curvas a diferencia del apartado anterior y es que la distancia recorrida por la señal a través de la capa atenuante en este caso es mayor y por tanto se hace más significativa la diferencia de polarización para la atenuación.

4. HAPS

4.6.3 Usuario 3

Este usuario lo hemos caracterizado con un ángulo de elevación de 23° , bastante más bajo que en los dos casos anteriores. Por tanto la atenuación será mayor en todos los casos ya que la distancia donde la lluvia puede causar pérdidas es mayor.

Un ángulo de 23° resultaría de una distancia de la estación terrestre a la proyección vertical del HAPS de unos 50 Km.

La altura de la estación HAP no es significativa ya que siempre será mayor que la altura equivalente de la lluvia donde se produce la atenuación que estamos estudiando.

En la Figura 4-21 se muestra la atenuación producida por diferentes intensidades de lluvia para la ciudad de Madrid y un ángulo de elevación de 23° . También se ha considerado una polarización horizontal.

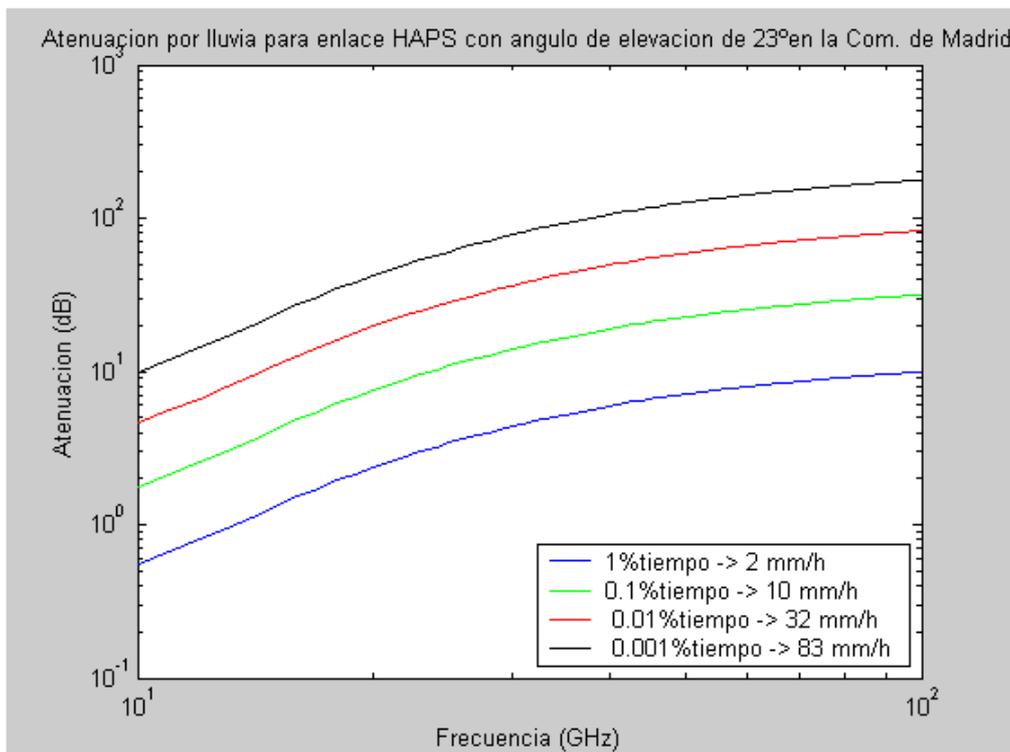


Figura 4-21: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 23° en Madrid.

Fijando la frecuencia a 30 GHz observamos en la Figura 4-21 que la atenuación es de 36 dB en comparación al usuario 2 donde teníamos 20 dB y al usuario 3 donde la atenuación era de 17,3 dB.

4. HAPS

En la Tabla 4-1 que se muestra a continuación vemos a modo de comparación los valores de atenuación en distintas frecuencias de trabajo para los tres usuarios considerados en el área de la Comunidad de Madrid con una tasa de lluvia de 32 mm/h.

Tabla 4-1: Atenuación por lluvia para ángulos de elevación de 85, 55 y 23° en Madrid.

Atenuación(dB)\Frecuencia(GHz)	20	40	60	80	100
Usuario 1 (85°)	9.23	23.82	32.4	37.54	41.02
Usuario 2 (55°)	10.72	27.40	37.03	42.76	46.62
Usuario 3 (23°)	19.65	49.43	66.19	76.03	82.6

A la hora de diseñar el enlace y todo el sistema habrá que tener en cuenta esta atenuación (lluvia) que es la más significativa para que a todos los usuarios que estén dentro de la zona de cobertura deseada puedan disfrutar del servicio.

Vamos a rehacer los cálculos para ver la gráfica que resulta para la ciudad de Sevilla con un ángulo de elevación 23° y las diferentes tasas de lluvia que tenemos de referencia.

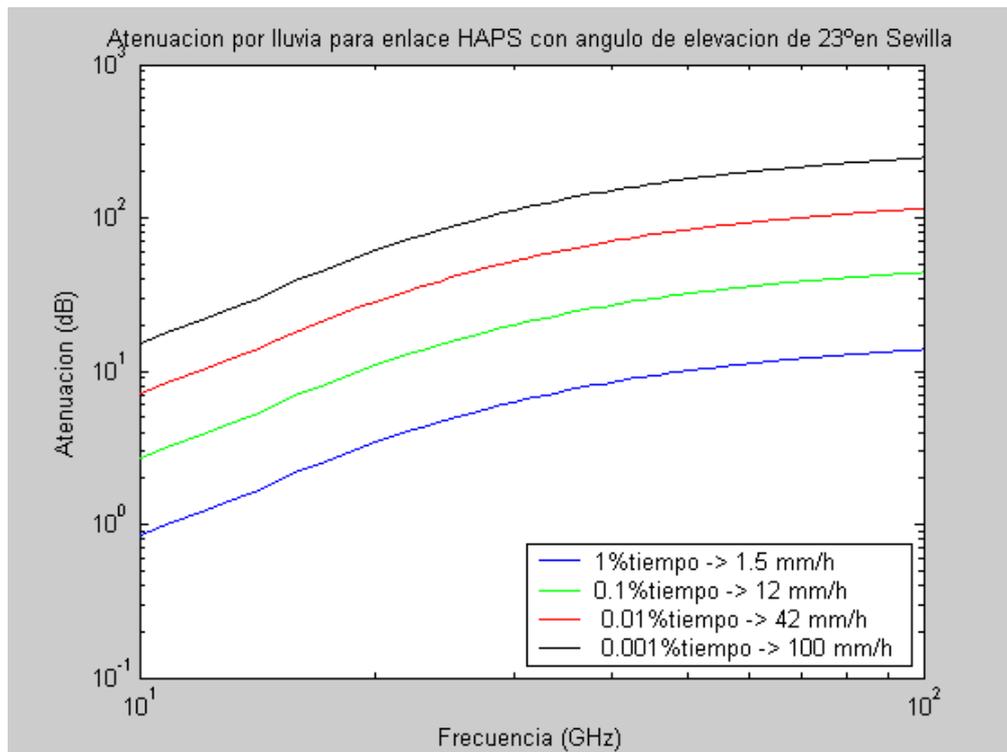


Figura 4-22: Atenuación por lluvia según intensidad para un ángulo de elevación de 23° en Sevilla.

4. HAPS

En la Tabla 4-2 que se muestra a continuación vemos a modo de comparación los valores de atenuación en distintas frecuencias de trabajo para los tres usuarios definidos en el área de Sevilla con una tasa de lluvia de 42 mm/h. que equivale al 0,01 % del tiempo en esta región.

Tabla 4-2: Atenuación por lluvia para ángulos de elevación de 85, 55 y 23° en Sevilla.

Atenuación(dB)\Frecuencia(GHz)	20	40	60	80	100
Usuario 1 (85°)	16.27	40.22	53.27	60.77	65.77
Usuario 2 (55°)	18.22	44.52	58.6	66.6	71.92
Usuario 3 (23°)	31.02	74.55	97.15	109.8	118.15

Por último, en la Figura 4-23 se muestra la atenuación para la polarización horizontal, circular y vertical suponiendo un ángulo de elevación de 23°.

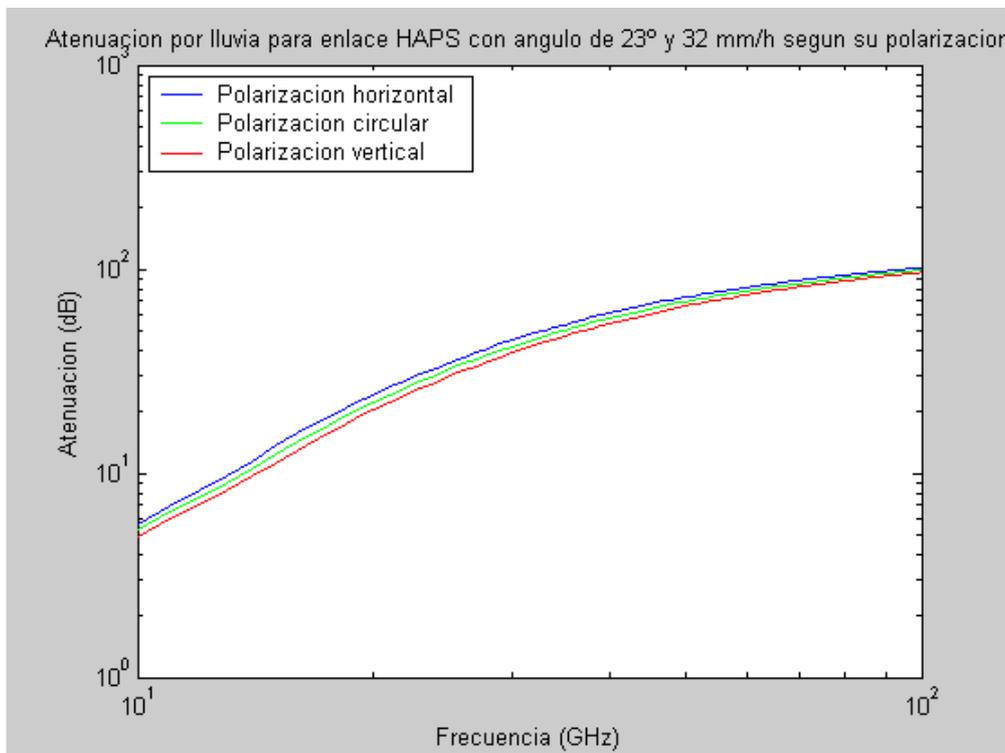


Figura 4-23: Atenuación por lluvia según polarización con tasa de 32 mm/h y ángulo de elevación de 23°.

Aquí se puede ver como definitivamente las tres curvas están más separadas que en el caso de los ángulos de 85 y 55 grados. La atenuación de la polarización es ligeramente mayor por la forma (achatada en horizontal) que las gotas de lluvia adquieren con el rozamiento del aire. En este caso se puede apreciar mejor esta idea pero si la trayectoria que atraviesa la capa atenuante no es grande casi no lo podemos apreciar como en los dos apartados anteriores.

4. HAPS

Como se ha visto anteriormente la latitud de la región en la que nos encontremos va a influir directamente en la altura efectiva de la lluvia. Dentro de España si nos situamos en la zona climática H y comparamos la ciudad de Santander (43°) con la de León (42°) y la de Madrid (40°) vemos que las alturas efectivas de lluvia son según la ecuación (4.3) de 3,475 km, 3,55 km y 3,7 km respectivamente. Estos valores si el ángulo de elevación del usuario es cercano a los 90° no van a tener mucha influencia sobre la atenuación. Sin embargo si tenemos un ángulo de elevación bajo, por ejemplo de 20° las distancias a través de la capa de lluvia son de 10,16 km, 10,38 km y 10,82 km respectivamente lo cual es una diferencia al menos significativa en términos de atenuación.

En la Figura 4-24 podemos observar las diferentes curvas de atenuación para la zona de Santander, León y Madrid todas ellas dentro de la región climática H y para un usuario con un ángulo de elevación de 20°. Se ha considerado una tasa de lluvia de 32 mm/h que es la tasa perteneciente al 0,01 % del tiempo para la región H.

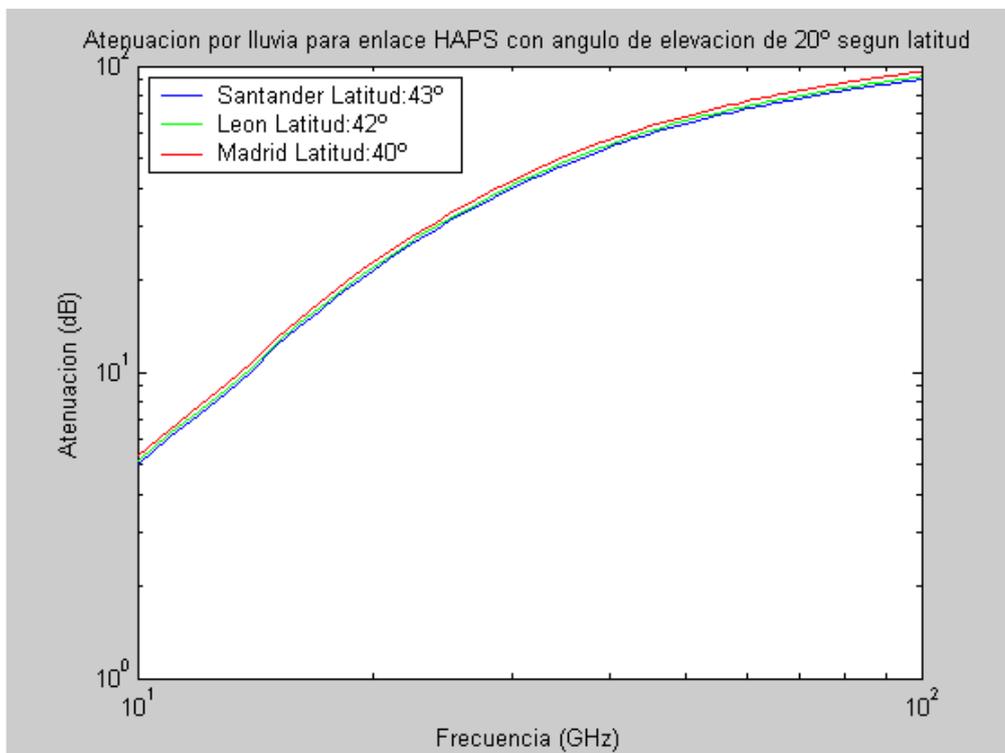


Figura 4-24: Atenuación por lluvia según latitud para un ángulo de elevación de 20° en la región H.

Podemos observar que a mayor latitud tenemos menos pérdidas debido a la lluvia. Si fijamos la frecuencia de trabajo en 30 GHz obtenemos un valor de atenuación de 41,25 dB para el caso de Santander, 42,28 dB para el caso de León y 43,71 dB en el caso de Madrid.

4. HAPS

Para la otra mitad de España que pertenece a la región climática K también va a haber diferencias significativas dependiendo la latitud con otros valores de intensidades de lluvia.

Por ejemplo en tres ciudades pertenecientes a esta zona como pueden ser Valencia (39,5°), Sevilla (37°) y Ceuta (35°) las alturas equivalentes de la capa de lluvia son de 3,74 km, 3,92 km y 3,98 km respectivamente. Al igual que en el caso de la zona H estas diferencias no son significativas si consideramos un ángulo de elevación alto pero en caso contrario ya empiezan a ser más importantes.

En la Figura 4-25 podemos observar las diferentes curvas de atenuación para la zona de Valencia, Sevilla y Ceuta todas ellas dentro de la región climática K y para un usuario con un ángulo de elevación de 20°. Se ha considerado una tasa de lluvia de 42 mm/h que es la tasa perteneciente al 0,01 % del tiempo para la región K.

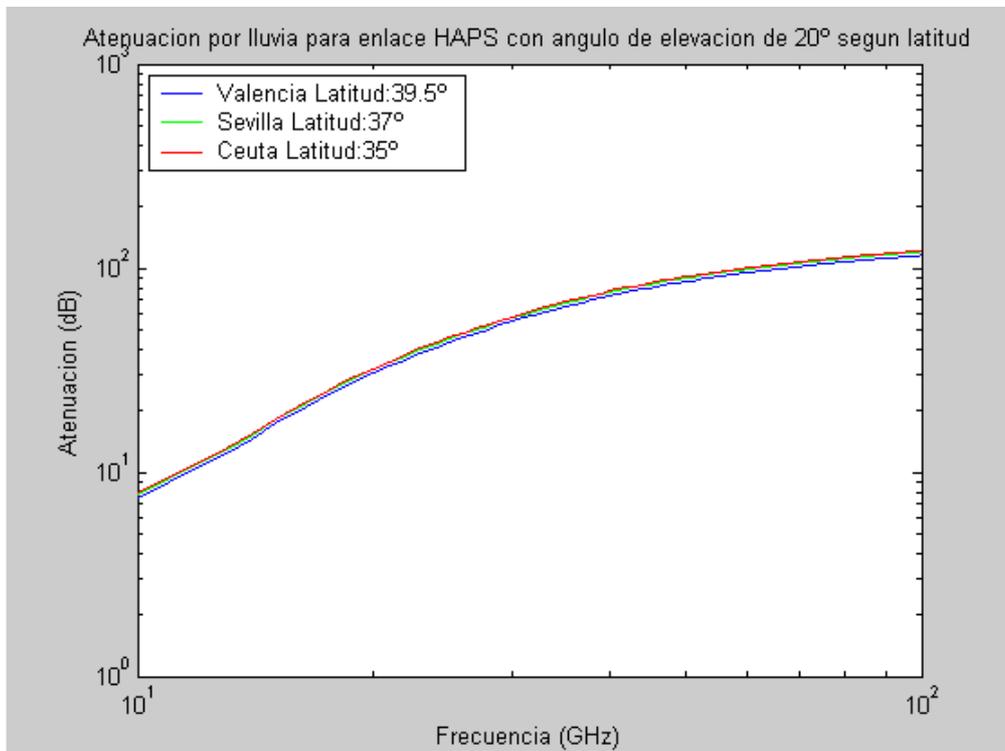


Figura 4-25: Atenuación por lluvia según latitud para un ángulo de elevación de 20° en la región K.

Evidentemente igual que en el caso anterior a mayor latitud tenemos menos pérdidas debido a la lluvia. Fijando la frecuencia de trabajo a 30 GHz obtenemos un valor de atenuación de 54,73 dB para el caso de Valencia, 56,95 dB para el caso de Sevilla y 57,77 dB en el caso de Ceuta. Por tanto es un factor más a tener en cuenta.

4.7 Efecto de la nieve

Este apartado es similar al de la lluvia ya que la altura de la capa atenuante donde comienzan a aparecer las nubes que provocan precipitación es la misma.

Con lo cual considerando los mismos tres tipos de usuarios que teníamos en el apartado anterior el escenario sería el siguiente.

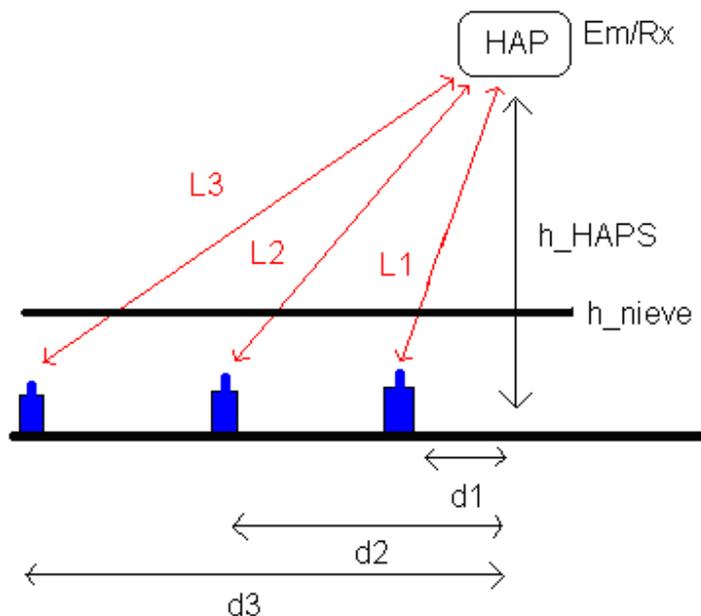


Figura 4-26: Esquema de comunicación HAPS en relación a la nieve.

Para ver su efecto vamos a considerar de nuevo el escenario de la comunidad de Madrid donde la latitud es de 40° con lo que la altura efectiva de la capa de nieve es de 3,7 km. y la altitud sobre el nivel del mar es de 650 metros.

Por tanto consideremos de nuevo un usuario con un ángulo de elevación de 85° , otro con un ángulo de 55° y el tercero con un ángulo de 23° .

En la Figura 4-27 se muestran las tres curvas de atenuación en función de la frecuencia para un índice de lluvia en forma de nieve de 4 mm/h.

4. HAPS

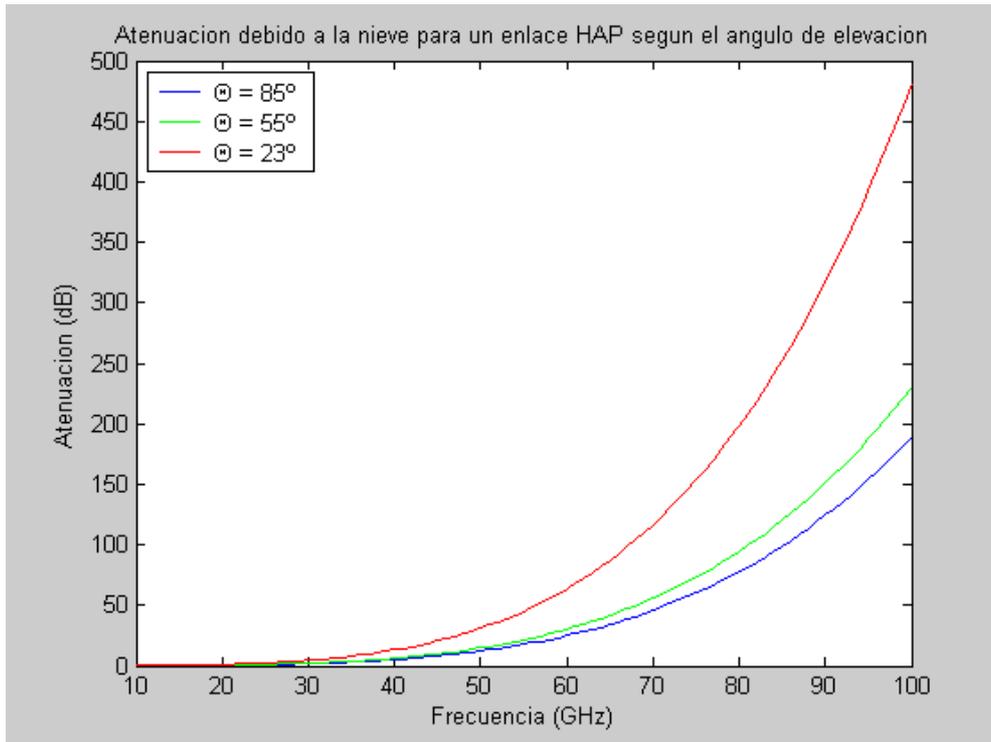


Figura 4-27: Atenuación por nieve según ángulo de elevación.

Recordemos que la aeronave se encuentra a 22 km. De nuevo a pesar de que la trayectoria entre emisor y receptor para los tres usuarios es de 22.085, 26.86 y 56.3 km. la señal únicamente sufrirá atenuación por la nieve durante 3.06, 3.72 y 7.8 km.

Como se puede observar en la Figura 4-27 hasta los 40 GHz las pérdidas son bastante bajas pero si subimos la frecuencia de trabajo la atenuación se dispara.

Hay que tener en cuenta que el caso de la nieve no es muy frecuente (para la mayoría de las ciudades de España que es donde se fundamenta el proyecto) ya que la probabilidad de este fenómeno es baja, del orden de décimas, y no va a ser lo habitual.

4.8 Efecto del granizo

Vamos a ver cuáles serían las pérdidas que sufriría la señal en el caso del granizo. La altura de la capa atenuante es exactamente igual a la de la lluvia y la nieve porque al fin y al cabo es otra forma de precipitación.

Siguiendo el esquema anterior calcularemos la atenuación para los tres usuarios tipo. Por tanto ahora el escenario sería el siguiente;

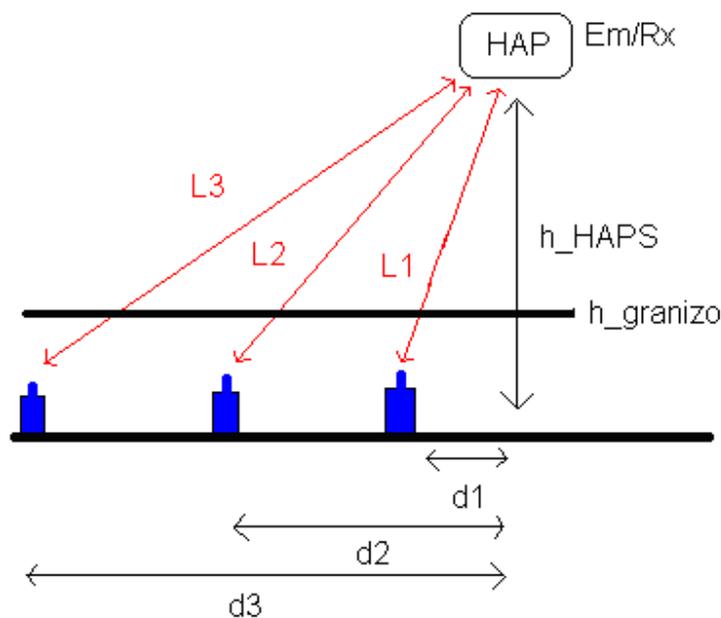


Figura 4-2: Esquema de comunicación HAPS en relación al granizo.

Para poder comparar el efecto de este fenómeno con los anteriores volvemos a considerar el escenario de la comunidad de Madrid con una latitud de 40° con lo que la altura efectiva de la capa de granizo es de 3,7 km. y la altitud sobre el nivel del mar es de 650 metros.

Por tanto el primer usuario tendría un ángulo de elevación de 85° y con una altura de la estación del HAP de 22 km. la señal discurriría sobre la capa atenuante durante 3.06 km. y el resto solo sufriría atenuación debido al espacio libre pero no debido al granizo. En la Tabla 4-3 se muestran para varios valores de frecuencia la atenuación producida, considerando unos copos esféricos con dos posibles valores de diámetro, y una densidad de 1 g/m³.

4. HAPS

Tabla 4-3: Atenuación por granizo para el usuario 1 y distintos diámetros de partícula.

Usuario 1 (85°)		
FRECUENCIA (GHz)	ATENUACIÓN (dB)	
	D = 0.97 cm	D = 1.93 cm
15	2.75	12.85
30	5.81	15.30
45	8.57	18.05
60	9.18	18.36

El usuario 2 mantiene un ángulo de 55° con respecto al HAPS con lo cual la distancia durante la cual le afecta esta perturbación es menor que en caso del usuario número 1.

Tabla 4-4: Atenuación por granizo para el usuario 2 y distintos diámetros de partícula.

Usuario 2 (55°)		
FRECUENCIA (GHz)	ATENUACIÓN (dB)	
	D = 0.97 cm	D = 1.93 cm
15	3.35	15.62
30	7.07	18.6
45	10.42	21.95
60	11.16	22.32

El usuario 3 cuyo ángulo es de 23° con respecto al HAPS es el que se ve más afectado ya que recorrido a través de la capa atenuante es mayor debido a la menor verticalidad de la trayectoria.

Tabla 4-5: Atenuación por granizo para el usuario 3 y distintos diámetros de partícula.

Usuario 3 (23°)		
FRECUENCIA (GHz)	ATENUACIÓN (dB)	
	D = 0.97 cm	D = 1.93 cm
15	7.02	32.76
30	14.82	39
45	21.84	46.02
60	23.40	46.80

En todos los casos se ha considerado una densidad de 1 g/m³.

Se puede apreciar en las Tablas 4-2 y 4-3 que la atenuación para los usuarios con ángulos de elevación de 85° y 55° son similares. Sin embargo las pérdidas del usuario 3 son el doble que las del usuario 2.

4.9 Pérdidas de propagación

Como hemos visto anteriormente la fórmula de las pérdidas por propagación en espacio libre es;

$$L_{fs} \text{ (dB)} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} \quad (4.4)$$

Siendo;

f ; frecuencia en giga hertzios.

d ; distancia en kilómetros.

L ; Atenuación en decibelios.

A la fórmula (4.4) habría que añadir las pérdidas extras en el caso de nuestro enlace HAPS-Tierra, con lo que quedaría;

$$L_{\text{TOTAL}} \text{ (dB)} = L_{fs} + L_v + L_o + L_n + L_f + L_{ll} \quad (4.5)$$

Siendo;

L_v ; Atenuación por vapor de agua en dB.

L_o ; Atenuación por oxígeno en dB.

L_n ; Atenuación por nubes en dB.

L_f ; Atenuación por niebla en dB.

L_{ll} ; Atenuación por lluvia en dB.

De nuevo vamos a considerar que existe lluvia en vez de nieve o granizo ya que ocurre con más frecuencia.

Vamos a comparar cómo saldrían las pérdidas totales en nuestro enlace HAPS en el que la estación aérea se encuentra a 22 km. de altura, en una **zona abierta** (no hay ciudades cercanas) para los tres usuarios que se han definido en el apartado anterior.

Hay que recalcar que estamos poniéndonos, en términos de atenuación, en el peor caso prácticamente ya que estamos suponiendo que todos los fenómenos interactúan al mismo tiempo con la señal y provocan pérdidas.

4. HAPS

4.9.1 Usuario 1

Este usuario tiene un ángulo de elevación de 85° con unas condiciones ambientales de 8 g/mm³ de densidad y una tasa de lluvia de 32mm/h. Como la altura de la estación HAP es de 22 km., la distancia entre emisor y receptor es de 22,085 km., lo cual nos va a ser útil para calcular el tercer término de la ecuación.

Para nuestro enlace HAPS si fijamos, por ejemplo, la frecuencia de trabajo a 30 GHz sustituyendo en la fórmula nos quedaría;

$$L_{\text{TOTAL}} (\text{dB}) = 92,44 + 29,54 + 26,88 + 0,32 + 0,03 + 0,73 + 0,02 + 16,14 = \\ 166,11 \text{ dB}$$

Si en vez de lluvia el agua cae en forma de nieve en las pérdidas habrá que sumar un factor de 3 dB en vez de los 16,14 dB de la lluvia. En este caso es más pequeño pero para valores más altos de frecuencia la atenuación supera con creces a la de la lluvia.

Si el agua cae en forma de granizo el factor de atenuación por precipitación sería de 5,81 dB en vez de 16,14 dB.

En la Tabla 4 se muestra valores de atenuación para algunas frecuencias de trabajo.

Tabla 4-6: Pérdidas de propagación totales para el usuario 1.

Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
15	147,96
30	166,11
48	181,69
60	212,75
80	198,54
100	206,26

La banda de frecuencias actualmente identificada en todo el mundo para las aplicaciones HAPS es la banda entre 47,2 – 47,5 GHz (500 MHz para el trayecto descendente) y 47,9 – 48,2 GHz (otros 500 MHz para el trayecto ascendente). Estas bandas se designan como bandas en 47/48 GHz. Con una frecuencia de trabajo de 48 GHz podemos observar que existe en nuestro enlace una atenuación de 181,69 dB.

4. HAPS

En algunos países debido a la lluvia intensa que sufren se designó otras bandas de frecuencias inferiores para HAPS, bandas en 28/31 GHz, es decir entre 27,5 – 28,35 GHz para el trayecto descendente, y 31,0 – 31,3 GHz para el trayecto ascendente. Podemos observar que en nuestro caso existe una atenuación total de propagación de 166,11 dB para una frecuencia de funcionamiento de 30 GHz. Efectivamente existen menos pérdidas de propagación en este caso que en el de 48GHz de frecuencia de funcionamiento pero hay que asegurarse de que no causará interferencias perjudiciales con otros servicios existentes en esa banda.

En la Figura 4-29 se puede observar la curva de las pérdidas de propagación del enlace Tierra-HAPS para un rango de frecuencias de entre 10 y 100 GHz.

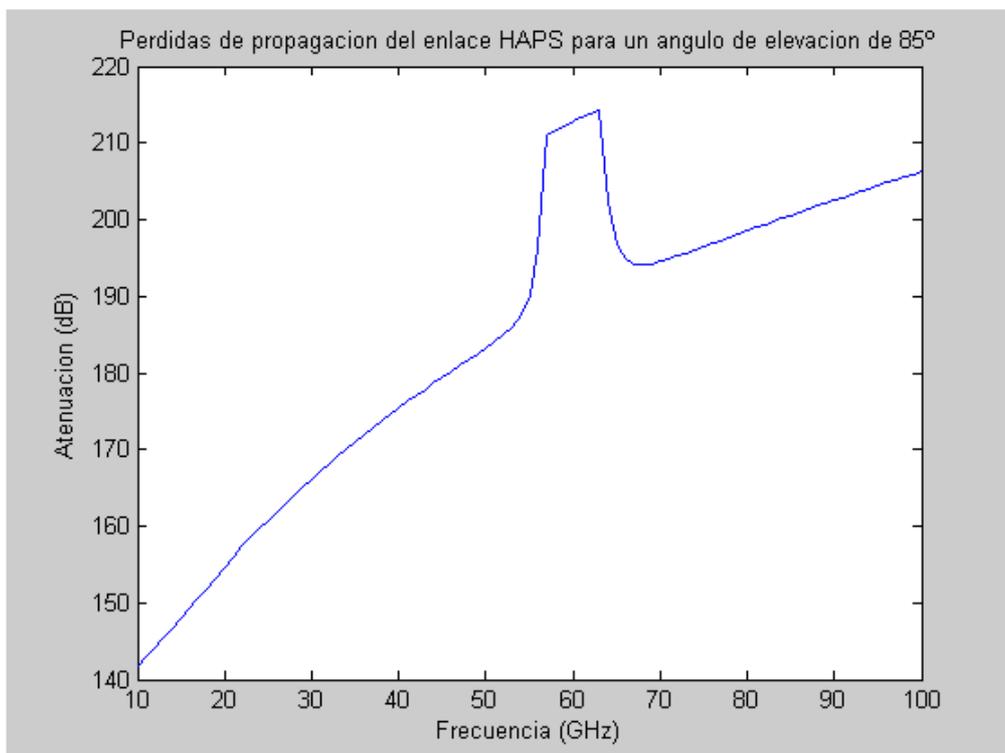


Figura 4-29: Pérdidas de propagación totales para un ángulo de elevación de 85°.

A modo de comparación con el enlace terrestre vemos que a pesar de que el HAPS se encuentre a 22 km. de altura existen menos pérdidas de propagación que en el caso del enlace terrestre de 10 km. para las mismas condiciones climatológicas y a medida que aumentamos la frecuencia de funcionamiento del sistema se hace más visible esta diferencia.

4. HAPS

4.9.2 Usuario 2

Este usuario tiene un ángulo de elevación de 55° con unas condiciones climáticas idénticas al apartado anterior. Como la altura de la estación HAP es de 22 km., la distancia entre emisor y receptor es de 26,86 km., mayor que anteriormente lo cual va a hacer que el tercer término de la ecuación sea mayor y conlleve más pérdidas por la distancia, además de que las atenuaciones serán mayores debido a que hay más trayectoria a través de la capa atenuante.

Para nuestro enlace HAPS si fijamos la frecuencia de trabajo a 30 GHz sustituyendo en la fórmula (4) nos quedaría;

$$L_{\text{TOTAL}} (\text{dB}) = 92,44 + 29,54 + 28,58 + 0,39 + 0,04 + 0,88 + 0,03 + 19,63 =$$
$$171,53 \text{ dB}$$

Si tenemos nieve en vez de lluvia habrá que sumar a la atenuación total un factor de 3,5 dB en vez de los 19,63 dB de la lluvia. De nuevo en este caso es más pequeño pero para valores mayores de frecuencia la atenuación supera con creces a la de la lluvia.

Si la precipitación es en forma de granizo el factor de atenuación sería de 7,07 dB.

En el siguiente cuadro (Tabla 4-7) se muestra valores de atenuación total para algunas frecuencias de trabajo.

Tabla 4-7: Pérdidas de propagación totales para el usuario 2.

Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
15	150,81
30	171,53
48	189,35
60	226,55
80	208,50
100	217,29

Evidentemente los valores de atenuación son ligeramente más altos que en el caso del ángulo de elevación de 85°. No obstante sigue siendo inferior que los valores de atenuación en el caso del enlace terrestre. En las primeras frecuencias como son los 15 GHz son similares pero a medida que aumentamos la frecuencia de trabajo se hace más notable la diferencia.

4. HAPS

Por ejemplo en el caso de una frecuencia de trabajo de 80 GHz en el enlace terrestre teníamos unas pérdidas de propagación de 269,86 dB y en el enlace HAPS obtenemos un valor de 208,5 dB. Existe una diferencia de 61,36 dB.

En la Figura 4-30 se puede observar la curva de las pérdidas de propagación del enlace Tierra-HAPS para un rango de frecuencias de entre 10 y 100 GHz con las condiciones de este usuario.

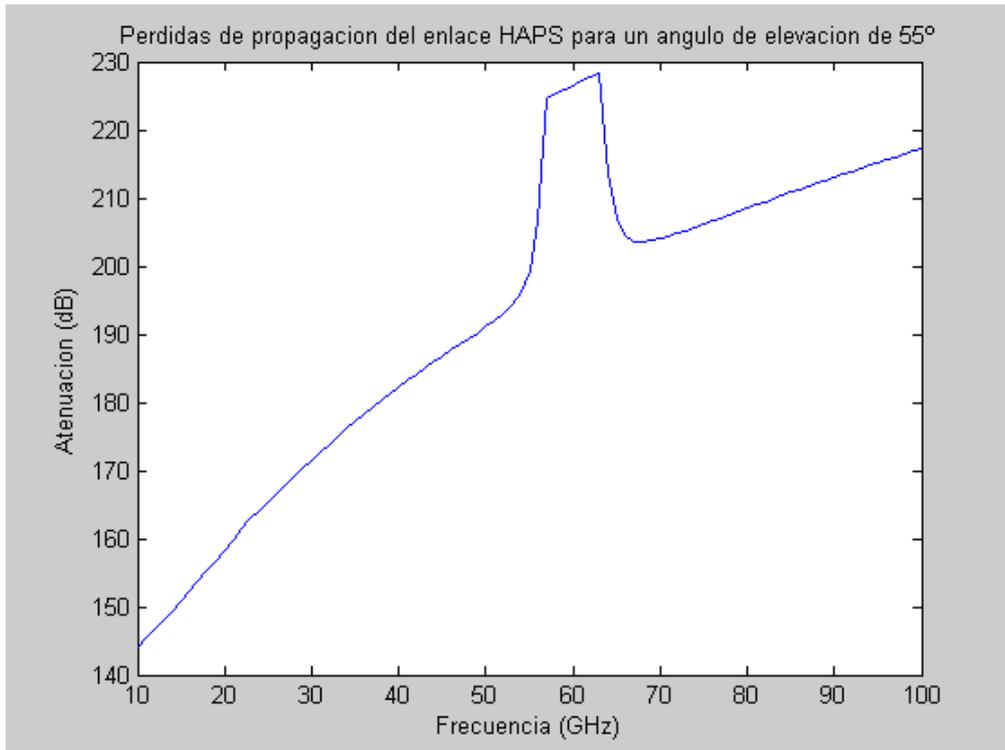


Figura 4-30: Pérdidas de propagación totales para un ángulo de elevación de 55°.

Como se observa en la gráfica vuelve a destacar un pico de atenuación en la frecuencia de resonancia del oxígeno, es decir en 60 GHz.

4. HAPS

4.9.3 Usuario 3

Este usuario tiene un ángulo de elevación de 23° con unas condiciones climáticas idénticas al apartado anterior. Como la altura de la estación HAP es de 22 km., la distancia entre emisor y receptor es ahora de 51,8 km., mayor que anteriormente lo cual va a hacer que el tercer término de la ecuación sea aún mayor y conlleve más pérdidas por la distancia además de atenuaciones mayores por cada fenómeno climático.

Para nuestro enlace HAPS si fijamos la frecuencia de trabajo a 30 GHz sustituyendo en la fórmula nos quedaría;

$$L_{TOTAL} \text{ (dB)} = 92,44 + 29,54 + 35,01 + 0,82 + 0,07 + 1,80 + 0,05 + 36,95 = \\ 196,68 \text{ dB}$$

Al igual que en el apartado anterior en el caso de que tengamos nieve en vez de lluvia habrá que sumar a la atenuación total un factor de 6 dB en vez de los 36,95 dB de la lluvia. Para esta frecuencia de trabajo en este caso tenemos menos atenuación pero si la aumentásemos, las pérdidas producidas por la nieve aumentarían exponencialmente y serían mucho mayores que para la lluvia. En el caso de que tengamos granizo habría que contar con un factor de 14,82 dB.

En la Tabla 4-8 se indican valores de atenuación total para algunas frecuencias de trabajo.

Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB)
15	163,01
30	196,68
48	226,36
60	300,67
80	258,21
100	273,18

Tabla 4-8: Pérdidas de propagación totales para el usuario 3

Evidente los valores de atenuación son más altos que en los dos casos anteriores. Esta vez la atenuación es muy parecida en todas las frecuencias a la del enlace terrestre ya que la señal tiene que recorrer una distancia muy grande. No obstante se puede observar que la diferencia se va acortando conforme aumentamos la frecuencia de trabajo hasta llegar a ser inferior.

4. HAPS

Por ejemplo para una frecuencia de 30 GHz en el enlace terrestre teníamos unas pérdidas de propagación de 191,28 dB y en el enlace HAPS obtenemos un valor de 196,68 dB. En el caso que nos atañe ahora mismo existe una diferencia de 5,4 dB por encima. Sin embargo si ahora fijamos la frecuencia de trabajo a 100 GHz en el enlace terrestre tenemos unas pérdidas de propagación de 291,16 dB y en el enlace HAPS obtenemos una atenuación de 273,18 dB. Ahora la diferencia es de 17,98 dB por debajo.

En la Figura 4-31 se puede observar la curva de las pérdidas de propagación del enlace Tierra-HAPS para un rango de frecuencias de entre 10 y 100 GHz.

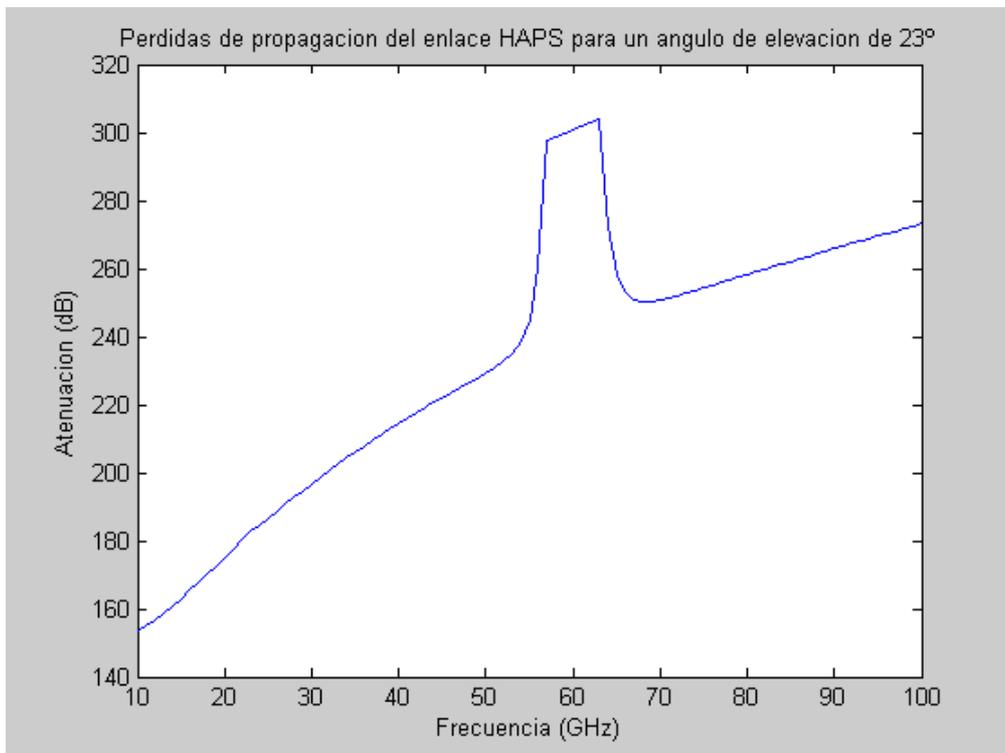


Figura 4-31: Pérdidas de propagación totales para un ángulo de elevación de 23°.

A pesar de que las pérdidas de propagación en este caso son muy parecidas a las del enlace terrestre hay que recordar que el punto deseable para la colocación de la estación HAPS es justo encima de donde se encuentren la mayoría de usuarios y es probable que no existan muchos usuarios con un ángulo de elevación de 23°. La mayoría tendrán un ángulo mayor y tendrán menos pérdidas.

La conclusión que podemos sacar es que para un enlace Tierra-Tierra si la frecuencia de trabajo supera los 10 GHz, y más para sistemas de larga distancia, el sistema se comportará muchísimo peor que un sistema Tierra-Aire. Además el HAPS permite un radio muy amplio de cobertura con unos parámetros de atenuación aceptables.

4.10 Shadowing

Un simple modelo de propagación FSL (Free Space Loss) no es suficiente para simular sistemas móviles proporcionados por HAPs en áreas urbanas o escenarios donde existan edificios u obstáculos que dificulten la línea de visión directa. Por tanto hay que añadir un factor de Shadowing dependiente del ángulo de elevación.

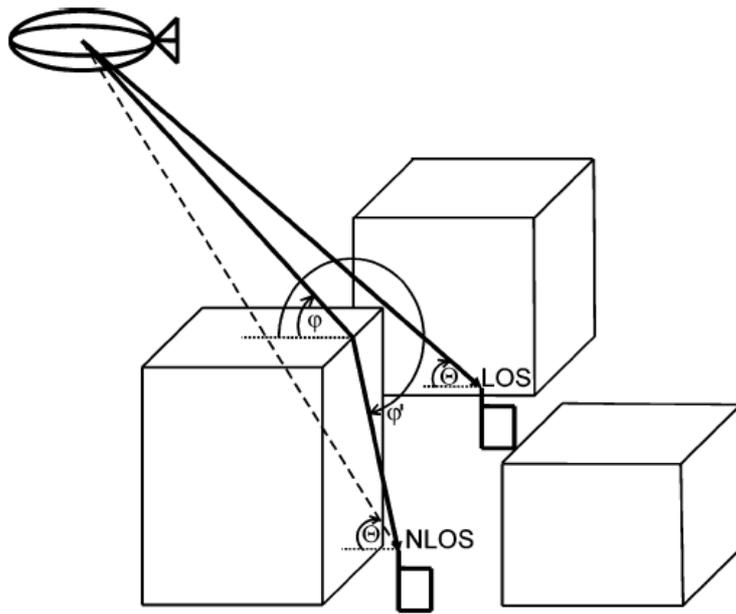


Figura 4-32: Escenario Shadowing.

Independientemente del ángulo de elevación las pérdidas por Shadowing dependerán de la zona considerada, es decir, la altura de los edificios y el grado de agrupación de los mismos, que evidentemente variará en función de las poblaciones. En nuestro proyecto estamos considerando tres zonas; urbana, suburbana y rural.

En la zona urbana debido a la actividad laboral que se presupone y la congregación de organismos, instituciones, comercios, zonas de ocio, etc., se concentra un gran número de personas por metro cuadrado. Por tanto en esta zona es donde preferentemente se localizan los edificios más altos y hay una mayor aglomeración de ellos.

Esta área, a priori, es la que más sufrirá el efecto de Shadowing porque no hay que olvidar que el parámetro fundamental sigue siendo el ángulo de elevación. Por ejemplo para un usuario situado justo debajo de la aeronave, es decir, que tenga un ángulo de 90 grados, aunque se encuentre dentro de la zona urbana el radio enlace no sufrirá pérdidas debido a este fenómeno.

4. HAPS

La caracterización de la atenuación por Shadowing para esta zona urbana se puede modelar de la siguiente manera;

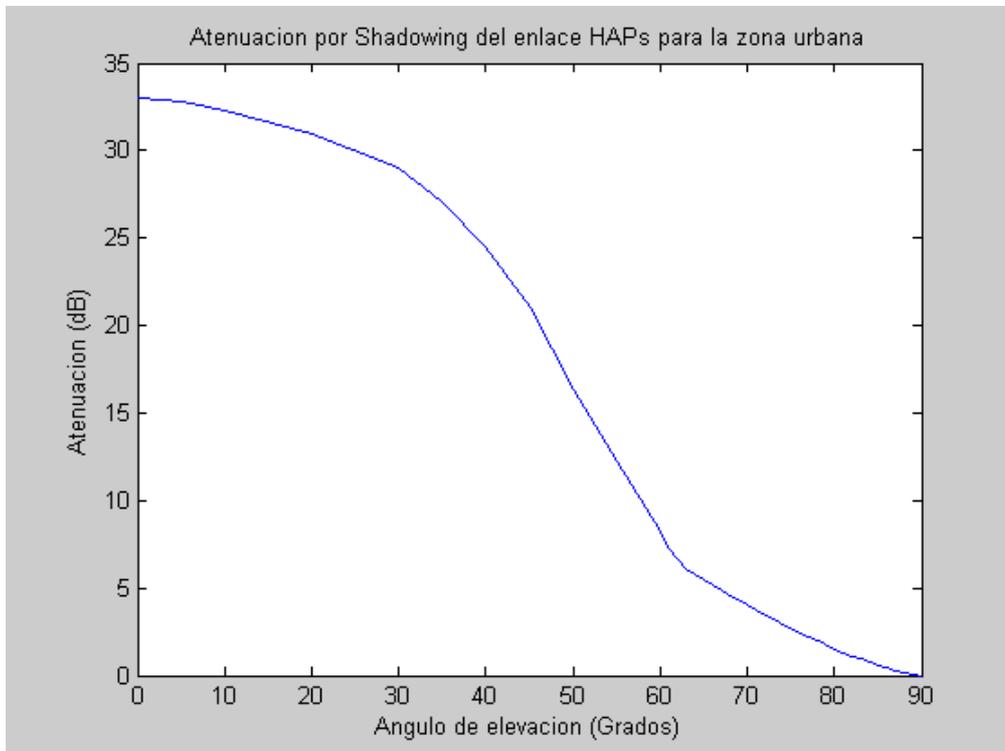


Figura 4-33: Atenuación por Shadowing en la zona urbana.

Un usuario que se encuentre en la vertical de la aeronave, es decir, tenga un ángulo de elevación de 90° no experimentará el efecto Shadowing y la atenuación por tanto debido a este efecto es 0.

Sin embargo a medida que disminuye el ángulo ésta atenuación va a aumentando. Debido a que nos encontramos en la zona urbana muchos edificios son altos por lo que cuanto más pequeño es el ángulo más probable es que uno de ellos pueda tapar la línea de visión directa con la estación HAP.

La atenuación máxima por Shadowing que sufre la señal en esta zona es de 33 dB y lógicamente ésta se produce en el caso de un ángulo de 0° (tendiendo a ese valor). En el caso de que la estación aérea esté localizada encima de esta zona urbana evidentemente no se llegará a este valor pero si el HAPS se encuentra apartado de la ciudad pero entra dentro de su radio de cobertura se puede llegar a producir un ángulo muy bajo.

4. HAPS

Vamos a ver cual sería la atenuación por Shadowing en una zona suburbana que se caracteriza por edificios más bajos que en el caso anterior y también más espaciados. Esta área se puede identificar como las afueras de una gran ciudad.

En la Figura 4-34 se puede apreciar la atenuación debida al efecto del Shadowing frente al ángulo de elevación de un usuario que se encuentre en la zona suburbana.

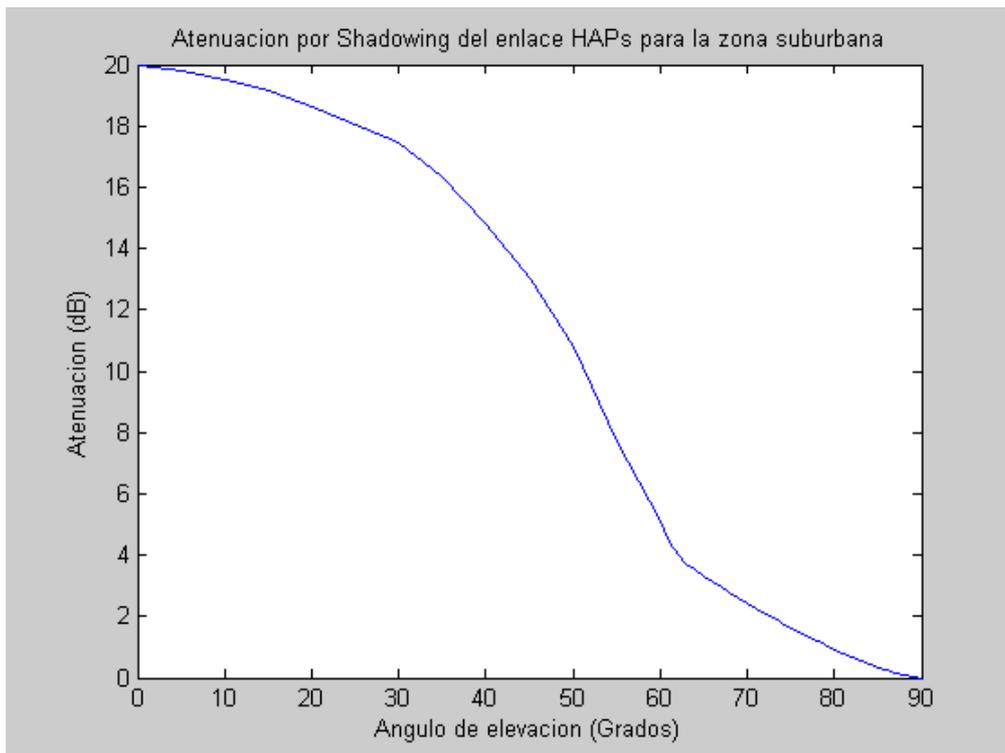


Figura 4-34: Atenuación por Shadowing en la zona suburbana.

Como se puede apreciar la curva es similar al caso anterior. Igualmente para un usuario que se encuentre debajo del HAPS no sufre atenuación por este fenómeno pero a medida que disminuye el ángulo van aumentando las pérdidas. Sin embargo los valores de atenuación son sensiblemente menores que en la zona urbana llegando a una atenuación máxima de 20 dB para un ángulo de elevación de 0°, en lugar de los 33 dB que teníamos para el mismo punto en la curva anterior.

Por último vamos a ver que ocurre en la tercera zona estudiada. La zona rural se caracteriza básicamente por tener edificios más bajos y distanciados que las dos zonas anteriores. Esta situación se puede asemejar a poblaciones que se encuentren lejos de la ciudad independientes a ella.

4. HAPS

En la Figura 4-35 se puede apreciar la atenuación debida al efecto del Shadowing frente al ángulo de elevación de un usuario que se encuentre en la zona rural.

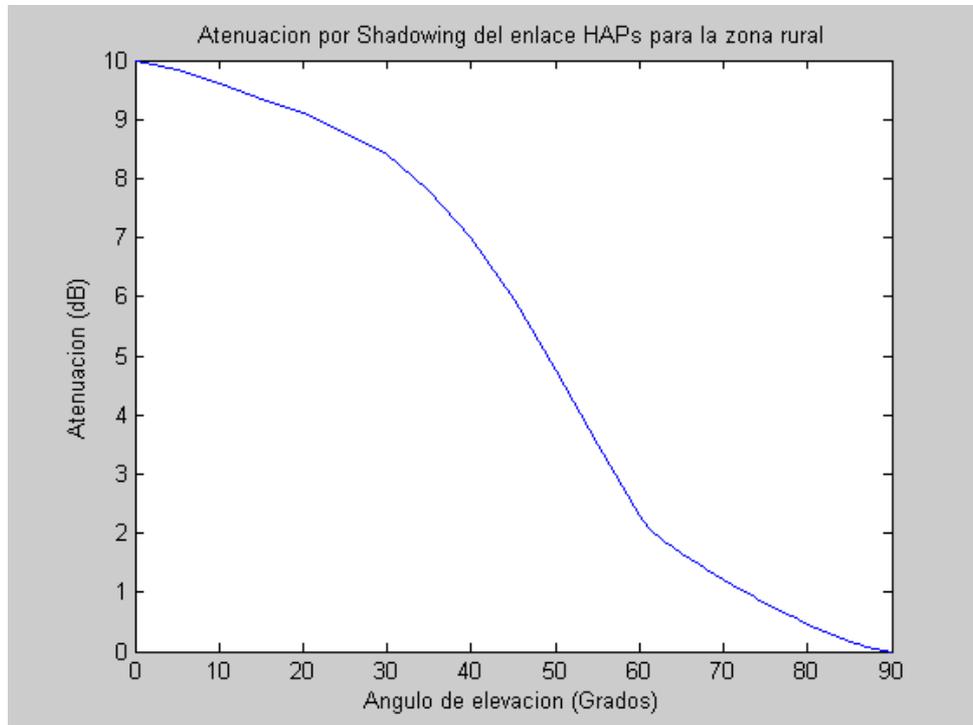


Figura 4-35: Atenuación por Shadowing en la zona rural.

Efectivamente la curva se asemeja a la zona urbana y suburbana pero los valores de atenuación son más bajos. Para un ángulo de elevación de 0° la atenuación es de 10 dB (10 dB menos que la zona suburbana y 23 dB menos que la zona urbana) y va disminuyendo según aumentamos el ángulo hasta llegar a los 0 dB en un ángulo de 90°.

Anteriormente obtuvimos las pérdidas de propagación en un espacio abierto, pero si las calculamos teniendo en cuenta que el sistema va a dar soporte a alguna de estas tres zonas hay que añadir el factor de Shadowing. Por tanto nos quedaría;

$$L_{TOTAL} \text{ (dB)} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} + L_v + L_o + L_n + L_f + L_{ll} + S \quad (4.6)$$

Siendo;

S ; atenuación por Shadowing

La estación HAP puede ser fija o móvil. Si es móvil un mismo usuario tendrá distintos ángulos de elevación en distintos momentos con lo que éste factor irá variando. Aunque sea fija, la aeronave no se queda suspendida totalmente fija sino que da vueltas con un radio pequeño alrededor de un punto fijo con lo que también variarán (aunque poco) los ángulos de elevación del mismo usuario. Vamos a ver los diferentes escenarios según la posición del HAPS.

4. HAPS

4.10.1 HAPS sobre zona urbana

El esquema general de esta situación sería el que se muestra en la Figura 4-36;

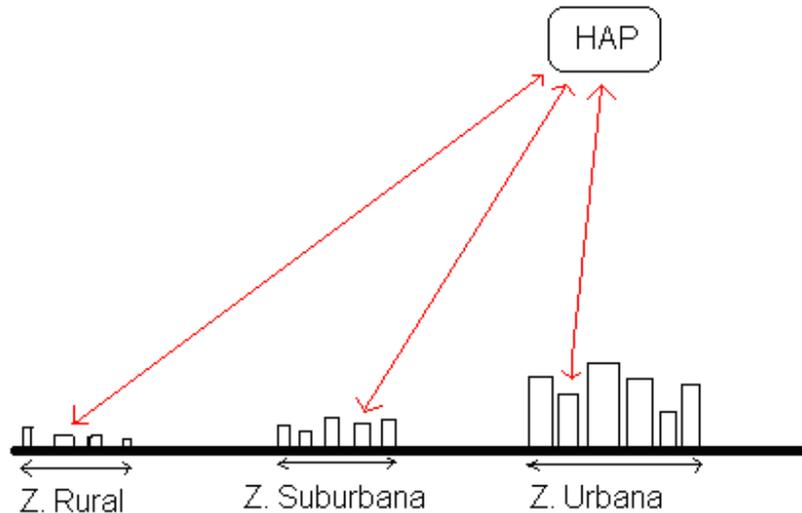


Figura 4-36: Escenario de HAPS sobre zona Urbana.

En este escenario suponemos que la aeronave se lanza para que se posicione sobre la zona urbana. Si la mayoría de usuarios a los que vamos a dar servicio se encuentran en la ciudad esta opción parece la más lógica ya que a pesar de que la atenuación por Shadowing en esta zona es la más alta, para la mayoría vamos a tener un ángulo de elevación muy alto con lo que por la curva que hemos obtenido anteriormente no existirán muchas pérdidas.

Suponiendo que el HAPS se encuentra a una altura de 22 km. sobre el centro de una ciudad vamos a considerar tres tipos de usuarios;

El usuario 1 se encuentra en la zona urbana. Por poner un caso medio suponemos que se encuentra a unos 2 km. del centro de la ciudad con lo que tendría un ángulo de elevación respecto a la aeronave de 85° .

El usuario 2 se encuentra en la zona suburbana. Podemos suponer que se encuentra a unos 15 km. del centro de la ciudad, es decir, tendría un ángulo de elevación respecto a la aeronave de 55° .

El usuario 3 se encuentra en la zona rural. Vamos a suponer que la distancia entre él y la vertical del HAPS es de 50 km. con lo que tendría un ángulo de elevación respecto a la aeronave de 23° .

4. HAPS

En la Tabla 4-9 se muestran las atenuaciones por Shadowing y las pérdidas totales de propagación fijando la frecuencia en 30 GHz para estos tres tipos de usuarios.

Tabla 4-9: Pérdidas por Shadowing y totales según ángulo de elevación con HAPS sobre la zona Urbana.

Usuario \ Pérdidas	Shadowing	Propagación (Totales)
Usuario 1 (Zona Urbana). Theta = 85°	0,58 dB	166,69 dB
Usuario 2 (Zona Suburbana). Theta = 55°	7,7 dB	179,23 dB
Usuario 3 (Zona Rural). Theta = 23°	8,9 dB	205,58 dB

Análogamente a los apartados anteriores vamos a calcular las pérdidas de propagación totales, incluyendo el factor de Shadowing de cada uno de los tres usuarios para los valores de frecuencia que hemos cogido de referencia en este proyecto.

Tabla 4-10: Pérdidas totales según ángulo de elevación con HAPS sobre la zona Urbana.

Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB) Usuario 1	Atenuación (dB) Usuario 2	Atenuación (dB) Usuario 3
15	148,54	158,51	171,91
30	166,69	179,23	205,58
48	182,27	197,05	235,16
60	213,33	234,25	309,57
80	199,12	216,20	267,11
100	206,84	224,99	282,08

Hay que mencionar que la estación HAP no tiene porque estar suspendida en el centro de la ciudad, es decir, no tiene que haber simetría. Sin embargo si como hemos dicho la mayoría de usuarios se encuentra en esta zona y están más o menos homogéneamente distribuidos, lo óptimo sería situarlo en el centro para que todos los usuarios no bajen de un cierto ángulo de elevación.

Pero la posición del HAPS puede variar dentro de esta zona adecuándose a cualquier factor para optimizar la rentabilidad del sistema.

4.10.2 HAPS sobre zona suburbana

El esquema general de esta situación sería el siguiente;

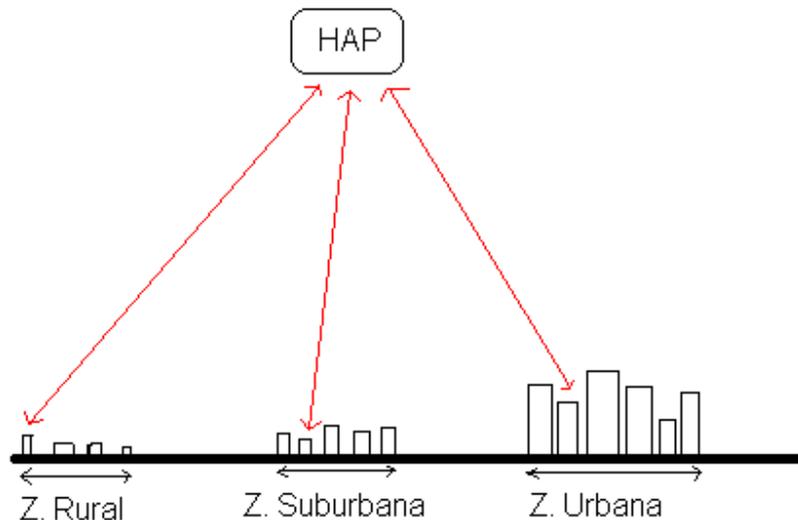


Figura 4-37: Escenario de HAPS sobre zona Suburbana.

En este escenario estamos suponiendo que la aeronave está posicionada encima de la zona suburbana. En este caso apenas van a existir pérdidas por Shadowing en la zona suburbana sin embargo la atenuación de los usuarios que se encuentren en la zona urbana van a ser más altas que en el apartado anterior.

Lo más probable es que la zona urbana sea donde haya mayor número de clientes de nuestro sistema pero la ventaja de este escenario es que la estación HAP está entre la zona urbana y la rural con lo cual los ángulos de elevación serán altos.

Todos los usuarios que se encuentren en la zona suburbana tendrán pocas pérdidas de Shadowing porque la aeronave estaría situada justo encima y los usuarios de las zonas urbana y rural al estar relativamente cerca tendrían un ángulo de elevación en ningún caso bajo.

Por tanto suponemos ahora que el HAPS se encuentra a una altura de 22 km. sobre el centro de una zona interurbana y vamos a considerar los tres tipos de usuarios anteriores pero que en esta situación cambiarán sus parámetros;

El usuario 1 se encuentra en la zona urbana. Por tanto vamos a considerar que se encuentra a una distancia de 15 Km. de la zona suburbana sobre la que se sitúa la estación aérea. Este usuario ahora dispondría de un ángulo de elevación de 55 °.

4. HAPS

El usuario 2 como se encuentra en la zona suburbana al igual que el HAPS podemos suponer que tiene un ángulo de 85° .

El usuario 3 se encuentra en la zona rural. Vamos a suponer que la distancia entre un usuario de esta zona y la vertical del HAPS es de 35 km. con lo que tendría un ángulo de elevación respecto a la aeronave de 32° .

En la Tabla 4-11 se muestran las atenuaciones por Shadowing y las pérdidas totales de propagación fijando la frecuencia en 30 GHz para estos tres tipos de usuarios.

Tabla 4-11: Pérdidas por Shadowing y totales según ángulo de elevación con HAPS sobre la zona Suburbana.

Usuario \ Pérdidas	Shadowing	Propagación (Totales)
Usuario 1 (Zona Urbana). Theta = 55°	12,20 dB	183,73 dB
Usuario 2 (Zona Suburbana). Theta = 85°	0,35 dB	166,46 dB
Usuario 3 (Zona Rural). Theta = 32°	8,16 dB	193,56 dB

Análogamente a los apartados anteriores calcularemos las pérdidas de propagación totales para cada uno de los tres usuarios y para los mismos valores de frecuencia, incluyendo la atenuación por Shadowing.

Tabla 4-12: Pérdidas totales según ángulo de elevación con HAPS sobre la zona Suburbana.

Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB) Usuario 1	Atenuación (dB) Usuario 2	Atenuación (dB) Usuario 3
15	163,01	148,31	165,87
30	183,73	166,46	193,56
48	201,55	182,04	217,69
60	238,75	213,10	273,53
80	220,70	198,89	243,55
100	229,49	206,61	255,65

Este escenario no es el más indicado si el sistema centra su servicio en una gran ciudad. Sin embargo en el caso de que haya varias zonas rurales a las que se quiera dar soporte además de la zona suburbana y urbana, puede ser una buena solución.

La conclusión es que la solución depende de la geometría del esquema y los intereses del proveedor del servicio.

4.10.3 HAPS sobre zona rural

El esquema general de este escenario sería el siguiente;

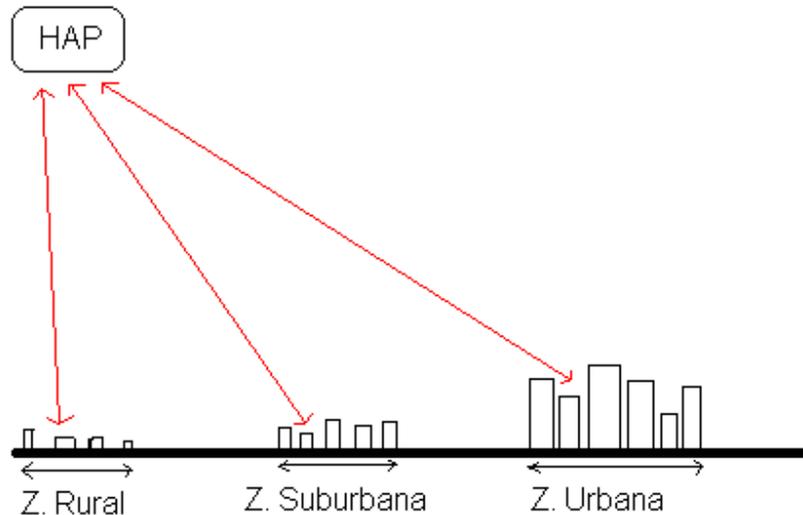


Figura 4-38: Escenario de HAPS sobre zona Rural.

En este escenario estamos suponiendo que la aeronave está posicionada sobre la zona rural. En este caso apenas van a existir pérdidas por Shadowing en esta zona ya que los edificios serán relativamente bajos y estarán muy espaciados y además el ángulo de elevación para los usuarios del área rural será muy alto.

Sin embargo la atenuación de los usuarios que se encuentren en la zona urbana va a ser muy alta debido a que se encuentran relativamente lejos de la aeronave, con un ángulo de elevación bajo y con una penalización por Shadowing muy alta lo que provocará muchas pérdidas en la propagación de la señal.

Por tanto suponiendo que el HAPS se encuentra a una altura de 22 km. sobre el centro de una zona rural vamos a considerar los tres tipos de usuarios anteriores pero cambiando sus parámetros que se dan en este escenario;

El usuario 1 se encuentra en la zona urbana. Por tanto vamos a considerar que se encuentra a una distancia de 50 Km. respecto de la proyección vertical de la aeronave, con lo cual su ángulo de elevación sería de unos 23°.

4. HAPS

El usuario 2 se sitúa de nuevo en la zona suburbana con lo cual si respetamos las distancias fijadas anteriormente este usuario se distanciaría del centro de la zona urbana en 35 Km. Su ángulo de elevación sería en este caso de 32°.

El usuario 3 se vuelve a localizar como en los apartados anteriores en la zona rural. Vamos a considerar que este usuario dispone de un ángulo de 85° ya que el HAPS se encuentra encima de su zona.

En la Tabla 4-13 se muestran las atenuaciones debido al Shadowing y las pérdidas totales de propagación fijando la frecuencia en 30 GHz para estos tres tipos de usuarios.

Tabla 4-13: Pérdidas por Shadowing y totales según ángulo de elevación con HAPS sobre la zona Rural.

Usuario \ Pérdidas	Shadowing	Propagación (Totales)
Usuario 1 (Zona Urbana). Theta = 23°	30,40 dB	227,08 dB
Usuario 2 (Zona Suburbana). Theta = 32°	17,00 dB	202,40 dB
Usuario 3 (Zona Rural). Theta = 85°	0,18 dB	166,29 dB

Análogamente a los apartados anteriores vamos a calcular las pérdidas de propagación totales para cada uno de los tres usuarios y para los mismos valores de frecuencia, incluyendo la atenuación por Shadowing.

Tabla 4-14: Pérdidas totales según ángulo de elevación con HAPS sobre la zona Rural.

Frecuencia (GHz)	Atenuación (dB) Usuario 1	Atenuación (dB) Usuario 2	Atenuación (dB) Usuario 3
15	193,41	174,71	148,14
30	227,08	202,40	166,29
48	256,76	226,53	181,87
60	331,07	282,37	212,93
80	288,61	252,39	198,72
100	303,58	264,39	206,44

Si la zona rural de la que estamos hablando es pequeña y la población es reducida esta situación es la peor solución en términos de cantidad de usuarios del sistema.

Sin embargo esta opción es interesante si hay más de una ciudad a una distancia asequible ya que se podría dar soporte a una cantidad muy grande de clientes con una calidad de servicio aceptable. Recordemos que a una altura de 22 km el HAPS puede abarcar una zona de cobertura de aproximadamente 100 km.

4.11 Disponibilidad del sistema

Los sistemas HAP, han sido propuestos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) para ofrecer servicios 3G y de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA) en las bandas de ondas milimétricas de 28/31 y 47/48 GHz.

Vamos a analizar un enlace WiMAX punto a punto entre el HAPS situado a una altura de 22 km. y una estación terrestre para tres frecuencias de operación; 13 GHz (para no interferir con los sistemas satélites), 28 GHz (banda Ka) y 48 GHz (banda SHF) con potencia de transmisión -20 dBW, -15 dBW y -10 dBW respectivamente.

Para la estación terrestre la antena debe ser directiva orientada hacia el HAPS y volvemos a suponer una ganancia fija de 25 dB. Para esto suponemos una antena “tracking” que persiga a la aeronave y el haz esté siempre en el máximo, orientado hacia ella.

Sin embargo la ganancia de la antena del HAPS es decreciente en función del ángulo de elevación tal y como se muestra a continuación;

$$G(\varphi) = \left\{ \begin{array}{ll} 34,8 - 3(\varphi / 1,57)^2 & 0^\circ \leq \varphi < 4,53^\circ \\ 9,8 & 4,53^\circ \leq \varphi \leq 5,87^\circ \\ 55,95 - 60 \log_{10}(\varphi) & 5,87^\circ < \varphi \leq 37^\circ \\ -38,2 & \varphi > 37^\circ \end{array} \right\} \quad (4.7)$$

, siendo φ el ángulo que forma la estación aérea con el receptor.

Vamos a suponer una antena multihaz para el HAPS que por sus características es la más adecuada para esta situación ya que con un solo haz se limita mucho la cobertura debido a que la ganancia sufre un descenso muy brusco con el ángulo.

Hay que destacar que cuanto mayor sea el número de haces lógicamente aumentaremos la cobertura del sistema dando servicio a usuarios que puedan encontrarse más alejados de la perpendicular de la aeronave.

4. HAPS

Vamos a estudiar la disponibilidad del sistema para cuatro ubicaciones de usuarios, con diferente ángulo de elevación; el primero a 90° respecto al HAPs, justo en el máximo del primer lóbulo con lo que la ganancia será máxima (34,8 dB), el segundo a $87,5^\circ$, en el punto medio (27,19 dB de ganancia) entre el primer y el segundo lóbulo, el tercero a 85° en el máximo del segundo lóbulo (34,8 dB), y el cuarto a $77,5^\circ$ donde la ganancia vuelve a ser de 27,19 dB.

Hay que destacar que sólo hay un único usuario con ángulo de elevación de 90° , sin embargo hay varios con un ángulo de elevación menor, concretamente los que tengan el mismo radio en una circunferencia con centro la perpendicular del HAPs.

4. HAPS

4.11.1 Enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13GHz

Independientemente de las condiciones meteorológicas que se produzcan en el momento de la transmisión siempre tendremos pérdidas por espacio libre que para este apartado serán;

Usuario 1 (ángulo de elevación de 90°)

$$L_{fs1} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(13) + 20\log_{10}(22) = 141,57 \text{ dB.}$$

Usuarios 2 (ángulo de elevación de 87,5°)

$$L_{fs2} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(13) + 20\log_{10}(22,02) = 141,58 \text{ dB.}$$

Usuarios 3 (ángulo de elevación de 85°)

$$L_{fs3} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(13) + 20\log_{10}(22,08) = 141,60 \text{ dB.}$$

Usuarios 4 (ángulo de elevación de 77,5°)

$$L_{fs3} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(13) + 20\log_{10}(22,53) = 141,77 \text{ dB.}$$

La potencia de ruido [x2] tomando un ancho de banda de 10 MHz y un factor de ruido de 6 dB sería;

$$N_0 = -114 + 10\log_{10}(B_{\text{MHz}}) + \text{NF} = -98 \text{ dBm} = -128 \text{ dBW}$$

La relación señal a ruido sin contar aspectos meteorológicos quedaría;

Usuarios 1 (ángulo de elevación de 90°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -20 \text{ dBW} + 34,8 \text{ dB} - 141,57 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 0 \text{ dB} = \mathbf{26,23 \text{ dB.}}$$

Usuarios 2 (ángulo de elevación de 87,5°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -20 \text{ dBW} + 27,19 \text{ dB} - 141,58 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 0,22 \text{ dB} = \mathbf{18,39 \text{ dB.}}$$

Usuarios 3 (ángulo de elevación de 85°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -20 \text{ dBW} + 34,8 \text{ dB} - 141,60 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 0,58 \text{ dB} = \mathbf{25,62 \text{ dB.}}$$

Usuarios 4 (ángulo de elevación de 77,5°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -20 \text{ dBW} + 27,19 \text{ dB} - 141,77 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 1,85 \text{ dB} = \mathbf{16,57 \text{ dB.}}$$

4. HAPS

4.11.1.1 Enlace ubicado en La Coruña

Con una densidad de 8 g/m^3 la altura máxima equivalente de las nubes se puede calcular de acuerdo a la expresión (4.1) y es de 3,93 km. mientras que la mínima es 0,2 km. La Coruña tiene una latitud de $43,3^\circ$, con lo que la altura efectiva de la lluvia es de 3,45 km de acuerdo a la expresión (4.3). Para la niebla se ha usado una altura máxima de 80 m.

Tabla 4-15: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13 GHz sobre la Coruña.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
22,5 %	Soleado	90 °	26,17	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,32	16 QAM / 3/4
		85 °	25,55	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,50	16 QAM / 1/2
73,66 %	Nublado	90 °	25,92	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,07	16 QAM / 1/2
		85 °	25,30	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,25	QPSK / 3/4
2,5 %	Niebla	90 °	25,91	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,06	16 QAM / 1/2
		85 °	25,29	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,24	QPSK / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	90 °	25,46	64 QAM / 3/4
		87,5°	17,62	16 QAM / 1/2
		85 °	24,85	64 QAM / 3/4
		77,5 °	15,80	QPSK / 3/4
0,2 %	Nieve	90 °	25,88	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,03	16 QAM / 1/2
		85 °	25,26	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,21	QPSK / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	90 °	24,48	64 QAM / 3/4
		87,5°	16,63	16 QAM / 1/2
		85 °	23,86	64 QAM / 2/3
		77,5 °	14,81	QPSK / 3/4
0,03 %	Granizo	90 °	22,82	64 QAM / 2/3
		87,5°	14,97	QPSK / 3/4
		85 °	22,20	16 QAM / 3/4
		77,5 °	13,15	QPSK / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	90 °	22,17	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,32	QPSK / 3/4
		85 °	21,55	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,50	QPSK / 3/4
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	90 °	17,88	16 QAM / 1/2
		87,5°	10,08	QPSK / 1/2
		85 °	17,29	16 QAM / 1/2
		77,5 °	8,22	BPSK / 1/2

4. HAPS

4.11.1.2 Enlace ubicado en Barcelona

Con una densidad de 7 g/m^3 la altura máxima equivalente de las nubes se puede calcular de acuerdo a la expresión (4.1) y es de 4,23 km. mientras que la mínima es 0,2 km. Barcelona tiene una latitud de $41,46^\circ$, con lo que la altura efectiva de la lluvia es de 3,59 km. de acuerdo a la expresión recogida en (4.3).

Tabla 4-16: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13 GHz sobre Barcelona.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
29 %	Soleado	90°	26,18	64 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	18,33	16 QAM / 3/4
		85°	25,56	64 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	16,51	16 QAM / 1/2
69,19 %	Nublado	90°	25,93	64 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	18,08	16 QAM / 1/2
		85°	25,31	64 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	16,26	QPSK / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	90°	25,49	64 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	17,64	16 QAM / 1/2
		85°	24,91	64 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	15,82	QPSK / 3/4
0,6 %	Niebla	90°	25,92	64 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	18,07	16 QAM / 1/2
		85°	25,30	64 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	16,25	QPSK / 3/4
0,1 %	Nieve	90°	25,90	64 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	18,05	16 QAM / 1/2
		85°	25,28	64 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	16,23	QPSK / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	90°	24,50	64 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	16,65	16 QAM / 1/2
		85°	23,87	64 QAM / 2/3
		$77,5^\circ$	14,83	QPSK / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	90°	22,20	16 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	14,35	QPSK / 3/4
		85°	21,58	16 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	12,53	QPSK / 3/4
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	90°	17,91	16 QAM / 1/2
		$87,5^\circ$	10,07	QPSK / 1/2
		85°	17,31	16 QAM / 1/2
		$77,5^\circ$	8,22	BPSK / 1/2
0 %	Granizo	90°	No aplicable	
		$87,5^\circ$	No aplicable	
		85°	No aplicable	
		$77,5^\circ$	No aplicable	

4. HAPS

4.11.1.3 Enlace ubicado en Madrid

Con una densidad de 4 g/m^3 la altura máxima equivalente de las nubes se puede calcular de acuerdo a la expresión (4.1) y es de 5,14 km. mientras que la mínima es 0,2 km. Madrid tiene una latitud de $40,27^\circ$, con lo que la altura efectiva de la lluvia es 3,68 km. conforme a la expresión de (4.3), y tiene una altitud de 600 metros.

Tabla 4-17: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13 GHz sobre Madrid.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
30 %	Soleado	90 °	26,20	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,36	16 QAM / 3/4
		85 °	25,59	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,54	16 QAM / 1/2
67,19 %	Nublado	90 °	25,94	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,16	16 QAM / 1/2
		85 °	25,33	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,28	QPSK / 3/4
1 %	Niebla	90 °	25,93	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,15	16 QAM / 1/2
		85 °	25,32	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,27	QPSK / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	90 °	25,52	64 QAM / 3/4
		87,5°	17,94	16 QAM / 1/2
		85 °	24,91	64 QAM / 3/4
		77,5 °	15,86	QPSK / 3/4
0,7 %	Nieve	90 °	25,91	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,13	16 QAM / 1/2
		85 °	25,30	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,25	QPSK / 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	90 °	24,53	64 QAM / 3/4
		87,5°	16,75	16 QAM / 1/2
		85 °	23,92	64 QAM / 2/3
		77,5 °	14,87	QPSK / 3/4
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	90 °	22,23	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,45	QPSK / 3/4
		85 °	21,62	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,57	QPSK / 3/4
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	90 °	18,07	16 QAM / 1/2
		87,5°	10,17	QPSK / 1/2
		85 °	17,33	16 QAM / 1/2
		77,5 °	8,26	BPSK / 1/2
0 %	Granizo	90 °	No aplicable	
		87,5°	No aplicable	
		85 °	No aplicable	
		77,5 °	No aplicable	

4. HAPS

4.11.1.4 Enlace ubicado en Sevilla

Con una densidad de 6 g/m^3 la altura máxima equivalente de las nubes se puede calcular de acuerdo a la expresión (4.1) y es de 4,54 km. mientras que la mínima es 0,2 km. Sevilla tiene una latitud de $37,41^\circ$, con lo que la altura efectiva de la lluvia es de 3,89 km. de acuerdo a (4.3).

Tabla 4-18: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13 GHz sobre Sevilla.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
33 %	Soleado	90°	26,18	64 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	18,34	16 QAM / 3/4
		85°	25,57	64 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	16,52	16 QAM / 1/2
64,59 %	Nublado	90°	25,92	64 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	18,08	16 QAM / 1/2
		85°	25,31	64 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	16,26	QPSK / 3/4
1,3 %	Niebla	90°	25,91	64 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	18,07	16 QAM / 1/2
		85°	25,30	64 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	16,25	QPSK / 3/4
1 %	Lluvia (1,5 mm/h)	90°	25,10	64 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	17,26	16 QAM / 1/2
		85°	24,49	64 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	15,44	QPSK / 3/4
0,1 %	Lluvia (12 mm/h)	90°	23,32	64 QAM / 2/3
		$87,5^\circ$	15,48	QPSK / 3/4
		85°	22,70	64 QAM / 2/3
		$77,5^\circ$	13,65	QPSK / 3/4
0,01 %	Lluvia (42 mm/h)	90°	19,14	16 QAM / 3/4
		$87,5^\circ$	11,28	QPSK / 3/4
		85°	18,50	16 QAM / 3/4
		$77,5^\circ$	9,43	QPSK / 1/2
0,001 %	Lluvia (100 mm/h)	90°	11,47	QPSK / 3/4
		$87,5^\circ$	3,59	No funciona
		85°	10,73	QPSK / 1/2
		$77,5^\circ$	1,65	No funciona
0 %	Nieve	90°		No aplicable
		$87,5^\circ$		No aplicable
		85°		No aplicable
		$77,5^\circ$		No aplicable
0 %	Granizo	90°		No aplicable
		$87,5^\circ$		No aplicable
		85°		No aplicable
		$77,5^\circ$		No aplicable

4. HAPS

4.11.1.5 Enlace ubicado en Tenerife

Con una densidad de 7 g/m^3 la altura máxima equivalente de las nubes se puede calcular de acuerdo a la expresión (4.1) y es de 4,23 km. mientras que la mínima es 0,2 km. Tenerife tiene una latitud de $28,57^\circ$, con lo que la altura efectiva de lluvia es de 3.80 km. de acuerdo a la expresión de (4.2).

Tabla 4-19: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 13 GHz sobre Tenerife.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
34 %	Soleado	90 °	26,18	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,33	16 QAM / 3/4
		85 °	25,56	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,51	16 QAM / 1/2
64,84 %	Nublado	90 °	25,93	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,08	16 QAM / 1/2
		85 °	25,31	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,26	QPSK / 3/4
1 %	Lluvia (0,6 mm/h)	90 °	25,15	64 QAM / 3/4
		87,5°	17,29	16 QAM / 1/2
		85 °	24,51	64 QAM / 3/4
		77,5 °	15,44	QPSK / 3/4
0,1 %	Lluvia (6 mm/h)	90 °	23,43	64 QAM / 2/3
		87,5°	15,61	QPSK / 3/4
		85 °	22,72	64 QAM / 2/3
		77,5 °	13,64	QPSK / 3/4
0,05 %	Niebla	90 °	25,92	64 QAM / 3/4
		87,5°	18,07	16 QAM / 1/2
		85 °	25,30	64 QAM / 3/4
		77,5 °	16,25	QPSK / 3/4
0,01 %	Lluvia (22 mm/h)	90 °	19,18	16 QAM / 3/4
		87,5°	11,31	QPSK / 3/4
		85 °	18,52	16 QAM / 3/4
		77,5 °	9,44	QPSK / 1/2
0,001 %	Lluvia (70 mm/h)	90 °	11,48	QPSK / 3/4
		87,5°	3,61	No funciona
		85 °	10,80	QPSK / 1/2
		77,5 °	1,64	No funciona
0 %	Nieve	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable
0 %	Granizo	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable

4. HAPS

4.11.2 Enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz

En este caso en el que la frecuencia de operación es de 28 GHz las pérdidas por espacio libre serían;

Usuarios 1 (ángulo de elevación de 90°)

$$L_{fs1} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(28) + 20\log_{10}(22) = 148,23 \text{ dB.}$$

Usuarios 2 (ángulo de elevación de 87,5°)

$$L_{fs2} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(28) + 20\log_{10}(22,02) = 148,24 \text{ dB.}$$

Usuarios 3 (ángulo de elevación de 85°)

$$L_{fs3} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(28) + 20\log_{10}(22,08) = 148,26 \text{ dB.}$$

Usuarios 4 (ángulo de elevación de 77,5°)

$$L_{fs3} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(28) + 20\log_{10}(22,53) = 148,44 \text{ dB.}$$

La potencia de ruido [x2] tomando un ancho de banda de 10 MHz y un factor de ruido de 6 dB sigue siendo;

$$N_0 = -114 + 10\log_{10}(B_{\text{MHz}}) + \text{NF} = -98 \text{ dBm} = -128 \text{ dBW}$$

La relación señal a ruido sin contar aspectos meteorológicos quedaría;

Usuarios 1 (ángulo de elevación de 90°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -15 \text{ dBW} + 34,8 \text{ dB} - 148,23 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 0 \text{ dB} = \mathbf{24,57 \text{ dB.}}$$

Usuarios 2 (ángulo de elevación de 87,5°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -15 \text{ dBW} + 27,19 \text{ dB} - 148,24 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 0,22 \text{ dB} = \mathbf{16,73 \text{ dB.}}$$

Usuarios 3 (ángulo de elevación de 85°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -15 \text{ dBW} + 34,8 \text{ dB} - 148,26 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 0,58 \text{ dB} = \mathbf{23,96 \text{ dB.}}$$

Usuarios 4 (ángulo de elevación de 77,5°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -15 \text{ dBW} + 27,19 \text{ dB} - 148,44 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 1,85 \text{ dB} = \mathbf{14,90 \text{ dB.}}$$

4. HAPS

4.11.2.1 Enlace ubicado en La Coruña

Tabla 4-20: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz sobre La Coruña.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
22,5 %	Soleado	90 °	24,23	64 QAM 2/3
		87,5 °	16,39	QPSK 3/4
		85 °	23,60	64 QAM 2/3
		77,5 °	14,54	QPSK 3/4
73,66 %	Nublado	90 °	23,61	64 QAM 2/3
		87,5 °	15,77	QPSK 3/4
		85 °	22,98	64 QAM 2/3
		77,5 °	13,92	QPSK 3/4
2,5 %	Niebla	90 °	23,59	64 QAM 2/3
		87,5 °	15,75	QPSK 3/4
		85 °	22,96	64 QAM 2/3
		77,5 °	13,90	QPSK 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	90 °	21,70	16 QAM 3/4
		87,5 °	13,86	QPSK 3/4
		85 °	21,06	16 QAM 3/4
		77,5 °	12,00	QPSK 3/4
0,2 %	Nieve	90 °	23,12	64 QAM 2/3
		87,5 °	15,28	QPSK 3/4
		85 °	22,48	16 QAM 3/4
		77,5 °	13,42	QPSK 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	90 °	17,53	16 QAM 1/2
		87,5 °	9,69	QPSK 1/2
		85 °	16,89	16 QAM 1/2
		77,5 °	7,82	BPSK 1/2
0,03 %	Granizo	90 °	18,08	16 QAM 1/2
		87,5 °	9,22	BPSK 1/2
		85 °	16,42	16 QAM 1/2
		77,5 °	7,35	BPSK 1/2
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	90 °	7,93	BPSK 1/2
		87,5 °	- 0,1	No funciona
		85 °	7,08	BPSK 1/2
		77,5 °	- 1,68	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	90 °	- 10,50	No funciona
		87,5 °	- 18,21	No funciona
		85 °	- 11,22	No funciona
		77,5 °	- 20,31	No funciona

4. HAPS

4.11.2.2 Enlace ubicado en Barcelona

Tabla 4-21: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz sobre Barcelona.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
29 %	Soleado	90 °	24,29	64 QAM 2/3
		87,5 °	16,44	16 QAM 1/2
		85 °	23,67	64 QAM 2/3
		77,5 °	14,60	QPSK 3/4
69,19 %	Nublado	90 °	23,65	64 QAM 2/3
		87,5 °	15,80	QPSK 3/4
		85 °	23,03	64 QAM 2/3
		77,5 °	13,95	QPSK 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	90 °	21,74	16 QAM 3/4
		87,5 °	13,88	QPSK 3/4
		85 °	21,10	16 QAM 3/4
		77,5 °	12,01	QPSK 3/4
0,6 %	Niebla	90 °	23,63	64 QAM 2/3
		87,5 °	15,78	QPSK 3/4
		85 °	23,01	64 QAM 2/3
		77,5 °	13,93	QPSK 3/4
0,1 %	Nieve	90 °	23,16	64 QAM 2/3
		87,5 °	15,31	QPSK 3/4
		85 °	22,58	16 QAM 3/4
		77,5 °	13,44	QPSK 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	90 °	17,57	16 QAM 1/2
		87,5 °	9,72	QPSK 1/2
		85 °	16,94	16 QAM 1/2
		77,5 °	7,85	BPSK 1/2
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	90 °	7,79	BPSK 1/2
		87,5 °	- 2,02	No funciona
		85 °	7,12	BPSK 1/2
		77,5 °	- 1,98	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	90 °	- 10,23	No funciona
		87,5 °	- 18,12	No funciona
		85 °	- 10,99	No funciona
		77,5 °	- 20,16	No funciona
0 %	Granizo	90 °	No aplicable	
		87,5 °	No aplicable	
		85 °	No aplicable	
		77,5 °	No aplicable	

4. HAPS

4.11.2.3 Enlace ubicado en Madrid

Tabla 4-22: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz sobre Madrid.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
30 %	Soleado	90 °	24,44	64 QAM 3/4
		87,5°	16,59	16 QAM 1/2
		85 °	23,81	64 QAM 2/3
		77,5 °	14,75	QPSK 3/4
67,19 %	Nublado	90 °	23,79	64 QAM 2/3
		87,5°	15,94	QPSK 3/4
		85 °	23,16	64 QAM 2/3
		77,5 °	14,10	QPSK 3/4
1 %	Niebla	90 °	23,77	16 QAM 3/4
		87,5°	15,92	QPSK 3/4
		85 °	23,14	16 QAM 3/4
		77,5 °	14,08	QPSK 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	90 °	21,95	16 QAM 3/4
		87,5°	14,09	QPSK 3/4
		85 °	21,30	16 QAM 3/4
		77,5 °	12,23	QPSK 3/4
0,7 %	Nieve	90 °	23,32	64 QAM 2/3
		87,5°	15,47	QPSK 3/4
		85 °	22,68	16 QAM 3/4
		77,5 °	13,62	QPSK 3/4
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	90 °	17,77	16 QAM 1/2
		87,5°	9,91	QPSK 1/2
		85 °	17,11	16 QAM 1/2
		77,5 °	8,03	BPSK 1/2
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	90 °	8,09	BPSK 1/2
		87,5°	0,05	No funciona
		85 °	7,26	BPSK 1/2
		77,5 °	- 1,81	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	90 °	- 10,03	No funciona
		87,5°	- 17,91	No funciona
		85 °	- 10,82	No funciona
		77,5 °	- 20,02	No funciona
0 %	Granizo	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable

4. HAPS

4.11.2.4 Enlace ubicado en Sevilla

Tabla 4-23: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz sobre Sevilla.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
33 %	Soleado	90 °	24,34	64 QAM 2/3
		87,5°	16,50	16 QAM 1/2
		85 °	23,73	64 QAM 2/3
		77,5 °	14,66	QPSK 3/4
64,59 %	Nublado	90 °	23,31	64 QAM 2/3
		87,5°	15,85	QPSK 3/4
		85 °	23,08	64 QAM 2/3
		77,5 °	14,01	QPSK 3/4
1,3 %	Niebla	90 °	23,30	64 QAM 2/3
		87,5°	15,84	QPSK 3/4
		85 °	23,07	64 QAM 2/3
		77,5 °	14,00	QPSK 3/4
1 %	Lluvia (1,5 mm/h)	90 °	20,01	16 QAM 3/4
		87,5°	12,54	QPSK 3/4
		85 °	19,77	16 QAM 3/4
		77,5 °	10,69	QPSK 1/2
0,1 %	Lluvia (12 mm/h)	90 °	12,79	QPSK 3/4
		87,5°	5,30	No funciona
		85 °	12,50	QPSK 3/4
		77,5 °	3,40	No funciona
0,01 %	Lluvia (42 mm/h)	90 °	- 4,13	No funciona
		87,5°	- 11,69	No funciona
		85 °	- 4,53	No funciona
		77,5 °	- 13,67	No funciona
0,001 %	Lluvia (100 mm/h)	90 °	- 35,81	No funciona
		87,5°	- 43,45	No funciona
		85 °	- 36,25	No funciona
		77,5 °	- 45,38	No funciona
0 %	Nieve	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable
0 %	Granizo	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable

4. HAPS

4.11.2.5 Enlace ubicado en Tenerife

Tabla 4-24: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 28 GHz sobre Tenerife.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
34 %	Soleado	90 °	24,29	64 QAM 2/3
		87,5°	16,44	16 QAM 1/2
		85 °	23,67	64 QAM 2/3
		77,5 °	14,60	QPSK 3/4
64,84 %	Nublado	90 °	23,65	64 QAM 2/3
		87,5°	15,80	QPSK 3/4
		85 °	23,03	64 QAM 2/3
		77,5 °	13,95	QPSK 3/4
1 %	Lluvia (0,6 mm/h)	90 °	20,36	16 QAM 3/4
		87,5°	12,50	QPSK 3/4
		85 °	19,71	16 QAM 3/4
		77,5 °	10,61	QPSK 1/2
0,1 %	Lluvia (6 mm/h)	90 °	13,16	QPSK 3/4
		87,5°	5,26	No funciona
		85 °	12,45	QPSK 3/4
		77,5 °	3,34	No funciona
0,05 %	Niebla	90 °	23,63	64 QAM 2/3
		87,5°	15,78	QPSK 3/4
		85 °	23,01	64 QAM 2/3
		77,5 °	13,93	QPSK 3/4
0,01 %	Lluvia (22 mm/h)	90 °	- 3,86	No funciona
		87,5°	- 11,84	No funciona
		85 °	- 4,66	No funciona
		77,5 °	- 13,78	No funciona
0,001 %	Lluvia (70 mm/h)	90 °	- 35,57	No funciona
		87,5°	- 43,46	No funciona
		85 °	- 36,27	No funciona
		77,5 °	- 45,43	No funciona
0 %	Nieve	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable
0 %	Granizo	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable

4. HAPS

4.11.3 Enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz

En este caso en el que la frecuencia de operación es de 48 GHz las pérdidas por espacio libre serían;

Usuarios 1 (ángulo de elevación de 90°)

$$L_{fs1} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(48) + 20\log_{10}(22) = 152,91 \text{ dB.}$$

Usuarios 2 (ángulo de elevación de 87,5°)

$$L_{fs2} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(48) + 20\log_{10}(22,02) = 152,92 \text{ dB.}$$

Usuarios 3 (ángulo de elevación de 85°)

$$L_{fs3} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(48) + 20\log_{10}(22,08) = 152,94 \text{ dB.}$$

Usuarios 4 (ángulo de elevación de 77,5°)

$$L_{fs3} = 92,44 + 20\log_{10}(f)_{\text{GHz}} + 20\log_{10}(d)_{\text{km}} = 92,44 + 20\log_{10}(48) + 20\log_{10}(22,53) = 153,12 \text{ dB.}$$

La potencia de ruido [x2] tomando un ancho de banda de 10 MHz y un factor de ruido de 6 dB sigue siendo;

$$N_0 = -114 + 10\log_{10}(B_{\text{MHz}}) + \text{NF} = -98 \text{ dBm} = -128 \text{ dBW}$$

La relación señal a ruido para el canal descendente (incluyendo “Shadowing”) sin contar aspectos meteorológicos quedaría;

Usuarios 1 (ángulo de elevación de 90°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -10 \text{ dBW} + 34,8 \text{ dB} - 152,91 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 0 \text{ dB} = \mathbf{24,89 \text{ dB.}}$$

Usuarios 2 (ángulo de elevación de 87,5°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -10 \text{ dBW} + 27,19 \text{ dB} - 152,92 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 0,22 \text{ dB} = \mathbf{17,05 \text{ dB.}}$$

Usuarios 3 (ángulo de elevación de 85°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -10 \text{ dBW} + 34,8 \text{ dB} - 152,94 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 0,58 \text{ dB} = \mathbf{24,28 \text{ dB.}}$$

Usuarios 4 (ángulo de elevación de 77,5°)

$$\text{SNR} = P_{\text{tx}} + G_{\text{tx}} - L + G_{\text{rx}} - N_0 - S = -10 \text{ dBW} + 27,19 \text{ dB} - 153,12 \text{ dB} + 25 - (-128 \text{ dBW}) - 1,85 \text{ dB} = \mathbf{15,22 \text{ dB.}}$$

4. HAPS

4.11.2.1 Enlace ubicado en La Coruña

Tabla 4-25: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz sobre La Coruña.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
22,5 %	Soleado	90 °	23,98	64 QAM / 2/3
		87,5°	16,14	QPSK / 3/4
		85 °	23,34	64 QAM / 2/3
		77,5 °	14,28	QPSK / 3/4
73,66 %	Nublado	90 °	22,18	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,34	QPSK / 3/4
		85 °	21,54	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,48	QPSK / 3/4
2,5 %	Niebla	90 °	22,13	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,29	QPSK / 3/4
		85 °	21,49	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,43	QPSK / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	90 °	18,88	16 QAM / 3/4
		87,5°	10,99	QPSK / 1/2
		85 °	18,17	16 QAM / 1/2
		77,5 °	10,90	QPSK / 1/2
0,2 %	Nieve	90 °	16,44	16 QAM / 1/2
		87,5°	8,59	BPSK / 1/2
		85 °	15,77	QPSK / 3/4
		77,5 °	6,57	BPSK / 1/2
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	90 °	11,53	QPSK / 3/4
		87,5°	3,65	No funciona
		85 °	10,83	QPSK / 1/2
		77,5 °	1,74	No funciona
0,03 %	Granizo	90 °	11,16	QPSK / 1/2
		87,5°	3,30	No funciona
		85 °	10,49	QPSK / 1/2
		77,5 °	1,42	No funciona
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	90 °	- 5,74	No funciona
		87,5°	- 13,65	No funciona
		85 °	- 6,47	No funciona
		77,5 °	- 15,28	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	90 °	- 36,46	No funciona
		87,5°	- 44,64	No funciona
		85 °	- 38,54	No funciona
		77,5 °	- 46,88	No funciona

4. HAPS

4.11.2.2 Enlace ubicado en Barcelona

Tabla 4-26: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz sobre Barcelona.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
29 %	Soleado	90 °	24,12	64 QAM / 2/3
		87,5°	16,28	QPSK / 3/4
		85 °	23,50	64 QAM / 2/3
		77,5 °	14,42	QPSK / 3/4
69,19 %	Nublado	90 °	22,27	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,43	QPSK / 3/4
		85 °	21,65	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,56	QPSK / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	90 °	18,94	16 QAM / 3/4
		87,5°	11,09	QPSK / 1/2
		85 °	18,30	16 QAM / 3/4
		77,5 °	9,20	BPSK / 1/2
0,6 %	Niebla	90 °	22,22	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,37	QPSK / 3/4
		85 °	21,15	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,51	QPSK / 3/4
0,1 %	Nieve	90 °	11,26	QPSK / 3/4
		87,5°	3,40	No funciona
		85 °	10,60	QPSK / 1/2
		77,5 °	1,49	No funciona
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	90 °	11,58	QPSK / 3/4
		87,5°	3,80	No funciona
		85 °	10,94	QPSK / 1/2
		77,5 °	1,83	No funciona
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	90 °	- 5,69	No funciona
		87,5°	- 13,56	No funciona
		85 °	- 6,36	No funciona
		77,5 °	- 15,48	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	90 °	- 36,34	No funciona
		87,5°	- 44,63	No funciona
		85 °	- 38,13	No funciona
		77,5 °	- 46,48	No funciona
0 %	Granizo	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable

4. HAPS

4.11.2.3 Enlace ubicado en Madrid

Tabla 4-27: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz sobre Madrid.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
30 %	Soleado	90 °	24,43	64 QAM / 3/4
		87,5°	16,59	16 QAM / 1/2
		85 °	23,82	64 QAM / 2/3
		77,5 °	14,75	QPSK / 3/4
67,19 %	Nublado	90 °	22,55	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,71	QPSK / 3/4
		85 °	21,94	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,87	QPSK / 3/4
1 %	Niebla	90 °	22,50	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,66	QPSK / 1/2
		85 °	21,89	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,82	QPSK / 3/4
1 %	Lluvia (2 mm/h)	90 °	19,22	16 QAM / 3/4
		87,5°	11,36	QPSK / 3/4
		85 °	18,58	16 QAM / 3/4
		77,5 °	9,49	QPSK / 1/2
0,7 %	Nieve	90 °	17,09	16 QAM / 1/2
		87,5°	9,22	BPSK / 1/2
		85 °	16,41	16 QAM / 1/2
		77,5 °	7,28	BPSK / 1/2
0,1 %	Lluvia (10 mm/h)	90 °	11,99	QPSK / 3/4
		87,5°	4,09	No funciona
		85 °	11,25	QPSK / 3/4
		77,5 °	2,13	No funciona
0,01 %	Lluvia (32 mm/h)	90 °	- 4,99	No funciona
		87,5°	- 12,94	No funciona
		85 °	- 5,87	No funciona
		77,5 °	- 15,01	No funciona
0,001 %	Lluvia (83 mm/h)	90 °	- 35,87	No funciona
		87,5°	- 43,83	No funciona
		85 °	- 36,77	No funciona
		77,5 °	- 46,36	No funciona
0 %	Granizo	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable

4. HAPS

4.11.2.4 Enlace ubicado en Sevilla

Tabla 4-28: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz sobre Sevilla.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
33 %	Soleado	90 °	24,24	64 QAM / 2/3
		87,5°	16,40	16 QAM / 1/2
		85 °	23,63	64 QAM / 2/3
		77,5 °	14,57	QPSK / 3/4
64,59 %	Nublado	90 °	22,35	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,51	QPSK / 3/4
		85 °	21,74	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,69	QPSK / 3/4
1,3 %	Niebla	90 °	22,30	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,26	QPSK / 3/4
		85 °	21,69	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,64	QPSK / 3/4
1 %	Lluvia (1,5 mm/h)	90 °	16,74	16 QAM / 1/2
		87,5°	8,98	BPSK / 1/2
		85 °	16,18	QPSK / 3/4
		77,5 °	7,10	BPSK / 1/2
0,1 %	Lluvia (12 mm/h)	90 °	4,37	No funciona
		87,5°	- 3,49	No funciona
		85 °	3,73	No funciona
		77,5 °	- 5,34	No funciona
0,01 %	Lluvia (42 mm/h)	90 °	- 24,66	No funciona
		87,5°	- 32,52	No funciona
		85 °	- 25,55	No funciona
		77,5 °	- 34,98	No funciona
0,001 %	Lluvia (100 mm/h)	90 °	- 77,63	No funciona
		87,5°	- 85,63	No funciona
		85 °	- 78,90	No funciona
		77,5 °	- 88,29	No funciona
0 %	Nieve	90 °	No aplicable	
		87,5°	No aplicable	
		85 °	No aplicable	
		77,5 °	No aplicable	
0 %	Granizo	90 °	No aplicable	
		87,5°	No aplicable	
		85 °	No aplicable	
		77,5 °	No aplicable	

4. HAPS

4.11.2.5 Enlace ubicado en Tenerife

Tabla 4-29: Modulación y FEC para un enlace WiMAX HAPS-Terrestre en 48 GHz sobre La Tenerife.

Porcentaje tiempo	Fenómeno	Ángulo elevación	SNR (dB)	Modulación / FEC
34 %	Soleado	90 °	24,11	64 QAM / 2/3
		87,5°	16,27	QPSK / 3/4
		85 °	23,50	64 QAM / 2/3
		77,5 °	14,42	QPSK / 3/4
64,84 %	Nublado	90 °	22,26	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,42	QPSK / 3/4
		85 °	21,65	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,56	QPSK / 3/4
1 %	Lluvia (0,6 mm/h)	90 °	16,81	16 QAM / 1/2
		87,5°	8,70	BPSK / 1/2
		85 °	15,97	QPSK / 3/4
		77,5 °	6,84	BPSK / 1/2
0,1 %	Lluvia (6 mm/h)	90 °	4,61	No funciona
		87,5°	- 3,41	No funciona
		85 °	3,64	No funciona
		77,5 °	- 5,56	No funciona
0,05 %	Niebla	90 °	22,22	16 QAM / 3/4
		87,5°	14,28	QPSK / 3/4
		85 °	21,61	16 QAM / 3/4
		77,5 °	12,52	QPSK / 3/4
0,01 %	Lluvia (22 mm/h)	90 °	- 23,76	No funciona
		87,5°	- 31,96	No funciona
		85 °	- 25,31	No funciona
		77,5 °	- 34,59	No funciona
0,001 %	Lluvia (70 mm/h)	90 °	- 76,78	No funciona
		87,5°	- 84,99	No funciona
		85 °	- 78,29	No funciona
		77,5 °	- 87,68	No funciona
0 %	Nieve	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable
0 %	Granizo	90 °		No aplicable
		87,5°		No aplicable
		85 °		No aplicable
		77,5 °		No aplicable

Capítulo 5

CONCLUSIONES

5. Conclusiones

En este apartado podemos destacar que para frecuencias de operación menores que 10 GHz los fenómenos climatológicos tienen una influencia despreciable en términos de atenuación en la trayectoria de un enlace de radiocomunicaciones. Sin embargo a partir de 10 GHz fenómenos tales como las partículas de vapor de agua u oxígeno suspendidas en la atmósfera, las nubes, la niebla, la lluvia, la nieve o el granizo comienzan a cobrar mucha importancia. A medida que aumentamos la frecuencia de trabajo las atenuaciones producidas por estos efectos se ven incrementadas al igual que al aumentar la distancia de enlace.

Parámetros como son la densidad de agua por unidad de volumen, la temperatura ambiente o la polarización de las ondas electromagnéticas determinan el mayor o menor efecto de estos fenómenos, así como la zona geográfica donde se sitúe el sistema, su latitud y su frecuencia de lluvia. Por ejemplo para España que es el objetivo de estudio de este proyecto en Sevilla llueve en menos ocasiones que en Madrid, sin embargo cuando llueve suele hacerlo con más intensidad, lo cual tiene un efecto más negativo sobre la radiocomunicación.

Como hemos podido comprobar en un radioenlace terrestre a parte de las pérdidas de propagación propias de la distancia, durante toda la trayectoria sufriremos pérdidas por los fenómenos atmosféricos. Tanto el vapor de agua como el oxígeno se encuentran siempre presentes en cualquiera de estos escenarios. Las nubes, la niebla, la lluvia, el granizo y la nieve aparecen con una cierta probabilidad pero cuando ocurra alguno de ellos lo sufriremos durante toda la distancia de enlace. Algo que no ocurre con los HAPS.

Muchos de los fenómenos aquí estudiados (nubes (medias y bajas), niebla, lluvia, nieve y granizo) tienen una altura máxima de unos 3 o 4 Km., con lo que en el caso del HAPS al estar 7 veces más alto las ondas milimétricas interactuarán con ellos en un tramo pequeño de la trayectoria entre emisor y receptor, cosa que no ocurre con los enlaces terrestres que sufren atenuación durante toda la trayectoria. Por ejemplo la lluvia en zonas pobladas se origina de media aproximadamente a los 3 Km. de altitud en la atmósfera terrestre y los HAPS vuelan a un mínimo de 21 Km., lo que implica que si tenemos un ángulo de elevación de 70 grados, el 14 % del trayecto de la señal LOS del HAPS es afectado por el agua de la lluvia. En cambio la señal del sistema terrestre es afectada en su totalidad.

Esta característica es muy importante en este proyecto ya que estamos trabajando con ondas milimétricas. A partir de 10 GHz la longitud de onda es muy pequeña, comparable al diámetro de las partículas suspendidas en el aire provocadas por todos estos fenómenos meteorológicos y como resultado va a hacer que la señal de radio se vea fuertemente atenuada. Este efecto no es tan significativo en frecuencias inferiores.

Otra ventaja de los HAPS es su cobertura. En este proyecto los escenarios se han enfocado con la aeronave situada sobre una ciudad basándose en el mayor número de usuarios posibles por área y en minimizar el efecto del Shadowing.

REFERENCIAS

- [1]. Altshuler, E. A., & Marr, R. A. “*Cloud attenuation at Millimeter Wavelengths*”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 37, N° 11, pp. 1473-1479, 1989
- [2]. Roger L. Freeman, “*Radio System Design for Telecommunications*”, Third Edition, Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing, 2007.
- [3]. José María Hernando Rábanos, “*Transmisión por radio*”, 6ª edición, Editorial Universitaria Ramón Areces, 2008.
- [4]. Alejandro Aragón-Zabala, José Luis Cuevas-Ruiz, José Antonio Delgado-Penín, “*High-Altitude Platforms for Wireless Communications*”, Wiley. 2008.
- [5]. Tutiempo Network S.L. www.tutiempo.net
- [6]. Agencia Estatal de Meteorología. www.aemet.es
- [7]. Sachin Kuman Agrawal, Parul Garg, “*Calculation of Chanel Capacity Considering the Effect of Different Seasons for Higher Altitude Platform System*”, Springer Science+Business Media, LLC, 2009.
- [8]. Steve Nesbitt. Atmospheric Sciences. University of Illinois at urbana-champaign, “*Radar Meteorology. Attenuation*”. 2007.
- [9]. Louis J. Battan, “*Radar Attenuation by Wet Ice Spheres*”, Institute of Atmospheric Physycs, The University of Arizona, Tucson, 1971.
- [10]. Ahson, Syed, “*WIMAX: Standards and Security*”, BocaRaton: CRC Press, 2008
- [11]. Andrews, Jeffrey , “*Fundamentals of WiMAX understanding broadband wireless networking*”, 2007.
- [12]. Ahson, Syed, “*WiMAX Technologies, Performances Analysis, and QoS*”, BocaRaton: CRC Press, 2008.

BIBLIOGRAFÍA

- Ángel Cardama Aznar, Lluís Jofre Roca, Juan Manuel Rius Casals, Jordi Romeu Robert, Sebastián Blanch Boris, Miguel Ferrando Bataller: “*Antenas*”, 1998.
- Roger Lhermitte, “*Attenuation and Scattering of Millimeter Wavelength Radiation by Clouds and Precipitation*”, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1989.
- Chen, Chuan Cheng, “*Attenuation of electromagnetic radiation by haze, fog, clouds and rain*”, Rand. 1975.
- Zhang, Yan, “*WIMAX network planning and optimization*”, 1ª ed. BocaRaton: CRC Press, 2009.
- CAPANINA Project: “www.capanina.org”.York Electronics Centre, Universidad de Cataluña, Politécnico de Torino, Universidad de Budapest, BTEExact Technologies, German Aerospace Centre (DLR), Japan Stratosphere Communications (JSC).
- Vaclav Kvicera and Martin Grabner, “*Rain Attenuation on Terrestrial Wireless Links in the mm Frequency Bands*”, Czech Meteorology Institute, 2010.
- Kumar, Amitabh, “*Mobile broadcasting with WIMAX principles, technology and applications.*”.Focal Press, 2008.
- H. Sizun, “*Radio wave Propagation for Telecommunication Aplications*”, Springer, 2005.
- Loutfi Nuaymi, “*WIMAX: Technology for Broadband Wireless Access*”, Wiley, 2007.
- A. M. Osharin, “*Simulation of Attenuation of Millimeter Radio Waves in Dry Snowfalls*”, Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. 41, N° 4, pp. 295-300, 1998.

GLOSARIO

HAPs	High Altitude Platforms
HAPS	High Altitude Platform Station
LOS	Line of Sight
PSK	Phase Shift Keying
SNR	Signal Noise Rate
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
QoS	Quality of Service
BPSK	Binary Phase Shift Keying
ARQ	Automatic Repeat Request
BER	Bit Error Rate
SINR	Signal Interference Noise Rate
LEO	Low Earth Orbit
ITU	International Telecommunication Union
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
TDD	Time Division Duplex
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
ISDN	Integrated Services Digital Network

Glosario

HALE	High Altitude Long Endurance
HAVE	High Altitude Very Long Endurance
ATM	Asynchronous Transfer Mode
TDM	Time Division Multiplexing
RTCP	Real Time Control Protocol
FSL	Free Space Loss
FEC	Forward Error Correction
BWA	Broadband Wireless Access
AMC	Adaptative Modulation and Coding
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation

Presupuesto

PRESUPUESTO

1. Ejecución Material

• Ordenador personal.....	1.350 €
• Software.....	800 €
• Impresora laser.....	300 €
• Material de oficina.....	150 €
Total de ejecución Material.....	2.600 €

2. Gastos generales

• 18 % sobre Ejecución Material.....	468 €
--------------------------------------	-------

3. Beneficio Industrial

• 6 % sobre Ejecución Material.....	156 €
-------------------------------------	-------

4. Honorarios Proyecto

• 650 horas a 20 € / hora.....	13.000 €
--------------------------------	----------

5. Material fungible

• Gastos de impresión.....	75 €
• Encuadernación.....	25 €
Total material fungible.....	100 €

6. Subtotal del presupuesto

• Subtotal Presupuesto.....	16.324 €
-----------------------------	----------

7. I.V.A. aplicable

• 18% Subtotal Presupuesto.....	2.938,32 €
---------------------------------	------------

8. Total presupuesto

Total Presupuesto.....	19.262,32 €
------------------------	-------------

Madrid, Marzo de 2011
El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Ricardo Valdivia Pérez
Ingeniero Superior de Telecomunicación

PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un estudio de los fenómenos que afectan a la capacidad de los sistemas HAPs y Terrestres en diferentes escenarios de comunicaciones. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

Pliego de condiciones

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

Pliego de condiciones

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

Pliego de condiciones

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

Pliego de condiciones

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.