

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de  
Telecomunicación

Simulación de comunicaciones vía satélite con HTZ  
Communications

Autor: Rubén Varo García

Tutor: Rafael Boloix Tortosa

Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

# **Simulación de comunicaciones vía satélite con HTZ Communications**

Autor:

Rubén Varo García

Tutor:

Rafael Boloix Tortosa

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado: Simulación de comunicaciones vía satélite con HTZ Communications

Autor: Rubén Varo García

Tutor: Rafael Boloix Tortosa

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

Quisiera agradecer a mi tutor, Rafael Boloix, por confiar en mí para la realización de este proyecto y por toda la ayuda prestada durante el desarrollo del mismo, a todos mis profesores y profesoras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla por la formación recibida, y a la Universidad de Sevilla por haberme permitido formar parte de la misma durante estos últimos cuatro años.

*Rubén Varo García*

*Sevilla, 2021*





# Resumen

---

Las comunicaciones vía satélite juegan un papel fundamental hoy en día, constituyendo una manera eficaz y rápida de comunicar lugares muy alejados o que inicialmente eran inaccesibles. Son numerosos los usos que nos ofrece esta tecnología, como puede ser internet por satélite, televisión por satélite, etc. o aplicaciones de geolocalización como GPS o Galileo.

Este trabajo de fin de grado tiene por objeto analizar el potencial que ofrece el programa HTZ Communications sobre las comunicaciones vía satélite, explicando sus distintas funciones: balances de enlace, análisis de interferencias, estudios de visibilidad y mapas de cobertura, entre otras, y presentando simulaciones a modo de ejemplo.



# Índice

---

Agradecimientos

Resumen

Contenidos

<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. <i>Motivación</i> .....	2
1.2. <i>Objetivos del proyecto</i> .....	2
1.3. <i>Estructura del proyecto</i> .....	2
<b>2. Fundamentos teóricos</b> .....	<b>4</b>
2.1. <i>Configuración de un sistema de comunicaciones vía satélite</i> .....	4
2.2. <i>Tipos de órbitas</i> .....	17
<b>3. Base de datos de satélites</b> .....	<b>21</b>
3.1. <i>Creación de satélites en la base de datos de satélites</i> .....	21
3.2. <i>Descripción de la base de datos de satélites</i> .....	27
3.3. <i>Cálculos desde la base de datos de satélites</i> .....	28
3.3.1. <i>Análisis de cobertura</i> .....	28
3.3.2. <i>Mapa de ganancia</i> .....	33
3.3.3. <i>Interferencia en el enlace descendente</i> .....	34
3.3.4. <i>Interferencia en el enlace ascendente</i> .....	40
<b>4. Estaciones terrenas</b> .....	<b>41</b>
4.1. <i>Creación de estaciones terrenas</i> .....	41
<b>5. Cálculos desde el menú de satélite</b> .....	<b>46</b>
5.1. <i>Satélite a estación (P2P)</i> .....	46
5.2. <i>Estación a satélite (P2P)</i> .....	50
5.3. <i>Constelación de satélites a estación</i> .....	51
5.4. <i>Mapa C/I de satélite</i> .....	55
5.5. <i>Mapa PFD de satélite</i> .....	59
<b>6. Base de datos TLE</b> .....	<b>61</b>
6.1. <i>Introducción al formato TLE</i> .....	61
6.2. <i>Análisis de visibilidad</i> .....	66
<b>7. Conclusiones y líneas futuras de desarrollo</b> .....	<b>68</b>
7.1. <i>Conclusiones</i> .....	68
7.2. <i>Líneas futuras de desarrollo</i> .....	68
<b>Referencias</b> .....	<b>70</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>72</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>74</b>



# 1. INTRODUCCIÓN

---

La aparición de los sistemas de comunicaciones por satélite supuso un importante progreso para el mundo de las comunicaciones, ofreciendo oportunidades y servicios que hasta ese momento eran impensables. Con ellos se consiguió comunicar lugares muy alejados o que previamente eran inaccesibles, y han conseguido reformular servicios como la telefonía, la televisión o el Internet.

Esta tecnología presenta multitud de ventajas frente a las comunicaciones terrestres tradicionales. Los sistemas de satélite pueden proporcionar cobertura a lugares remotos donde falla el sistema terrestre, por ejemplo en entornos montañosos. Además, las antenas de comunicaciones vía satélite poseen gran flexibilidad ya que pueden diseñarse para proporcionar cobertura a áreas de servicio tan pequeñas como una ciudad o tan grandes como un país.

Aunque la fabricación del satélite pueda resultar costosa, este posee gran rentabilidad al tener un costo operativo promedio bajo y funcionar durante años (15 años aproximadamente). Los costos del satélite son independientes de la distancia de los puntos que queramos comunicar, mientras que los costos de la red terrestre son proporcionales a la distancia. Asimismo, estos sistemas tienen una instalación relativamente rápida ya que, una vez que el satélite está en posición, se puede instalar la estación terrena y se puede establecer la comunicación en días u horas. En contraposición, los circuitos terrestres requieren instalaciones que requieren mucho tiempo y hacen que sean mucho menos rentables. También debemos tener en cuenta que el satélite en sí es un solo repetidor, mientras que los enlaces terrestres requieren de varios repetidores para compensar las pérdidas de trayectoria, así como de la ubicación de las antenas a alturas específicas para superar los obstáculos.

Las soluciones satelitales son altamente flexibles y pueden operar de manera independiente o como parte de una red más grande. Esta tecnología cuenta con una multitud de aplicaciones como televisión, telefonía, radio, Internet, navegación, observación terrestre o militares.

Cabe destacar los satélites geoestacionarios, ampliamente usados en la actualidad. Estos satélites tienen un período orbital igual al periodo de rotación de la Tierra. Esta característica hace que el satélite parezca estático respecto a un punto fijo de la Tierra en rotación y, como resultado, se puede apuntar una antena a una dirección fija y mantener un enlace permanente con el satélite.

Además, actualmente ha surgido una tendencia al despliegue de constelaciones de satélites a órbitas bajas e intermedias para usos distintos como telefonía móvil, geolocalización o Internet. A diferencia de un único satélite, una constelación puede proporcionar cobertura global o cuasi global permanente ya que, en cualquier momento, al menos un satélite será visible. Gracias a que estas órbitas se encuentran mucho más cerca de la Tierra que aquella que usan los satélites tradicionales, obtenemos una latencia y pérdidas de propagación menores. Estas constelaciones son ideales para áreas del mundo donde la conectividad es un desafío, ofreciendo servicios tradicionales sin los límites de la infraestructura terrestre tradicional. Actualmente, el aumento en el ancho de banda y la velocidad necesarios para los nuevos servicios de telecomunicaciones, así como la escasez de posiciones orbitales en banda Ku, ha ocasionado el desarrollo de la banda Ka para este tipo de tecnologías.

Lo comentado anteriormente demuestra la relevancia actual de las comunicaciones vía satélite y sus amplias posibilidades de futuro.

## 1.1. Motivación

El diseño de un sistema de comunicaciones por satélite está definido a partir de las condiciones particulares con las que se topa la señal electromagnética en el camino recorrido desde la Tierra al satélite en el enlace ascendente o el recorrido desde el satélite a la Tierra en el enlace descendente.

Normalmente tendremos una línea de visión directa entre la estación terrena y el satélite, es decir, entre ellos encontraremos la atmósfera terrestre y el espacio libre. En estas condiciones, el enlace establecido entre ambas estará gobernado por las pérdidas de propagación en el espacio libre, que determinan que la potencia de la señal recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Por tanto, teniendo en cuenta la gran longitud de este tipo de enlaces, este efecto será el más significativo.

Además de las pérdidas de propagación en el espacio libre, deberemos considerar una serie de efectos adicionales que resultan en un impacto negativo sobre la señal. Estos efectos incluyen lluvia, nubes, efectos atmosféricos, aparición de interferencias, desapuntamiento de antenas, etc. Un listado completo de todos los efectos que deben considerarse al proyectar los enlaces Tierra-espacio para los sistemas de telecomunicación espacial se puede encontrar en la recomendación P.618 de la UIT.

El objetivo final será garantizar la prestación del servicio en cuestión de acuerdo con unos patrones de calidad. Por tanto, el ingeniero, en su labor de diseño, deberá tener en cuenta todos estos factores, así como otros relacionados con el rendimiento del satélite y las estaciones transmisora y receptora.

Esta planificación requiere de una serie de cálculos que pueden resultar tediosos si se realizan manualmente, además de consumir gran cantidad de tiempo. Es por ello por lo que se han creado multitud de programas de simulación como el que usaremos en este trabajo, HTZ Communications. Gracias a él, obtendremos un cálculo rápido y preciso de balances de enlace con un alto nivel de personalización, además de otras opciones como mapas, análisis de interferencias, etc.

## 1.2. Objetivos del proyecto

Como hemos mencionado anteriormente, la calidad de la comunicación en el diseño de comunicaciones vía satélite viene dada por una serie de parámetros. El objetivo de este diseño es que el servicio sea fiable, es decir, que la comunicación esté disponible con unos parámetros de calidad adecuados a los requeridos por el usuario.

El objetivo de este proyecto es el análisis de los cálculos y procedimientos que se realizan en la planificación de enlaces de este tipo mediante las herramientas de HTZ Communications. Para ello, a lo largo de cada uno de los capítulos de este documento se expondrá una base teórica de cada una de las funcionalidades que nos proporciona el programa y se complementará con sus respectivas simulaciones para así dar una visión más completa y visual.

## 1.3. Estructura del proyecto

El proyecto se organiza en 7 capítulos, de la siguiente forma:

El primer capítulo, en el que nos encontramos, se hace una breve introducción a los sistemas de comunicaciones por satélite y se presenta el proyecto justificando su realización y estableciendo sus objetivos.

A continuación nos encontramos el segundo capítulo, en el que se expone una base teórica necesaria para la comprensión de los posteriores capítulos, presentando la configuración típica de un sistema de comunicaciones por satélite: el enlace de comunicaciones y las partes de este tipo de sistema, incluyendo el segmento terrenal, espacial y de control. Finalmente, se acaba examinando los tipos de órbitas existentes y se hará un balance de sus ventajas e inconvenientes.

En el tercer capítulo se presenta la base de datos de satélites, desde la que podremos crear o importar los diferentes satélites que vayamos a usar en nuestras simulaciones, se realizan análisis de cobertura (cobertura compuesta, mejor servidor, cobertura simultánea y mapa de densidad de flujo de potencia), se calculan mapas de ganancia y se realizan análisis de interferencias tanto en el enlace ascendente como en el descendente.

Seguidamente, en el cuarto capítulo, aprenderemos a crear y configurar estaciones terrenas.

En el quinto capítulo se realiza una serie de cálculos y simulaciones desde el menú de satélites. Se examinan mapas C/I (*Carrier/Interference* – Portadora/Interferencia), mapas PFD (*Power Flux Density* – Densidad de Flujo de Potencia), la intensidad de campo y potencia recibida por las estaciones desde cada satélite y el nivel de interferencia de las estaciones en una constelación de satélites y viceversa.

En el sexto capítulo se presenta el formato TLE, la creación de objetos con este formato y su uso para realizar análisis de visibilidad.

Finalmente, en el séptimo y último capítulo, se incluye las conclusiones del presente proyecto y se proponen posibles líneas de desarrollo para continuar en su profundización.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nos referimos a comunicaciones vía satélite como aquellas que usan satélites artificiales en órbita alrededor de la Tierra. Los satélites actúan como repetidores, recibiendo las señales que se les envían desde las estaciones terrenas y reenviándolas a otro satélite o de vuelta a los receptores situados en la Tierra.

En este capítulo introductorio se detallan los aspectos básicos de los sistemas de comunicaciones por satélite.

### 2.1. Configuración de un sistema de comunicaciones vía satélite

Antes de realizar nuestras simulaciones con HTZ Communications es necesario conocer el esquema típico de un sistema de comunicaciones vía satélite.

La figura 2.1 muestra una visión general de un sistema de comunicaciones por satélite. El esquema está formado por un segmento espacial, un segmento de control y un segmento terrenal [1].

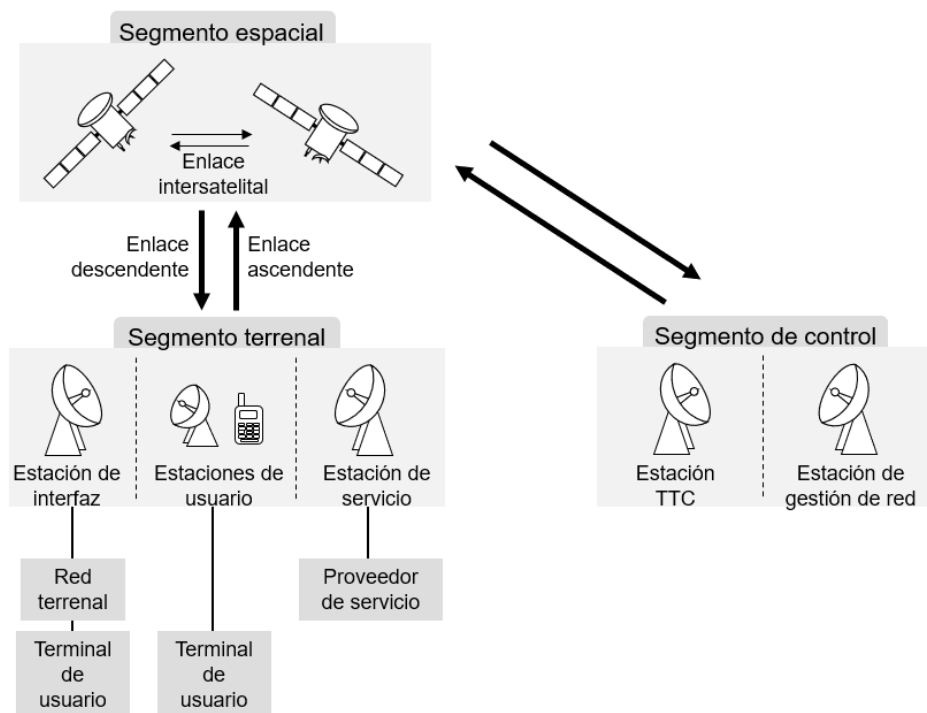


Figura 2.1: Segmentos de un sistema de comunicaciones por satélite [2]

- **Segmento espacial:** formado por los distintos satélites.
- **Segmento de control:** también llamado TT&C (Telemetry, Tracking and Control - Telemetría, Seguimiento y Control). Este segmento consta de todas las instalaciones terrestres para el control y seguimiento de los satélites, así como para gestión del tráfico y los recursos asociados a bordo del satélite.
- **Segmento terrenal:** formado por las estaciones terrenas. Podemos distinguir entre:



- **Estaciones de usuario:** permiten el acceso directo del cliente al segmento espacial. Pueden ser portátiles, estaciones móviles y terminales de muy pequeña apertura (VSAT).
- **Estaciones de interfaz:** también llamadas pasarelas y cuya función es interconectar el segmento espacial a una red terrestre.
- **Estaciones de servicio:** recopilan y distribuyen información desde y hacia estaciones de usuario a través del segmento espacial. Pueden ser concentradores o estaciones de alimentación.

### 2.1.1. Enlace de comunicaciones

En un sistema de comunicaciones por satélites podemos encontrar tres tipos de enlaces [1]:

- **Enlace ascendente:** desde las estaciones terrenas a los satélites.
- **Enlace descendente:** desde los satélites a las estaciones terrenas.
- **Enlace entre satélites.**

Los enlaces ascendentes y descendentes consisten en portadoras moduladas por radiofrecuencia, mientras que los enlaces entre satélites pueden ser de radiofrecuencia u óptica.

En los enlaces ascendente y descendente tendremos propagación en condiciones de espacio libre [3], la atenuación será proporcional al cuadrado de la distancia y de la frecuencia. Además, debemos tener en cuenta la atenuación adicional por lluvia y gases atmosféricos e interferencias. Ya que el satélite está limitado en potencia, se asignan frecuencias más bajas al enlace descendente al ser el más desfavorable. Los márgenes de desvanecimiento serán reducidos ya que no existe multitrayecto y el valor de retardo en la propagación será notable.

En cuanto a las bandas de frecuencias más utilizadas en las comunicaciones por satélite tenemos [4]:

#### **Banda L**

Su rango de frecuencia se extiende desde 1 hasta 2 GHz, y por tanto su longitud de onda desde 30 hasta 15 cm.

Su gran longitud de onda le permite penetrar la estructura terrestre, por lo que se utilizan transmisores de baja potencia. Además, no es afectada por la lluvia de forma considerable. Su rango de baja frecuencia facilita el diseño de componentes, siendo estos menos costosos que los de las bandas de frecuencia más alta. Sin embargo, esta banda presenta una menor capacidad de transmisión de datos.

Esta banda se utiliza para una amplia gama de aplicaciones que incluyen radares, comunicaciones móviles y por satélite, navegación por satélite (como GPS, GLONASS, etc.) y aplicaciones de transmisión por satélite (DAB).

#### **Banda S**

Su rango de frecuencia se extiende desde 2 hasta 4 GHz, y por tanto su longitud de onda desde 15 hasta 7,5 cm.

Esta banda, usada para la transmisión de datos en tiempo real y por su alta resistencia a los desvanecimientos, es la preferida para comunicaciones entre satélites y TT&C (Tracking, Telemetry & Command).

**Banda C**

Su rango de frecuencia se extiende desde 4 hasta 8 GHz, y por tanto su longitud de onda desde 7,5 hasta 3,75 cm.

Esta banda ofrece un ancho de banda más económico en comparación con bandas superiores y, como en las anteriores bandas, no se ve demasiado afectada por la lluvia y otros factores climatológicos. Estos efectos serán visibles a partir de los 10 GHz [5]. En las siguientes bandas, cuyas frecuencias superan los 10 GHz, sí será un factor que deberemos tener en cuenta.

**Banda Ku**

Su rango de frecuencia se extiende desde 12 hasta 18 GHz, y por tanto su longitud de onda desde 2,5 hasta 1,67 cm.

Debido a que esta banda usa frecuencias mayores, las antenas y sistemas son de dimensiones más reducidas y por tanto la banda Ku es una solución más económica y flexible que la C. La banda Ku es más propensa al desvanecimiento por lluvia, sin embargo, tiene la ventaja de ser más resistente a la interferencia terrestre. Estos desvanecimientos provocados por la lluvia y gases atmosféricos serán más severos a medida que nos acerquemos a la banda K. Además, cuenta con una mayor capacidad de transmisión comparada con los sistemas que trabajan bandas anteriores, aunque casi todas sus frecuencias están ya asignadas.

**Banda Ka**

Su rango de frecuencia se extiende desde 27 hasta 40 GHz, y por tanto su longitud de onda desde 11,11 hasta 7,5 mm.

Como principales ventajas, la banda Ka cuenta con un amplio espectro de frecuencias disponibles y posee una alta capacidad de transmisión. Esta banda tiene una longitud de onda más pequeña, lo que conducen a antenas y sistemas más pequeños. Entre sus inconvenientes, una mayor atenuación por lluvia y gases atmosféricos, el efecto Doppler tiene un efecto considerable y se precisan transmisores de alta frecuencia, lo que encarece el precio del sistema. También se trata de una banda muy sensible a interferencias del medio.

En la banda Ka se usan los denominados “*spot beams*”. Estos haces están mucho más enfocados que en las bandas anteriores, proporcionando un alto rendimiento utilizando la misma cantidad de ancho de banda y reduciendo el costo del espectro. Los haces puntuales enfocados permiten la reutilización de frecuencias, aumentando la capacidad del sistema de satélite.

En la siguiente tabla se resumen las principales bandas de frecuencias en las comunicaciones por satélite:

Tabla 2.1: Bandas de frecuencias de microondas usadas en comunicaciones por satélite [4]

<b>Banda</b>	<b>Frec. mínima</b>	<b>Frec. máxima</b>	<b><math>\lambda</math> máxima</b>	<b><math>\lambda</math> mínima</b>
<b>L</b>	1 GHz	2 GHz	30 cm	15 cm
<b>S</b>	2 GHz	4 GHz	15 cm	7,5 cm
<b>C</b>	4 GHz	8 GHz	7,5 cm	3,75 cm
<b>Ku</b>	12 GHz	18 GHz	2,5 cm	1,67 cm
<b>Ka</b>	27 GHz	40 GHz	11,11 mm	7,5 mm

### 2.1.2. Segmento espacial

Tal y como hemos comentado anteriormente, la misión de un satélite es la de repetir las señales recibidas desde la estación terrestre hacia otro satélite o a receptores terrestres en la frecuencia adecuada.

El satélite consta de la carga útil y la plataforma. La carga útil consiste en todos los equipos electrónicos y antenas que soportan la recepción y transmisión de información, mientras que la plataforma se encarga del control orbital, posición y propulsión del satélite y cuenta con otros subsistemas como son los de energía, control térmico y procesado de datos.

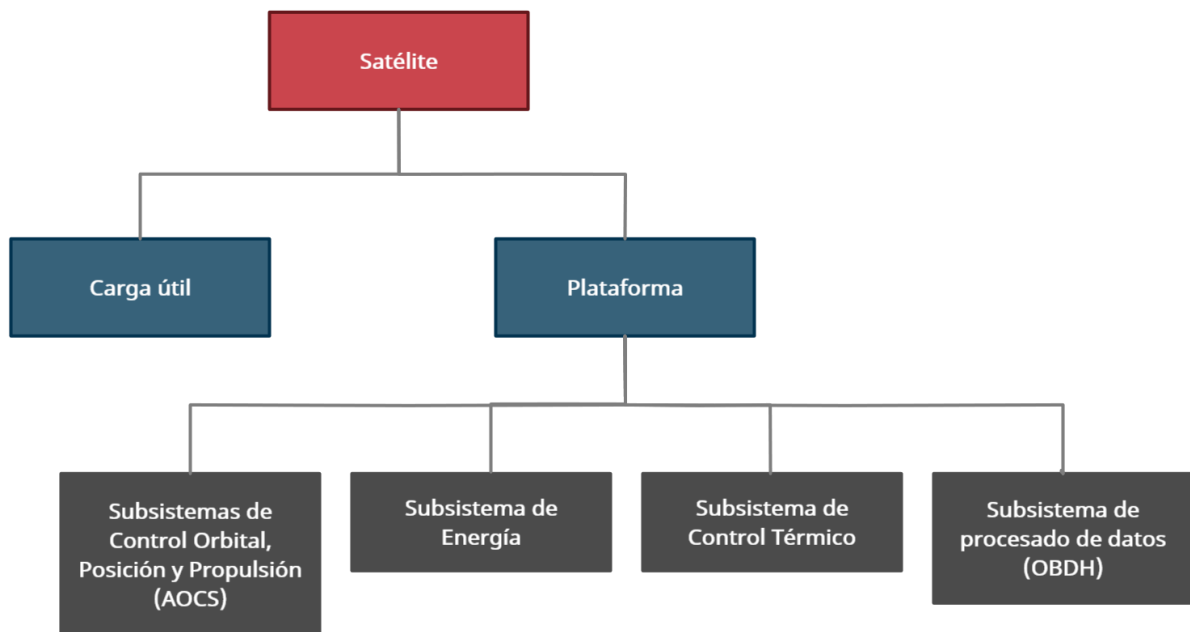


Figura 2.2: Esquema del segmento espacial

#### 2.1.2.1. Carga útil

Se conoce como transpondedor a aquel dispositivo que realiza funciones de transmisión y recepción de la señal [6]. Es la unidad básica de amplificación y cambio (transposición) de frecuencia en el satélite. Se le asocia a una o varias antenas de emisión, que determinan la potencia y la zona de cobertura del haz emitido según su forma y orientación. Se caracteriza por un determinado ancho de banda, siendo valores típicos 36 MHz y 54 MHz. Un satélite dispone de varios transpondedores que permiten aumentar la capacidad de la carga útil. Es posible distinguir dos tipos de transpondedores:

- **Transpondedor transparente:** no procesa la señal recibida, solo la amplifica y retransmite.
- **Transpondedor regenerativo:** procesa la señal en banda base y la regenera, además de amplificarla y retransmitirla. Las principales ventajas de los transpondedores regenerativos son una mejor relación señal a ruido (SNR) y mayor flexibilidad en la implementación.

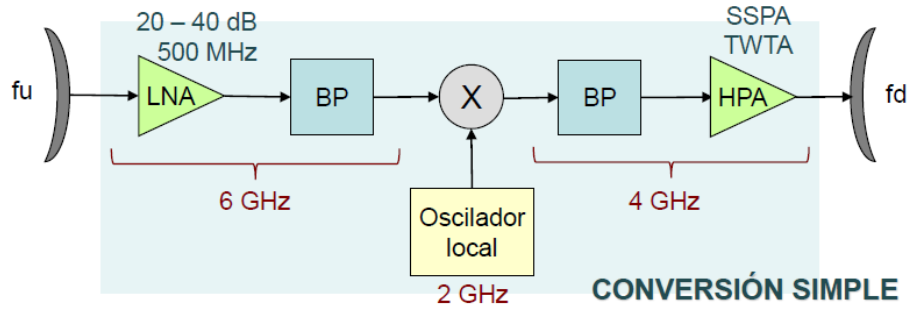


Figura 2.3: Transpondedor transparente de conversión simple [2]

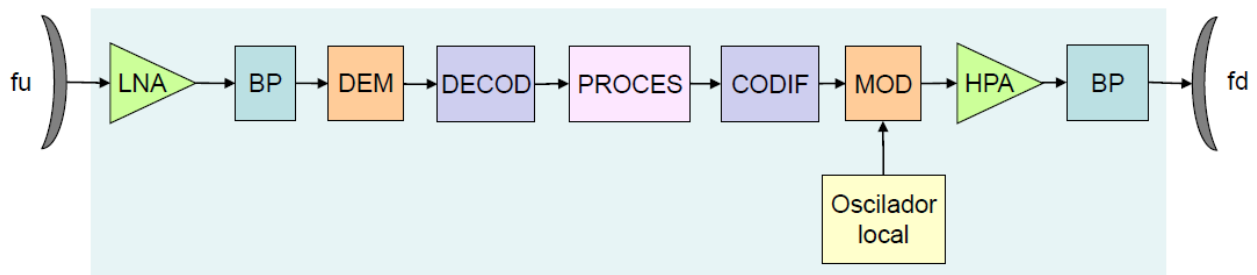


Figura 2.4: Transpondedor regenerativo [2]

Como se ha mencionado, las dos funciones principales del transpondedor son las de conversión de frecuencia de las señales y su posterior amplificación.

La conversión de frecuencia se realiza mediante un convertidor reductor de frecuencias. La frecuencia de este oscilador local es la diferencia entre la de entrada y la de salida. La figura de ruido elevada de los mezcladores limita la calidad del receptor, por ello usamos previamente un amplificador de bajo nivel de ruido (LNA). Para frecuencias altas (banda Ka) se usa una doble conversión de frecuencia.

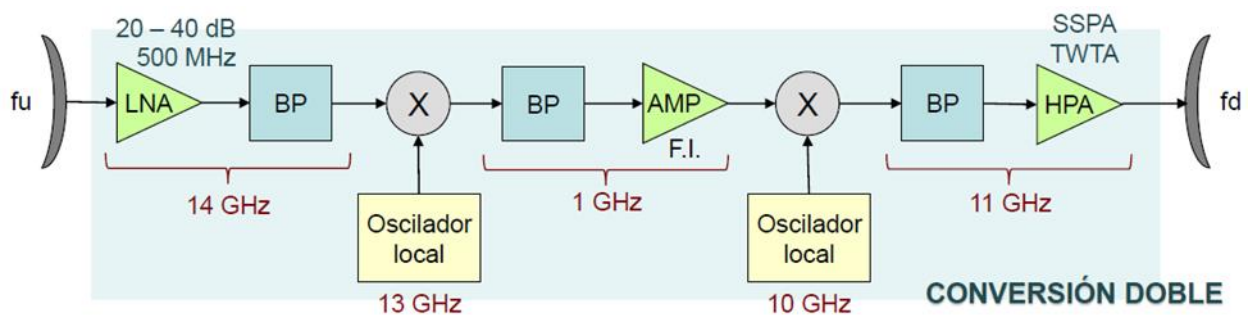


Figura 2.5: Transpondedor transparente de conversión doble [2]

Para la amplificación de las señales se usan amplificadores no lineales en las etapas de potencia para así obtener un rendimiento elevado. Para mejorar la eficiencia y disminuir el ruido de intermodulación, el ancho de banda de carga útil total del satélite se divide en varias sub-bandas, siendo las portadoras de cada sub-banda amplificadas por un amplificador de potencia dedicado. La cadena de amplificación asociada con cada sub-banda se denomina canal de satélite o transpondedor. La división del ancho de banda se logra mediante un conjunto de filtros llamado multiplexor de entrada (IMUX). Las portadoras amplificadas se recombinan en el multiplexor de salida (OMUX).

Un esquema completo de los transpondedores con la canalización descrita anteriormente puede ser encontrado en la siguiente figura:

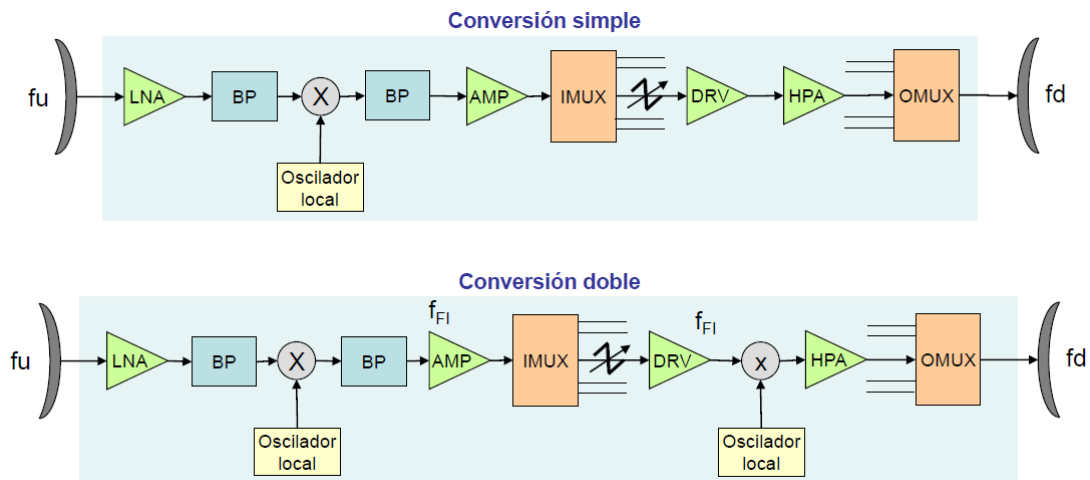


Figura 2.6: Canalización en transpondedores de conversión simple y doble [2]

Los bloques más importantes del esquema de un transpondedor pueden ser resumidos en los siguientes:

- **LNA** (*Low Noise Amplifier* – Amplificador de Bajo Ruido)
  - Determina la figura de ruido del receptor.
  - Suelen incorporar varias etapas (50-60 dB).
- **Convertidor de frecuencia**
  - Realiza el cambio de frecuencias del enlace ascendente a enlace descendente.
  - Puede realizarse en una o dos etapas.
- **IMUX** (*In Multiplexer* – Multiplexor de Entrada)
  - Incrementa la capacidad de la carga útil manteniendo la calidad del enlace (menor ruido de intermodulación).
  - División de la señal en varios canales con filtros muy selectivos.
  - Bajo rizado en banda para evitar la conversión AM/PM en el amplificador no-lineal.
  - Retardo de grupo constante dentro de banda (pudiendo requerirse ecualización).
- **HPA** (*High Power Amplifier* – Amplificador de Alta Potencia), se usan principalmente dos tipos de amplificadores:
  - **TWTA** (*Traveling-Wave Tube Amplifier* – Amplificador de Tubo de Onda Progresiva)
    - Se basan en la interacción de un haz de electrones (cátodo incandescente) y una onda electromagnética lenta.
    - Requieren un equipo auxiliar, EPC (*Electronic Power Conditioner*), que genere las tensiones de miles de voltios que se requieren para acelerar el haz.
    - Funcionamiento lineal limitado.
    - Ancho de banda aumenta si disminuye la frecuencia de trabajo.
    - Cátodo se desgasta con el tiempo.
    - Hasta 3 KW de potencia.

- **SSPA** (*Solid State Power Amplifier* – Amplificador de Potencia de Estado Sólido)
  - Gran ancho de banda.
  - Más baratos que TWTA.
  - No requieren voltajes elevados a la entrada.
  - Potencia del orden de 100 KW, aunque se pueden configurar varias etapas en serie para más potencia.
  - Alta sensibilidad al calor.
- **OMUX** (*Out Multiplexer* – Multiplexador de Salida)
  - Combinan las señales amplificadas y las entrega todas juntas a la antena.
  - Bajas pérdidas de inserción ya que trabajan a alto nivel de potencia.
  - Deben controlar la dispersión del espectro producida por el amplificador no lineal.
  - Se realizan mediante cavidades resonantes multimodo en guías, bien de INVAR o de fibra de carbono, metalizadas interiormente con plata u oro para minimizar las pérdidas.

En el subsistema de las antenas de la carga útil se usan antenas de varios tipos, desde antenas tipo dipolo, donde se requieren características omnidireccionales, hasta antenas altamente direccionales. Estas últimas, a diferencia de las omnidireccionales, concentran la mayor parte de la energía radiada de manera localizada, aumentando así la potencia emitida hacia el receptor y evitando interferencias introducidas por fuentes indeseadas.

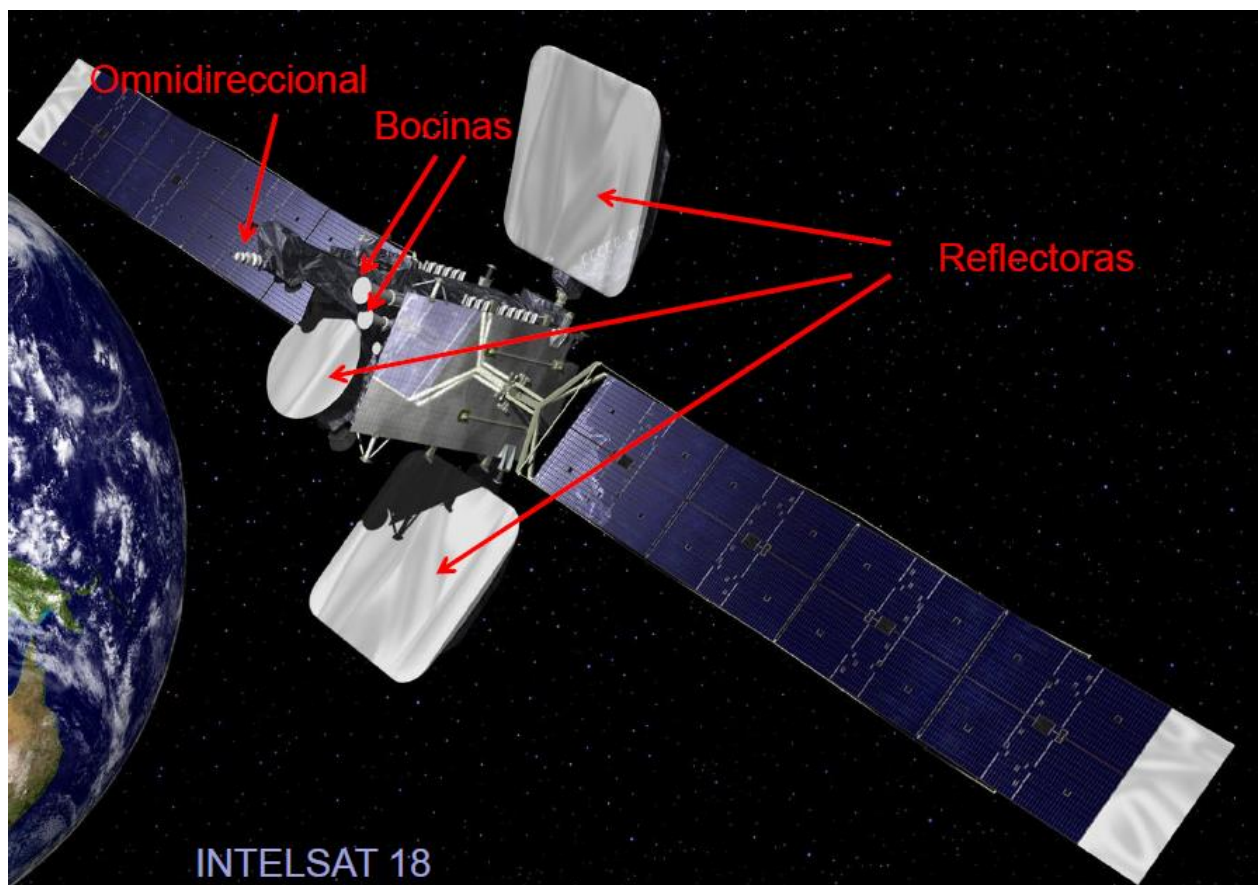


Figura 2.7: Antenas usadas en el satélite Intelsat 18 [2]

Para el análisis de las propiedades de las antenas se usa principalmente el diagrama de radiación [7]. El diagrama de radiación es la representación gráfica de las características de radiación de la antena, en función de las distintas direcciones del espacio. Para ello, se suele usar un sistema de coordenadas esféricas. Este diagrama representa la densidad de potencia radiada, aunque también se pueden encontrar diagramas de polarización o de fase.

En este punto podemos definir otro parámetro importante de las antenas y que está íntimamente relacionado con el diagrama de radiación, el ancho de haz a  $-3$  dB. Este se puede definir como el intervalo angular en el que la densidad de potencia radiada es igual a la mitad de la potencia máxima (en la dirección principal de radiación).

Con el patrón de radiación podremos analizar cuan directiva es una antena. La directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isótropa que radiase la misma potencia que la antena. Si no se especifica la dirección angular se sobreentiende que la directividad se refiere a la dirección de máxima radiación.

En una antena existirán diferentes pérdidas que resulten en una disminución de su eficiencia, es decir, no toda la potencia entregada por el transmisor será radiada. Por ejemplo, podemos tener pérdidas por iluminación, que son aquellas pérdidas de ganancia relacionadas con la iluminación no uniforme de la apertura. También podemos mencionar las pérdidas por *spillover*, que son aquellas debida a la radiación del alimentador fuera del ángulo que contiene el reflector. Debemos tener en cuenta que a medida que la iluminación del borde crece, la eficiencia de iluminación aumenta, pero la eficiencia de *spillover* disminuye. Por tanto, tenemos que encontrar el punto óptimo para la eficiencia combinada (iluminación y *spillover*). Otras pérdidas importantes son las debida al bloqueo, que surgen por la parte de apertura bloqueada por el alimentador o subreflector y sus soportes.

Los tipos de antenas más usados son los siguientes [7][8]:

### **Antenas filiformes**

Las antenas filiformes son antenas cuyos elementos radiantes son conductores de hilo que tienen una sección despreciable respecto a la longitud de onda de trabajo. Las dimensiones suelen ser como máximo de una longitud de onda. Ejemplos de antenas de hilo son el monopolo vertical, la antena espira o la antena helicoidal. Son usadas principalmente en VHF y UHF para proporcionar comunicaciones para los sistemas de TTC&M.

### **Antenas de bocina**

Las antenas de bocina son un tipo de antena de apertura, en la que se usa una sección ensanchada de la guía de onda conocida como bocina para dirigir el haz electromagnético de forma que concentran la emisión y recepción de su sistema radiante en una dirección. Se utilizan en frecuencias de microondas cuando se requieren haces relativamente anchos, como para una cobertura global. Se pueden agrupar varias bocinas, alimentándolas con una amplitud y una fase diferentes, para conseguir un determinado diagrama de radiación y dar cobertura a un país o continente. Las bocinas también se usan como alimentadores para reflectores, iluminando el reflector y formando lo que se conoce como antena parabólica.

### **Antenas reflectoras**

Su funcionamiento se basa en la reflexión de las ondas electromagnéticas. Las ondas que inciden paralelamente al eje principal de la antena se reflejan y van a parar a un punto denominado foco que está centrado en la superficie de recepción de la antena. En cambio, si se trata de una antena emisora, las ondas que son emitidas desde el foco (dispositivo de emisión) se ven reflejadas y abandonan el reflector de forma paralela al eje de la antena.

Cuando se desea la máxima directividad de una antena la forma del reflector generalmente es parabólica, con la fuente primaria localizada en el foco y dirigida hacia el reflector.

El mayor ejemplo de antena reflectora es aquella con reflector parabólico o también llamada antena parabólica. Estas se utilizan en sistemas de comunicaciones en las bandas de UHF a partir de los 800 MHz y en las de SHF y EHF. Entre sus principales ventajas se encuentran la sencillez de construcción y elevada direccionalidad.

Entre los tipos básicos de antenas con reflector podemos encontrar:

### ***Foco primario***

La superficie de estas antenas es un paraboloides de revolución y el foco está centrado en esta superficie. Como el LNB está montado centralmente, este bloquea muchas señales con su propia sombra sobre la superficie de la antena, provocando así pérdidas por bloqueo. A estas pérdidas se les suma aquellas provocadas por spillover, lo que ocasiona que este tipo de antenas tengan un rendimiento máximo de aproximadamente el 60%.

Su relativa gran superficie implica un menor ángulo de anchura del haz (3 dB), por lo que la antena debe montarse con mayor precisión que una antena offset normal. Una gran desventaja que acarrea el uso de este tipo de antenas es que la lluvia y la nieve pueden acumularse en el plato e interferir en la señal.

### ***Offset***

La principal diferencia con las antenas de foco primario es que el punto focal no se sitúa en el centro del plato, sino a un lado de este (*offset*). De esta forma, el foco queda fuera de la superficie de la antena y conseguimos un rendimiento mayor que con antenas de foco primario, pudiendo ser de un 70% o más.

Además, gracias a este offset, se tiene una menor probabilidad de que la nieve o lluvia se acumule sobre el plato ya que tiene una menor inclinación que las de foco primario.

### ***Cassegrain***

La antena Cassegrain consta de dos reflectores simétricos axialmente [9]. La alimentación primaria se coloca en el vértice del reflector principal e ilumina a este último mediante un subreflector colocado delante de él. Las formas de las dos superficies radialmente simétricas se calculan de modo que, después de las dos reflexiones, la onda primaria sea plana. En la configuración básica, el plato principal es un paraboloides mientras que el reflector auxiliar es un hiperboloides.

Gracias a que las antenas de alimentación, las guías de ondas asociadas y los componentes electrónicos del extremo frontal se ubican en el plato o detrás de este, en lugar de estar suspendidos en el frente, se mejora la eficiencia al reducir pérdidas debida al bloqueo de parte del haz de salida. Este diseño permite adaptar el patrón de radiación para obtener un mayor rendimiento gracias a la presencia de una segunda superficie reflectante en la trayectoria de la señal. Por ejemplo, en las antenas parabólicas ordinarias la ganancia se reduce porque la radiación de la antena de alimentación es menor en las partes externas del plato, lo que ocasiona una menor iluminación de estas partes. Para corregirlo, se modifica la forma del reflector secundario para dirigir más potencia de señal a estas zonas exteriores del plato. Como resultado obtenemos una iluminación más uniforme del primario, maximizando así la ganancia.

Sin embargo, esta solución acarrea un problema y es que el subreflector no es perfectamente hiperbólico, por lo que se pierde la propiedad de fase constante. Este error de fase se puede compensar modificando ligeramente la forma del espejo primario. El resultado es una mayor ganancia o relación ganancia/desbordamiento a expensas de superficies que son más difíciles de fabricar.

La principal desventaja del diseño Cassegrain es que la bocina de alimentación debe tener un ancho de haz más estrecho para enfocar su radiación en el reflector secundario, que posee un diámetro más pequeño que el plato principal. El ancho de haz de la bocina de alimentación para un subreflector es típicamente de 10° a 15°, a diferencia de los 120° a 180° que implica el reflector principal.



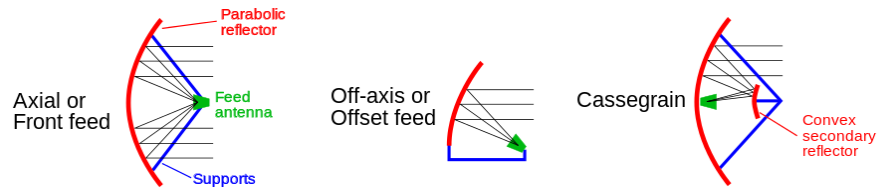


Figura 2.8: Tipos de antenas reflectoras

**Agrupaciones de antenas**

Las agrupaciones de antenas [10] se utilizan en satélites para crear múltiples haces desde una sola apertura, a lo que se le conoce como antenas multihaz o sistemas MBA. Una de las formas de obtener haces contorneados consiste en multialimentar un reflector offset con una agrupación de pequeños alimentadores cuyas excitaciones se controlan con una red formadora de haz que controla de manera individual la amplitud y fase de la señal que alimenta a cada uno de estos elementos de la agrupación. A esta técnica se le conoce como **reflector multialimentado**. Iridium y Globalstar utilizaron este tipo de antenas para generar hasta 16 haces desde una sola apertura para sus sistemas de telefonía móvil LEO.

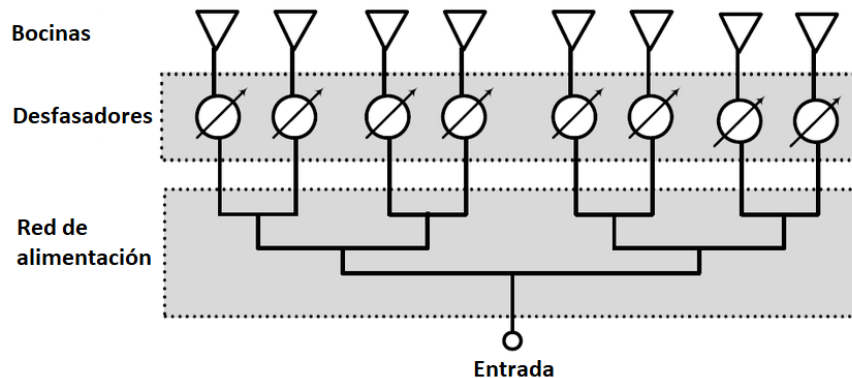


Figura 2.9: Esquema de una red formadora de haz [6]

Sin embargo, hay una solución más moderna que consiste en **reflectores conformados**. Este conformado consiste en el ligero deformado del reflector para conseguir haces de iluminación ajustados a la cobertura deseada (haces contorneados). En esta tecnología se usan técnicas de óptica física, en las que se calculan los campos de radiación a partir de las corrientes inducidas sobre las superficies reflectoras iluminadas. El resultado es un mayor ahorro energético y de material. Además, con esta técnica se pueden conseguir antenas de alta ganancia (distribución de apertura casi uniforme), antenas de muy bajo nivel de lóbulos secundarios, eliminar la potencia dispersada por el bloqueo del subreflector, etc.

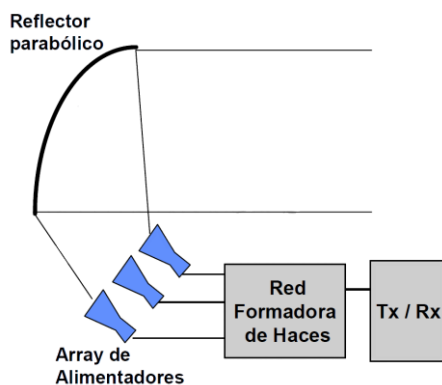


Figura 2.10: Reflector multialimentado [6]

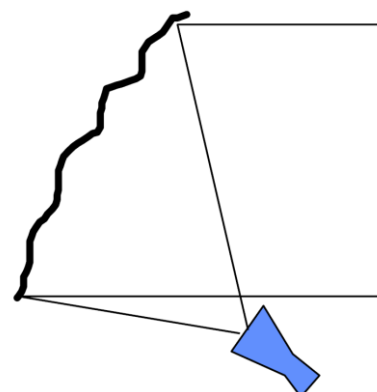


Figura 2.11: Reflector conformado [6]

El objetivo final de algunas de estas antenas instaladas en el satélite es la de proporcionar cobertura. La cobertura dada por un satélite se suele denominar huella satelital y corresponde con el área en tierra que cubren sus transpondedores. Los mapas de la huella satelital usualmente muestran la PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) del satélite en cada área medida en dBW aunque también pueden mostrar el diámetro mínimo estimado de un plato satelital receptor.

El satélite puede proporcionar cobertura a toda la región de la tierra que sea visible desde el satélite (cobertura global) y así permitir que se establezcan enlaces de larga distancia, por ejemplo de un continente a otro. Para un satélite geoestacionario, la cobertura global implica un ancho de haz de 3 dB de aproximadamente  $17.5^\circ$  [1].

Asimismo, el satélite puede proporcionar cobertura a una parte de la tierra (una región o país) por medio de un haz estrecho, con un ancho de haz de 3dB del orden de 1 a unos pocos grados. Así, se obtiene una mayor ganancia gracias a la reducción del ancho de haz de la antena. Sin embargo, debido a las reducidas dimensiones del haz, se puede dar el caso de que algunas estaciones terrenas queden fuera de la zona de cobertura. En este caso, estas estaciones terrenas podrán ser alcanzadas únicamente por enlaces terrestres o por otros satélites vinculados al considerado por enlace inter-satelital.

Por lo tanto, con la cobertura de antena de haz único, es necesario elegir entre una cobertura amplia que proporcione un servicio con calidad reducida a estaciones terrenas geográficamente dispersas o una cobertura reducida que proporcione un servicio con calidad mejorada a estaciones terrenas concentradas geográficamente.

Existe una alternativa que reúne las ventajas de estas dos opciones y es la utilización de antenas multihaz. Estas antenas proporcionan cobertura en un área extensa mediante la yuxtaposición de varias coberturas de haz estrecho. Cada haz proporciona una ganancia que aumenta a medida que disminuye el ancho del haz de la antena. De esta forma abarcamos una gran área con las ventajas que acarrear el uso de haces estrechos. El rendimiento del enlace mejora a medida que aumenta el número de haces. El límite estará en la tecnología de la antena, cuya complejidad crece cuantos más haces se utilicen.

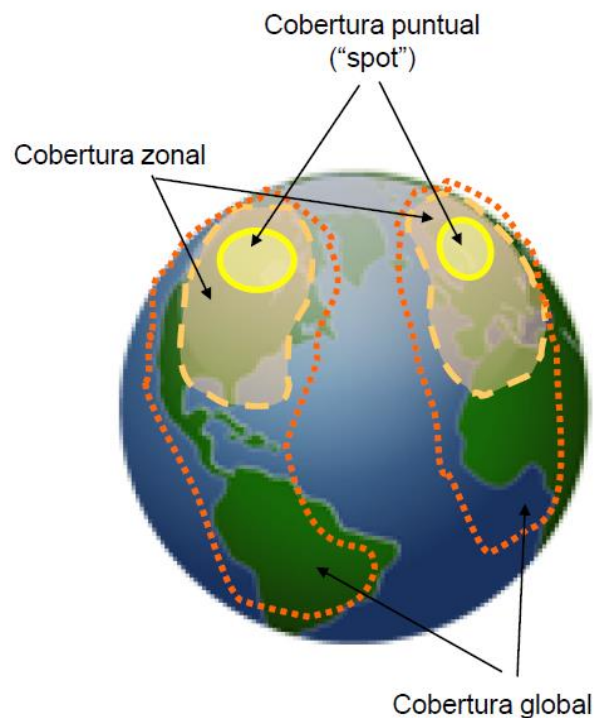


Figura 2.12: Tipos de cobertura [2]



Figura 2.13: Cobertura Hispasat 1D [2]

Existen varios tipos de diagrama de cobertura según el tipo de antena usado, como muestra la siguiente figura:

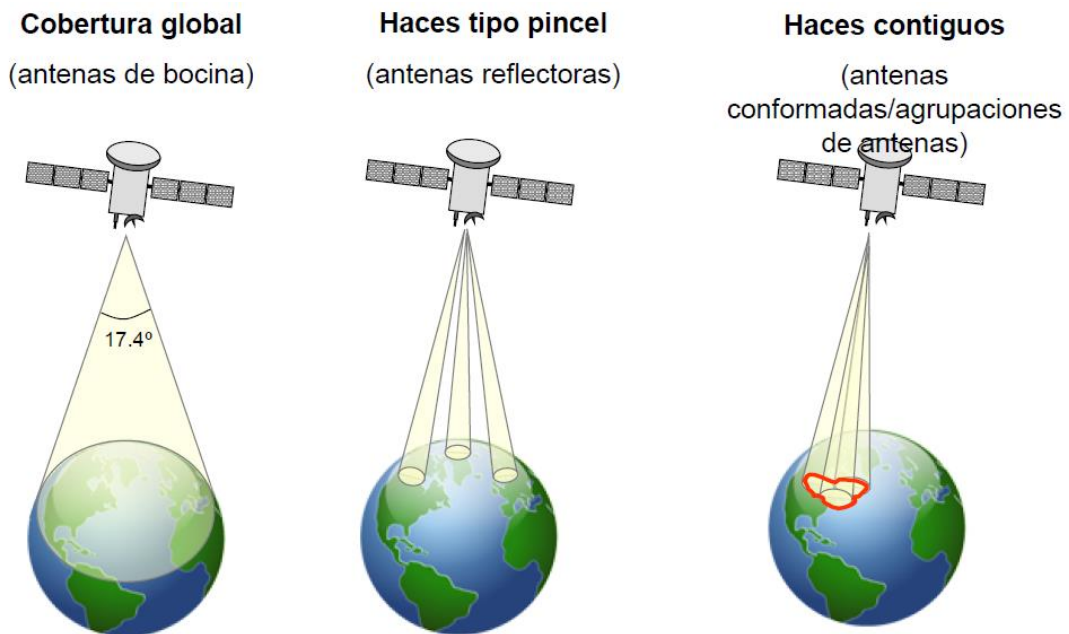


Figura 2.14: Tipos de diagrama de cobertura según el tipo de antena [2]

### 2.1.2.2. Plataforma

Una vez revisadas las funciones y los componentes de la carga útil del satélite, presentaremos la otra parte de la que se compone, la plataforma [11]. Esta, a su vez, se compone de diferentes subsistemas para el desempeño de sus funciones y son el de control orbital, posición y propulsión, de energía, de control térmico y de procesamiento de datos.

#### Subsistemas de Control Orbital, Posición y Propulsión

Es el subsistema de la plataforma encargado de mantener la posición orbital mediante correcciones periódicas y de apuntar las antenas a Tierra y los paneles al Sol. Mientras el satélite orbita alrededor de la Tierra, este debe girar a su vez sobre sí mismo para mantener su apuntamiento hacia las estaciones terrenas. Existen una gran cantidad de perturbaciones que afectan a la dinámica del satélite como, por ejemplo, el gradiente gravitatorio, la presión aerodinámica, la presión de radiación solar y el campo magnético. Esta es la causa de que el satélite necesite de un sistema que ayude a corregir este error.

Entre las funciones del subsistema AOCS destacan el mantenimiento de la actitud nominal del satélite (orientación) y de la órbita nominal, la generación de telemetría para informar del estado de las distintas unidades y el procesamiento de telemandos que enciende/apaga las distintas unidades que componen el satélite y controla las maniobras para el control orbital y de actitud.

Para el control de actitud, el satélite debe tener en cuenta en todo momento su orientación para así comparar con los ejes de referencia y corregirla si hiciera falta. Para la detección de la orientación se usan diferentes dispositivos como detectores del sol, detectores de infrarrojos, sensores estelares que relacionan la radiación estelar con un mapa celeste, magnetómetros que miden el campo magnético terrestre, sensores de radiofrecuencia y sensores inerciales como girómetros y acelerómetros. Para el mantenimiento de la orientación se suelen usar volantes de inercia (estabilizado en tres ejes) o un tambor exterior rotatorio (estabilizado por spin).

Para controlar el desapuntamiento de las antenas se puede recurrir a dos opciones, una mecánica en la que un motor gira la antena para contrarrestar la rotación del satélite, y otra electrónica, en la que se monta una matriz de antenas sobre un cilindro y en la que un sistema de control conmuta o modifica la alimentación de los elementos radiantes.

### **Subsistema de Energía**

Este subsistema se encarga de la generación, almacenamiento y distribución de energía eléctrica necesaria para la operación de los equipos del satélite. En el satélite existen diferentes elementos que componen este subsistema, como son las fuentes de energía primarias (paneles solares) que se encargan de la generación de la energía eléctrica, fuentes de energía secundarias (baterías) que almacenan energía procedente de los paneles solares cuando están operativos y la devuelven cuando dejan de estarlo (eclipses) y elementos de acondicionamiento y protección.

### **Subsistema de Control Térmico**

Encargado de mantener unos márgenes de temperatura de funcionamiento adecuados para los equipos y estructura del satélite. Este subsistema es fundamental ya que, si no se mantiene una temperatura adecuada, podrían aparecer deformaciones estructurales que pusieran en compromiso el correcto funcionamiento del apuntamiento del satélite y sus subsistemas.

Para ello se usan materiales como el kapton, que es un aislante térmico que se mantiene estable en un amplio rango de temperaturas (hasta 400 grados Celsius), superficies metálicas pulidas que absorben la parte visible del espectro solar pero refleja la radiación infrarroja o pinturas blancas, de aluminio, etc. También se usan tuberías de conducción que dispersan el calor por conducción (evaporación y condensación): el líquido interior, que suele ser amoníaco, se evapora y por presión se dirige al extremo frío donde se condensará y volverá a recircular. Otra opción es el reflector solar óptico (OSR) [12] que consiste en una capa superior hecha de cuarzo sobre una capa reflectante de metal. La capa exterior de cuarzo deja pasar la luz solar que se refleja en la capa metálica. Esto da como resultado un coeficiente de absorción bajo. La capa de cuarzo, a su vez, es un buen emisor de infrarrojos. El resultado de estas propiedades es un material de buena emisión y baja absorción, lo que lo convierte en un material frío.

### **Subsistema de procesamiento de datos**

Este subsistema se encarga del control y procesamiento de los datos recibidos o transmitidos y de la distribución de información entre subsistemas. Los distintos componentes del satélite se conectan a esta unidad central: sensores, giroscopios, GPS, carga útil, sistema de propulsión, etc. Entre los requisitos que debe cumplir este sistema se encuentran los de fiabilidad y robustez, resistencia a la radiación, operación en tiempo real, buena autonomía y un peso, tamaño y consumo de potencia reducido.

Este computador se encarga de varias funciones como son la monitorización de todos los aspectos de la operación e información del estado del satélite a la estación terrena, así como la decodificación, procesamiento y distribución de telecomandos recibidos de Tierra.

### **2.1.3. Segmento de control**

El segmento de control, también llamado TT&C (Telemetry, Tracking and Control - Telemetría, Seguimiento y Control) es aquel que monitoriza y controla al satélite desde la Tierra [1]. Este segmento se encarga de recibir los resultados de mediciones como la ubicación del satélite y parámetros de la órbita, así como señales de control enviadas desde el satélite que les permite hacer un seguimiento de los distintos subsistemas que componen el satélite (subsistemas de propulsión, térmico, carga útil, etc.) y de parámetros de radiofrecuencia de la carga útil. Asimismo, envía señales de control al satélite para iniciar maniobras y

cambiar el estado o modo de operación de los equipos. Entre estas maniobras podemos destacar la ejecución de correcciones periódicas para el mantenimiento orbital de acuerdo con las determinaciones constantes de la posición del satélite.

#### **2.1.4. Segmento terrenal**

Las estaciones terrestres deben realizar el seguimiento del satélite para apuntar sus antenas correctamente y deben tener en cuenta el desplazamiento Doppler debido al movimiento del satélite. Este segmento se encarga del intercambio de información entre el satélite y la Tierra. El segmento terrenal lo componen la estación terrena transmisora, la estación terrena receptora y las redes terrenales [1].

##### **Estación terrena transmisora**

Esta estación recibe las señales a transmitir en banda base, que pueden ser de varios tipos, como señales multiplex telefónicas, radiofónicas, de datos o de vídeo. Estas señales modulan portadoras en frecuencia intermedia que se convierte posteriormente a radiofrecuencia y que, tras ser amplificadas, se transmite hacia el satélite.

Para la transmisión de estas señales se usan de antenas de gran directividad (de uno a cinco metros de diámetro aproximadamente) ya que se requieren potencias elevadas. Las portadoras que se transmiten pueden estar activadas continuamente o a petición, es decir, cuando haya información a transmitir.

##### **Estación terrena receptora**

Esta estación se encarga de recibir la información desde el segmento espacial. Para ello, dispone de una antena muy directiva y un sistema receptor de muy bajo factor de ruido. Las señales recibidas se pasan entonces a través de un amplificador de bajo ruido, que a menudo se ubica en el concentrador de la antena para así minimizar la distancia que debe recorrer la señal, antes de ser convertidas a frecuencia intermedia. A continuación se demodula la señal. Los posibles errores, causados principalmente por la degradación de la señal, se identifican y corrigen en la medida de lo posible. Finalmente, se demodulan los mensajes destinados a dicha estación. Si el destino de estos mensajes no correspondiera con la estación terrena en cuestión, estos se reenviarían hacia los centros de conmutación a través de circuitos terrenales.

Las estaciones se distinguen por el volumen y tipo de tráfico que gestione. Podemos destacar la estación maestra, que se encarga de la gestión del sistema y que normalmente se encuentra en el nudo principal de la red, así como estaciones de alto, medio o bajo tráfico que hacen posible la atención de un elevado número de canales.

##### **Redes terrenales**

Las redes terrenales son utilizadas cuando las señales no se originan o no tienen como destino final la estación terrena en cuestión. Este conjunto de nodos proporciona comunicación de un punto de la Tierra a otro. A las redes terrenales se le pueden unir redes satelitales, que cumplen la misma función con la salvedad de que la comunicación se produce entre satélites en vez de entre estaciones terrenas.

## **2.2. Tipos de órbitas**

Los satélites son puestos en órbita mediante cohetes espaciales que los sitúan circundando la Tierra. Según su altura, las órbitas se pueden clasificar en [13]:

**Órbita LEO** (*Low Earth Orbit* – Órbita Terrestre Baja): 200 – 2000 km (altura sobre la superficie de la Tierra)

Órbita situada entre la atmósfera y el cinturón de radiación de Van Allen y que cuenta con un ángulo de inclinación bajo. Su excentricidad es muy pequeña ( $e < 0.06$ ), lo que ocasiona que sean casi circulares. Posee un periodo orbital de 1.5 horas aproximadamente y una alta velocidad ( $> 27000$  km/hora). Ya que cuenta con una altitud relativamente baja, las pérdidas de propagación son pequeñas y los retardos son mínimos ( $< 10$  ms), aunque el tiempo de visibilidad es reducido ( $< 15$  min). Debido a que su huella satelital es pequeña se necesitan alrededor de 50 a 70 satélites para dar cobertura global. Se caracteriza por su facilidad de puesta en órbita al necesitarse menos energía que con otras. Como desventajas cabe destacar que en esta zona se producen continuos eclipses y existen perturbaciones como la resistencia atmosférica o la presión de la radiación solar.

Algunas aplicaciones y servicios de esta órbita son comunicaciones móviles, teledetección, investigación espacial, vigilancia, meteorología, etc.

A modo de resumen se muestra una tabla con las ventajas e inconvenientes de esta órbita:

Tabla 2.2: Ventajas e inconvenientes de la órbita LEO [3][13]

Ventajas	Inconvenientes
Menores pérdidas de propagación	Gran constelación de satélites para cobertura global
Terminales más pequeños	Alto impacto de efecto Doppler debido a la gran velocidad angular
Retardos mínimos ( $< 10$ ms)	Visibilidad breve y elevación variable
Facilidad en la puesta en órbita	Compleja arquitectura de red
Una huella más pequeña conlleva una mayor reutilización de frecuencias, lo que lleva a mayor capacidad del sistema	Muchos eclipses
	Propenso a colisiones con basura espacial

**Órbita MEO** (*Medium Earth Orbit* – Órbita Terrestre Media): 10000 – 30000 km

La órbita MEO, también llamada ICO (*Intermediate Circular Orbit* - Órbita Circular Intermedia) es usada por satélites entre altitudes de órbita terrestre baja y órbita geosíncrona. Cuenta con un periodo orbital de 5 a 12 horas aproximadamente y con una alta velocidad ( $> 19000$  km/hora). Debido a su altitud, mayor que la órbita LEO, los retardos son medios ( $< 100$  ms) y el tiempo de visibilidad es mayor (2 a 4 horas). Para proporcionar cobertura global se necesitan alrededor de 10 a 12 satélites. La puesta en órbita es más difícil que en la LEO, pues se requieren varias etapas hasta alcanzar la órbita final. Además, debemos tener en cuenta que en esta órbita hay una gran radiación de los cinturones de Van Allen.

Algunas aplicaciones y servicios de esta órbita son comunicaciones móviles, gestión de flotas, navegación (GPS, Galileo), etc.

A modo de resumen se muestra una tabla con las ventajas e inconvenientes de esta órbita:

Tabla 2.3: Ventajas e inconvenientes de la órbita MEO [3][13]

Ventajas	Inconvenientes
Menores pérdidas que GEO	Constelación de satélites considerable para cobertura global
Terminales de tamaño medio	Efecto Doppler
Retardos medios (< 100ms)	Visibilidad breve
Se necesitan menos satélites para cobertura global que LEO	Muchos eclipses
	Propenso a colisiones con basura espacial

**Órbita HEO** (*High Earth Orbit – Órbita Terrestre Alta*):

Órbita de elevada excentricidad. Su apogeo tiene la altura de las órbitas MEO, GEO o mayor, mientras que su perigeo la altura de LEO. Esta órbita inclinada extremadamente alargada tiene la ventaja de ofrecer largos tiempos de permanencia en determinadas zonas terrestres de alta latitud, al pasar la mayor parte del tiempo en la zona del apogeo. En ella existen perturbaciones como el movimiento del perigeo, la resistencia atmosférica en la zona del perigeo y radiación al atravesar los cinturones de Van Allen.

Ejemplos de órbitas HEO son las conocidas órbitas Mólniya y las órbitas Tundra.

A modo de resumen se muestra una tabla con las ventajas e inconvenientes de esta órbita:

Tabla 2.4: Ventajas e inconvenientes de la órbita HEO [3][13]

Ventajas	Inconvenientes
Cobertura de zonas polares	No da cobertura global
Mayor ángulo de elevación	Pérdidas de enlace grande
Coste de lanzamiento barato	Retardo considerable
	Efecto Doppler
	Cruce con cinturones de Van Allen en perigeo (radiación)
	Muy sensibles a la asimetría de la Tierra

**Órbita GEO** (*Geosynchronous Equatorial Orbit – Órbita Geoestacionaria*): 35.786 km

La órbita GEO es un caso particular de la órbita GSO (*Geosynchronous Orbit – Órbita Geosíncrona*) que es aquella órbita geocéntrica que cuenta con el mismo periodo orbital que el periodo de rotación terrestre (86164 segundos), que tiene un semieje mayor de 42164 km y que puede tener inclinación y excentricidad no nulas. La órbita geoestacionaria es una órbita geosíncrona situada en el ecuador. El satélite parece estático respecto a un punto fijo de la Tierra en rotación. El satélite orbita en la dirección de la rotación

de la Tierra, a una altitud de 35.786 km sobre el ecuador. Esta altitud es significativa ya que produce un período orbital igual al período de rotación de la Tierra, conocido como día sideral. Como resultado, se puede apuntar una antena a una dirección fija y mantener un enlace permanente con el satélite.

Algunas aplicaciones y servicios de esta órbita son radiodifusión y enlaces de contribución, comunicación de flotas, comunicaciones móviles, meteorología (Meteosat), satélites de *relay*, redes VSAT, etc.

A modo de resumen se muestra una tabla con las ventajas e inconvenientes de esta órbita:

Tabla 2.5: Ventajas e inconvenientes de la órbita GEO [3][13]

Ventajas	Inconvenientes
Tecnología desarrollada	No cubre zonas polares
Estabilidad de la señal	Pérdidas de enlace
Doppler mínimo	Retardo considerable
Interferencias predecibles	Alto coste de lanzamiento
Puesta en órbita conocida (breve)	Bajo ángulo de elevación
Buena visibilidad	Eclipses
	Basura espacial

La siguiente figura resume las órbitas descritas en este apartado:

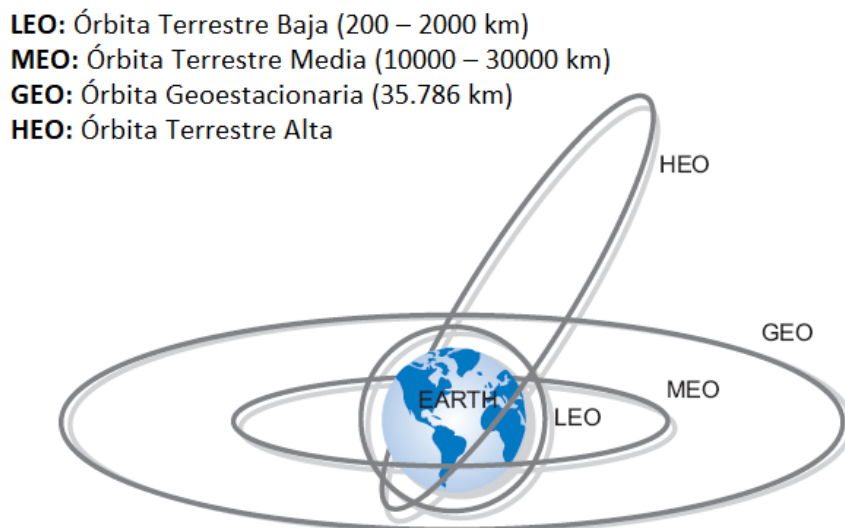


Figura 2.15: Tipos de órbitas [14]



# 3. BASE DE DATOS DE SATÉLITES

En este capítulo se describirá la base de datos de satélites, cómo crear y configurar satélites y la realización de cálculos desde esta.

## 3.1. Creación de satélites en la base de datos de satélites

HTZ Communications nos ofrece la posibilidad de importar automáticamente una serie de satélites desde un archivo ASCII desde el menú *Satellite/Import satellites...* Sin embargo, nosotros optaremos por la opción manual.

Para la creación manual de un satélite [15] nos dirigiremos a la ventana de base de datos de satélites *Satellite/Satellite database...* A continuación pulsaremos en el botón *Add...* Se nos abrirá una ventana donde podremos especificar los parámetros de nuestro satélite a definir.

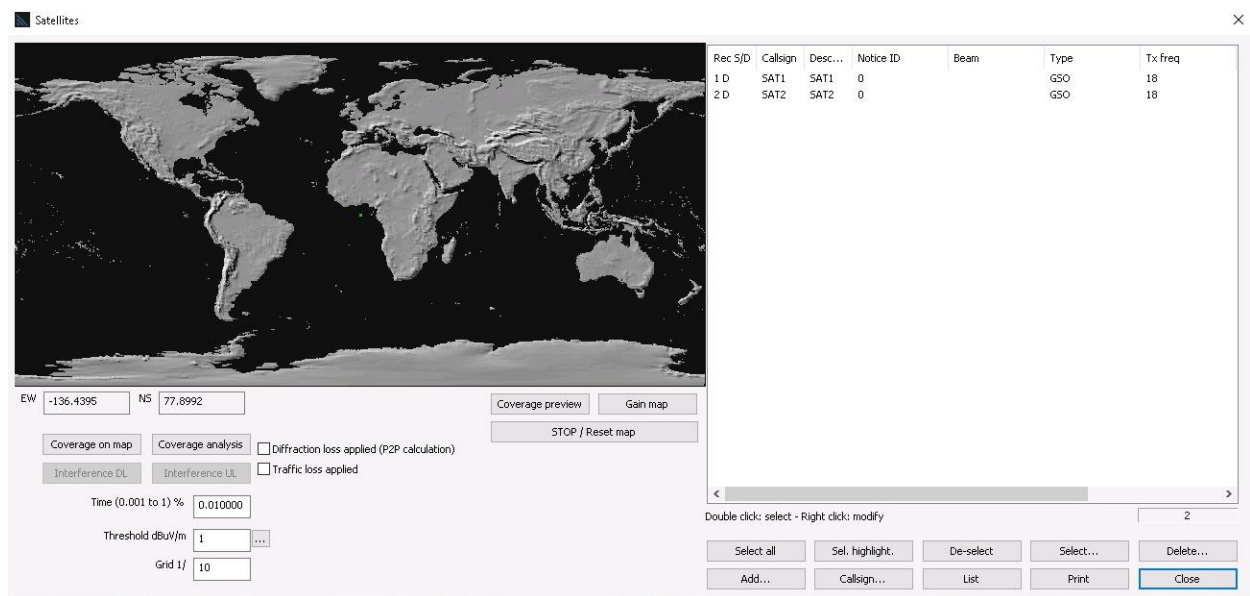


Figura 3.1: Ventana base de datos de satélites

La ventana está organizada en función de distintos parámetros técnicos:

- Características del satélite.
- Control de actitud del satélite.
- Transmisión/recepción.
- Antena.
- Polarización.
- Órbita circular (sólo accesible para satélites NGSO).

Una vez se definan los parámetros, el usuario podrá modificarlos en cualquier momento haciendo clic derecho sobre el satélite que desee en la lista de satélites y pulsando en la opción *Parameters* del menú desplegable.

A continuación se detallan estos parámetros [16]:

### 1. Características del satélite:

- **Call sign** (Código identificativo): código de identificación del satélite. Esta información se utiliza para identificar al satélite en la lista de la base de datos.
- **Color** (Color): color que se utilizará para representar el satélite y su cobertura en el planisferio.
- **Type** (Tipo): tipo de satélite. Existen dos tipos diferentes: GSO (Satélite Geosíncrono) o NGSO (Satélite no Geosíncrono).
- **Description** (Descripción): texto libre de información. Esta información se muestra en la lista de la base de datos de satélites.
- **Info zone** (Zona de información): zona de texto libre.
- **Notice** (Identificador): identificador de satélites importados de la base de datos SRS (UIT).
- **Beam** (Haz): nombre del haz.
- **Group ID Tx / Rx** (ID de grupo Tx / Rx): ID de grupo para transmisión y recepción.
- **Model atten** (Atenuación del modelo): atenuación en dB para tener en cuenta cuando se ejecuta la simulación para el satélite. También se puede aplicar la Recomendación 618 ingresando un -1 en el campo.
- **n.o. subscribers** (Número de suscriptores): número de suscriptores gestionados por el satélite.
- **BW occupancy** (Ocupación de BW): ocupación del ancho de banda en MHz.
- **Loss** (Pérdida): en dB. Este campo no está abierto y se proporciona automáticamente de acuerdo con el ancho de banda de los abonados conectados al satélite.

### 2. Control de actitud del satélite:

El control de actitud del satélite es el conjunto de acciones para controlar la orientación de este respecto a la Tierra.

- **Longitude** (Longitud): en grados (desde -180 hasta +180).
- **Latitude** (Latitud): en grados (desde -90 hasta +90). Sólo accesible para los satélites de tipo NGSO (Satélite no Geosíncrono), ya que para los GSO (Satélites Geosíncrono) esta es 0 grados.
- **StationKeepingError** (Error en el mantenimiento de la posición orbital del satélite): existen varios factores que perturban la posición orbital del satélite como las fuerzas gravitatorias del sol o de la luna. Este parámetro se introduce en grados.
- **Distance to earth center** (Distancia al centro de la Tierra): en kilómetros. Sólo accesible para los satélites de tipo NGSO (Satélite no Geosíncrono), ya que para los GSO (Satélites Geosíncrono) este parámetro es una constante y es igual a 42164 km.

La posición del satélite y la orientación de su antena (coordenadas de apuntamiento) se pueden definir de dos formas diferentes:

- 1) Utilizando la latitud y la longitud del punto subsatelital junto con la orientación del haz alrededor del eje satélite-objetivo.
- 2) Usando los ángulos de Euler ( $\varphi, \theta, \psi$ ) = (phi, theta, psi).

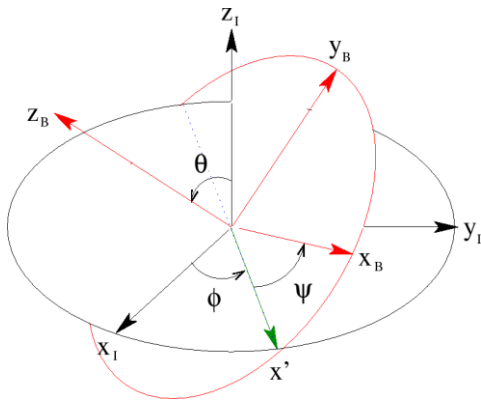


Figura 3.2: Ángulos de Euler [17]

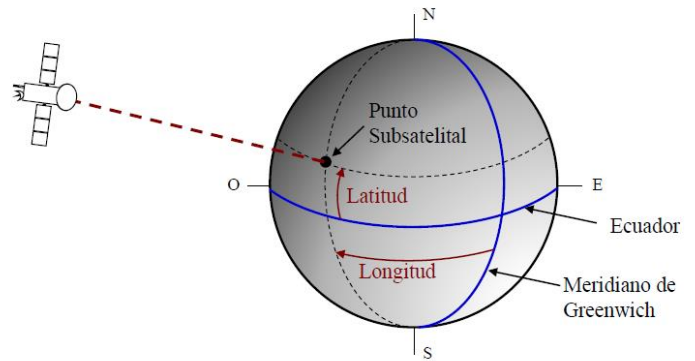


Figura 3.3: Latitud y longitud del punto subsatelital [2]

- **Boresight coord** (Coordenadas de apuntamiento): modo de las coordenadas. Existen tres posibilidades:
  - **Earth boresight coordinates are valid** (Coordenadas de apuntamiento terrestre activas): esta elección abre los campos de los ángulos de apuntamiento de longitud y latitud, la distancia al centro de la Tierra y la orientación de apuntamiento. Esta opción activa también el control de *Coordinates -> Euler* (Coordenadas -> Euler).
    - **Boresight longitude** (Longitud de apuntamiento): en grados (desde -180 hasta +180).
    - **Boresight latitude** (Latitud de apuntamiento): en grados (desde -90 hasta +90).
    - **Boresight earth center (dist)** (Distancia a la Tierra): en kilómetros.
    - **Boresight orientation** (Orientación): en grados.
  - **Euler angles only are valid** (Ángulos de Euler solamente activos): esta elección abre los campos de distancia al centro de la Tierra, la orientación de apuntamiento y los ángulos de Euler phi, theta y psi. Esta opción también activa el control de *Euler -> Coordinates* (Euler -> Coordenadas).
    - **Boresight Euler angle phi** (Ángulo de Euler phi): en grados.
    - **Boresight Euler angle theta** (Ángulo de Euler theta): en grados.
    - **Boresight Euler angle psi** (Ángulo de Euler psi): en grados.
  - **Both are valid** (Ambos activos): esta opción abre todos los campos de entrada y ambos controles.
- **Euler -> Coordinates** (Euler -> Coordenadas): conversión de los ángulos de Euler en coordenadas de apuntamiento terrestre. Sólo disponible en el modo de ángulos de Euler o ambos activos.
- **Coordinates -> Euler** (Coordenadas -> Euler): conversión de las coordenadas de apuntamiento de la Tierra en ángulos de Euler. Sólo disponible en el modo de coordenadas de apuntamiento terrestre o ambos activos.

### 3. Transmisión/recepción:

- **Nominal power** (Potencia nominal): en vatios.
- **Max power** (Máxima potencia): en vatios.
- **Tx gain** (Ganancia del transmisor): en dB.
- **Rx gain** (Ganancia del receptor): en dB.
- **Tx losses** (Pérdidas del transmisor): en dB.
- **Rx losses** (Pérdidas del receptor): en dB.
- **ISO** (Modo isofrecuencia): activa el modo isofrecuencia.
- **Tx frequency** (Frecuencia del transmisor): en GHz.
- **Tx bandwidth** (Ancho de banda del transmisor): en MHz.
- **Rx frequency** (Frecuencia del receptor): en GHz.
- **Rx bandwidth** (Ancho de banda del receptor): en MHz.
- **Rx antenna noise K** (Ruido K de la antena de recepción): en Kelvin.
- **G/T** (Relación G/T): ganancia sobre temperatura en dB/K.
- **Launch delay** (Retraso de lanzamiento): en  $\mu$ sec.

### 4. Antena:

- **Max pointing error (roll+pitch)** (Máximo error de apuntamiento del cabeceo y alabeo): en grados.
- **Max pointing error (rotation yaw)** (Máximo error de apuntamiento de la guiñada): en grados.
- **Max power** (Máxima potencia): en vatios.
- **Pattern shape** (Patrón de radiación): 4 opciones: patrón circular, elíptico, otro o GXT. Para GXT se deberá seleccionar el archivo correspondiente con el botón *GXT file...*

### 5. Polarización:

- **Clockwise** (En el sentido de las agujas del reloj).
- **Polar axial ratio** (Relación axial polar): introducir un 1 para una polarización circular, de lo contrario se deberá introducir la relación Emín/Emáx.
- **Angle of polarization** (Ángulo de polarización): en grados.

### 6. Óbita circular:

- **Inclination** (Inclinación): desde  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ .
- **Anomaly at  $T_0$**  (Anomalía en  $T_0$ ): desde  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .
- **Relative time  $T-T_0$**  (Tiempo relativo  $T-T_0$ ): en segundos.

Vamos a proceder a la creación de un satélite de ejemplo mediante los pasos explicados anteriormente. Usaremos el satélite HISPASAT 30W-5 (Hispasat 1E), situado en la longitud orbital 30 oeste. El transpondedor dispondrá de 14 W de potencia nominal y las antenas transmisoras y receptoras tendrán 43.5 dB de ganancia. Las frecuencias a las que se establece el enlace son 14808 MHz para el enlace ascendente y 11729 MHz para el descendente, en banda Ku.

La ventana de los parámetros para la creación del satélite con todos los valores introducidos se muestra en la siguiente figura:

Figura 3.4: Creación de satélite de ejemplo HISPASAT 1E

Para las simulaciones siguientes se han introducido varios satélites cuya información ha sido extraída de [18].

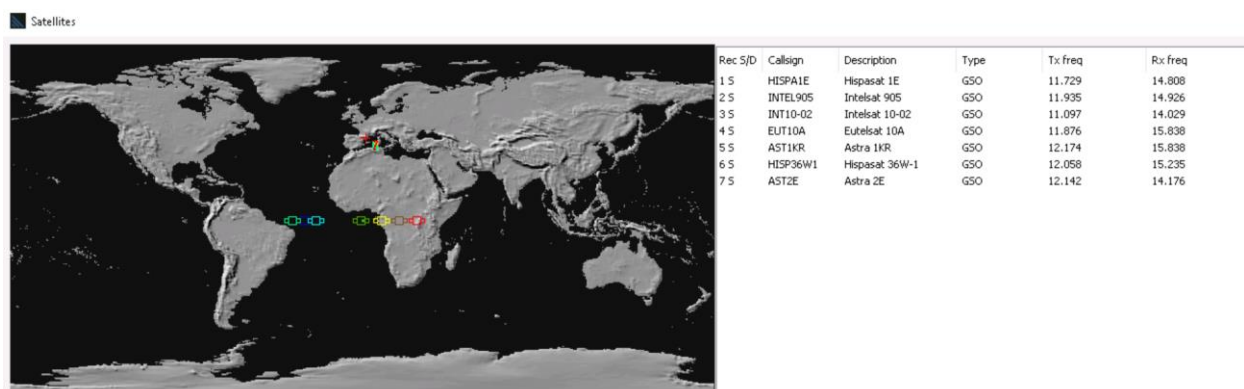


Figura 3.5: Base de datos de satélites con varios satélites de ejemplo

La información acerca de estos satélites está recogida en la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Parámetros de los satélites de ejemplo

<b>Número</b>	<b>Nombre</b>	<b>Posición</b>	<b>Potencia nominal (W)</b>	<b>Ganancia antenas (dB)</b>	<b>PIRE (dBW)</b>	$f_{ul}$ (MHz)	$f_{dl}$ (MHz)
1	HISPASAT 1E	30° W	14	42	54	14808	11729
2	INTELSAT 905	24° W	10	30	40	14926	11935
3	INTELSAT 10-02	1° W	11	25.7	42	14029	11097
4	EUTELSAT 10A	10° E	12	37.2	48	15838	11876
5	ASTRA 1KR	19° E	12	39.2	50	14206	12174
6	HISPASAT 36W-1	36° W	6	47.2	55	15235	12058
7	ASTRA 2E	13° W	13	39.8	54	14176	12142

Todos estos satélites son geoestacionarios. Se han utilizado estos satélites en concreto porque poseen una huella satelital que cubre España, que será donde situaremos nuestras estaciones terrenas. Estos serán los satélites que usaremos principalmente a lo largo de este documento. En la siguiente figura se muestran las localizaciones orbitales de estos satélites y la orientación de sus antenas sobre el planisferio.

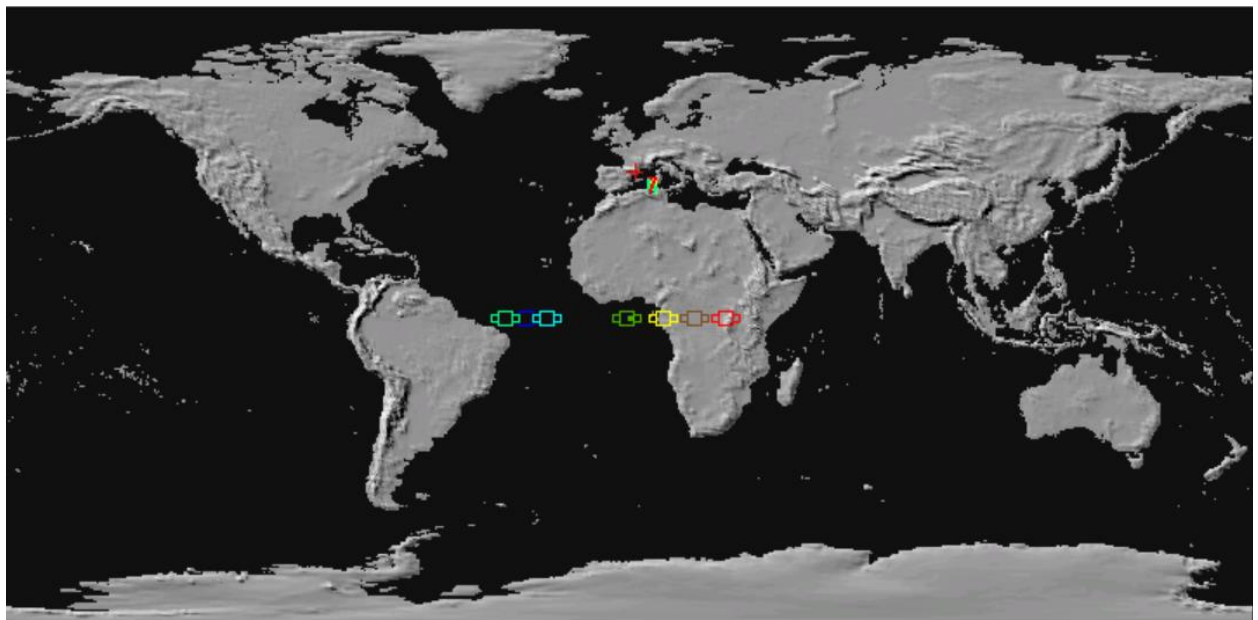


Figura 3.6: Localización orbital de los satélites de ejemplo y orientación de sus antenas en el mapamundi

### 3.2. Descripción de la base de datos de satélites

Cuando abrimos la ventana de base de datos de satélites *Satellite/Satellite database...*, podemos distinguir varias zonas que se muestran en la figura 3.7. A continuación procedemos a explicar con detalle la función de cada una de ellas [15].

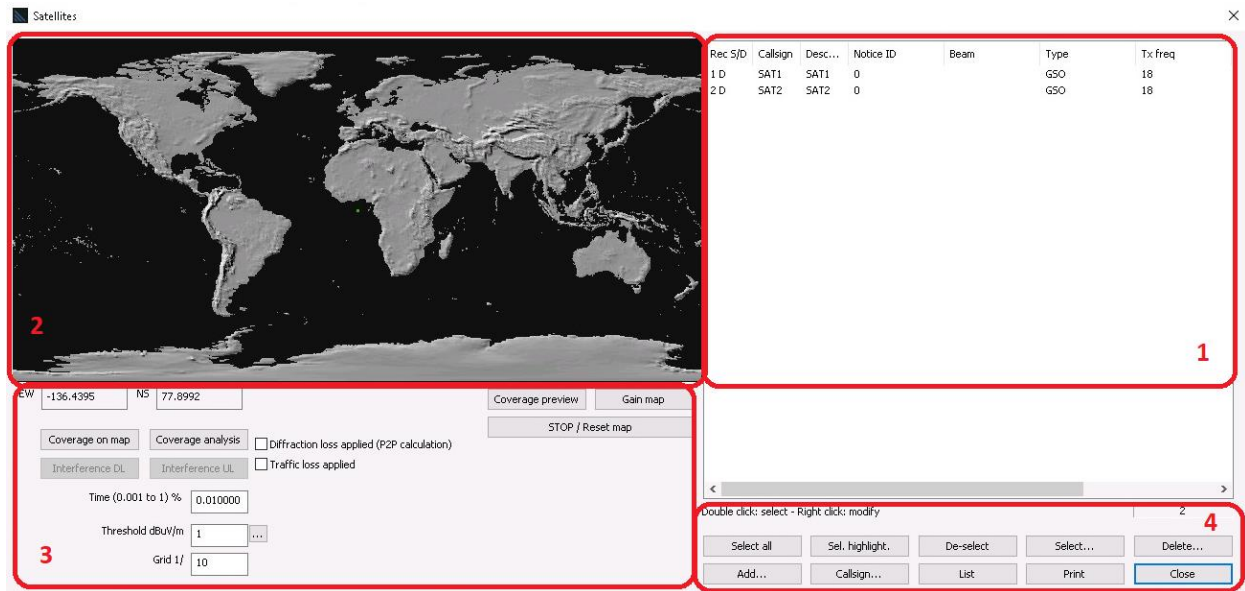


Figura 3.7: Zonas de la ventana de base de datos de satélites

#### 1. Lista de satélites:

En esta zona se muestra la lista de los satélites importados a la base de datos.

La primera columna en la ventana de la base de datos de satélites, *Rec S/D*, muestra el número de registro y el estado (S para seleccionado, D para deseleccionado). Para seleccionar o deseleccionar los satélites se usan los botones situados en el área 4 *Select all* (Seleccionar todos), *Sel. highlight.* (Seleccionar los destacados), *De-select* (Deseleccionar) y *Select...* (Seleccionar...) donde podremos buscar y seleccionar el satélite por su identificador. También podremos seleccionar y deseleccionar cualquier satélite de la lista haciendo clic con el botón derecho y luego usando *Select/De-select*.

Es importante tener en cuenta que **sólo los satélites seleccionados se tendrán en cuenta para los cálculos**.

El resto de las columnas muestra información acerca del nombre, descripción, identificador, haz, tipo de satélite y frecuencia del transmisor, parámetros que se vieron en el apartado anterior.

Al hacer clic con el botón derecho en cualquier satélite de la lista, se abrirá un menú emergente que ofrece diferentes opciones:



- **Parameters** (Parámetros): abre el cuadro de parámetros del satélite para comprobarlos o modificarlos.
- **Convert to station** (Convertir a estación): crea un objeto de tipo Tx/Rx en el mapa con los parámetros de satélite y su cobertura (si la hubiera). Esto permite que la herramienta utilice las mismas funciones que para cualquier otro objeto en el mapa, sin usar más la base de datos de satélites.
- **Resources** (Recursos): esta opción permite calcular el número de suscriptores conectados, la banda de frecuencia ocupada, pérdidas y ganancias del satélite seleccionado y actualizar el valor de las pérdidas en dB del satélite.



**2. Área de visualización:**

En esta área se muestra el planisferio. Al seleccionar un satélite en la lista de la base de datos aparecerán dos iconos del color definido en los parámetros del satélite, correspondientes a la localización orbital y a la orientación de la antena sobre el mapamundi. Estos iconos son:

Tabla 3.2: Parámetros del área de visualización

Localización orbital de los satélites	
Orientación de la antena	

Si hacemos clic derecho en cualquier punto del mapamundi podremos seleccionar los satélites circundantes dentro de un rango especificado, tal y como se muestra en siguiente figura:

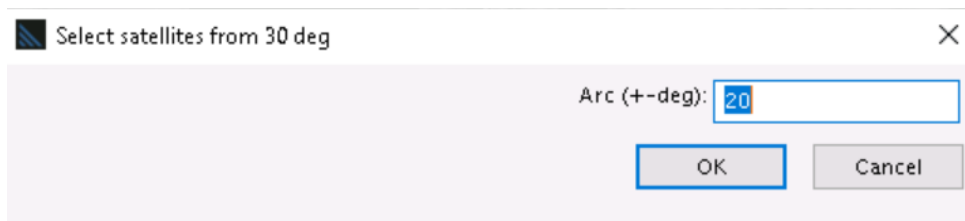


Figura 3.8: Selección de satélites dentro de un rango específico

**3. Área de cálculos:**

Las funciones de esta zona se analizarán en el siguiente apartado 3.3.

**4. Área de control:**

Para agregar nuevos satélites se usa el botón *Add...* Los botones *Sel. highlight.*, *Select all*, *Select...* y *De-Select* sirven para seleccionar/deseleccionar satélites. Si se hace clic en *Delete...* se eliminarán los satélites seleccionados. El botón *Callsign...* asignará automáticamente un identificador a cada satélite usando el primer o los dos primeros caracteres.

**3.3. Cálculos desde la base de datos de satélites**

Desde el menú de base de datos de satélites se nos ofrece la posibilidad de realizar distintos cálculos como son análisis de cobertura, mapa de ganancia y medidas de interferencias tanto en el enlace ascendente como en el descendente. Se procede a explicar cada uno de ellos y a realizar distintas simulaciones que muestren su funcionamiento [15].

**3.3.1. Análisis de cobertura**

Esta función muestra la huella de cobertura de los satélites en dBuV/m y dBm.

Para el análisis de cobertura usaremos los botones *Coverage preview* y *Coverage on map*.

El botón *Coverage preview* (Vista previa de cobertura) muestra la huella de cobertura de los satélites seleccionados en el mapa del mundo situado a la izquierda de la base de datos de satélite. Cada huella se mostrará con el color correspondiente al que hayamos asignado a cada satélite. Esta opción nos puede servir para hacernos una idea rápida de las zonas a la que uno o varios satélites darán cobertura.



Si usamos la opción *Coverage on map* (Cobertura en el mapa) se cerrará la base de datos de satélites, se mostrará la cobertura de los satélites seleccionados en el terreno y aparecerá una ventana donde podremos seleccionar entre cuatro tipos de análisis distintos. La cobertura se calcula utilizando el modelo de propagación seleccionado, que es por defecto el UIT-R P.618, aunque también puede ser definido por el usuario, y el umbral de receptor especificado. Para las simulaciones se ha fijado un umbral de 1 dBuV/m. Las posibilidades de análisis que se nos ofrece son las siguientes:

**Composite coverage** (Cobertura compuesta)

Muestra el valor de intensidad de campo recibido más alto encontrado en cada punto del terreno. Para ello, se utiliza una paleta de colores que muestra esta intensidad y que podremos personalizar.

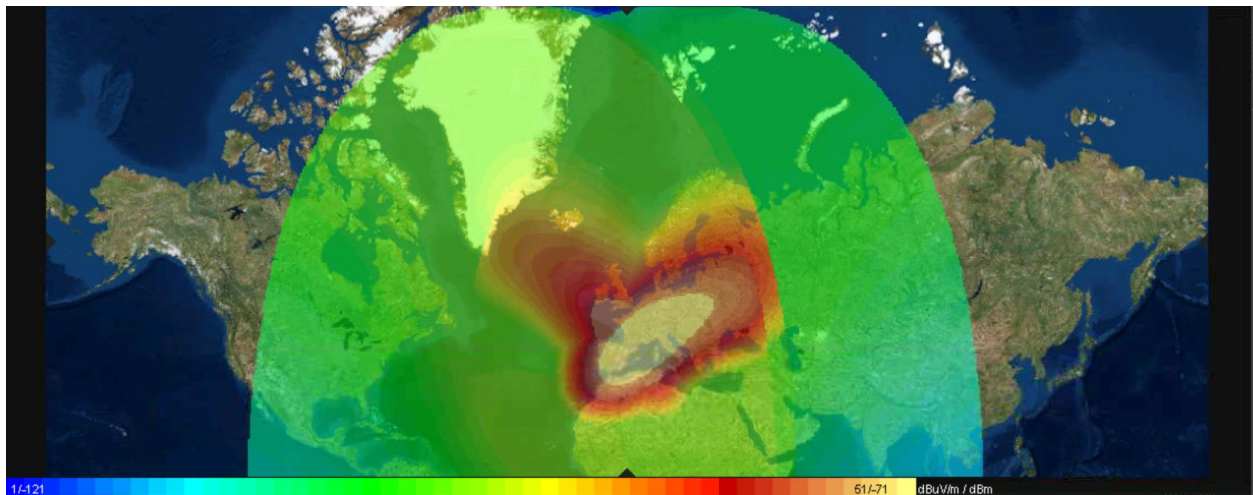


Figura 3.9: Cobertura compuesta

La paleta de colores situada en la parte inferior muestra la intensidad de campo, siendo el color azul situado más a la izquierda el valor más bajo con 1 dbuV/m (tal y como establecimos el umbral) y -121 dBm, mientras que el color amarillo situado más a la derecha denota el valor más alto con 51 dbuV/m y -71 dBm.

Además de la paleta, podemos hacer clic derecho y pulsar sobre *Coverage mean value...* para obtener el valor medio de la intensidad de campo en una determinada zona del mapa, como se muestra en la siguiente figura:

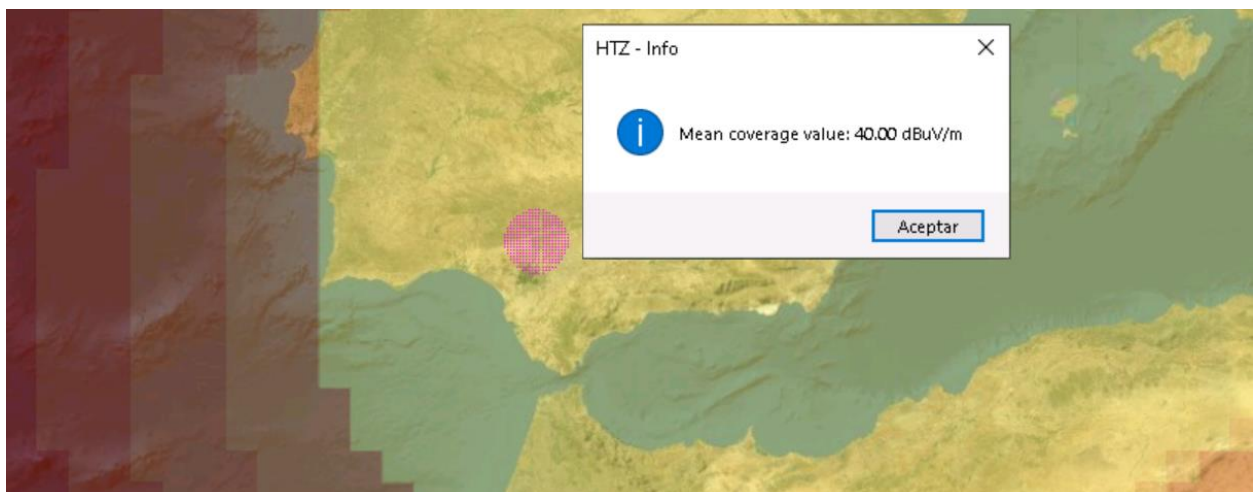


Figura 3.10: Función "Coverage mean value"

**Best server display** (Mostrar el mejor servidor)








Muestra qué satélite proporciona la máxima intensidad de campo recibida en cada punto del terreno. Cada satélite podrá ser diferenciado de los demás por el color definido en sus parámetros. Los colores de la paleta disponen de un código que permite diferenciarlos, del 1 al 12 de izquierda a derecha.



Figura 3.11: Paleta de colores

Para los satélites en la base de datos se han usado los colores mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 3.3: Colores usados por los satélites

<i>Satélite</i>	<i>Código color</i>	<i>Color</i>
HISPASAT 1E	1	
INTELSAT 905	3	
INTELSAT 10-02	6	
EUTELSAT 10A	7	
ASTRA 1KR	10	
HISPASAT 36W-1	4	
ASTRA 2E	9	

Si ejecutamos la simulación, obtendremos algo parecido a la siguiente figura:

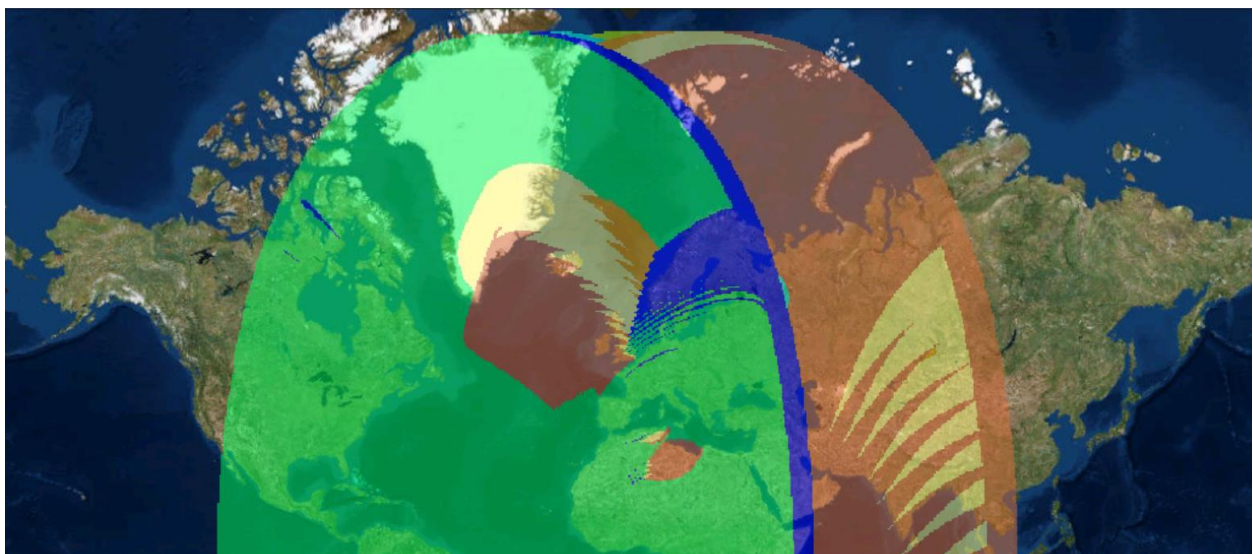


Figura 3.12: Mejor servidor

Como hemos mencionado anteriormente, esta función nos muestra en el mapa qué satélite nos ofrece mayor intensidad de campo en los puntos del terreno. Por tanto, podemos concluir que el satélite que nos proporciona mejor servicio en España es HISPASAT 36W-1.

El programa nos ofrece una función interesante llamada *Legend color report by distance*. Para acceder a esta debemos hacer clic derecho en la zona del mapa que queramos analizar y a continuación pinchar sobre *Legend color report by distance...* Al clicar se nos abrirá una ventana donde especificaremos el radio del círculo que tomará el programa como superficie a analizar. Esto lo haremos en el recuadro *End distance (m)*. Para este ejemplo tomaremos un radio de 25000000 metros y lo centraremos en Europa. El programa dibujará el círculo en el mapa y se nos abrirá un informe. El informe contiene información acerca del área cubierta por cada satélite y su porcentaje cubierto respecto al total o los mínimos valores de potencia en dBm. Es importante recordar que estos porcentajes están basados en el mapa del mejor servidor, por tanto puede ser que los satélites cubran más superficie de la que nos dice el informe, sin embargo, habrá otro satélite que nos proporcione más potencia.

Observando el informe mostrado en la figura 3.14 vemos que el satélite con código de color 4 (Hispasat 36W-1) ocupa la mayoría del área que estamos analizando, con un 69.21% y con un valor mínimo de -117.8296 dBm. En cambio, el satélite con código de color 7 (Eutelsat 10A) ocupa únicamente un 0.07% del área.

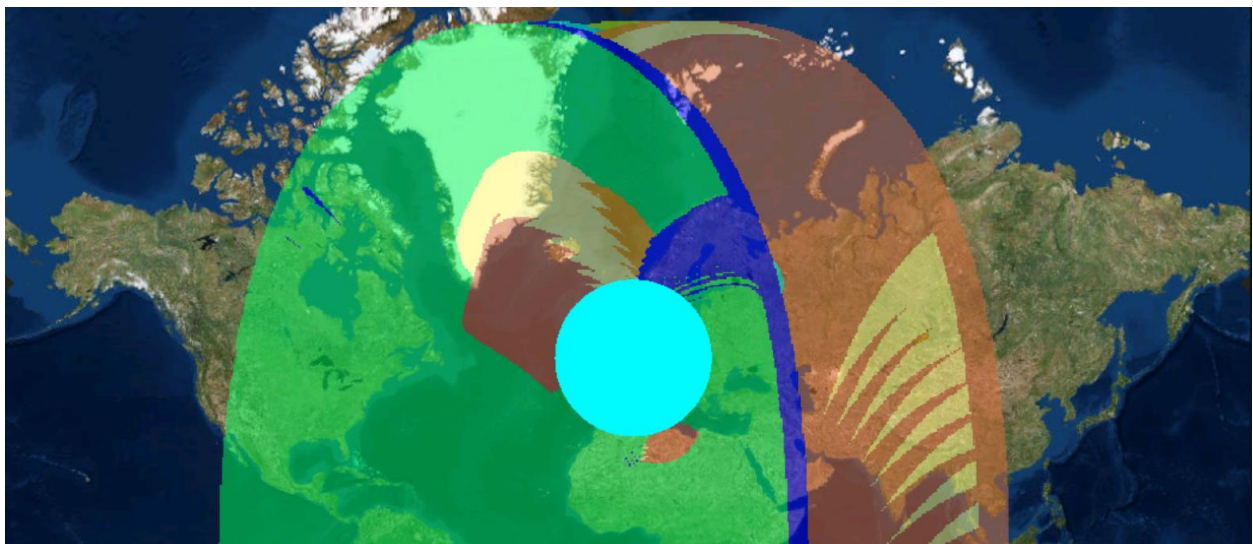


Figura 3.13: Función "Legend color report by distance"

Record	Color code	Min value found	Min value found dBm	Surface covered km2	Total area covered km2	Percentage covered	Label	Start distance (m)	End distance (m)
1	1	1	-120.8297	1413123.50	19634662.00	7.20		0	2500000
2	4	4	-117.8297	13590076.00	19634662.00	69.21		0	2500000
3	7	7	-114.8297	14717.79	19634662.00	0.07		0	2500000
4	9	9	-112.8297	3573001.75	19634662.00	18.20		0	2500000
5	10	10	-111.8297	1043742.88	19634662.00	5.32		0	2500000

Figura 3.14: Informe obtenido con la función "Legend color report by distance"



**Simultaneous coverage** (Cobertura simultánea)

Muestra las áreas de coberturas superpuestas.

Al ejecutar la simulación, obtenemos la siguiente figura:

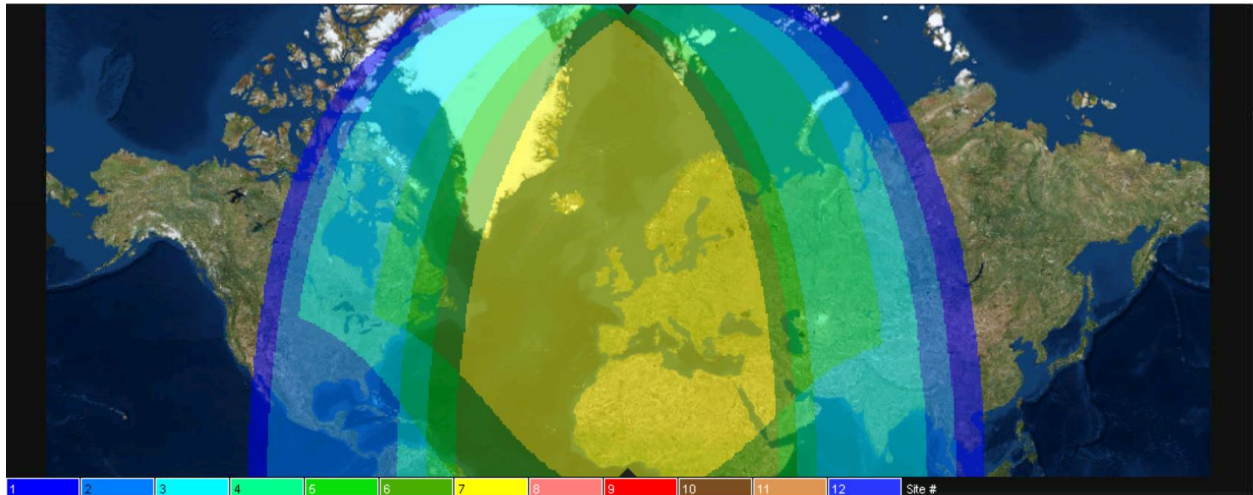


Figura 3.15: Cobertura simultánea

La leyenda de abajo nos muestra el número de satélites que emiten en la zona coloreada con el color correspondiente. Por ejemplo, en el área de color amarillo dan cobertura siete satélites mientras que la zona de color azul oscuro solo da cobertura un satélite.

**Power flux density map** (Mapa de densidad de flujo de potencia)

Muestra el mapa de densidad de flujo de potencia. Este cálculo se realiza teniendo en cuenta un ancho de banda de referencia que podremos seleccionar.

Probaremos esta funcionalidad con el satélite Hispasat 1E. Para ello, seleccionaremos un ancho de banda de referencia de 1 MHz. Debemos tener en cuenta que si tenemos varios satélites seleccionados en la base de datos esta simulación se realizará teniendo en cuenta todos ellos. Si ejecutamos la simulación con esta configuración obtendremos la siguiente figura:

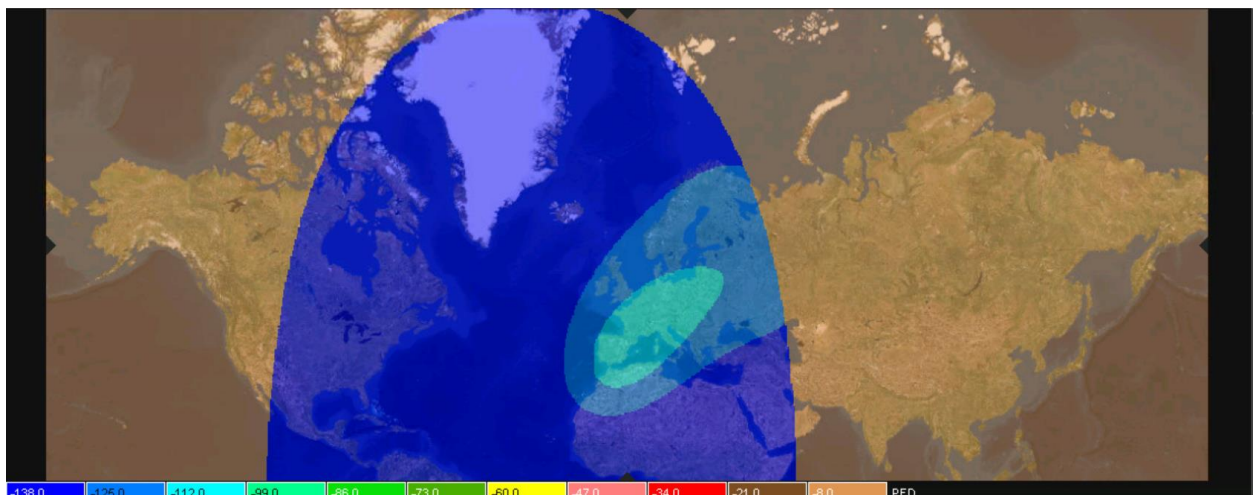


Figura 3.16: Mapa de densidad de flujo de potencia del satélite Hispasat 1E

La paleta de colores situada en la parte inferior muestra los valores de la densidad de flujo de potencia expresados en dBW/m<sup>2</sup>. Se puede observar que en España tenemos una densidad de -112 dBW/m<sup>2</sup>. Debemos tener en cuenta que la porción de mapa con color marrón está fuera de la cobertura del satélite y por tanto la densidad de potencia del satélite será aproximadamente cero.

Esta opción es de especial interés para asegurarnos de que cumplimos los límites de emisión impuestos por la UIT. Estos límites dependerán de los servicios y bandas de los satélites. Según la UIT [19]:

*“Las emisiones de estaciones espaciales pueden causar interferencias a sistemas de radioenlaces terrenales en las bandas de frecuencias compartidas. En función del ángulo de llegada puede penetrar energía interferente por el haz principal o los lóbulos laterales de las antenas de las estaciones terrenales de los sistemas de radioenlaces. Si bien pueden calcularse los efectos interferentes debidos a las emisiones de una determinada estación espacial en un solo sistema de radioenlaces, es prácticamente imposible calcular los efectos acumulativos de numerosas estaciones espaciales en cada uno de los múltiples sistemas de radioenlaces existentes o en proyecto. Por consiguiente, teniendo en cuenta la uniformidad en las características de los sistemas de radioenlaces con visibilidad directa, se ha encontrado la forma de proteger a estos sistemas imponiendo restricciones generales a las emisiones de las estaciones espaciales. Estas restricciones se refieren al valor de la densidad máxima admisible de flujo de potencia, en una anchura de banda de referencia, producida en la superficie de la Tierra por las emisiones de las estaciones espaciales en las condiciones de propagación en el espacio libre.”*

Al determinar estos límites se tiene en cuenta que los valores han de ser suficientemente bajos, para así no rebasar los límites recomendados de interferencia máxima admisible a los actuales y futuros sistemas de radioenlaces terrenales que usan las mismas frecuencias, y que estos han de ser suficientemente altos de manera que puedan funcionar satisfactoriamente los sistemas de radiocomunicaciones espaciales.

### 3.3.2. Mapa de ganancia

Muestra el mapa de ganancia del satélite que seleccionemos. Si seleccionamos más de un satélite los mapas se superpondrán.

Si, por ejemplo, seleccionamos el satélite Hispasat 1E y clicamos sobre *Coverage preview* (Vista previa de cobertura) se nos indicará en el mapa terrestre la zona a la que proporciona cobertura este satélite.

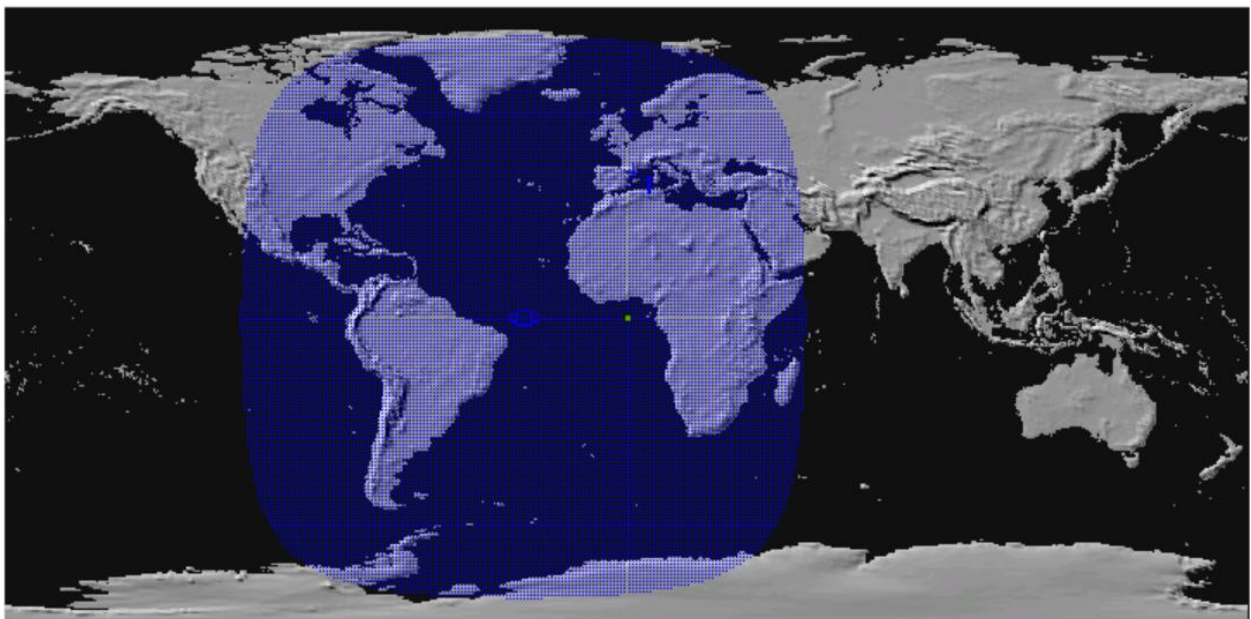


Figura 3.17: Vista previa de cobertura del satélite Hispasat 1E

No obstante, sabemos que el satélite no emitirá un nivel de potencia uniforme sino que dependerá de la zona en que nos encontremos de este área de cobertura. Para mostrar los distintos niveles de ganancia del satélite utilizamos la opción *Gain Map* (Mapa de ganancia).

En la representación se usa la paleta de colores por defecto del programa en la que el color de más a la derecha se corresponde con el menor nivel de ganancia mientras que el de más a la izquierda representa el mayor nivel de ganancia.



Figura 3.18: Paleta de colores

En la siguiente figura podemos observar que el satélite Hispasat 1E tiene el mayor nivel de ganancia en la zona de Europa y por tanto recibiremos un mayor nivel de potencia.

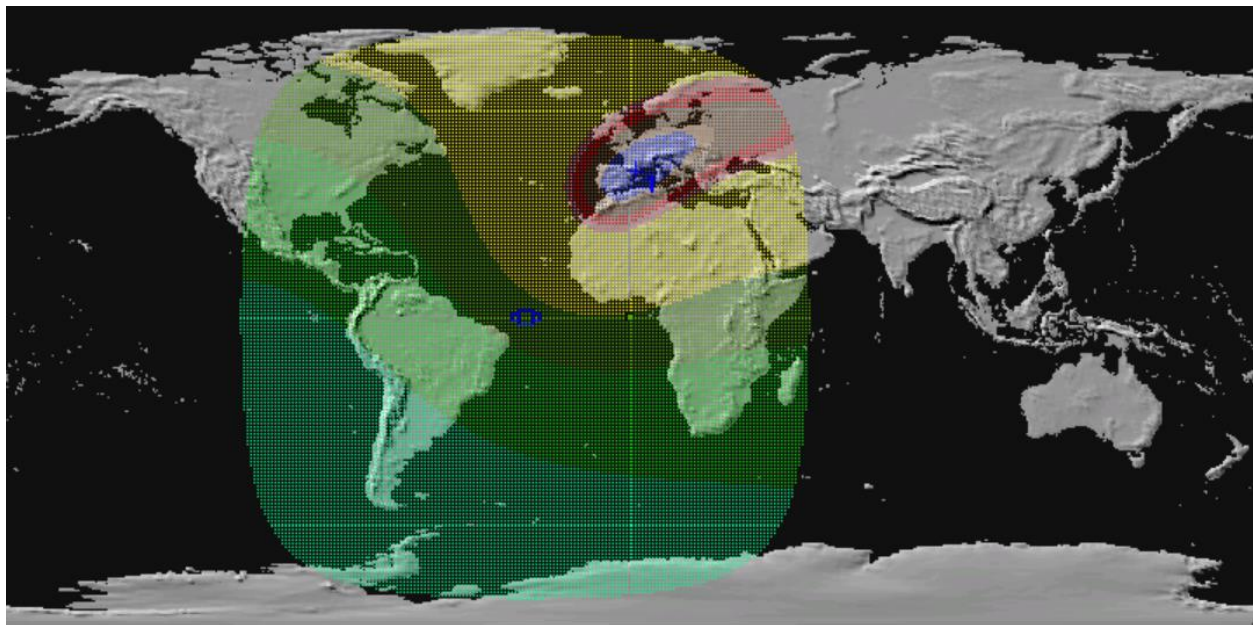


Figura 3.19: Mapa de ganancia del satélite Hispasat 1E

### 3.3.3. Interferencia en el enlace descendente

Esta herramienta nos permite analizar la interferencia causada por los satélites en las estaciones terrenas para las situaciones de cocanal, canales adyacentes o N+2, N+3... hasta N+15 canales.

La interferencia cocanal es la diafonía de dos transmisores de radio distintos que usan el mismo canal, mientras que la interferencia de canal adyacente es aquella producida en el canal que está inmediatamente al lado del que nos interesa. El segundo canal adyacente estará a dos canales de distancia, el tercero a tres canales de distancia, y así sucesivamente.

Para contrarrestar este fenómeno existen diversas técnicas, todas ellas consistentes en la determinación de factores de rechazo de interferencia, que definen como afectan las señales interferentes a la señal deseada en función de su separación en frecuencia.

Podremos acceder a la configuración de estos factores de rechazo de interferencia mediante el botón *IRF...* que encontraremos en el recuadro de la función *Interference UL* (Interferencia en el enlace ascendente) [20]. Al clicar se nos abrirá la siguiente ventana:



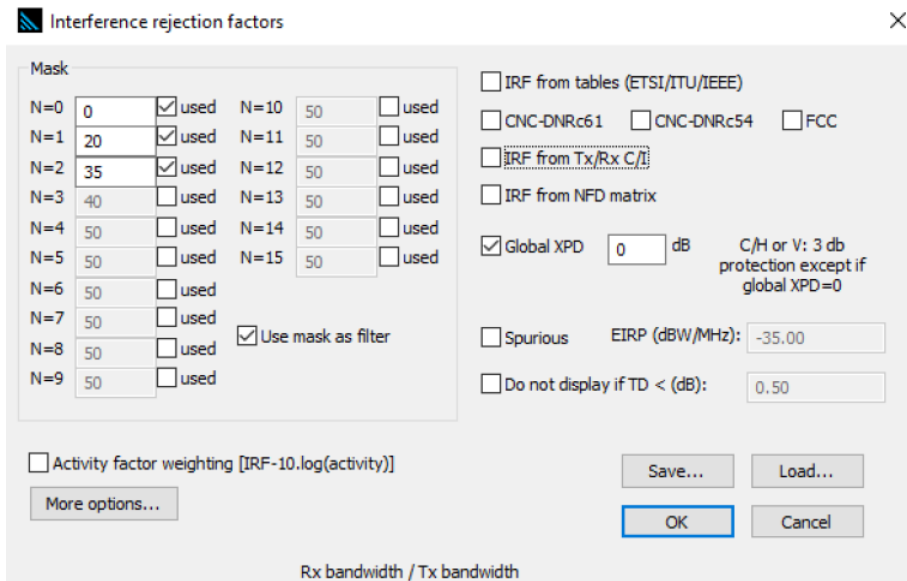


Figura 3.20: Ventana factores de rechazo de interferencia

En este cuadro podremos definir los factores de rechazo para tener en cuenta en los cálculos de interferencia. Sencillamente, estos valores de IRF definirán la atenuación que se aplicará a una señal interferente cuando interfiera una señal deseada.

A partir de la señal deseada (“Wanted”) se define el cocanal, el canal adyacente, el canal N+2, y así sucesivamente tal y como se muestra en la siguiente figura:



Figura 3.21: Definición de los diferentes canales [20]

En el cuadro IRF están disponibles varias opciones para la definición de los valores de rechazo de interferencia, que podremos seleccionar individualmente o todas juntas. Si todas las opciones están marcadas, se aplicará la siguiente regla de prioridad:

1. IRF definidos por matriz.
2. RF definidos por el C/I de los transmisores/receptores.
3. IRF definidos por tablas.
4. IRF definidos por máscara.

### IRF definidos por máscara

La máscara espectral está destinada a reducir la interferencia de canales adyacentes limitando la radiación excesiva en frecuencias más allá del ancho de banda necesario. Para ello, atenuaremos los canales no deseados. Por tanto, los factores de rechazo se definen mediante un valor por canal y se miden en dB.

Podremos configurar una máscara de rechazo de interferencia desde el cocanal hasta el decimoquinto canal adyacente: N=0 para la situación cocanal, N=1 para la situación del primer canal adyacente, N=2 para la situación de segundo canal, y así sucesivamente. Para seleccionar una situación, simplemente mascamos la casilla correspondiente "used". Un ejemplo se muestra en la siguiente figura:

N	Mask (dB)	used
N=0	0	<input checked="" type="checkbox"/>
N=1	20	<input checked="" type="checkbox"/>
N=2	30	<input checked="" type="checkbox"/>
N=3	40	<input type="checkbox"/>
N=4	50	<input type="checkbox"/>
N=5	50	<input type="checkbox"/>
N=6	50	<input type="checkbox"/>
N=7	50	<input type="checkbox"/>
N=8	50	<input type="checkbox"/>
N=9	50	<input type="checkbox"/>
N=10	50	<input type="checkbox"/>
N=11	50	<input type="checkbox"/>
N=12	50	<input type="checkbox"/>
N=13	50	<input type="checkbox"/>
N=14	50	<input type="checkbox"/>
N=15	50	<input type="checkbox"/>

Use mask as filter (all modes)

Figura 3.22: Ejemplo de IRF definido por máscara

La configuración anterior supone que al canal deseado (N=0) se le aplicará una atenuación de 0 dB o, lo que es lo mismo, no se verá afectado. No obstante, el primer canal adyacente (N=1) se verá atenuado 20 dB y el segundo canal adyacente (N=2) 30 dB. Esta situación puede observarse en la siguiente figura, donde se muestra la máscara que usaremos finalmente.

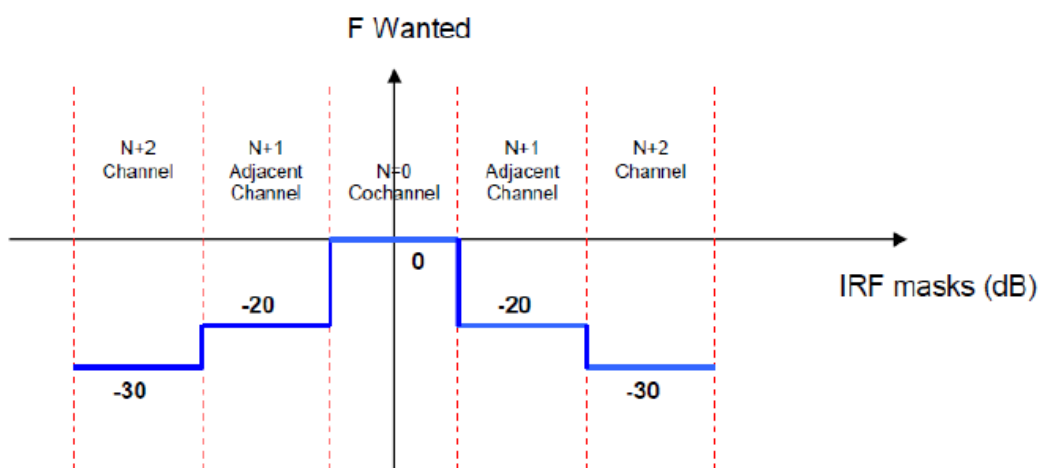


Figura 3.23: Máscara resultante de la configuración de la figura 3.18 [20]



### IRF definidos por matriz

La definición de los factores de rechazo de interferencia por matriz sigue la misma idea que aquellos definidos por máscara, con la salvedad de que, en vez de definir los factores de rechazo para cada canal, lo haremos por cada paso de frecuencia que definamos. Así, obtendremos una máscara más precisa y suave.

Se debe preparar un conjunto de matrices para tener en cuenta todos los pares de equipos transmisor-receptor, es decir, una matriz para cada transmisor y cada receptor en la red bajo diseño.

La siguiente figura representa una matriz con un paso de frecuencia de 1 MHz. La línea verde y discontinua muestra la definición mediante máscara, mientras que la roja mediante matriz.

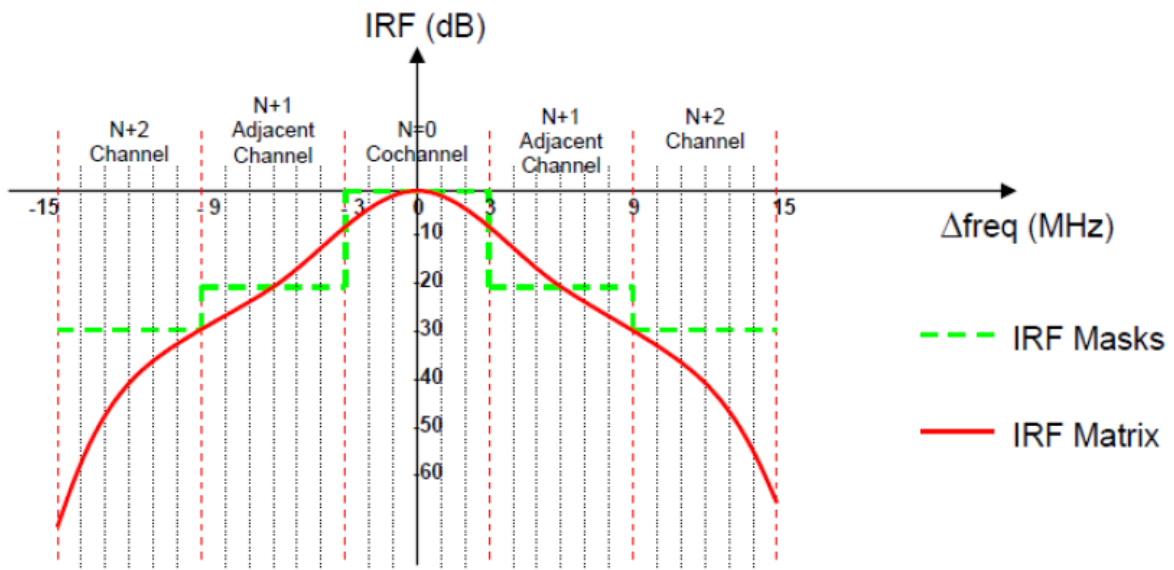


Figura 3.24: Ejemplo de IRF definido por matriz [20]

La matriz se puede definir de dos formas diferentes:

1. Manualmente, mediante *Tools/ Extensions/NFD mask...*
2. Automáticamente, usando la calculadora *IRF Tools/ Extensions/IRF calculator...*

### IRF definidos por tabla

La opción anterior presenta el inconveniente de que requiere mucha más información sobre el equipo transmisor y receptor, que a menudo puede ser difícil de obtener. Por ello, el programa nos ofrece la posibilidad de derivar automáticamente los valores de IRF de tablas predefinidas de distintas recomendaciones. Estas tablas contienen diferentes matrices con un paso de frecuencia correspondiente al ancho de banda definido más bajo. El uso de estas tablas es el mismo que el descrito para las matrices de IRF.

El programa nos ofrece 3 posibilidades:

- Tablas ETSI/UIT/IEEE.
- CNC-DNRc61 y CNC-DNRc54: fórmulas de rechazo de ENACOM.
- FCC: fórmulas de rechazo de FCC.

### IRF definidos por el C/I de los transmisores/receptores

Esta opción tiene en cuenta el valor de la relación C/I de los transmisores y receptores. Este campo se podrá configurar en la pestaña *Advanced* de sus parámetros:

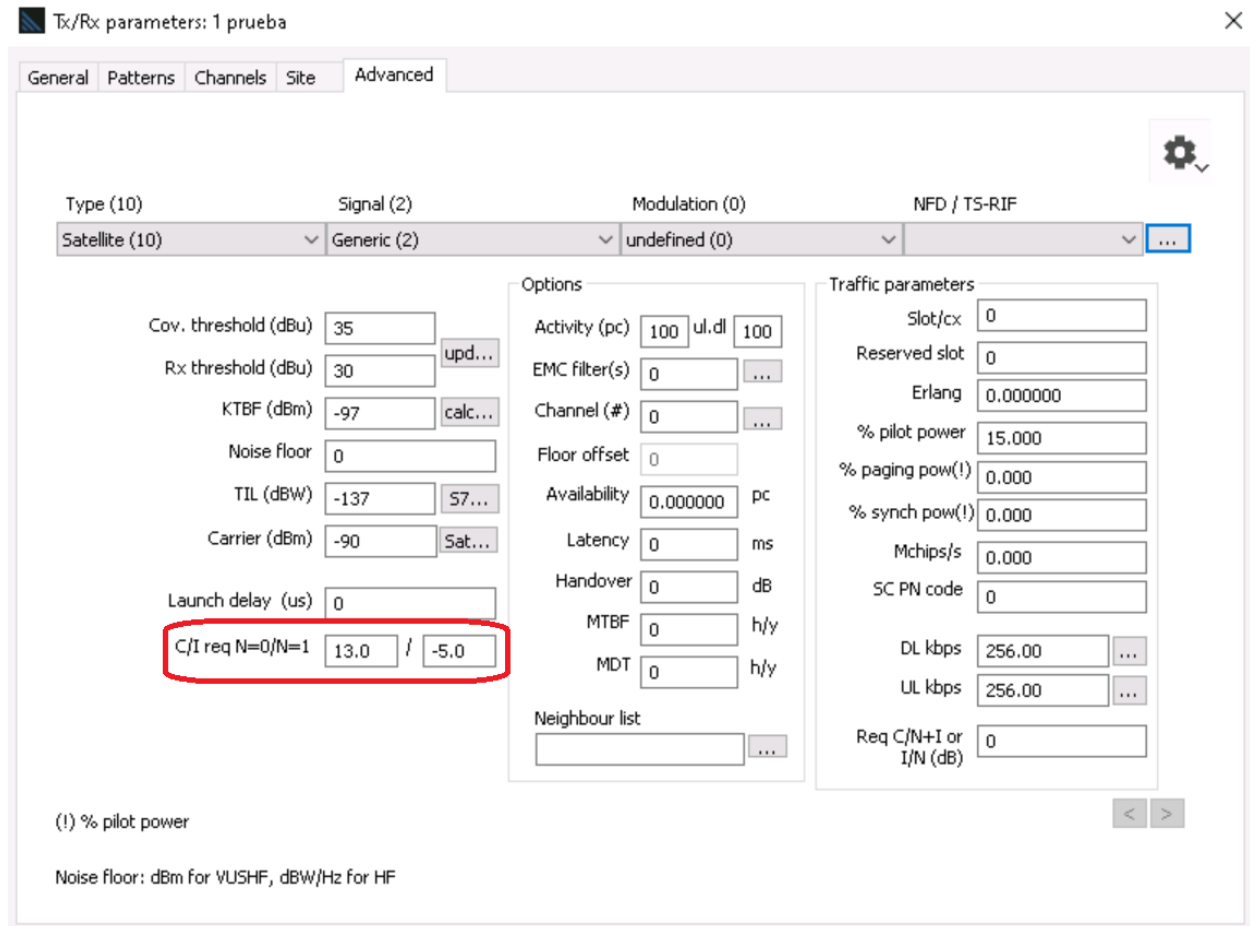


Figura 3.25: IRF definidos por el C/I de un transmisor

Si el valor de C/I en el cocanal o en los canales adyacentes es igual a -127, entonces este valor no se tendrá en cuenta.

La relación de protección C/I caracteriza la capacidad del receptor de recibir la señal deseada (C) en presencia de interferencia (I). Un valor positivo de esta relación significa que la señal deseada debe ser mayor una cantidad determinada de decibelios que la señal interferente para ser decodificada correctamente, mientras que un valor negativo indica que la señal deseada puede ser más débil que la que interfiere.

A continuación se va a realizar una simulación para determinar la interferencia en el enlace descendente. Para ello necesitaremos un conjunto de estaciones terrenas. En esta simulación se hará uso del escenario de estaciones terrenas descrito en la figura 4.6 y en la tabla 4.1.

Una vez en esta disposición, pulsaremos sobre el botón *Interference DL* (Interferencia en el enlace descendente). Se nos abrirá la ventana de configuración de los factores de rechazo de interferencia. En la figura 3.26 se muestra la configuración usada para la simulación en cuestión que, según el orden de prioridad, usará las tablas ETSI/UIT/IEEE para el cálculo de los factores de rechazo de interferencia.

Usando la configuración de los factores de rechazo, el programa nos calculará la interferencia causada en las estaciones terrenas para las situaciones de cocanal y canales adyacentes.

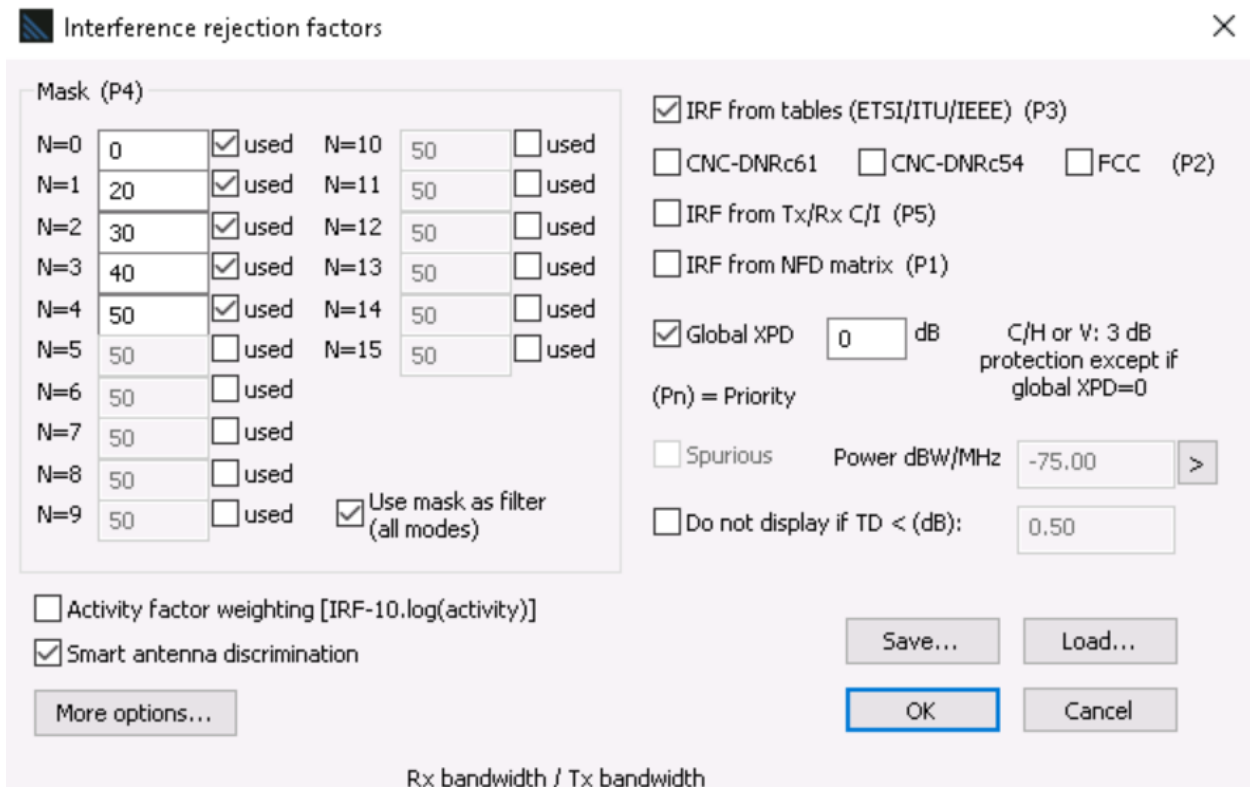


Figura 3.26: Configuración IRF para simulación de interferencia en el enlace descendente

### Space to earth interference

Station	#	Callsign	Freq MHz	Pr dBm	TD dB
	1	orphan	11729	-79.24	17.83
	2	orphan	11935	-96.80	3.66
	3	orphan	11097	-102.29	1.12
	4	orphan	11876	-91.74	6.39
	5	orphan	12174	-100.04	1.76
	6	orphan	12068	-90.01	7.78
	7	orphan	12142	-88.13	9.40

Figura 3.27: Interferencia en el enlace descendente

El resultado es un informe como el mostrado en la figura 3.27. Este nos muestra la frecuencia de transmisión del satélite en MHz, la potencia recibida por la estación en dBm y la degradación del umbral (TD) en dB.

La sensibilidad de un receptor de radio se define como el nivel de la señal deseada recibida para una tasa de error de bit (BER) dada [21]. En presencia de una señal interferente, el nivel de la señal deseada recibida debe aumentarse para conservar la misma BER. Para una BER determinada, la diferencia entre el valor de nivel de sensibilidad aumentado debido a la interferencia y el valor de sensibilidad sin interferencia es la degradación del umbral (TD). En resumen, la degradación del umbral es equivalente al aumento del nivel de ruido debido a la señal interferente en la entrada del receptor.

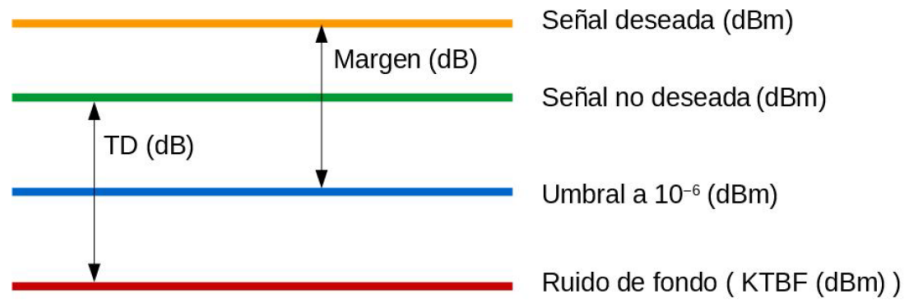


Figura 3.28: Degradación del umbral debido a interferencias [22]

### 3.3.4. Interferencia en el enlace ascendente

Esta función nos permite calcular la interferencia provocada por las estaciones terrenas en los distintos satélites.

Al clicar en esta función se mostrará el cuadro de configuración de IRF. La configuración de IRF que se usará es la mostrada en la figura 3.23. El resultado será un informe similar al del apartado anterior:

### Earth to Space interference

Station	#	Sat	Freq Tx MHz	Freq Rx MHz	Pr dBm
	1	HISPA1E	14808	14808	-71.88
	1	NTEL906	14808	14926	-109.84
	1	NT10-02	14808	14029	-151.71
	1	EUT10A	14808	15838	-151.61
	1	AST1KR	14808	15838	-149.69
	1	ISP36W	14808	15235	-120.90
	1	AST2E	14808	14176	-139.19
	2	HISPA1E	14926	14808	-99.40
	2	NTEL906	14926	14926	-85.35
	2	NT10-02	14926	14029	-152.14
	2	EUT10A	14926	15838	-142.97
	2	AST1KR	14926	15838	-141.21
	2	ISP36W	14926	15235	-136.73
	2	AST2E	14926	14176	-140.70
	3	HISPA1E	14029	14808	-135.98
	3	NTEL906	14029	14926	-146.84
	3	NT10-02	14029	14029	-88.57
	3	EUT10A	14029	15838	-155.83
	3	AST1KR	14029	15838	-156.89
	3	ISP36W	14029	15235	-141.84
	3	AST2E	14029	14176	-119.42

Figura 3.29: Interferencia en el enlace ascendente

En el informe se muestra la potencia recibida en dBm por los satélites desde cada una de las estaciones terrenas. Por ejemplo, si analizamos el satélite Hispasat 1E, que está enlazado con la estación 1 (en el informe se distingue porque la frecuencia de transmisión y la de recepción es la misma), recibe un nivel de potencia de -71.88 dBm. Asimismo, se puede ver el nivel de potencia recibido por este satélite procedente de las demás estaciones. Con estos niveles de potencia podremos calcular una relación señal deseada a interferencia, restando el nivel de potencia deseada (potencia recibida la estación enlazada) y no deseada (potencia recibida por las demás estaciones).

## 4. ESTACIONES TERRENAS

De la misma forma que hemos definido los satélites, necesitamos crear las estaciones terrenas para que nuestra comunicación sea viable. En este capítulo aprenderemos a crearlas manualmente y veremos sus parámetros.

### 4.1. Creación de estaciones terrenas

Como ocurría con los satélites, HTZ Communications nos da la posibilidad de importar automáticamente las estaciones terrenas desde un archivo ASCII. Sin embargo, nosotros optaremos de nuevo por la opción manual.

Para crear una estación terrena [15] hacemos clic derecho sobre el mapa que se nos muestra al iniciar HTZ Communications y a continuación *Add station* → *Tx/Rx...* Se nos abrirá una ventana para configurar los distintos parámetros de nuestra estación terrena. Es importante que en el tipo de estación elijamos la opción de satélite, mostrada en el programa como en la figura 4.1.

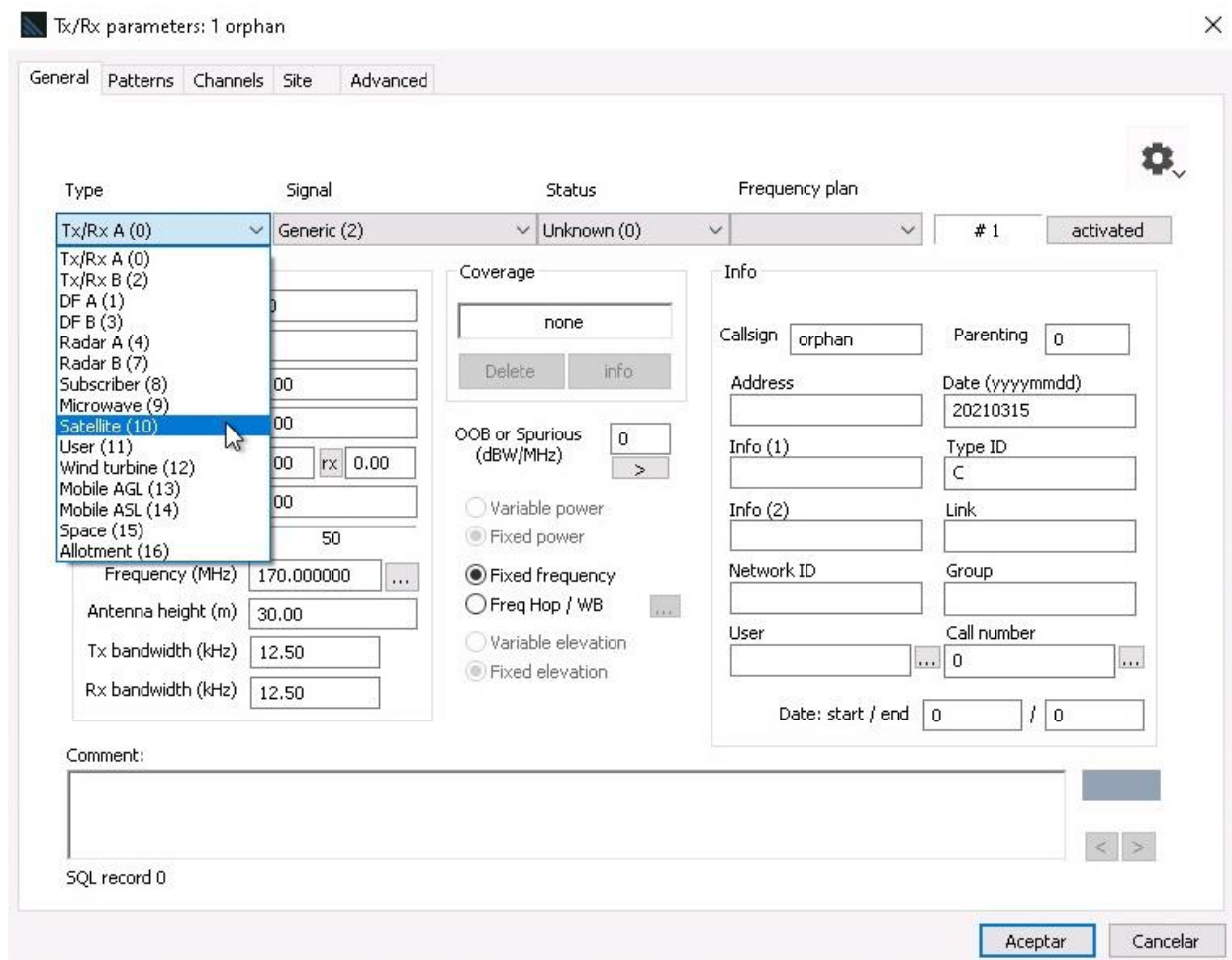


Figura 4.1: Selección estación tipo satélite

En la pestaña *General* podemos encontrar los parámetros del transmisor y receptor, como pueden ser la potencia nominal (W), la ganancia del transmisor y receptor (dB), las pérdidas del transmisor y receptor (dB), la PIRE (W), la frecuencia utilizada (MHz), la altura de la antena (m) y el ancho de banda del transmisor y receptor (kHz).

En la pestaña *Patterns* podremos ver el patrón de radiación de la antena que usemos, así como configurar parámetros de antena como la polarización, el diámetro y su orientación.

Una vez hayamos creado la estación, debemos elegir un satélite de la base de datos para orientar la antena de la estación hacia el satélite. Para ello, hacemos clic en el botón *Sat...* de la pestaña *Patterns* del cuadro de parámetros Tx/Rx (también se puede encontrar en la pestaña *Advanced*).

Vamos a proceder a la creación de una estación terrena de ejemplo mediante los pasos explicados anteriormente. La estación la situaremos en las coordenadas (37°21'05.6"N, 5°58'28.8"W), en la calle Elche de Sevilla, donde están instaladas antenas parabólicas para comunicaciones por satélite en un edificio que pertenece a Telefónica.

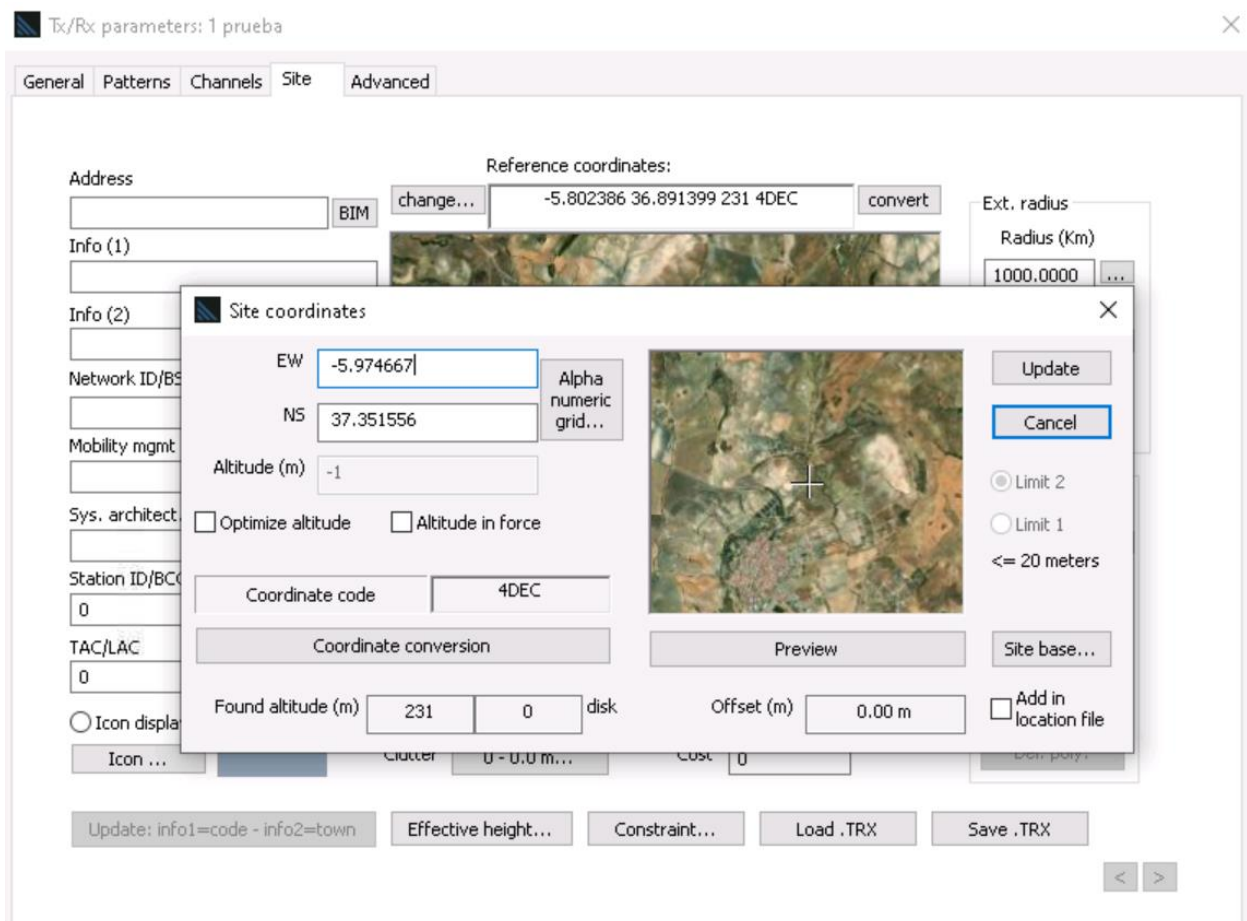


Figura 4.2: Ubicación de la estación terrena de ejemplo

La antena que usaremos se encuentra por defecto en la base de datos de antenas de HTZ Communications (pestaña *Patterns* → *Antenna database*) y corresponde con el modelo P8-102 del fabricante Andrew Corporation. Se trata de una antena parabólica con 2.23 m de diámetro y que cuenta con 45.5 dB de ganancia.

Una vez cargado el modelo, obtendremos el patrón de radiación y los parámetros de antena mostrados en la siguiente figura:

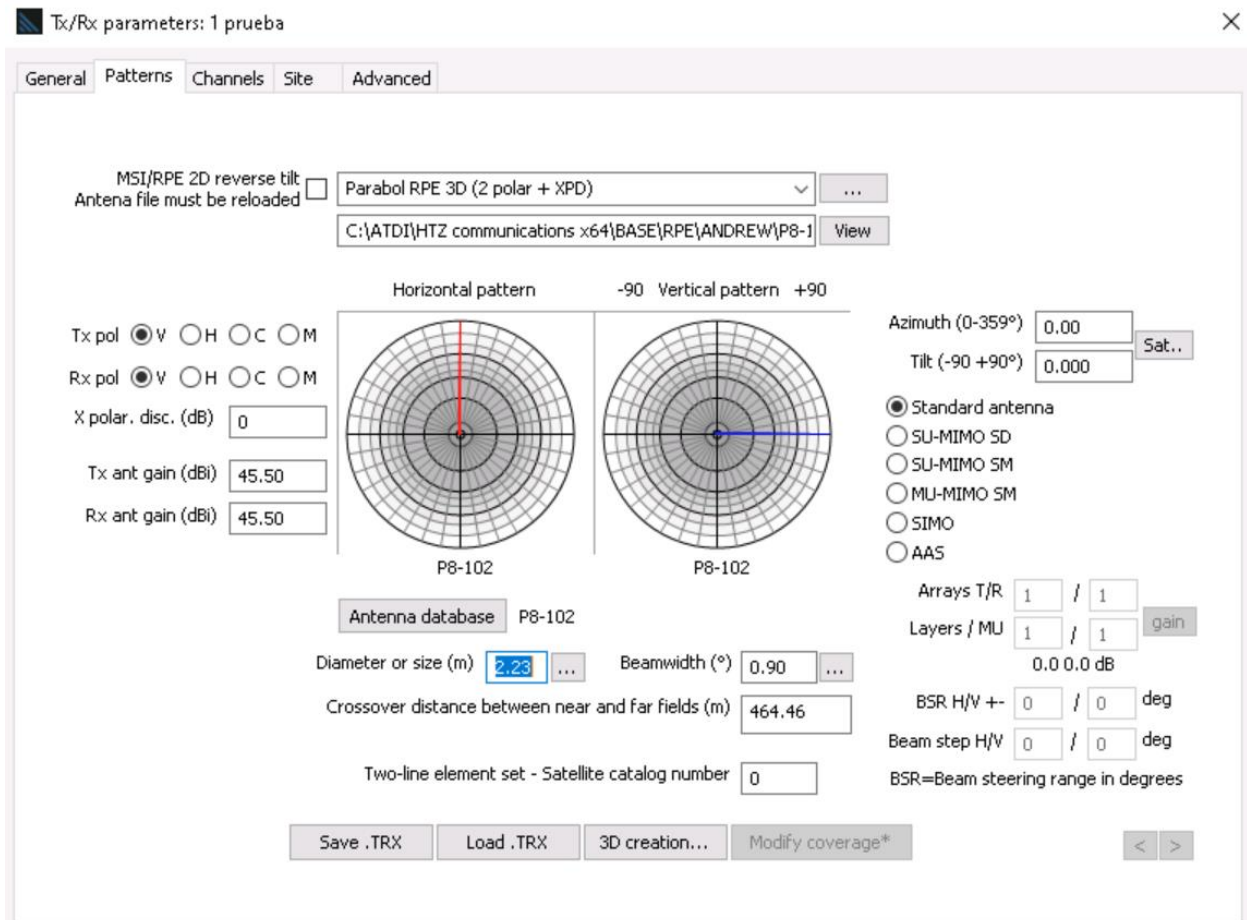


Figura 4.3: Patrón de radiación y parámetros para la antena de la estación terrena de ejemplo

En esta misma pestaña podremos orientar la estación terrena al satélite haciendo clic en el botón *Sat...*. Seguidamente se nos pedirá que seleccionemos un satélite de la base de datos. En este caso se usará el satélite Hispasat 1E que creamos en el apartado 3.1 “Creación de satélites en la base de datos de satélites”. El programa orientará la antena automáticamente al satélite seleccionado.

A continuación vamos a ajustar los parámetros de la estación terrena en la pestaña *General*. Cabe mencionar que hay ciertos parámetros que se ajustarán automáticamente al apuntar la estación terrena a un satélite determinado, como son la frecuencia y los anchos de banda de transmisión y recepción.

El resto de los parámetros se deben introducir manualmente. La ventana de los parámetros para la creación de la estación terrena con todos los valores introducidos se muestra en la figura 4.4. Podemos destacar los siguientes parámetros de nuestra estación terrena de prueba: potencia nominal de 100 W, ganancia de antenas transmisora y receptora de 45.5 dBi, pérdidas de 2 dB tanto en transmisión como en recepción y frecuencia de transmisión de 14808 MHz.

Como funcionalidad extra cabe mencionar que disponemos de una calculadora de pérdidas de alimentación. A ella accederemos mediante los botones *tx* o *rx* del apartado *Losses (dB)*. Esta ventana se muestra en la figura 4.5. En esta ventana encontramos una lista con diferentes tipos de cables que podremos utilizar para alimentar nuestras antenas. Esta se podrá ampliar usando el botón *Edit feeder list...*, se nos abrirá un documento Excel donde deberemos introducir las pérdidas del cable en cuestión. En el recuadro *Length* introduciremos la longitud del cable en metros, usando la atenuación específica del cable mostrada en el recuadro *Atten (db/100m)*, nos calculará automáticamente la atenuación total cuyo valor se mostrará en el recuadro *Total Atten (dB)*.



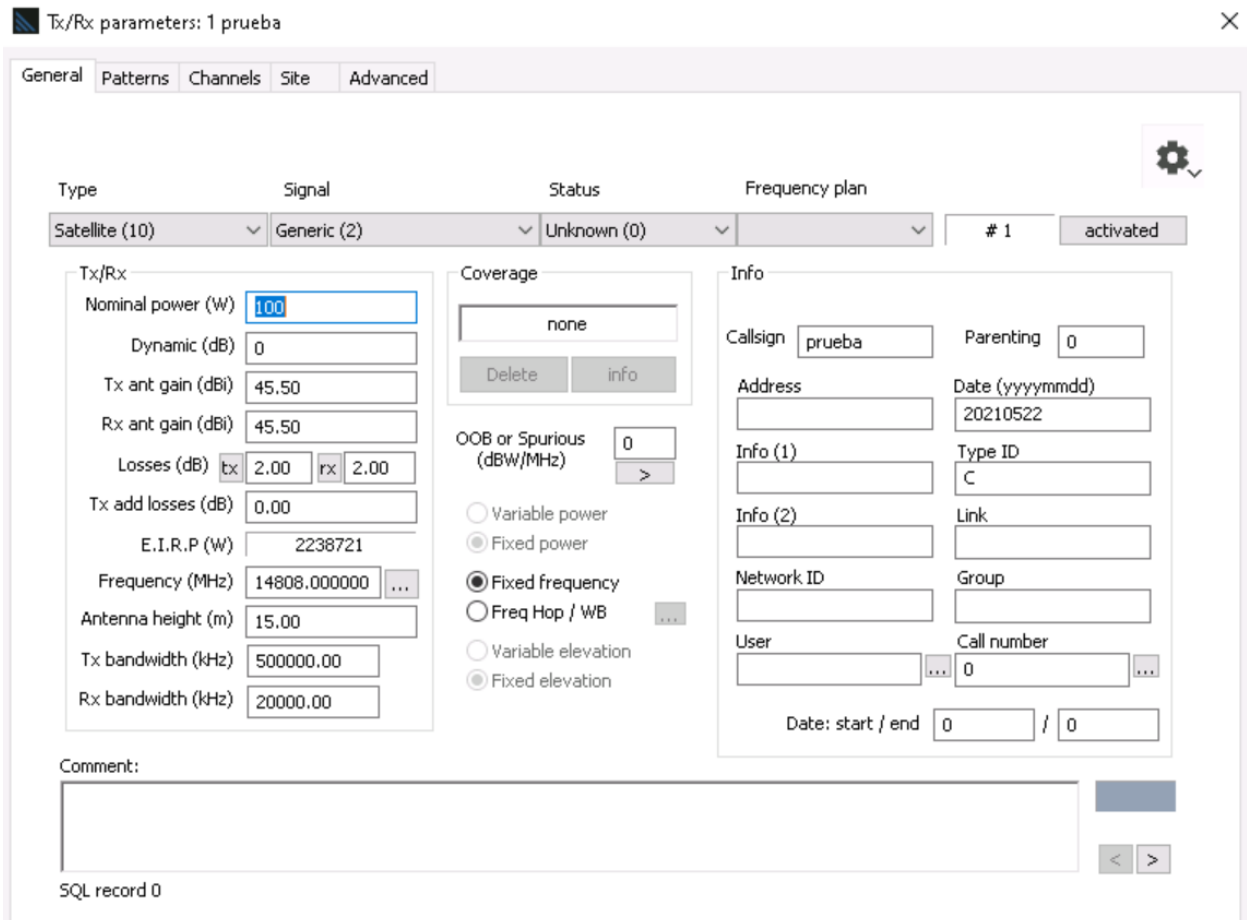


Figura 4.4: Parámetros de la estación terrena de ejemplo

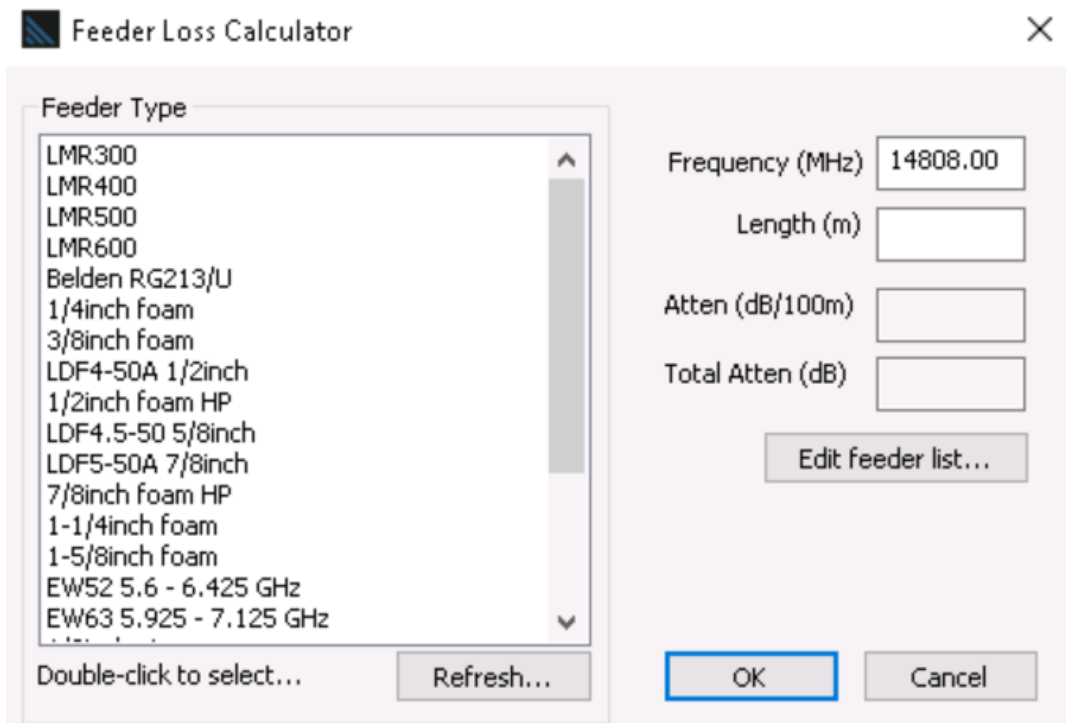


Figura 4.5: Calculadora de pérdidas de alimentación



Siguiendo los pasos anteriores se han añadadido seis estaciones terrenas más. Sus localizaciones se muestran en la siguiente figura:



Figura 4.6: Localizaciones de las estaciones terrenas de ejemplo

La siguiente tabla resume los parámetros más importantes de estas estaciones terrenas:

Tabla 4.1: Parámetros de las estaciones de ejemplo

<b>Número estación</b>	<b>Enlazado satélite</b>	<b><math>a</math></b>	<b>Posición aproximada</b>	<b>Potencia nominal (W)</b>	<b>Ganancia antena transmisora (dB)</b>	<b>Ganancia antena receptora (dB)</b>	<b>PIRE (dBW)</b>	<b><math>f</math> (MHz)</b>
1	HISPASAT 1E		5.9746° W 37.3515° N	100	45.5	45.5	63.5	14808
2	INTELSAT 905		5.6094° W 37.0915° N	90	43.5	41.5	62	14926
3	INTELSAT 10-02		4.8765° W 37.5030° N	80	44.5	41.5	62.5	14029
4	EUTELSAT 10A		3.2814° W 37.5714° N	110	39.5	37.5	57.9	15838
5	ASTRA 1KR		4.3376° W 36.9538° N	120	32.5	31.5	52.3	14206
6	HISPASAT 36W-1		5.9327° W 36.5566° N	110	34.5	32.5	53.9	15235
7	ASTRA 2E		2.5270° W 37.2289° N	75	39.5	38.5	56.2	14176

## 5. CÁLCULOS DESDE EL MENÚ DE SATÉLITE

Desde el menú de satélite se nos ofrece la posibilidad de calcular la intensidad de campo y potencia recibidas por las estaciones o por los satélites, el nivel de interferencia de una constelación de satélites en las estaciones terrenas, así como mostrar mapas C/I y PFD. Para acceder a este menú basta con pulsar sobre *Satellite*. En este capítulo se explicará cada una de estas opciones y se realizarán distintas simulaciones que muestren su funcionamiento.

### 5.1. Satélite a estación (P2P)

Esta función calcula la intensidad de campo (FS) y potencia recibida (PR) por las estaciones desde cada satélite incluido en la base de datos, generándose un informe.

Accederemos a esta función mediante la opción *Satellite to Station...* Al clicar se nos abrirá un cuadro, mostrado en la siguiente figura, con diferentes opciones:

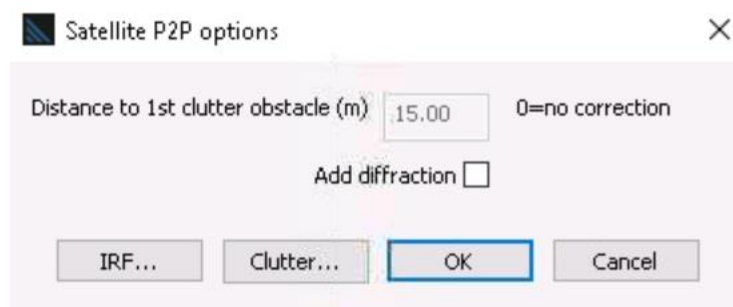


Figura 5.1: Opciones satélite a estación (P2P)

En el recuadro *Distance to 1st clutter obstacle (m)* podremos establecer la distancia a la que se considerará el obstáculo más cercano a la ubicación del receptor. El receptor se deberá ubicar dentro de un código clutter determinado. Si el valor es 0 no se considerará ninguna corrección.

Existe la posibilidad de tener en cuenta las pérdidas por difracción en los cálculos marcando la casilla *Add diffraction*.

Los valores del informe generado se dan teniendo en cuenta los valores de IRF, que podremos consultar y modificar haciendo clic en el botón *IRF...*

Si pulsamos en el botón *Clutter...* se nos abrirá la configuración de parámetros de la ocupación del suelo [23], mostrado en la figura 5.2. El campo *Clutter height (Altura clutter)* permite modificar la altura del terreno indicado por el correspondiente código clutter en la capa DEM, que es aquella capa del proyecto que contiene la altimetría del suelo (cotas) y de los edificios. En la tabla 5.1 se muestran las alturas por defecto para los diez primeros códigos. El resto de las alturas pueden ser definidas por el usuario. También se puede elegir si la referencia de altura para las estaciones y radioenlaces es la capa clutter o la capa DEM (DMT) marcando las casillas *T/R over clutter* o *T/R over ground* respectivamente. La opción *T/R over ground relaxed* sólo es compatible con el modelo Deygout 94 y permite considerar la ubicación del receptor sobre el suelo y el resto de su entorno sobre clutter.

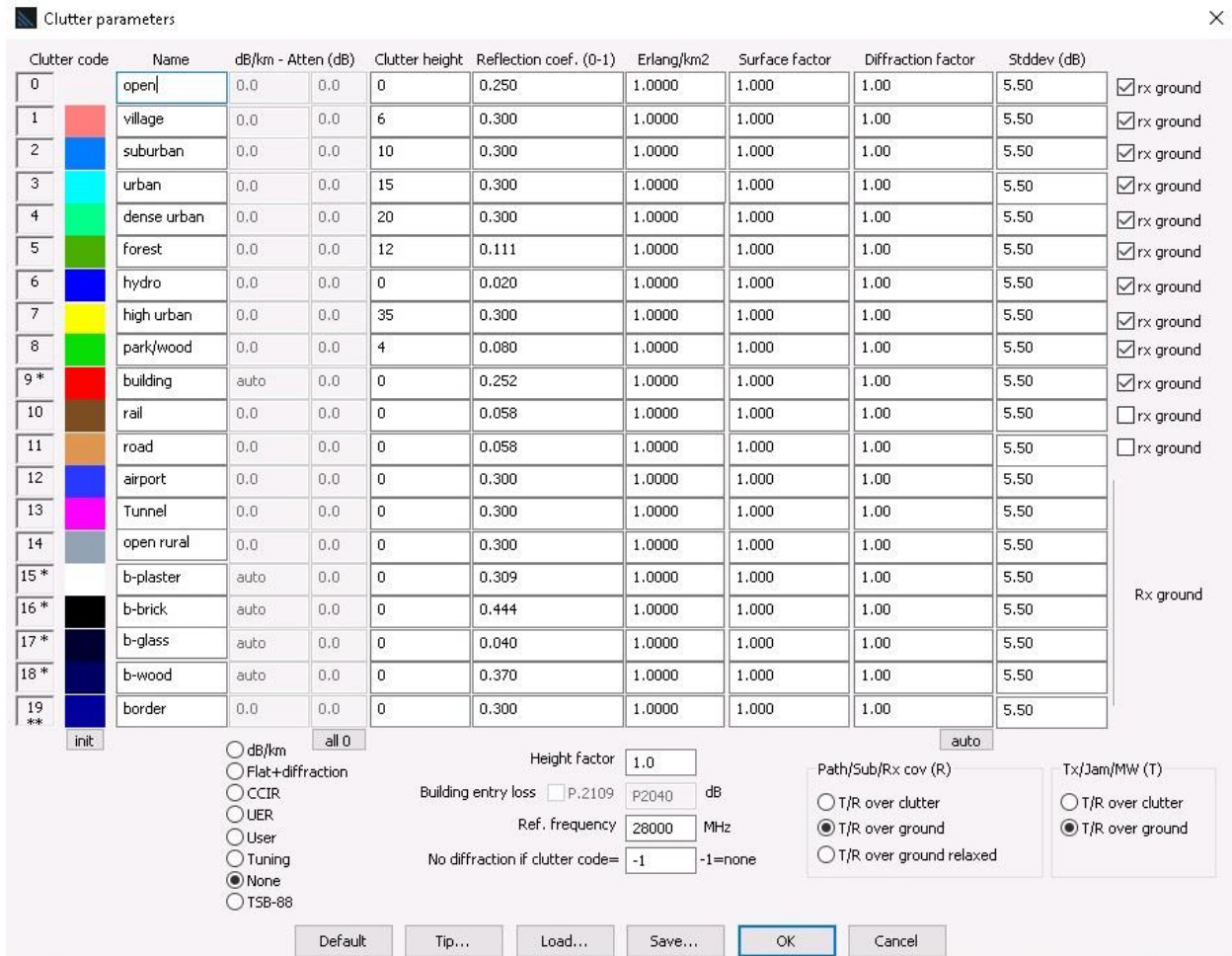


Figura 5.2: Parámetros del clutter

Tabla 5.1: Modificación de la altura local de la capa DEM en función del código de clutter

<b>Código clutter</b>	<b>Incremento de altura (m)</b>
0 – open	0
1 – village	6
2 – suburban	10
3 – urban	15
4 – dense urban	20
5 – forest	12
6 – hydro	0
7 – high urban	35
8 – park/wood	4
9 – roof - building	0

Cada código de la capa *clutter* lleva asociadas unas pérdidas, que pueden definirse como un valor dependiente de la distancia recorrida (en dB/km) o como un valor fijo que se añade independientemente de la distancia, según el modo de funcionamiento seleccionado (casillas *dB/Km*, *Flat+diffraction*, *CCIR*, etc). Los modos *CCIR (UIT)*, *UER* y *TSB-88* se refieren a valores normalizados y se muestran en las tablas 5.2, 5.3 y 5.4.

Tanto si se selecciona el modo *User* u otro, las pérdidas sólo se tendrán en cuenta si en la ubicación del receptor la altura de clutter es mayor que 0. Además, sólo se considerará el efecto del último obstáculo y no puede usarse junto con la capa de edificios (.BLG). Cuando se selecciona la capa DEM como referencia de altura, en el caso de que la altura del receptor sea menor que la altura definida para el correspondiente código de *clutter*, sólo se considera el efecto del último obstáculo para el cálculo de las pérdidas.

En la columna *Reflection coef.* se definen los valores de los coeficientes de reflexión asociado a cada código clutter, que se emplearán en estudios de cobertura. En la columna *Erlang/km<sup>2</sup>* se introduce información relativa al tráfico de datos. En las columnas *Surface factor* y *Diffraction factor* se introducen factores que modifican la altura final de clutter, tal que  $h_{total} = h_{clutter} * h_{superf} * h_{dif}$ . En la columna *Stddev (dB)* (desviación estándar) se introducen datos para realizar estudios estadísticos de cobertura.

Tabla 5.2: Pérdidas asociadas a la capa clutter según la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones)

<b>L<sub>clut</sub> (dB) – UIT</b>				
<b>Código clutter</b>	<b>f ≤ 400 MHz</b>	<b>40 &lt; f ≤ 160 MHz</b>	<b>160 &lt; f ≤ 450 MHz</b>	<b>f &gt; 450 MHz</b>
0	3	5	7	9
1	9	12	15	18
2	19	22	25	28
3	22	25	28	31
4	25	28	31	34
5	27	27	27	27
6	0	0	0	0
7	29	32	35	38
8	3	5	7	9
9	0	0	0	0

Tabla 5.3: Pérdidas asociadas a la capa clutter según la UER (Unión Europea de Radiodifusión)

<b>L<sub>clut</sub> (dB) – UER</b>		
<b>Código clutter</b>	<b>f &lt; 300 MHz</b>	<b>f ≥ 300 MHz</b>
0	2	4
1	6	8
2	8	12
3	8	12
4	8	12
5	4	8
6	0	0
7	8	12
8	4	8
9	0	0

Tabla 5.4: Pérdidas asociadas a la capa clutter según la NTIA (National Telecommunication and Information Administration, de EEUU).

<b>L<sub>clut</sub> (dB) – TSB-88</b>					
<b>Código clutter</b>	<b>30 &lt; f ≤ 50 MHz</b>	<b>136 &lt; f ≤ 174 MHz</b>	<b>220 &lt; f ≤ 222 MHz</b>	<b>380 &lt; f ≤ 512 MHz</b>	<b>746 &lt; f ≤ 941 MHz</b>
0	3	3	3	3	5
1	3	3	3	4	18
2	1	9	9	10	10
3	3	8	9	12	25
4	0	0	0	0	0
5	3	8	9	10	10
6	1	3	3	3	3
7	3	14	15	16	20
8	4	15	16	17	20
9	4	14	14	15	20

A continuación se va a realizar una simulación para ilustrar esta funcionalidad. En esta simulación se hace uso del escenario de estaciones terrenas descrito en la figura 4.6 y en la tabla 4.1. Al clicar en *Satellite to station (P2P)*... obtenemos el informe que se muestra a continuación. Cabe mencionar que se han obviado algunas filas para que este no sea tan extenso, mostrándose los datos correspondientes a las estaciones 1, 2 y 3.

**SIGNAL FROM SATELLITE**

Station	#	Satellite	Max FS (dBuV/m)	Max PR (dBm)	Freq. (GHz)
	1	Hispasat 1E	38.3	-76.8	11.729000
	1	Intelsat 905	0.0	-115.7	11.935000
	1	Intelsat 10-02	0.0	-140.9	11.097000
	1	Eutelsat 10A	0.0	-131.6	11.876000
	1	Astra 1KR	0.0	-130.1	12.174000
	1	Hispasat 36W-1	16.0	-99.4	12.058000
	1	Astra 2E	0.0	-129.1	12.142000
	2	Hispasat 1E	12.8	-105.4	11.729000
	2	Intelsat 905	25.0	-93.3	11.935000
	2	Intelsat 10-02	0.0	-142.6	11.097000
	2	Eutelsat 10A	0.0	-134.3	11.876000
	2	Astra 1KR	0.0	-132.9	12.174000
	2	Hispasat 36W-1	1.8	-116.5	12.058000
	2	Astra 2E	0.0	-132.0	12.142000
	3	Hispasat 1E	0.0	-122.9	11.729000
	3	Intelsat 905	0.0	-135.3	11.935000
	3	Intelsat 10-02	17.9	-99.8	11.097000
	3	Eutelsat 10A	0.0	-127.3	11.876000
	3	Astra 1KR	0.0	-128.8	12.174000
	3	Hispasat 36W-1	0.0	-122.6	12.058000
	3	Astra 2E	0.0	-129.4	12.142000

Figura 5.3: Informe "Satélite a estación (P2P)"

En el informe se incluye información acerca de la intensidad de campo en dBuV/m y potencia recibida en dBm por las estaciones desde cada uno de los satélites incluidos en la base de datos, además de la frecuencia de transmisión de cada satélite.

Además de determinar la potencia recibida podremos analizar qué satélites son más perjudiciales para cada estación terrena. Esto se podrá ver fácilmente en la columna *Max FS*. Por ejemplo, para la estación 1, que está enlazada con el satélite Hispasat 1E, el satélite más perjudicial es Hispasat 36W-1 por recibir un mayor nivel de campo de este. Sin embargo, para la estación 3, que está enlazada con el satélite Intelsat 10-02, no hay ninguno preocupante a priori.

## 5.2. Estación a satélite (P2P)

Esta función calcula la intensidad de campo (FS) y potencia recibida (PR) por los satélites desde las estaciones terrenas, generándose un informe.

Vamos a realizar una simulación para mostrar esta función. Pulsaremos sobre *Station to satellite (P2P)*... En esta simulación se hace uso del escenario de estaciones terrenas descrito en la figura 4.6 y en la tabla 4.1. Obtenemos el informe mostrado a continuación. Cabe mencionar que se han obviado algunas filas para que este no sea tan extenso, mostrándose los datos correspondientes a las estaciones 1, 2 y 3.

<b>SIGNAL FROM STATIONS</b>						
Station	#	Satellite	Max FS (dBuV/m)	Max PR (dBm)	Freq. (GHz)	RadPow (dBW)
	1	Hispasat 1E	46.8	-71.9	14.808000	63.50
	1	Intelsat 905	20.8	-109.8	14.926000	37.48
	1	Intelsat 10-02	3.2	-151.7	14.029000	19.85
	1	Eutelsat 10A	1.8	-151.6	15.838000	18.50
	1	Astra 1KR	1.7	-149.7	15.838000	18.50
	1	Hispasat 36W-1	22.5	-120.9	15.235000	39.34
	1	Astra 2E	1.6	-139.2	14.176000	18.50
	2	Hispasat 1E	19.3	-99.4	14.808000	36.05
	2	Intelsat 905	45.3	-85.4	14.926000	62.04
	2	Intelsat 10-02	2.9	-152.1	14.029000	19.49
	2	Eutelsat 10A	0.5	-143.0	15.838000	17.21
	2	Astra 1KR	0.3	-141.2	15.838000	17.04
	2	Hispasat 36W-1	6.8	-136.7	15.235000	23.57
	2	Astra 2E	0.2	-140.7	14.176000	17.04
	3	Hispasat 1E	2.2	-136.0	14.808000	18.94
	3	Intelsat 905	3.3	-146.8	14.926000	20.03
	3	Intelsat 10-02	45.9	-88.6	14.029000	62.53
	3	Eutelsat 10A	7.1	-155.8	15.838000	23.81
	3	Astra 1KR	4.1	-156.9	15.838000	20.82
	3	Hispasat 36W-1	1.1	-141.8	15.235000	17.94
	3	Astra 2E	2.5	-119.4	14.176000	19.30

Figura 5.4: Informe "Estación a satélite (P2P)"

En el informe se incluye información acerca de la intensidad de campo en dBuV/m y potencia recibida en dBm por los satélites desde cada una de las estaciones terrenas activas, además de su frecuencia de transmisión y la potencia radiada en la dirección del satélite en dBW.

El análisis de este informe es análogo al apartado anterior. Cabe mencionar que la potencia recibida por los satélites que no estén enlazados a una estación determinada variará con respecto a ciertos parámetros. Al utilizar antenas muy directivas, el apuntamiento de estas y la posición del satélite tendrán una gran influencia, recibiendo más potencia los satélites más cercanos al satélite enlazado con la estación que estamos considerando. También, cuanto más próximas sean las frecuencias, más potencia se recibirá, ya que los otros canales serán atenuados por los filtros del satélite.



### 5.3. Constelación de satélites a estación

Esta función calcula el nivel de interferencia de una constelación de satélites en las estaciones terrenas activadas en el mapa. El resultado se muestra como un análisis estadístico.

Una constelación de satélites es una agrupación de satélites artificiales que trabajan como un único sistema. Su principal ventaja es la de proporcionar cobertura global o casi global permanente, ya que en cualquier momento y lugar sobre la Tierra como mínimo un satélite será visible. Además, las constelaciones de satélites evidencian otros beneficios importantes como la resistencia a fallas de satélites individuales, redundancia de carga útil y almacenamiento y procesamiento distribuidos. Normalmente estos satélites se colocan en conjuntos de planos orbitales complementarios y se conectan a estaciones terrenas distribuidas globalmente. También pueden usar intercomunicación entre satélites de su misma constelación. Ejemplos de constelaciones de satélites son los servicios de telefonía satelital Iridium y Globalstar, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), las constelaciones de Galileo y GLONASS para navegación y geodesia, etc.

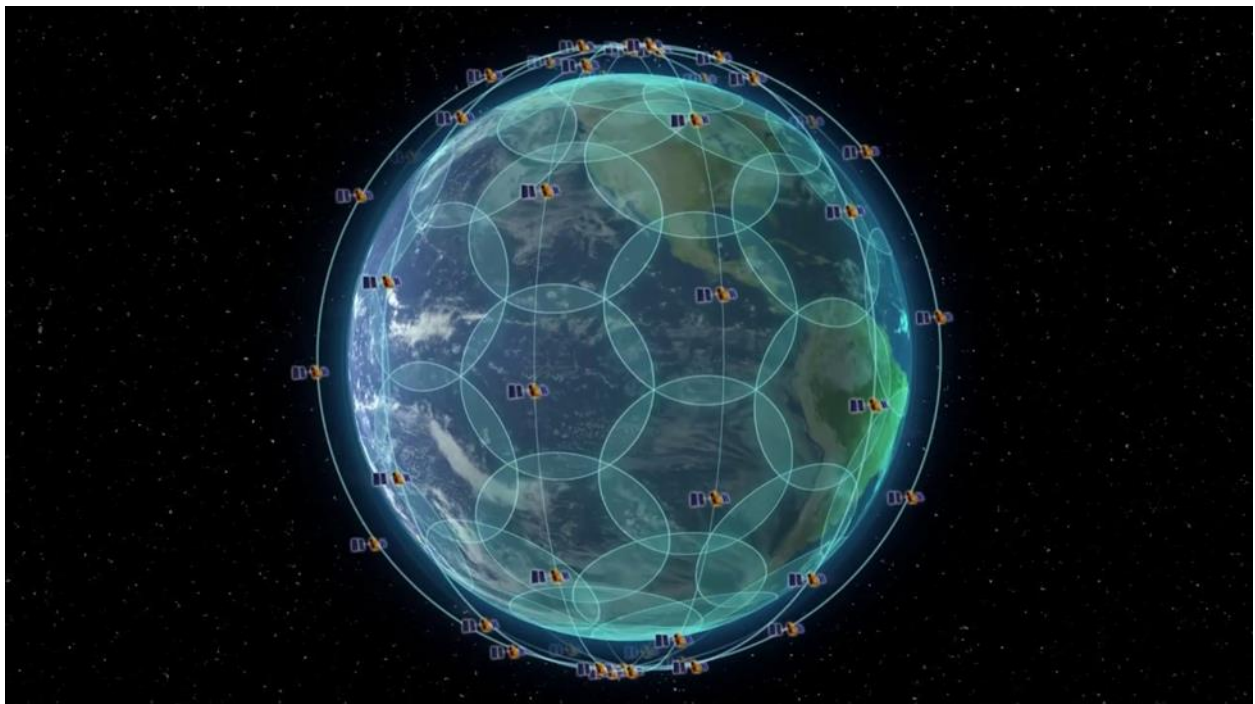


Figura 5.5: Constelación de satélites [24]

La función calcula la interferencia desde una constelación de satélites no geoestacionarios hasta las estaciones terrenas, proporcionando una distribución de valores  $I/N$ . La relación interferencia-ruido,  $I/N$ , viene dada por la relación entre la densidad espectral de potencia interferente en la entrada del receptor ( $I$ ) y la densidad espectral de potencia de ruido ( $N$ ). Esta relación es usada como criterio de protección en el diseño de enlaces de radiocomunicaciones.

Este tipo de análisis se emplea, por ejemplo, en satélites de investigación espacial tripulados y no tripulados próximos a la Tierra. En [25] se especifica los criterios de protección necesarios para controlar, dirigir y explotar adecuadamente estos satélites. Este margen del enlace se optimiza para ahorrar peso y energía teniendo en cuenta las limitaciones reglamentarias de la densidad de flujo de potencia (PFD). Para frecuencias de enlaces de comunicación que operan hasta 10 GHz, un margen de diseño de enlace típico estará en el rango de -3 a -6 dB. En esas condiciones, la presencia de una señal interferente que genere un aumento de la potencia de ruido del sistema global de 1 dB se considerará perjudicial para la calidad del enlace. Sin embargo, considerando que las bandas de frecuencia se compartirán entre otros sistemas de radio espaciales y terrestres, la relación máxima permitida entre la potencia de interferencia y el ruido adoptada podrá aumentar hasta los -10 dB.

Para el cálculo del criterio de protección se usa un ancho de banda de referencia, que depende de la anchura de banda más reducida que pueda emplearse. Para receptores de estación terrena, los bucles con enganche de fase pueden utilizar anchuras de banda de algunos hertzios para bandas de frecuencias por debajo de 20 GHz. En el caso de bandas de frecuencias por encima de 20 GHz se prevé la transmisión de datos a alta velocidad basada en MDP-4 con anchuras de banda del orden de 1 MHz. La anchura de banda de detección de una estación espacial suele ser de 1 kHz.

Otro factor para tener en cuenta es el tiempo de referencia. El porcentaje de tiempo de referencia se refiere al tiempo durante el cual los enlaces de operaciones espaciales pueden tolerar un nivel de interferencia por encima del criterio de protección. La UIT establece que el tiempo de interferencia acumulado no debe exceder el 1% cada día para este tipo de sistemas, y para las etapas críticas, como las fases de lanzamiento, las maniobras críticas de la nave espacial deben limitarse temporalmente al 0,1% del período de tiempo orbital.

Al clicar sobre *Satellite constellation to station...* se desplegará el siguiente cuadro que permite al usuario ingresar los parámetros de la constelación de satélites utilizada en los cálculos de I/N:

Figura 5.6: Configuración de la constelación en la función “Satellite constellation to station...”

En esta ventana nos encontramos los siguientes campos [26]:

**Number of satellites** (Número de satélites)

Número total de satélites en la constelación.

**Number of planes** (Número de planos)

Número de planos orbitales utilizados por la constelación.

**Pass number** (Número de pasadas)

Las posiciones de los satélites se considerarán para los cálculos cada (Periodo/Número de pasadas) segundos.



**Period** (Periodo)

Duración del análisis de la constelación. En segundos.

**Orbit tilt** (Inclinación de la órbita)

Inclinación del plano orbital con respecto al plano ecuatorial. En grados.

**Phasis** (Fase)

En grados. Si la fase se establece en 0°, los diferentes satélites de la constelación se distribuyen uniformemente cada (360°/Número de planos) grados en cada plano. De lo contrario, se distribuyen con un desplazamiento de esta fase.

**Rain intensity 0.01%** (Intensidad de lluvia que se excede el 0.01% de un año) en mm/h, **Vapour concentration** (Concentración de vapor) en g/m<sup>3</sup>, **Temperature** (Temperatura) en Kelvin. Estos datos son usados por el modelo de propagación UIT-R P.618.

**Reference satellite** (Satélite de referencia)

Selecciona un satélite de la base de datos y lo adjunta a la constelación. Este satélite se repetirá en toda la constelación.

A continuación se procede a probar esta funcionalidad. Primero, crearemos un satélite no geoestacionario:

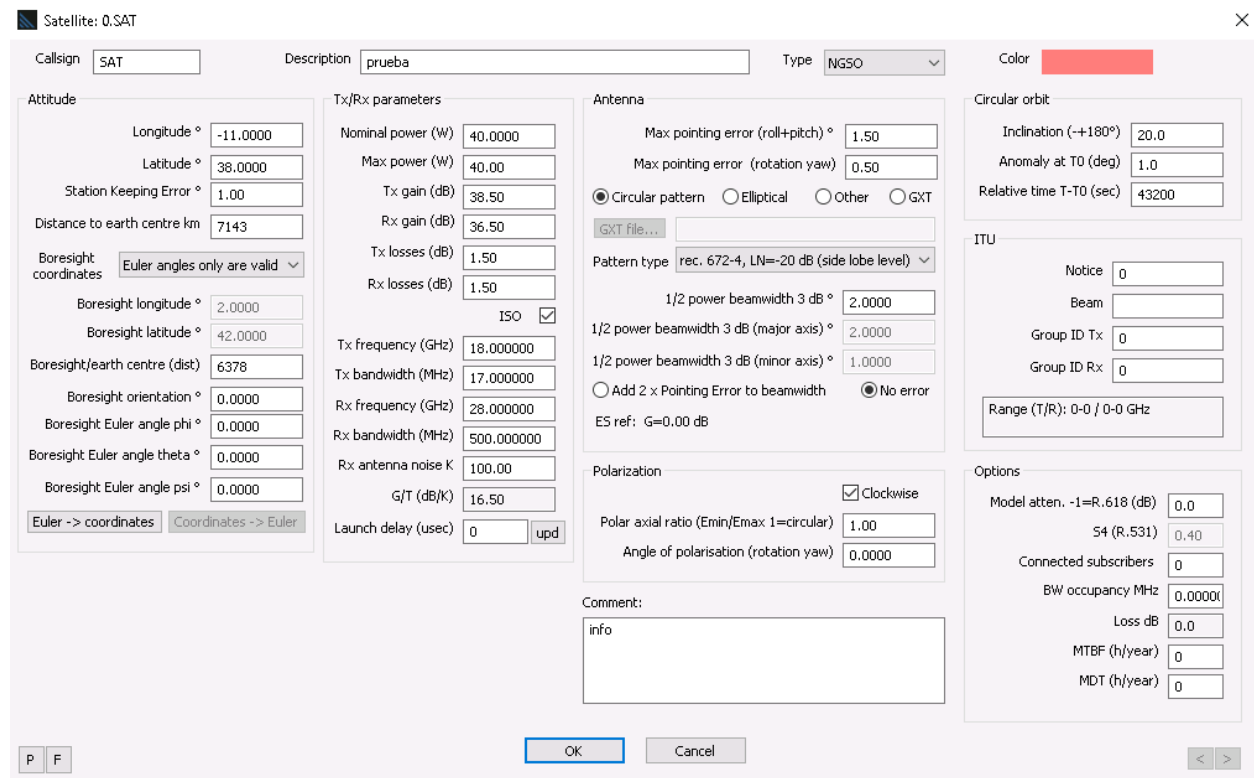


Figura 5.7: Creación del satélite no geoestacionario de prueba para el cálculo de I/N

En esta simulación se volverá a utilizar el escenario de estaciones terrenas descrito en la figura 4.6 y en la tabla 4.1. A continuación, configuraremos los parámetros de la constelación de satélites. Se usará la configuración mostrada en la figura 5.6. Obtendremos el siguiente resultado:

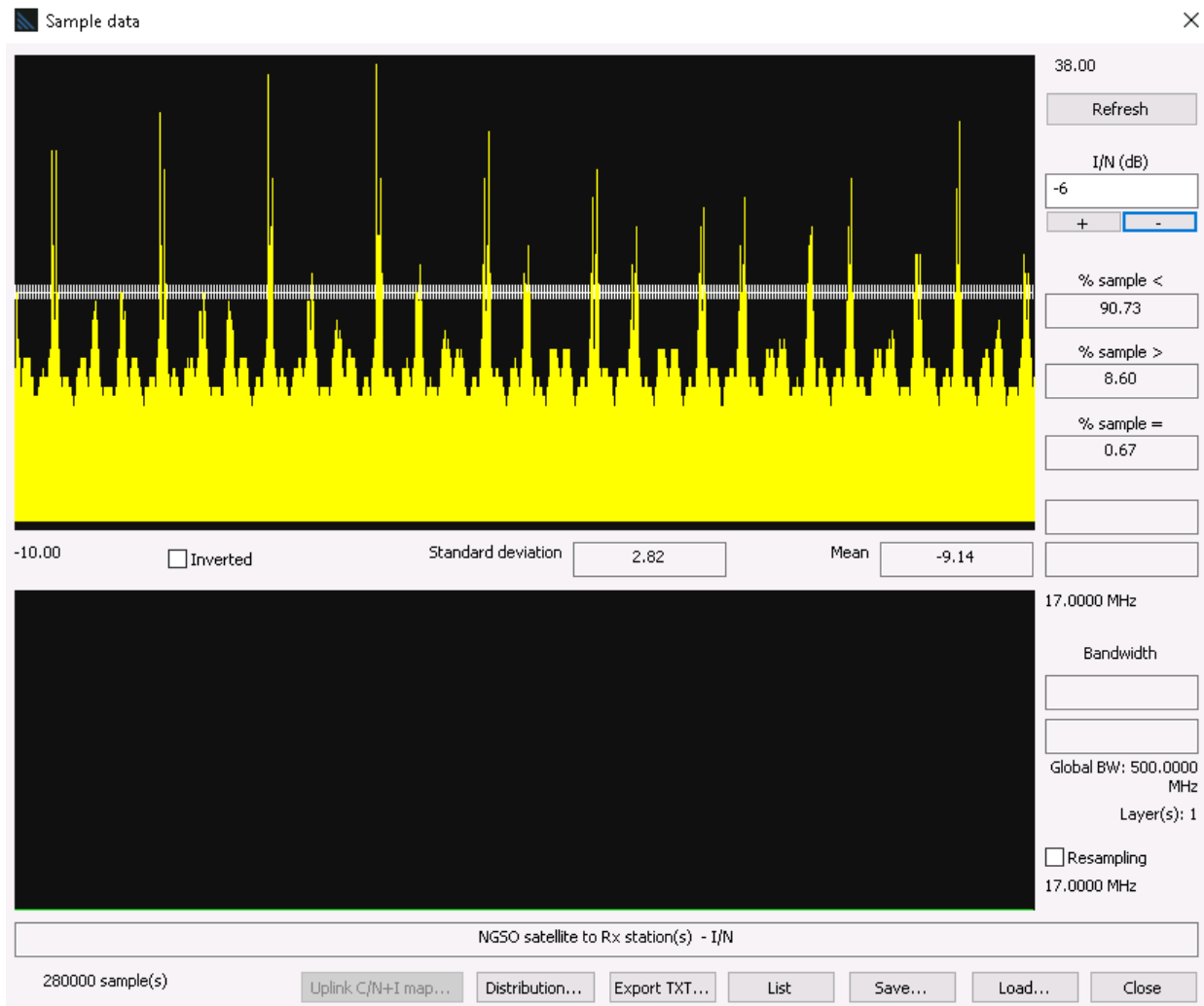


Figura 5.8: Simulación "Satellite constellation to station..."

La figura 5.8 muestra la distribución de valores I/N. En el recuadro I/N podremos establecer nuestro umbral para calcular el porcentaje de muestras que sobrepasan (*% sample >*), son inferiores (*% sample <*) o son iguales (*% sample =*) a este valor. En este ejemplo hay un porcentaje de muestras del 8.60 % superior a un nivel de I/N de -6 dB, un 90.73 % por debajo y un 0.67 % igual al mismo. Usando la duración del análisis podremos calcular el tiempo que este sistema ha excedido el umbral.

También se nos muestra la media (*Mean*) y la desviación típica (*Standard deviation*) de esta distribución, siendo estas en el ejemplo -9.14 y 2.82 respectivamente. En *Bandwith* podremos ver el ancho de banda que se ha tomado como referencia.

Si clicamos en *List* se nos abrirá un documento tipo Excel donde se mostrará el nivel de I/N calculado para cada muestra.

## 5.4. Mapa C/I de satélite

Esta función genera un mapa C/I, además de un informe con el mínimo valor de C/I encontrado en los diferentes puntos de prueba [27].

La relación de protección C/I caracteriza la capacidad del receptor de recibir la señal deseada (C) en presencia de interferencia (I). Por ejemplo, para señales cocanal, una C/I de 14 dB significa que la señal deseada debe ser al menos 14 dB mayor que la señal interferente de la misma frecuencia (cocanal) para que el receptor la decodifique correctamente. Un valor negativo indica que la señal deseada puede ser más débil que la que interfiere una determinada cantidad de decibelios.

Esta función resulta de gran utilidad durante la fase de planificación de una red por satélite, donde puede ser útil calcular las relaciones portadora/interferencia entre portadoras de las redes interferente e interferida a efectos de determinar los niveles de interferencia que contribuyen a la degradación de la calidad, así como constituir un elemento que complete la coordinación de frecuencias de las redes por satélite conforme al Reglamento de Radiocomunicaciones.

Al pulsar sobre la función *Satellite notice C/I map...* (Mapa C/I de satélite) se nos abrirá la siguiente ventana:

Figura 5.9: Configuración de mapa C/I

Lo primero que deberemos realizar para generar el mapa C/I será configurar el receptor que usará el programa para los cálculos. Para ello clicaremos sobre *Parameters...* del recuadro *Receiver*. La ventana para la configuración de estos parámetros se muestra a continuación:

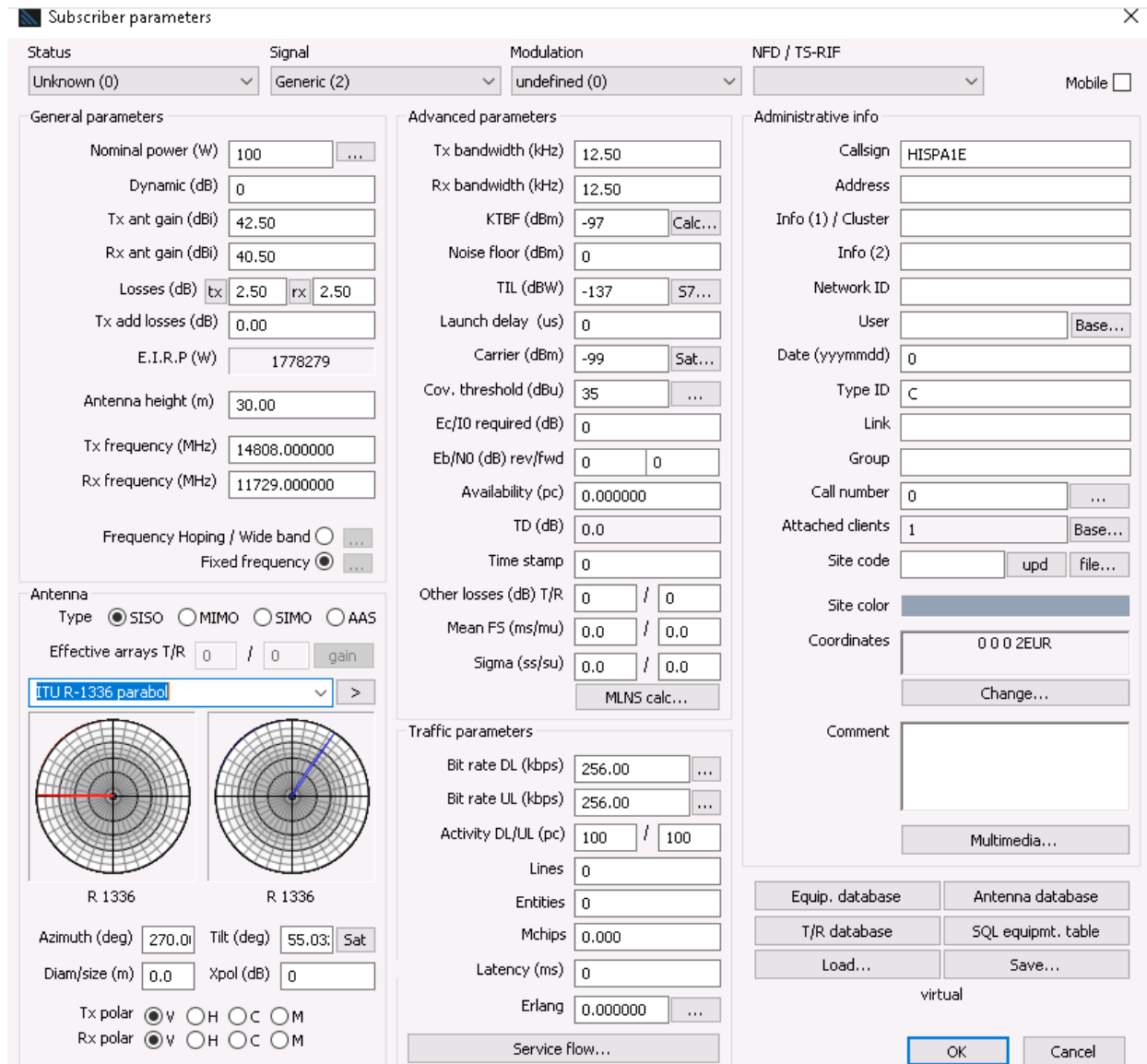


Figura 5.10: Configuración del receptor usado en el mapa C/I

Para las pruebas usaremos la configuración mostrada en la figura anterior. El receptor deberá estar conectado a un satélite de la base de datos, utilizando el botón *Sat...*

Luego procederemos a introducir las especificaciones de C/I en sus respectivos recuadros: la C/I requerida en situación co-canal (*Required co-channel C/I*), la requerida en los canales adyacentes (*Required adjacent C/I*) y la requerida en los canales N+2 (*Required N+2 C/I*).

En los cálculos, el nivel C deseado provendrá del satélite vinculado. Asimismo, todas las emisiones que tengan el mismo Notice ID de ese satélite serán consideradas a su vez emisiones deseadas. Por ejemplo, si el receptor está conectado al satélite 1 con el Notice ID 1234, la función ajustará la frecuencia del receptor, orientará el receptor de la antena hacia el satélite y moverá el receptor en cada punto de prueba para todos los satélites con el mismo Notice ID (1234). Los satélites con un Notice ID diferente se consideran interferentes. La función calculará el mínimo C/I en los puntos de prueba.

Hay tres modos diferentes disponibles para la ubicación de la estación terrena receptora virtual:

- **Map grid** (Cuadrícula en el mapa): se considerarán todos los puntos del mapa, excepto aquellos ubicados en códigos de clutter no seleccionados. Los puntos del mapa se toman usando una cuadrícula cuyo tamaño podremos configurar en *Grid*.
- **Random points** (Puntos aleatorios): se utilizan puntos aleatorios en el mapa, ubicados en códigos de clutter que hayamos seleccionado. En *Max points* podremos configurar el máximo número de puntos que se usarán.
- **From vector points** (Usar puntos vectoriales): se utilizan las ubicaciones de los puntos vectoriales de un archivo VEC que podremos cargar en *File* → *Load* → *Load vector file (.VEC)*.

A continuación se muestra el resultado de la simulación usando el modo de cuadrícula en el mapa:



Figura 5.11: Mapa C/I usando el modo "Map grid"

Report listing

R...	Wanted SAT ...	Callsign	Notice ID	Frequency GHz	Unwanted SA...	Callsign	Description	Notice ID	Frequency GHz	Min C/I dB	Max power received dBm	X	Y
1	1	HISPA1E	1	11.729	6	HISP...	Hispasat...	3	12.058	24.8	-125.2	35.332052	40.044427
2	2	INTEL905	1	11.935	6	HISP...	Hispasat...	3	12.058	14.4	-126.6	39.726584	46.437848
3	3	INT10-02	1	11.097	6	HISP...	Hispasat...	3	12.058	17.9	-134.8	30.937521	52.160447

Figura 5.12: Informe del mapa C/I usando el modo "Map grid"

Los resultados se enumeran en un informe con la siguiente información:

- **Wanted SAT emission** (Emisión deseada): número del satélite en la base de datos cuya emisión se desea, así como su nombre, Notice ID y frecuencia de transmisión.
- **Unwanted SAT emission** (Emisión no deseada): número del satélite en la base de datos que ocasiona un mayor nivel de interferencia en la emisión deseada, así como su nombre, Notice ID y frecuencia de transmisión.
- **Min C/I dB**: mínimo valor de C/I encontrado en los diferentes puntos de prueba.
- **Max power received dBm** (Potencia máxima recibida en dBm): máximo nivel de interferencia provocado por los satélites no deseados en los puntos de prueba.
- **X/Y**: coordenadas de los puntos de prueba.



También probaremos el modo *From vector points*. Para establecer los diferentes puntos de prueba donde se realizará la simulación tendremos que crear un archivo VEC, donde introduciremos esta información. Para ello, nos dirigimos a *Map → Vector layer → New vector file*. Con esta instrucción habremos creado el archivo VEC. A continuación tendremos que situar los diferentes puntos de prueba. Esto se realiza haciendo clic derecho sobre el mapa en la posición que deseemos y luego *Add vector → Point*.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de archivo VEC con diferentes puntos de prueba:



Figura 5.13: Puntos de prueba del archivo VEC

A continuación se muestra el resultado de la simulación usando este modo:

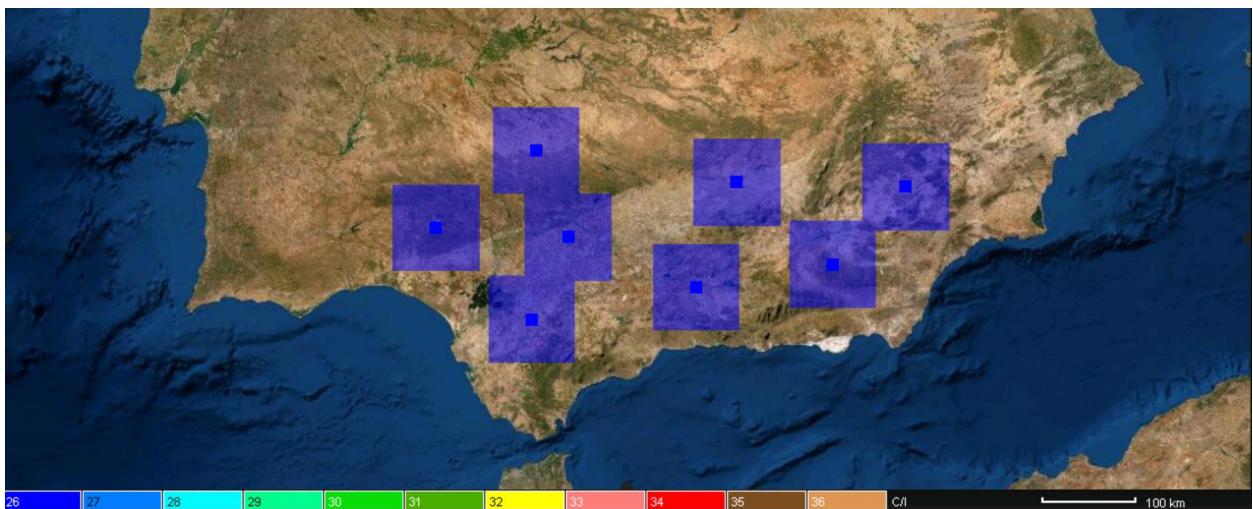


Figura 5.14: Mapa C/I usando el modo "From vector points"

R...	Wanted SAT ...	Callsign	Notice ID	Frequency GHz	Unwanted SAT ...	Callsign	Notice ID	Frequency GHz	Min C/I dB	Max power received dBm	X	Y
1	1	HISPA1E	1	11.729	6	HISP36W1	4	12.058	29.3	-108.6	-2.065412	37.961512
2	2	INTEL905	1	11.935	6	HISP36W1	4	12.058	25.8	-118.6	-2.065412	37.961512
3	3	INT10-02	1	11.097	6	HISP36W1	4	12.058	27.9	-128.5	-6.591779	37.649022

Figura 5.15: Informe del mapa C/I usando el modo "From vector points"

## 5.5. Mapa PFD de satélite

Esta función genera un mapa PFD (Densidad de Flujo de Potencia) y un informe con los puntos donde el valor de PFD sea máximo. Esta función resulta de gran utilidad para asegurarnos de que cumplimos los valores límites especificados por la ITU en las recomendaciones ITU-R 1141 y 1142 [27].

Para los cálculos disponemos de tres modos diferentes para la ubicación de la estación terrena receptora virtual, como ocurría con el mapa C/I: Cuadrícula de mapa, Puntos aleatorios y Usar puntos vectoriales. Para las dos primeras opciones es interesante usar el botón *Countries...* con el que podremos cargar un archivo COD donde se especifiquen los países en los que se quieran realizar estos cálculos. Si no se especifica ningún archivo se usará todo el planisferio.

Al pulsar sobre la función *Satellite PFD map...* (Mapa PFD de satélite) se nos abrirá la siguiente ventana:

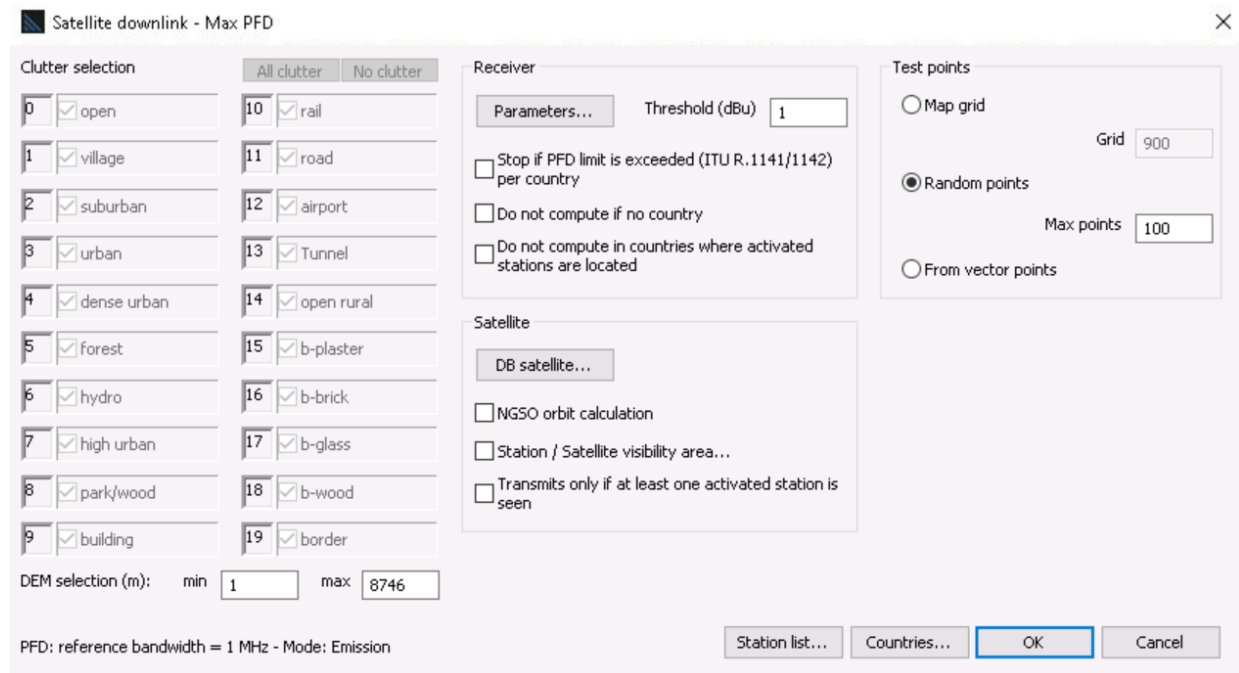


Figura 5.16: Configuración de mapa PFD

Los pasos a seguir son similares a los del apartado anterior. Primero deberemos configurar el receptor usando el botón *Parameters...* Usaremos la configuración mostrada en la figura 5.8. A continuación seleccionaremos el modo que deseemos. Por ejemplo, si usamos la opción de cuadrícula en el mapa obtenemos lo siguiente:

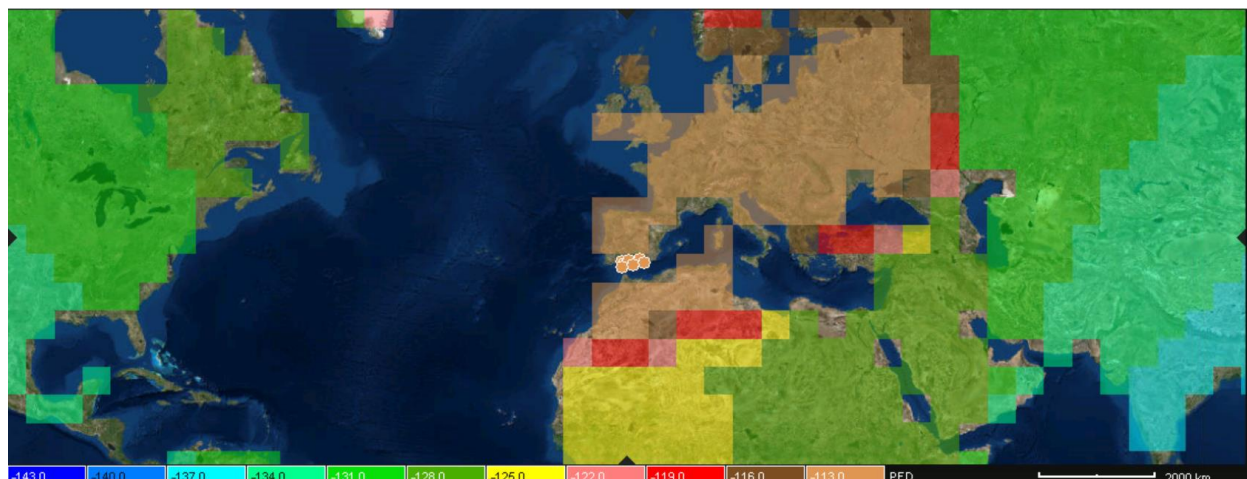


Figura 5.17: Mapa PFD usando el modo "Map grid"

Report listing

Record	SAT emis...	Callsign	Frequency GHz	Max PFD ...	reference BW (MHz)	Max power received (dBm)	X point	Y point	X sat	Y sat	PFD limit (dBW/m2/MHz)
1	1	HISPA1E	11.729	-107.0	1	-119.8	-4.218732	40.044427	-30.000000	0.000000	-121.0
2	2	INTEL905	11.935	-120.4	1	-133.4	-4.218732	40.044427	-24.000000	0.000000	-121.0
3	3	INT10-02	11.097	-124.2	1	-136.5	4.570331	36.597877	-1.000000	0.000000	-121.0
4	4	EUT10A	11.876	-112.3	1	-125.2	4.570331	36.597877	10.000000	0.000000	-121.0
5	5	AST1KR	12.174	-110.3	1	-123.4	8.964862	36.597877	19.000000	0.000000	-121.0
6	6	HISP36W1	12.058	-105.5	1	-118.5	-8.613264	40.044427	-36.000000	0.000000	-121.0
7	7	AST2E	12.142	-109.4	1	-122.5	8.964862	36.597877	28.000000	0.000000	-121.0

Figura 5.18: Informe del mapa PFD usando el modo "Map grid"

Usando los puntos de prueba de la figura 5.11 y la opción *From vector points* obtenemos:

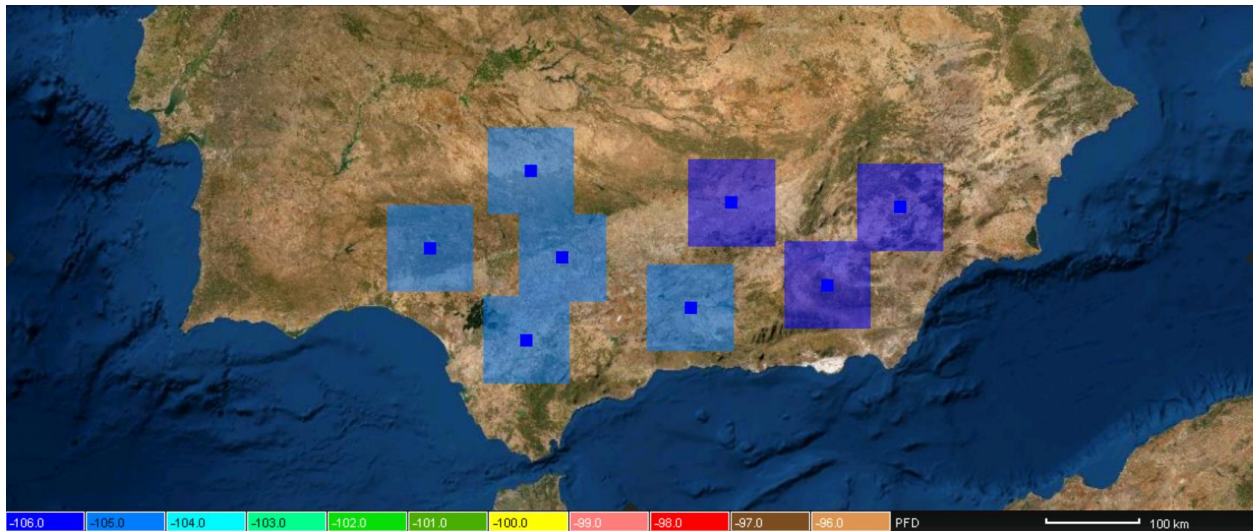


Figura 5.19: Mapa PFD usando el modo "From vector points"

Report listing

R...	SAT emissio...	Callsign	Frequency GHz	Max PFD dB (dBW/m2/MHz)	reference BW (MHz)	Max power received (dBm)	X point	Y point	X sat	Y sat	PFD limit (dBW/m2/MHz)
1	1	HISPA1E	11.729	-106.9	1	-119.7	-5.668...	36.949...	-30....	0....	-121.0
2	2	INTEL905	11.935	-120.3	1	-133.3	-5.668...	36.949...	-24....	0....	-121.0
3	3	INT10-02	11.097	-124.2	1	-136.5	-4.086...	37.195...	-1.0...	0....	-121.0
4	4	EUT10A	11.876	-112.3	1	-125.2	-2.768...	37.370...	10.0...	0....	-121.0
5	5	AST1KR	12.174	-110.4	1	-123.5	-2.768...	37.370...	19.0...	0....	-121.0
6	6	HISP36W1	12.058	-105.5	1	-118.5	-5.668...	36.949...	-36....	0....	-121.0
7	7	AST2E	12.142	-109.5	1	-122.6	-2.768...	37.370...	28.0...	0....	-121.0

Figura 5.20: Informe del mapa PFD usando el modo "From vector points"



# 6. BASE DE DATOS TLE

Un conjunto de elementos de dos líneas TLE (*Two Line Element*) es un formato de datos que codifica una lista de elementos orbitales de objetos en órbita terrestre para un momento dado, la época. En astronomía, una época o época de referencia es un momento en el tiempo utilizado como punto de referencia para alguna cantidad astronómica variable en el tiempo. Utilizando una fórmula de predicción adecuada se puede estimar con cierta precisión el estado de elemento (posición y velocidad) en cualquier punto del pasado o del futuro.

Los TLE se utilizan ampliamente como entrada para proyectar las futuras trayectorias orbitales de los desechos espaciales con el fin de respaldar el análisis de riesgos, el análisis de aproximación cercana, las maniobras para evitar colisiones y el análisis forense.

Existen entidades que rastrean los objetos detectables en la órbita de la Tierra, crean un TLE correspondiente para cada objeto y los ponen a disposición del público. Ejemplos de estas son <https://celestrak.com/> y <https://www.space-track.org/>

## 6.1. Introducción al formato TLE

El formato TLE [28] es un estándar de facto que, como hemos comentado anteriormente, se destina para la distribución de los elementos orbitales de un objeto en órbita terrestre. La representación de datos TLE es usada por modelos de perturbaciones como SGP (Perturbación General Simplificada), SGP4 (Satélites cercanos a la Tierra,  $T < 225$  minutos), SDP4 (Satélites del espacio profundo,  $T > 225$  minutos), SGP8 y SDP8. Por tanto, cualquier algoritmo que utilice un formato TLE como fuente de datos debe implementar uno de los modelos SGP para calcular correctamente el estado del objeto en un momento de interés.

Un conjunto TLE puede incluir una línea de título antes de los datos del elemento, por lo que cada listado puede ocupar tres líneas en el archivo. El título no es obligatorio ya que cada línea de datos incluye un código de identificación de objeto único. En la siguiente figura 6.1 se detalla un ejemplo del formato TLE:

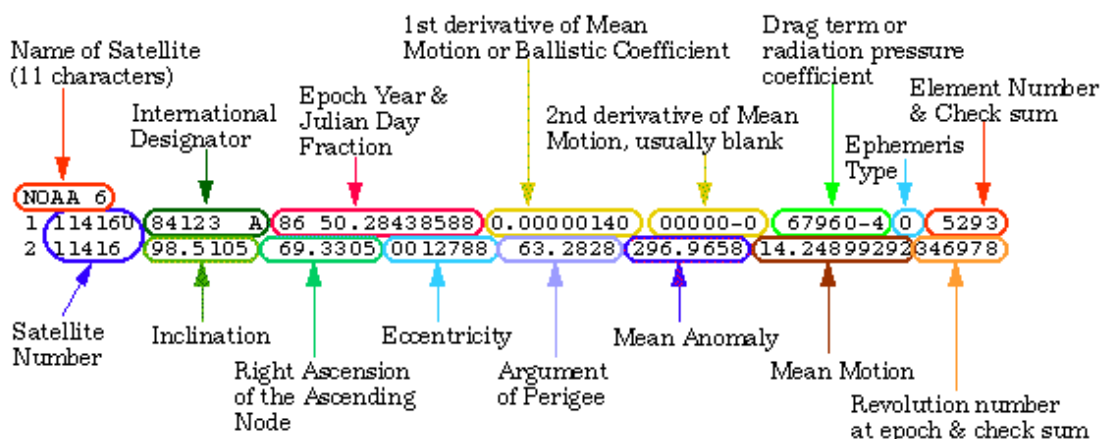


Figura 6.1: Ejemplo de formato TLE [29]

El formato usado consiste en dos líneas de 69 caracteres. Los únicos caracteres válidos son números del 0 al 9 (columnas N), letras mayúsculas de la A a la Z (columnas A), puntos, espacios en blanco y signos más y menos.

Los datos de cada satélite se expresan en tres líneas de texto con el siguiente formato:

```

AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA
1 NNNNNU NNNNNAAA NNNNN.NNNNNNNNN +.NNNNNNNNN +NNNNN-N +NNNNN-N N NNNNN
2 NNNNN NNN.NNNN NNN.NNNN NNNNNNNN NNN.NNNN NNN.NNNN NN.NNNNNNNNNNNNNNN
    
```

Figura 6.2: Caracteres permitidos en el formato TLE

Para la primera línea tenemos los siguientes campos [30]:

Tabla 6.1: Campos de la primera línea del formato TLE

<b>Campo</b>	<b>Columnas</b>	<b>Contenido</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Ejemplo</b>
1	01-01	Número de la línea		1
2	03-07	Nombre del satélite		11416
3	08-08	Clasificación	U=No clasificado, C=Clasificado, S=Secreto	U
4	10-11	Designador internacional	Dos últimos dígitos del año de lanzamiento	84
5	12-14	Designador internacional	Número de lanzamiento de ese año	123
6	15-17	Designador internacional	Identificación de los componentes en el lanzamiento	A
7	19-20	Año de la época	Dos últimos años del año	86
8	21-32	Época	Día del año y fracción de la fecha juliana	50.28438588
9	34-43	Primera derivada de la velocidad orbital media	También llamado coeficiente balístico	0.00000140
10	45-52	Segunda derivada de la velocidad orbital media	Normalmente 0 Punto decimal asumido	00000-0
11	54-61	Término de resistencia	Punto decimal asumido	67960-4
12	63-63	Tipo de efemérides	Sólo para uso interno, siempre cero en datos TLE distribuidos	0
13	65-68	Número de conjunto de elementos	Se incrementa cuando se genera un nuevo TLE para este objeto	529
14	69-69	Suma de verificación	Módulo 10	3

**Name of Satellite** (Nombre del satélite)

Número de cinco dígitos asignado por el Comando Espacial de los Estados Unidos para identificar a los satélites que se encuentran en órbitas terrestres.

**International Designator** (Designador internacional)

Convención internacional para aludir a los satélites lanzados con éxito al espacio. Consiste en el año de lanzamiento, un número de tres dígitos indicando el número de lanzamiento de ese año y un código de hasta tres letras que representa la identificación de los componentes en el lanzamiento.

**Epoch Year and Julian Date Fraction** (Año de la época y fracción de la fecha juliana)

La fracción de la fecha juliana muestra el número de días transcurridos en el año en cuestión. Por ejemplo, en 86 50.28438588 el "86" representa el año de la época (1986) y el "50.28438588" la fracción de la fecha juliana. Esta última nos informa que han pasado algo más de cincuenta días desde el 1 de enero de 1986. El tiempo resultante del vector sería 1986/050:06:49:30.94. Para el cálculo de este último se ha procedido de la siguiente manera:

Empezamos con 50.28438588 días (Días = 50)

$50.28438588 \text{ días} - 50 \text{ días} = 0.28438588 \text{ días}$

$0.28438588 \text{ días} \times 24 \text{ horas/día} = 6.8253 \text{ horas (Horas = 6)}$

$6.8253 \text{ horas} - 6 \text{ horas} = 0.8253 \text{ horas}$

$0.8253 \text{ horas} \times 60 \text{ minutos/hora} = 49.5157 \text{ minutos (Minutos = 49)}$

$49.5157 \text{ minutos} - 49 \text{ minutos} = 0.5157 \text{ minutos}$

$0.5157 \text{ minutos} \times 60 \text{ segundos/minuto} = 30.94 \text{ segundos (Segundos = 30.94)}$

**Ballistic Coefficient** (Coeficiente balístico)

También conocido como la primera derivada del movimiento medio, el coeficiente balístico es la tasa diaria de cambio en el número de revoluciones que el objeto completa cada día, dividido por 2. Este es el término de arrastre general utilizado en el predictor SGP4.

**Second Derivative of Mean Motion** (Segunda derivada de la velocidad orbital media)

La segunda derivada del movimiento medio es un término de arrastre de segundo orden en el predictor SGP4 que se utiliza para modelar el decaimiento orbital, que es la reducción de la altura de la órbita de un objeto espacial respecto a otro. Representa la segunda derivada con respecto al tiempo en el movimiento medio diario, dividido por 6. Se debe aplicar un decimal inicial. Los dos últimos caracteres definen una potencia de 10, por ejemplo -11606-4 hace referencia a  $-0.11606 \times 10^{-4}$ .

**Drag Term** (Término de resistencia)

También llamado coeficiente de presión o BSTAR, el término de resistencia es una forma de modelar la resistencia aerodinámica de un satélite en el modelo de predicción SGP4. Los dos últimos caracteres definen una potencia de 10, de la misma forma que en la segunda derivada de la velocidad orbital media.

**Ephemeris Type** (Tipo de efemérides)

Una efemérides es una tabla de valores que indica las posiciones de objetos astronómicos en un momento dado. Sólo para uso interno, por tanto mantendremos este campo a cero.

**Checksum** (Suma de verificación)

Las sumas de verificación para cada línea se calculan sumando todos los dígitos en esa línea, incluido el número de línea. Se añadirá un uno a la suma de verificación por cada signo negativo (-) en esa línea. Todos los demás caracteres que no sean dígitos se ignoran.

En cuanto a la segunda línea, nos encontramos con los siguientes campos [30]:

Tabla 6.2: Campos de la segunda línea del formato TLE

Campo	Columnas	Contenido	Observaciones	Ejemplo
1	01-01	Número de línea		2
2	03-07	Nombre del satélite		11416
3	09-16	Inclinación	En grados	98.5105
4	18-25	Ascensión recta del nodo ascendente	En grados	69.3305
5	27-33	Excentricidad	Punto decimal asumido	0012788
6	35-42	Argumento del perigeo	En grados	63.2828
7	44-51	Anomalía media	En grados	296.9658
8	53-63	Velocidad orbital media	Revoluciones por día	14.24899292
9	64-68	Numero de revoluciones	Revoluciones en la época	34697
10	69-69	Suma de verificación	Módulo 10	8

En esta segunda línea se especifican los elementos orbitales, que son un conjunto de seis parámetros que especifican las coordenadas inerciales de un satélite en un instante determinado. Estos parámetros son excentricidad ( $e$ ), semieje mayor ( $a$ ), ascensión recta del nodo ascendente ( $\Omega$ ), inclinación del plano orbital ( $i$ ), argumento del perigeo ( $\omega$ ) y tiempo de paso por el perigeo ( $t_p$ ). La siguiente figura 6.3 ilustra estos parámetros.

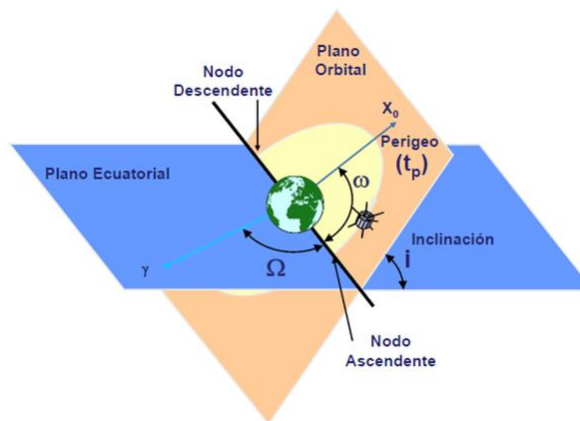


Figura 6.3: Elementos orbitales [31]

**Inclination** (Inclinación)

Ángulo que forma el plano orbital con respecto al plano de referencia (ecuador). Medido en grados.

**Right Ascension of the Ascending Node** (Ascensión recta del nodo ascendente)

Ángulo desde el punto vernal hasta la dirección del nodo ascendente, medido en el plano orbital. El punto vernal es aquel punto de la eclíptica en el cual el Sol pasa del hemisferio sur celeste al hemisferio norte, cosa que ocurre en el equinoccio de primavera. El nodo ascendente es el punto de corte donde la órbita del objeto pasa a través del plano de referencia. Medido en grados.

**Eccentricity** (Excentricidad)

Parámetro que define la forma de la órbita. Si la excentricidad es 0 tendremos una órbita circular, mientras que si tenemos una excentricidad menor que 1 la órbita será elíptica. Se debe aplicar un decimal inicial a este valor.

**Argument of Perigee** (Argumento del perigeo)

Ángulo desde el nodo ascendente hasta el perigeo, medido en el plano orbital del objeto y en su sentido de movimiento. Para órbitas ecuatoriales, en los que no hay nodo ascendente, y para órbitas circulares, que no tienen perigeo, no está definido. Medido en grados.

**Mean Anomaly** (Anomalía media)

Ángulo que el satélite recorre desde su paso por el perigeo si se estuviera moviendo en una órbita circular con radio igual al semieje mayor. Medido en grados.

Aunque podríamos crear nuestros propios objetos TLE, existe la opción de importarlos desde una base de datos que nos proporciona HTZ Communications, obtenida de <https://celestrak.com/> y <https://www.space-track.org/>. Para acceder a la misma nos dirigimos a *Satellite* → *TLE database...* A continuación, nos aparecerá una ventana con distintos documentos correspondientes a diferentes tipos de satélites. Por ejemplo, el documento *geo.txt* corresponde a satélites geoestacionarios.

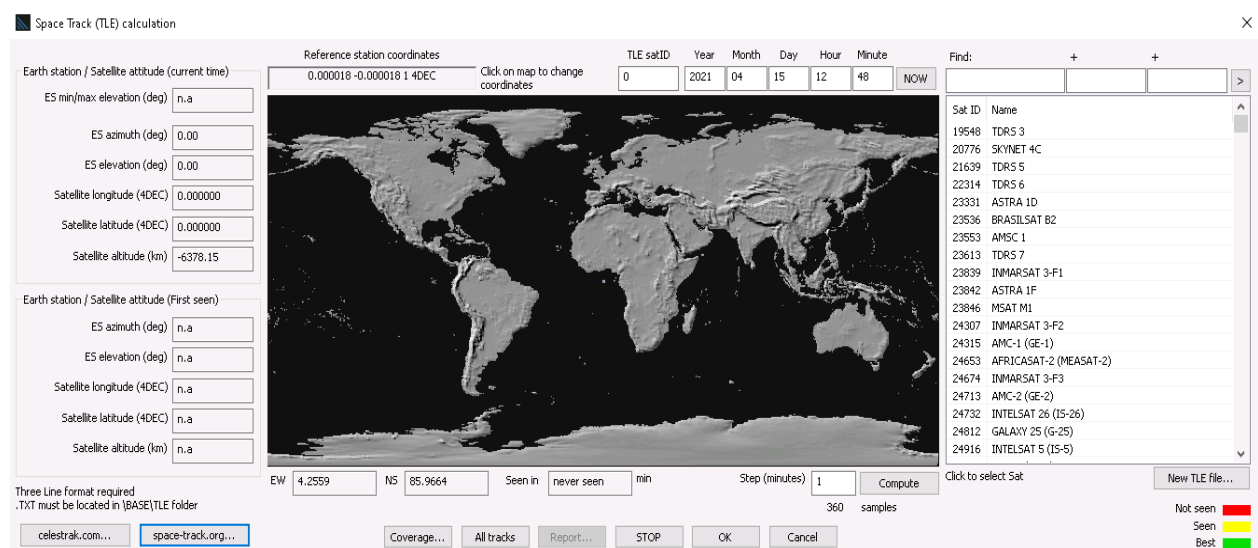


Figura 6.4: Menú de la base de datos TLE

## 6.2. Análisis de visibilidad

Los análisis de visibilidad permiten estudiar el tiempo que un satélite es visible desde un determinado lugar.

Para probar esta funcionalidad vamos a usar la base de datos de Globalstar, cargando por tanto el documento `globalstar.txt`. Globalstar es una compañía estadounidense de comunicaciones satelitales que opera una constelación satelital de órbita terrestre baja para teléfonos satelitales y comunicaciones de datos de baja velocidad.

Podremos seleccionar en el mapa la localización de nuestra estación terrena. Esta se mostrará en el mapa mediante una cruz de color violeta y con las letras ES. En este caso la situaremos en España. Si clicamos en *All tracks* se nos mostrará en el mapa la trayectoria de cada satélite de la base de datos que estemos usando. Para trazar esta trayectoria se usan tres colores: el rojo, el amarillo y el verde. El rojo representa el tramo en el que la estación terrena no ve al satélite. El color amarillo indica que la estación terrena sí ve al satélite pero el ángulo de elevación es pequeño y por tanto no tenemos una buena visibilidad. Finalmente, el verde representa los puntos donde tendremos una buena visibilidad.

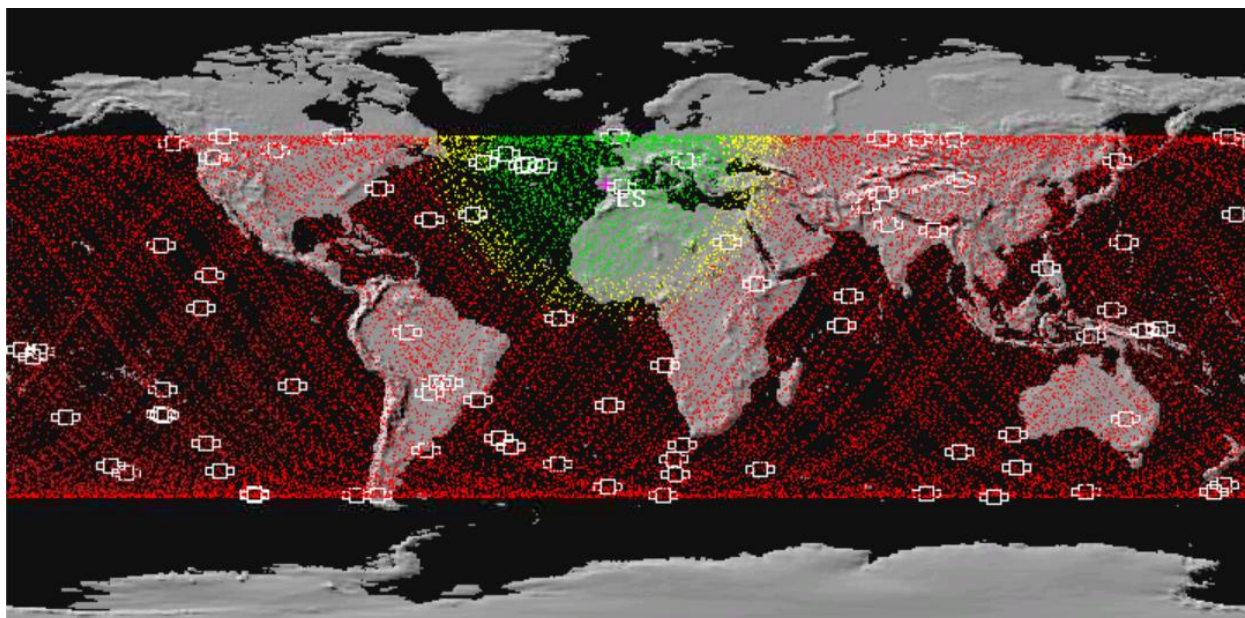


Figura 6.5: Trayectorias de la constelación de satélites Globalstar

En la lista de la derecha podremos seleccionar el satélite de la flota que queramos para ver su trayectoria individual. Por ejemplo, seleccionaremos el satélite con ID 25621 correspondiente a GLOBALSTAR M023. La trayectoria de este satélite se puede encontrar en la figura 6.6.

Vamos a proceder a hacer un análisis de visibilidad de este satélite en concreto. Para ello, seleccionaremos primeramente la fecha que queramos analizar mediante los recuadros Year/Month/Day/Hour/Minute (Año/Mes/Día/Hora/Minuto) situados en la parte superior de la ventana. Disponemos del botón NOW para rellenar automáticamente estos campos con la fecha actual.

A la izquierda de la ventana disponemos de datos como la elevación, el acimut y la longitud y latitud del satélite en el tiempo actual (arriba) y en el momento en el que la estación terrena ve por primera vez al satélite (abajo).

En el ejemplo que nos ocupa, si nos fijamos en la elevación para el tiempo actual veremos que nos indica que la estación terrena no ve al satélite y, efectivamente, si vemos el mapa, el satélite está en una posición marcada con el color rojo. El tiempo que tarda en alcanzar la primera vista se indica en el recuadro *Seen in*, que en este caso tiene un valor de 70 minutos medido desde el momento de referencia que introducimos previamente. Mediante el recuadro *Step* podremos ajustar la precisión del recorrido.



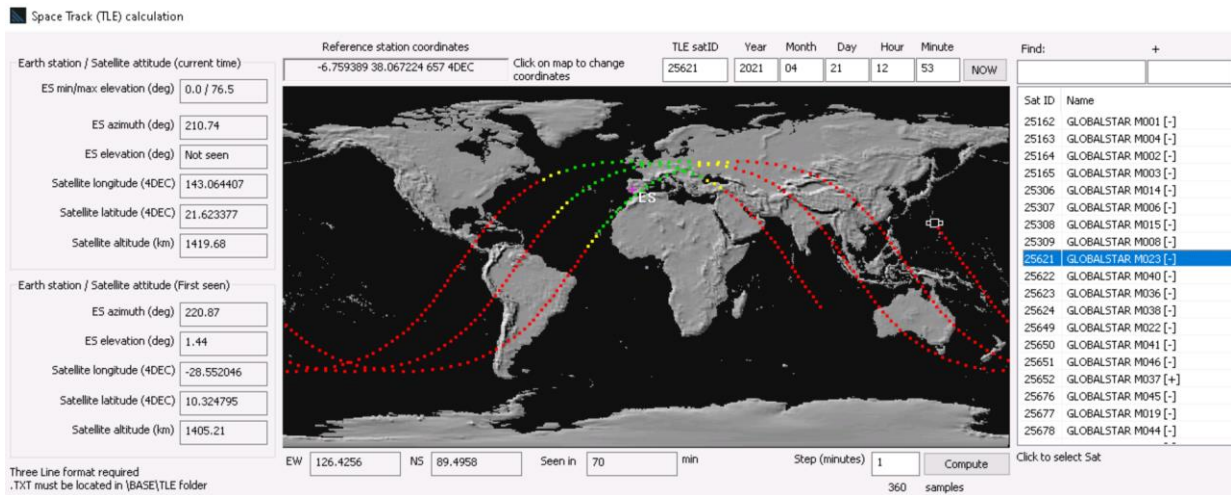


Figura 6.6: Trayectoria del satélite GLOBALSTAR M023

Además, podremos generar un informe de visibilidad clicando la opción *Report...* Por defecto, este informe está configurado para un tiempo de 360 minutos. Si lo generamos para el satélite GLOBALSTAR M023 obtenemos el siguiente listado:

Record	Sat ID	Sat Name	Timer	Sat longitude	Sat latitude	Sat alt equator (km)	Sat alt earth center (km)	Azimuth (deg)	Tilt (deg)	Seen
55	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +54 min	-57.953873	-28.815...	1416.16	7794.31	223.56	-90.00	0
56	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +55 min	-55.731459	-26.535...	1414.99	7793.14	223.40	-90.00	0
57	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +56 min	-53.605199	-24.213...	1413.86	7792.00	223.24	-90.00	0
58	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +57 min	-51.563684	-21.854...	1412.77	7790.91	223.09	-90.00	0
59	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +58 min	-49.596205	-19.463...	1411.72	7789.87	222.95	-90.00	0
60	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +59 min	-47.692709	-17.044...	1410.74	7788.88	222.81	-90.00	0
61	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +60 min	-45.843743	-14.603...	1409.81	7787.96	222.68	-90.00	0
62	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +61 min	-44.040379	-12.142...	1408.96	7787.11	222.54	-90.00	0
63	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +62 min	-42.274146	-9.666414	1408.19	7786.34	222.41	-90.00	0
64	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +63 min	-40.536947	-7.177691	1407.50	7785.64	222.27	-90.00	0
65	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +64 min	-38.820981	-4.679898	1406.89	7785.04	222.12	-90.00	0
66	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +65 min	-37.118667	-2.176165	1406.38	7784.52	221.97	-90.00	0
67	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +66 min	-35.422565	0.330450	1405.96	7784.10	221.80	-90.00	0
68	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +67 min	-33.725297	2.836916	1405.63	7783.77	221.61	-90.00	0
69	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +68 min	-32.019471	5.340199	1405.39	7783.54	221.40	-90.00	0
70	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +69 min	-30.297604	7.837214	1405.26	7783.40	221.15	-90.00	0
71	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +70 min	-28.552046	10.324795	1405.21	7783.35	220.87	1.44	1
72	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +71 min	-26.774895	12.799644	1405.25	7783.40	220.52	4.47	1
73	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +72 min	-24.957925	15.258295	1405.39	7783.53	220.09	7.93	1
74	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +73 min	-23.092504	17.697060	1405.60	7783.75	219.55	11.84	1
75	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +74 min	-21.169515	20.111980	1405.90	7784.04	218.86	16.29	1
76	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +75 min	-19.179282	22.498765	1406.27	7784.41	217.92	21.45	1
77	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +76 min	-17.111501	24.852730	1406.70	7784.85	216.61	27.55	1
78	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +77 min	-14.955188	27.168724	1407.20	7785.35	214.66	34.89	1
79	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +78 min	-12.698634	29.441053	1407.76	7785.90	211.49	43.86	1
80	25621	GLOBALSTAR M023 [-]	20210421 - 12:53 +79 min	-10.329409	31.663390	1408.36	7786.51	205.62	54.73	1

Figura 6.7: Informe de visibilidad del satélite GLOBALSTAR M023

El resultado es un listado con información de la longitud y latitud del satélite, las altitudes con respecto al ecuador y al centro de la Tierra, el acimut y la elevación de la antena y un campo que vale 0 si la estación terrena no ve al satélite y 1 si lo ve, para 360 minutos desde la fecha actual con un valor de paso de 1 minuto.

Como podemos observar en la anterior figura, al llegar a los 70 minutos el valor de *Seen* cambia de 0 a 1, que era lo que podíamos esperar.

# 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO

---

## 7.1. Conclusiones

En el presente trabajo de fin de grado se ha analizado el potencial que ofrece el programa HTZ Communications en las comunicaciones por satélite, explicando sus distintas funcionalidades y presentando simulaciones a modo de ejemplo.

De la realización de este proyecto se pueden extraer las siguientes conclusiones:

El programa de simulación HTZ Communications presenta multitud de ventajas. La planificación de un sistema de comunicaciones por satélite acarrea una serie de cálculos que pueden resultar tediosos si se realizan manualmente, además de consumir gran cantidad de tiempo. Estos incluyen balances de enlace, análisis de interferencias, mapas de cobertura, estudios de mejor servidor, etc. Gracias a HTZ communications se puede realizar esta planificación de una manera rápida, precisa y con un alto nivel de personalización, apoyándose en las simulaciones realizadas con este programa.

Además, se realizaron estudios de visibilidad, de vital importancia en la planificación de satélites no geostacionarios. Para ello se presentó el formato TLE, designado por el Comando de Defensa Aeroespacial de Norteamérica (NORAD) y cuya información es usada por modelos predictivos para determinar la posición y la velocidad de un satélite teniendo en cuenta fenómenos como perturbaciones, arrastre atmosférico, potencial gravitatorio, etc. De esta forma pudimos determinar el tiempo que un satélite es visible desde un lugar de referencia. También se generó un informe de visibilidad que nos daba información acerca de la longitud y latitud del satélite y del acimut y la elevación de la antena a lo largo de un intervalo de tiempo.

## 7.2. Líneas futuras de desarrollo

Debido al alto nivel de personalización que presenta el programa, y con el objeto de facilitar la comprensión por parte del lector, en este trabajo se ha optado por realizar un análisis de las funcionalidades sin entrar en demasiada profundidad. Por tanto, se propone trabajar las funcionalidades vistas en el trabajo con un nivel mayor de detalle.

Asimismo, debido que el alcance del proyecto es limitado, se han dejado por el camino ciertas funcionalidades sin analizar.

A continuación se citan algunas de las ampliaciones que se podrían realizar al proyecto actual:

Cálculos desde el menú *Statistics/Monte-Carlo/Interference*, desde donde podremos calcular:

- **Random transmitters to satellite (I/N)**: calcula la interferencia encontrada entre los transmisores aleatorios y los satélites seleccionados de la base de datos.
- **Satellite to random receivers (I/N)**: calcula la interferencia encontrada entre los satélites seleccionados de la base de datos y los receptores aleatorios.



Cálculos desde el menú emergente de la estación terrena/*Point to point*. En este punto podemos calcular:

- **I/N (Earth station Tx):** calcula la relación de interferencia I/N proveniente del elemento seleccionado y causada a los demás elementos, con la posibilidad de modificar el acimut y la inclinación de la antena de la estación seleccionada.
- **I/N (Earth station Rx):** calcula la relación de interferencia I/N en la estación seleccionada y proveniente de todos los demás elementos, con la posibilidad de modificar el azimut y la inclinación de la antena de la estación seleccionada.
- **Terrestrial station coordination:** calcula la degradación del umbral, considerando la estación seleccionada como víctima (modo Rx) o como potencial interferente (modo Tx).
- **Rx interference: 0-90°/0-360°:** esta función realiza cálculos de interferencia punto a punto en el receptor para una inclinación de 0 a 90 ° y un acimut de 0 a 360°. Podremos seleccionar un valor de paso para el acimut y la inclinación.
- **Rx antenna sweep (PFD):** calcula la mayor densidad de flujo de potencia (PFD), expresada en dBm/m<sup>2</sup>, recibida por la estación seleccionada y considerando una rotación de su antena cada n grados. El resultado es un gráfico que muestra para cada ángulo de acimut el máximo valor de PFD.
- **Satellite C/I:** calcula la relación C/I para una estación terrestre vinculada a un satélite.
- **EPM/OEPM:** calcula el margen de protección equivalente (EPM) del enlace descendente y enlace ascendente, antes (sin la estación seleccionada y su satélite asociado) y después (con la estación seleccionada y su satélite asociado). También se nos ofrece el margen de protección equivalente general (OEPM), que consiste en el siguiente cálculo: EPM después - EPM antes.
- **Satellite Budget:** esta función calcula el balance de enlace entre la estación seleccionada y el satélite al que está asociado. Los cálculos se realizan en dos direcciones: de estación terrena a satélite y de satélite a estación terrena.
- **Power received and OAA from GSO satellite(s):** calcula la potencia recibida por la estación seleccionada desde los satélites seleccionados de la base de datos. Busca satélites apuntados por la estación seleccionada con el mismo ángulo OAA (ángulo azimutal de observación).

# REFERENCIAS

---

- [1] Maral, G., Bousquet, M., & Sun, Z. (2020). *Satellite communications systems: systems, techniques and technology* (Sixth Edition). John Wiley and Sons.
- [2] Pérez Carrasco, J. A. (2021). Arquitectura de un sistema de comunicaciones por satélite [Figura]. En *Transparencias de la asignatura Comunicaciones vía satélite*.
- [3] Emiliani, L., Murillo Fuentes, J. J. (2006). Comunicaciones por satélite. *Transparencias de la asignatura Radiación y radiocomunicación*. Universidad de Sevilla.
- [4] UIT-R (2015). Recomendación UIT-R V.431-8. *Nomenclatura de las bandas de frecuencias y de las longitudes de onda empleadas en telecomunicaciones*. Ginebra, Suiza.
- [5] UIT-R (2017). Recomendación UIT-R P.618-13. *Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio*. Ginebra, Suiza.
- [6] Martínez, R., Calvo, M. (2009). Subsistema de comunicaciones, Carga útil de comunicaciones. *Transparencias de la asignatura Comunicaciones por satélite*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [7] Cardama Aznar, A. (2005). *Antenas* (2a ed., reimpr.). Edicions UPC.
- [8] Balanis, C. (2016). *Antenna theory : analysis and design* (Fourth edition.). Wiley.
- [9] Chatterjee, Rajeswari (2006). *Antenna theory and practice* (2nd ed.). New Delhi: New Age International.
- [10] Drabowitch, S. (2005). *Modern antennas* (2nd ed.). Kluwer Academic Publishers.
- [11] Martínez, R., Calvo, M. (2008). Subsistemas del satélite, Plataforma. *Transparencias de la asignatura Comunicaciones por satélite*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [12] Wertz, J., Larson, W., Kirkpatrick, D., & Klungle, D. (1991). *Space mission analysis and design* (3rd ed., 7th print.). Space Technology Library published jointly by Microcosm.
- [13] Martínez, R. (2008). Tipos de órbitas, Constelaciones de satélites. *Transparencias de la asignatura Comunicaciones por satélite*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [14] *Orbits*. (s. f.). [Figura]. <https://agsattract.com/>. <https://agsattract.com/images/orbits.png>
- [15] ATDI technical support. *Satellite Tutorial* (Release number v1.0). ATDI advanced communications. <https://atdi.com/htz-communications/>
- [16] ATDI technical support. *Satellite parameters* (Release number v1.0). ATDI advanced communications. <https://atdi.com/htz-communications/>

- [17] Branson, J. (2012, 21 octubre). *Euler angles* [Figura]. <https://hepweb.ucsd.edu/ph110b/>. [https://hepweb.ucsd.edu/ph110b/110b\\_notes/img457.png](https://hepweb.ucsd.edu/ph110b/110b_notes/img457.png)
- [18] Union of Concerned Scientists. (2021, 1 enero). *UCS Satellite Database*. <https://www.ucsusa.org>. <https://www.ucsusa.org/media/11492>
- [19] UIT-R (1995). Recomendación UIT-R SF.358-5. *Valores máximos admisibles de la densidad de flujo de potencia producida en la superficie de la tierra por satélites del servicio fijo que comparten las mismas bandas de frecuencias superiores a 1 GHz, con los sistemas de radioenlaces con visibilidad directa*. Ginebra, Suiza.
- [20] ATDI technical support. *Interference Rejection Factors* (Release number v1.0). ATDI advanced communications. <https://atdi.com/htz-communications/>
- [21] *International Telecommunication Union*. (2000, enero). *Threshold Degradation in the Fixed Service*. ITU-D. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Projects/ITU-EC-ACP/HIPSSA/Documents/REGIONAL%20documents/HCM4A-E-Annex09-en.pdf>
- [22] Hornillo Mellado, S. (2021). Degradación de umbral debido a interferencias [Figura]. En *Práctica 4: Diseño de radioenlaces mediante HTZ Communications de ATDI*. Prácticas de la asignatura Sistemas de Radiocomunicación.
- [23] Hornillo Mellado, S. (2021). Práctica 2: Estudio de perfil mediante HTZ Communications de ATDI. *Prácticas de la asignatura Sistemas de Radiocomunicación*.
- [24] *IridiumComm*. (2019, 17 enero). [Figura]. <https://theboringblog.quora.com/>. <https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-804a247b9ded527d506aeb9d4f789a0a>
- [25] UIT-R (2006). Recomendación UIT-R SA.609-2. *Criterios de protección para los enlaces de radiocomunicación con satélites de investigación espacial, tripulados o no tripulados, próximos a la Tierra*. Ginebra, Suiza.
- [26] ATDI technical support. *NGSO satellite calculations* (Release number v1.0). ATDI advanced communications. <https://atdi.com/htz-communications/>
- [27] ATDI technical support. *Satellite interference (C/I)* (Release number v1.0). ATDI advanced communications. <https://atdi.com/htz-communications/>
- [28] Martínez, R. (2008). Parámetros orbitales, Formato TLE de NORAD. *Transparencias de la asignatura Comunicaciones por satélite*. Universidad Politécnica de Madrid.
- [29] ATDI technical support. (s. f.). TLE format [Figura]. En *TLE Satellite database (Release number v2.0)*.
- [30] ATDI technical support. *TLE Satellite database* (Release number v2.0). ATDI advanced communications. <https://atdi.com/htz-communications/>
- [31] Martínez, R. (2008). Parámetros orbitales [Figura]. En *Parámetros orbitales, Formato TLE de NORAD*. *Transparencias de la asignatura Comunicaciones por satélite*. Universidad Politécnica de Madrid.

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2.1: Segmentos de un sistema de comunicaciones por satélite [2].....	4
Figura 2.2: Esquema del segmento espacial .....	7
Figura 2.3: Transpondedor transparente de conversión simple [2].....	8
Figura 2.4: Transpondedor regenerativo [2] .....	8
Figura 2.5: Transpondedor transparente de conversión doble [2].....	8
Figura 2.6: Canalización en transpondedores de conversión simple y doble [2].....	9
Figura 2.7: Antenas usadas en el satélite Intelsat 18 [2] .....	10
Figura 2.8: Tipos de antenas reflectoras.....	13
Figura 2.9: Esquema de una red formadora de haz [6] .....	13
Figura 2.10: Reflector multialimentado [6] .....	13
Figura 2.11: Reflector conformado [6].....	13
Figura 2.12: Tipos de cobertura [2] .....	13
Figura 2.13: Cobertura Hispasat 1D [2] .....	13
Figura 2.14: Tipos de diagrama de cobertura según el tipo de antena [2] .....	13
Figura 2.15: Tipos de órbitas [14].....	20
Figura 3.1: Ventana base de datos de satélites.....	21
Figura 3.2: Ángulos de Euler [17].....	21
Figura 3.3: Latitud y longitud del punto subsatelital [2].....	21
Figura 3.4: Creación de satélite de ejemplo HISPASAT 1E .....	25
Figura 3.5: Base de datos de satélites con varios satélites de ejemplo .....	25
Figura 3.6: Localización orbital de los satélites de ejemplo y orientación de sus antenas en el mapamundi ....	26
Figura 3.7: Zonas de la ventana de base de datos de satélites .....	27
Figura 3.8: Selección de satélites dentro de un rango específico.....	28
Figura 3.9: Cobertura compuesta.....	29
Figura 3.10: Función "Coverage mean value" .....	29
Figura 3.11: Paleta de colores .....	30
Figura 3.12: Mejor servidor.....	30
Figura 3.13: Función "Legend color report by distance".....	31
Figura 3.14: Informe obtenido con la función "Legend color report by distance" .....	31
Figura 3.15: Cobertura simultánea .....	32
Figura 3.16: Mapa de densidad de flujo de potencia del satélite Hispasat 1E.....	32
Figura 3.17: Vista previa de cobertura del satélite Hispasat 1E.....	33
Figura 3.18: Paleta de colores .....	34
Figura 3.19: Mapa de ganancia del satélite Hispasat 1E.....	34
Figura 3.20: Ventana factores de rechazo de interferencia .....	35
Figura 3.21: Definición de los diferentes canales [20].....	35
Figura 3.22: Ejemplo de IRF definido por máscara.....	36
Figura 3.23: Máscara resultante de la configuración de la figura 3.18 [20] .....	36
Figura 3.24: Ejemplo de IRF definido por matriz [20].....	37
Figura 3.25: IRF definidos por el C/I de un transmisor .....	38
Figura 3.26: Configuración IRF para simulación de interferencia en el enlace descendente .....	39
Figura 3.27: Interferencia en el enlace descendente.....	39
Figura 3.28: Degradación del umbral debido a interferencias [22] .....	40
Figura 3.29: Interferencia en el enlace ascendente.....	40
Figura 4.1: Selección estación tipo satélite .....	41

<i>Figura 4.2: Ubicación de la estación terrena de ejemplo.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.3: Patrón de radiación y parámetros para la antena de la estación terrena de ejemplo.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.4: Parámetros de la estación terrena de ejemplo .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.5: Calculadora de pérdidas de alimentación.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.6: Localizaciones de las estaciones terrenas de ejemplo .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.1: Opciones satélite a estación (P2P).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.2: Parámetros del clutter.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.3: Informe "Satélite a estación (P2P)" .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.4: Informe "Estación a satélite (P2P)" .....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.5: Constelación de satélites [24] .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.6: Configuración de la constelación en la función "Satellite constellation to station..." .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.7: Creación del satélite no geoestacionario de prueba para el cálculo de I/N .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.8: Simulación "Satellite constellation to station..." .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.9: Configuración de mapa C/I .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.10: Configuración del receptor usado en el mapa C/I.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.11: Mapa C/I usando el modo "Map grid".....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.12: Informe del mapa C/I usando el modo "Map grid" .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.13: Puntos de prueba del archivo VEC.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.14: Mapa C/I usando el modo "From vector points".....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.15: Informe del mapa C/I usando el modo "From vector points" .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.16: Configuración de mapa PFD .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.17: Mapa PFD usando el modo "Map grid".....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.18: Informe del mapa PFD usando el modo "Map grid" .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.19: Mapa PFD usando el modo "From vector points" .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.20: Informe del mapa PFD usando el modo "From vector points".....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 6.1: Ejemplo de formato TLE [29] .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 6.2: Caracteres permitidos en el formato TLE.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 6.3: Elementos orbitales [31] .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 6.4: Menú de la base de datos TLE .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 6.5: Trayectorias de la constelación de satélites Globalstar .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 6.6: Trayectoria del satélite GLOBALSTAR M023.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 6.7: Informe de visibilidad del satélite GLOBALSTAR M023.....</i>	<i>67</i>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 2.1: Bandas de frecuencias de microondas usadas en comunicaciones por satélite [4].....</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 2.2: Ventajas e inconvenientes de la órbita LEO [3][13].....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2.3: Ventajas e inconvenientes de la órbita MEO [3][13].....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2.4: Ventajas e inconvenientes de la órbita HEO [3][13].....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 2.5: Ventajas e inconvenientes de la órbita GEO [3][13].....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3.1: Parámetros de los satélites de ejemplo.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 3.2: Parámetros del área de visualización.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3.3: Colores usados por los satélites .....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4.1: Parámetros de las estaciones de ejemplo.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 5.1: Modificación de la altura local de la capa DEM en función del código de clutter.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 5.2: Pérdidas asociadas a la capa clutter según la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones)....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 5.3: Pérdidas asociadas a la capa clutter según la UER (Unión Europea de Radiodifusión).....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 5.4: Pérdidas asociadas a la capa clutter según la NTIA (National Telecommunication and Information Administration, de EEUU). .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 6.1: Campos de la primera línea del formato TLE .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 6.2: Campos de la segunda línea del formato TLE .....</i>	<i>64</i>