

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería de Telecomunicación

Comparación, simulación y estudios de cobertura de sistemas TETRA y DMR mediante la herramienta ICS Telecom

Autor: José Ángel Elías Revilla

Tutor: Rafael Boloix Tortosa

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

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Telecomunicación

Comparación, simulación y estudios de cobertura de sistemas TETRA y DMR mediante la herramienta ICS Telecom

Autor:

José Ángel Elías Revilla

Tutor:

Rafael Boloix Tortosa

Profesor titular

Dep. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Carrera: Comparación, simulación y estudios de cobertura de sistemas TETRA y DMR mediante la herramienta ICS Telecom

Autor: José Ángel Elías Revilla

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:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

A mis “unicornios”

A Sacha

En plena era de la información se desarrollan cada vez más sistemas de telecomunicación, y casi toda la información que recibimos está relacionada con sistemas de telecomunicaciones públicas, tales como GSM, 3G, 4G, etc. Además de estos sistemas, existen otro tipo de estándares dedicados a los sistemas de telecomunicaciones privados, de modo que puedan ser usados por miembros de distintos sectores, tales como empresas y cuerpos de seguridad y emergencias, de tal manera que las comunicaciones sean lo más efectivas posible, especialmente en términos de disponibilidad, a la par que seguras. Así, en este documento se pretende presentar y comparar dos estándares distintos de comunicaciones privadas: los estándares TETRA y DMR.

Este trabajo también tendrá una parte experimental, en la que plasmaremos dicha comparación mencionada anteriormente en un ejemplo concreto, centrándonos en las características de radiopropagación de ambos estándares. Para ello nos ayudaremos de la herramienta software ICS Telecom, de ATDI, la cual también presentaremos.

Por tanto, nos disponemos a estudiar la comparación entre los dos estándares de distinta manera: primero nos centraremos en la parte más técnica y luego, mediante el ejemplo, veremos experimentalmente las diferencias de ambas tecnologías, para acabar comparándolas en todos sus ámbitos.

Prefacio

La elaboración del presente documento surgió del interés personal que siempre he tenido en las radiocomunicaciones, aunque también cabe decir que me decidí concretamente por estudiar los sistemas TETRA y DMR a causa de mi trabajo, ya que son dos tecnologías con las que trabajamos habitualmente, pero no en profundidad. Por ello, este proyecto es una magnífica oportunidad para aprender no sólo como funcionan dichas tecnologías, sino también a manejar una herramienta software con la que se suele trabajar a la hora de realizar proyectos de ingeniería de radiocomunicaciones.

Este trabajo aúna tres partes: teórica, experimental y crítica. La parte teórica abarca el conocimiento de las tecnologías y sus aspectos más técnicos dedicados a cada caso concreto, mientras que la parte experimental se apoya en la teoría de radiocomunicaciones, así como en un caso práctico concreto, para poder sacar los resultados mediante el software ICS Telecom. En cuanto a la parte crítica es básicamente una comparación de los distintos métodos que se han seguido aquí para dar solución a un mismo problema en cuanto a cobertura, parámetros de tráfico, flexibilidad de la red, etc. Tres partes que, en su conjunto, buscan dar un enfoque de presentación de diversas opciones que ofrecer de un despliegue de red a un hipotético cliente, cuya decisión se basará en la relación calidad/precio que se quiera dar a la red o que el cliente pueda permitirse.

Mis más sinceros agradecimientos a Tomás, con quien continuamente discutía acerca de las posibilidades de las tecnologías que aquí se exponen; y también a Abraham, por dar su punto de vista técnico al comparar elementos de las simulaciones que aquí se exponen con casos reales de redes de comunicaciones vía radio.

Resumen	ix
Prefacio	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xix
Notación	xxiii
1 Introducción a las comunicaciones PMR	1
2 Introducción teórica: TETRA y DMR	2
2.1. TETRA	2
2.1.1. Introducción	2
2.1.2. Esquemas de transmisión	2
2.1.3. Acceso al medio	¡Error! Marcador no definido.
2.1.4. Modulación	5
2.1.4.1. Modulaciones de fase	5
2.1.4.2. Modulaciones de amplitud en cuadratura	6
2.1.5. Estructura de tramas	6
2.1.6. Tipos de canales en TETRA	7
2.1.6.1. Canales lógicos en TETRA	8
2.1.6.2. Canales físicos en TETRA	9
2.1.6.3. Ráfagas de datos	9
2.1.7. Características en transmisión y recepción	10
2.1.7.1. Sintonización de transmisor con receptor	10
2.1.7.2. Potencia de transmisión	10
2.1.7.3. Emisiones indeseadas	10
2.1.7.4. Requisitos de intermodulación	11
2.1.7.5. Características en recepción	11
2.2. DMR	12
2.2.1. Introducción	12
2.2.2. Esquema de transmisión	13
2.2.3. Acceso al medio	13
2.2.4. Modulación	14
2.2.5. Estructura de tramas	14
2.2.6. Canales y señalización en DMR	16
2.2.7. Características en transmisión y recepción	18
2.2.7.1. Sintonización de transmisor con receptor	18
2.2.7.2. Potencia de transmisión	18
2.2.7.3. Emisiones indeseadas	18
2.2.7.4. Requisitos de intermodulación	18
2.2.7.5. Características en recepción	19
3 Metodología empleada: ICS telecom	20
3.1. Introducción	20

3.2. Representación gráfica del terreno en ICS Telecom	21
3.3. Objetos en ICS Telecom	22
3.4. Cálculo de cobertura en ICS Telecom	24
4 Simulación y estudios de cobertura	28
4.1. Contexto y situación	28
4.2. Consideraciones generales	29
4.3. Simulación con TETRA	30
4.3.1. Características de los equipos	30
4.3.1.1. Equipos usados por las RTU (MS)	30
4.3.1.2. Equipos usados por los repetidores (BS)	32
4.3.2. Métodos de simulación	33
4.3.2.1. Simulación a partir de los emplazamientos con repetidores	34
4.3.2.2. Simulación a partir de la planificación futura	59
4.4. Simulación con DMR	68
4.4.1. Características de los equipos	68
4.4.1.1. Equipos usados por las RTU (MS)	68
4.4.1.2. Equipos usados por los repetidores (BS)	69
4.4.2. Métodos de simulación	70
4.4.2.1. Simulación a partir de los emplazamientos con repetidores	70
4.4.2.2. Simulación a partir de la planificación futura	78
5 Resultados, discusión y conclusiones	82
5.1. Discusión	82
5.1.1. Cobertura	82
5.1.2. Interferencia	82
5.1.3. Ruido	83
5.1.4. Tráfico	84
5.1.5. Robustez de la red	84
5.1.6. Ampliación de la red	84
5.1.7. Aspectos económicos	85
5.2. Conclusiones	85
Anexo A: Normas CNAF utilizadas	88
Anexo B: Informes de interferencia	89
B.0. Informes TETRA caso 1	89
B.1. Informes TETRA caso 2	90
B.2. Informes DMR caso 1	91
Anexo C: Informe de los planes de atribución de frecuencias	93
C.0. Plan de atribución de frecuencias en TETRA	93
C.1. Plan de atribución de frecuencias en DMR	94
Anexo D: Informes de cobertura	96
D.0. Informes TETRA caso 1	96
D.1. Informes TETRA caso 2	99
D.2. Informes DMR caso 1	102
D.3. Informes DMR caso 2	105
Anexo E: Informes de tráfico	108
E.0. Informes TETRA caso 1	108
E.1. Informes TETRA caso 2	108
E.2. Informes DMR caso 1	108
E.3. Informes DMR caso 2	109
Bibliografía	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Bandas de frecuencia TETRA típicas (norma ETSI TS 100392-15)	4
Tabla 2.2. Número de símbolos por cada timeslot y subslot TETRA	7
Tabla 2.3. Potencias de transmisión en TETRA	10
Tabla 2.4. Ejemplo umbrales de emisiones indeseadas en TETRA	11
Tabla 2.5. Característica de bloqueo en recepción en TETRA	12
Tabla 2.6. Sensibilidad del receptor en TETRA	12
Tabla 2.7. Relación portadora/interferencia en TETRA	12
Tabla 2.8. Desviación de frecuencia para modulación 4-FSK en DMR	14
Tabla 2.9. Potencias de transmisión típicas en DMR	18
Tabla 2.10. Relación portadora/interferencia en DMR	19
Tabla 4.1. Características emisora TETRA para RTU	30
Tabla 4.2. Características antena omnidireccional TETRA para RTU	31
Tabla 4.3. Características antena direccional TETRA para RTU	32
Tabla 4.4. Características emisora TETRA para BS	32
Tabla 4.5. Características antena omnidireccional TETRA para BS	33
Tabla 4.6. XPD global de 3 dB	42
Tabla 4.7. VER nominales en TETRA para modulación $\pi/4$ -DQPSK	57
Tabla 4.8. Características emisora DMR para RTU	68
Tabla 4.9. Características antena DMR para RTU	69
Tabla 4.10. Características emisora DMR para BS	69
Tabla 4.11. Características antena DMR para BS	70
Tabla 5.1. Niveles de sensibilidad media en comunicaciones PMR	83
Tabla 5.2. Resumen características de los distintos diseños	86
Tabla B.1. Informe de relación de protección TETRA (Caso 1)	89
Tabla B.2. Informe de interferencia global TETRA (Caso 1)	89
Tabla B.3. Informe de interferencia en mejor servidor TETRA (Caso 1)	90
Tabla B.4. Informe de relación de protección TETRA (Caso 2)	90
Tabla B.5. Informe de interferencia global TETRA (Caso 2)	90
Tabla B.6. Informe de interferencia en el mejor servidor TETRA (Caso 2)	91
Tabla B.7. Informe de relación de protección DMR (Caso 1)	91
Tabla B.8. Informe de interferencia global DMR (Caso 1)	91
Tabla B.9. Informe de interferencia en el mejor servidor DMR (Caso 1)	92
Tabla C.1. Atribución de frecuencias en TETRA	93
Tabla C.2. Atribución de frecuencias en DMR	94

Tabla D.1. Suscriptores cubiertos TETRA (Caso 1)	96
Tabla D.2. Cobertura en enlace ascendente TETRA (Caso 1)	97
Tabla D.3. Cobertura en enlace descendente TETRA (Caso 2)	99
Tabla D.4. Cobertura enlace ascendente TETRA (Caso 2)	100
Tabla D.5. Suscriptores cubiertos DMR (Caso 1)	102
Tabla D.6. Cobertura enlace ascendente DMR (Caso 1)	103
Tabla D.7. Cobertura enlace descendente DMR (Caso 2)	105
Tabla D.8. Cobertura enlace ascendente DMR (Caso 2)	106
Tabla E.1. Tráfico TETRA (Caso 1)	108
Tabla E.2. Tráfico TETRA (Caso 2)	108
Tabla E.3. Tráfico DMR (Caso 1)	108
Tabla E.4. Tráfico DMR con retraso medio aumentado (Caso 1)	109
Tabla E.5. Tráfico DMR con BS adicional en cada emplazamiento (Caso 1)	109
Tabla E.6. Tráfico DMR (Caso 2)	109
Tabla E.7. Tráfico DMR con retraso medio aumentado (Caso 2)	109
Tabla E.8. Tráfico DMR con BS adicional en cada emplazamiento (Caso 2)	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de transmisión TETRA para modulación de fase	3
Figura 2.2. Esquema de transmisión TETRA para modulación QAM	3
Figura 2.3. Sistemas de acceso al medio FDMA y TDMA	4
Figura 2.4. Radiocanales en tecnología analógica y TETRA	4
Figura 2.5. Comparación sistema radio convencional con sistema troncal	5
Figura 2.6. Constelaciones $\pi/4$ -DQPSK y $\pi/8$ -D8PSK	5
Figura 2.7. Constelaciones QAM	6
Figura 2.8. Jerarquía de tramas en TETRA	7
Figura 2.9. Ejemplo de estructura de ráfagas	9
Figura 2.10. Radiocanales en tecnología analógica y DMR	13
Figura 2.11. Ejemplo de señal modulada BFSK y constelación 4FSK	14
Figura 2.12. Estructura de trama en enlaces ascendente y descendente DMR	15
Figura 2.13. Estructura de timeslot en DMR	15
Figura 2.14. Indicación del estado en canal ascendente DMR	16
Figura 2.15. Indicación de timeslots en canales ascendente y descendente DMR	17
Figura 2.16. Sincronismo en canal ascendente y descendente	18
Figura 3.1. Organización por capas de ICS Telecom	20
Figura 3.2. Project Manager de ICS Telecom	21
Figura 3.3. Representación gráfica de distintas capas en ICS Telecom	21
Figura 3.4. Representación 3D de mapa 2D	22
Figura 3.5. Visor de coordenadas, cota y tipo de terreno	22
Figura 3.6. Propiedades de objeto en ICS Telecom	23
Figura 3.7. Emplazamiento preciso de estaciones en ICS Telecom	23
Figura 3.8. Parámetros de una estación	24
Figura 3.9. Ajuste de modelo de propagación	25
Figura 3.10. Umbrales de cobertura y distancia	25
Figura 3.11. Análisis de cobertura y leyenda	26
Figura 3.12. Perfil de cobertura	26
Figura 3.13. Cobertura compuesta	27
Figura 3.14. Solapamiento de cobertura	27
Figura 4.1. Representación de suscriptores en el mapa	28
Figura 4.2. Características de clutter	29
Figura 4.3. Patrón de radiación de antena omnidireccional TETRA para RTU	31
Figura 4.4. Patrón de radiación de antena direccional TETRA para RTU	32

Figura 4.5. Patrón de radiación de antena omnidireccional TETRA para BS	33
Figura 4.6. Repetidores y suscriptores TETRA	34
Figura 4.7. Lista de BS TETRA	34
Figura 4.8. Parámetros generales BS TETRA	35
Figura 4.9. Patrón radiación BS TETRA	36
Figura 4.10. Parámetros de los canales BS TETRA	36
Figura 4.11. Parámetros avanzados BS TETRA	37
Figura 4.12. Parámetros de los suscriptores TETRA	38
Figura 4.13. Datos cálculo cobertura	39
Figura 4.14. Cobertura compuesta TETRA (Caso 1)	39
Figura 4.15. Cobertura mejor servidor TETRA (Caso 1)	40
Figura 4.16. Paleta de usuario	40
Figura 4.17. Mapa cobertura mejor servidor con contraste	41
Figura 4.18. Interferencia con uno y varios interferentes	41
Figura 4.19. Ventana de análisis de interferencia	43
Figura 4.20. Discriminación de antena Rx omnidireccional	44
Figura 4.21. Configuración C/I y XPD	44
Figura 4.22. Detalle opciones informes	45
Figura 4.23. Mapa de interferencia global TETRA (Caso 1)	46
Figura 4.24. Mapa de interferencia en mejor servidor TETRA (Caso 1)	46
Figura 4.25. Mapa C/I: mínimo C/I global TETRA (Caso 1)	47
Figura 4.26. Mapa C/I: mínimo C/I en mejor servidor TETRA (Caso 1)	47
Figura 4.27. Informe puntual de señales recibidas	48
Figura 4.28. Ventana de plan de asignación de frecuencias	49
Figura 4.29. Banda a asignar	49
Figura 4.30. Interferencia tras asignación de frecuencias	51
Figura 4.31. Mapa C/I: mínimo C/I global TETRA tras reasignación de frecuencias (Caso 1)	51
Figura 4.32. Mapa C/I: mínimo C/I en mejor servidor TETRA tras reasignación de frecuencias (Caso 1)	52
Figura 4.33. Ventana de emparentamiento de suscriptores	52
Figura 4.34. Mapa de suscriptores emparentados al mejor servidor TETRA	53
Figura 4.35. Informe de suscriptores emparentados al mejor servidor TETRA	54
Figura 4.36. Mapa de suscriptores emparentados al servidor más cercano TETRA	54
Figura 4.37. Informe de suscriptores emparentados al servidor más cercano TETRA	55
Figura 4.38. Centros con antenas directivas	56
Figura 4.39. Parámetros suscriptor con antena directiva	56
Figura 4.40. Relación BER – Eb/N0 para modulación DQPSK	57
Figura 4.41. Ventana de disponibilidad de perfil	58
Figura 4.42. Ventana de parámetros de tráfico	59
Figura 4.43. Ventana de planificación futura	60

Figura 4.44. Informe tras planificación futura TETRA	61
Figura 4.45. Vista general tras planificación futura TETRA	61
Figura 4.46. Ubicación de emplazamientos TETRA en el mapa	62
Figura 4.47. Cobertura compuesta TETRA (Caso 2)	63
Figura 4.48. Cobertura en mejor servidor TETRA (Caso 2)	63
Figura 4.49. Interferencia global TETRA (Caso 2)	64
Figura 4.50. Interferencia sobre mejor servidor TETRA (Caso 2)	64
Figura 4.51. Mapa C/I: mínimo C/I TETRA (Caso 2)	65
Figura 4.52. Mapa C/I: mínimo C/I sobre mejor servidor TETRA (Caso 2)	65
Figura 4.53. Suscriptores interferidos de manera global TETRA (Caso 2)	66
Figura 4.54. Suscriptores interferidos en el mejor servidor TETRA (Caso 2)	66
Figura 4.55. Mapa C/I: mínimo C/I global tras reasignación de frecuencias TETRA (Caso 2)	67
Figura 4.56. Mapa C/I: mínimo C/I en mejor servidor tras reasignación de frecuencias TETRA (caso 2)	67
Figura 4.57. Patrón de radiación de antena DMR para RTU	69
Figura 4.58. Patrón de radiación de antena DMR para BS	70
Figura 4.59. Mapa de cobertura compuesta DMR (Caso 1)	71
Figura 4.60. Mapa de cobertura en mejor servidor DMR (Caso 1)	72
Figura 4.61. Discriminación de antena Rx en DMR	72
Figura 4.62. Mapa interferencia global DMR (Caso 1)	73
Figura 4.63. Mapa interferencia en mejor servidor DMR (Caso 1)	73
Figura 4.64. Mapa C/I: mínimo C/I global DMR (Caso 1)	74
Figura 4.65. Mapa C/I: mínimo C/I en mejor servidor DMR (Caso 1)	74
Figura 4.66. Mapa C/I: mínimo C/I global DMR tras ajuste de frecuencias (Caso 1)	75
Figura 4.67. Mapa C/I: mínimo C/I en mejor servidor DMR tras ajuste de frecuencias (Caso 1)	76
Figura 4.68. Informe suscriptores emparentados al mejor servidor en DMR	76
Figura 4.69. Informe suscriptores emparentados al servidor más cercano en DMR	77
Figura 4.70. Relación BER – Eb/N0 para modulación 4FSK	77
Figura 4.71. Informe tras planificación futura DMR	79
Figura 4.72. Detalle de ubicación del emplazamiento DMR	79
Figura 4.73. Vista general planificación futura DMR	80
Figura 4.74. Mapa cobertura compuesta DMR (Caso 2)	80

Notación

\forall	Para todo
\in	Perteneciente a
\mathbb{N}	Conjunto de todos los números naturales
BER	Bit Error Rate o tasa de error de bit
C/I	Relación Señal-Interferencia (Carrier/Interference)
C/I_a	Relación Señal-Interferencia con el canal adyacente
C/I_c	Relación Señal-Interferencia cocanal
C/N	Relación Carrier/Noise o relación señal a ruido
dB	Decibelio
dBc	Decibelios respecto a la portadora principal
dBd	Decibelios referidos al dipolo $\lambda/2$
dB _i	Decibelios referidos a la antena isótropa
dBm	Decibelios referidos a 1mW de potencia
dBuV/m o dB μ m/V	Decibelios referidos a 1 μ V/m de intensidad de campo eléctrico
E_b/N_0	Relación energía por bit/densidad espectral de potencia de ruido
FS	Field Strength o intensidad de campo
Hz	Hercio
kbps	Kilobits por segundo
P2P	Point-to-point
RF	Radiofrecuencia
SNR	Signal-to-Noise Ratio o relación señal a ruido
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
W	Watt o Vatio
>	Mayor que
<	Menor que
\neq	Distinto de
\approx	Aproximadamente

1 INTRODUCCIÓN A LAS COMUNICACIONES PMR

Los sistemas de comunicaciones PMR (*Professional Mobile Radio* o *Private Mobile Radio*) son sistemas de radiocomunicaciones que utilizan terminales radio portátiles (MS, *Mobile Station*) por regla general, tales como walkies, y se pueden comunicar directamente o bien se apoyan en estaciones base (BS, *Base Station*) para que los distintos usuarios de este sistema puedan comunicarse entre sí. Dentro de la operación de los sistemas PMR podemos encontrar varios estándares, tales como TETRA, MPT-1327, APCO 25 (también llamado P25) o DMR, diseñados para el uso dedicado de organizaciones específicas, aunque también podemos encontrar estándares para uso comercial. Los ejemplos típicos de organizaciones que hacen uso de los estándares dedicados son los cuerpos de seguridad, tales como bomberos o policías. Las principales características técnicas de los sistemas PMR son:

- Comunicaciones punto a multipunto
- *Push-to-talk* (pulsar para hablar) y *Release-to-listen* (soltar para escuchar)
- Grandes áreas de cobertura
- Grupos de usuarios cerrados
- Uso de las bandas de frecuencia de UHF y VHF.

A continuación nos disponemos a ver dos de los estándares de PMR más utilizados para las radiocomunicaciones privadas, detallando algunas de las características aquí introducidas.

2 INTRODUCCIÓN TEÓRICA: TETRA Y DMR

El objeto de estudio del presente documento son los estándares TETRA y DMR pertenecientes a las comunicaciones PMR. Vamos a ver cómo funcionan cada uno de ellos, centrándonos especialmente en las características de transmisión y propagación aérea de las señales de radio.

2.1. TETRA

2.1.1 Introducción

El estándar TETRA (*TErrestrial TRunked RAdio*) fue desarrollado por el ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) en 1995. Se trata de un estándar abierto, con lo que se fomenta la oferta y competencia de los distintos fabricantes de telecomunicaciones en lo que a equipos y tecnologías relacionados con este estándar se refiere. Nació como un estándar de comunicaciones digitales con aplicaciones militares y civiles, con el que las fuerzas del orden pueden coordinarse en caso de, por ejemplo, catástrofes o atentados terroristas, al margen de la saturación de líneas de comunicaciones públicas que tienen lugar cuando se dan este tipo de circunstancias.

Las redes TETRA son más robustas (están al margen de las redes públicas, por lo que la probabilidad de interferencia o colapso de líneas se reduce) y seguras (el mantenimiento de la red está reglado por la misma compañía privada que hace uso de ella) que las redes públicas. También cuentan con la ventaja de aquellos sistemas de radio donde un usuario habla y todos los demás permanecen a la escucha, aunque la comunicación sea *half-duplex*, y la combinan con la comunicación MS a MS, asegurando la privacidad de las comunicaciones mediante encriptación y autenticación.

Además, en las redes TETRA cobra una importancia relevante la figura del despachador, con el fin de coordinar las comunicaciones. El despachador es el encargado de mandar datos por difusión a las distintas MS o bien tareas concretas para cada uno de ellos. A su vez, el despachador también recibe datos de las MS TETRA, e incluso sabe la localización geográfica de las MS en caso de que estos estén dotados de GPS (*Global Positioning System*) y permanezcan en el área de cobertura de la red.

Por último, diremos que TETRA permite la comunicación en grupos previamente definidos y la creación dinámica de nuevos grupos, muy útil a la hora de coordinar distintos grupos cerrados (por ejemplo bomberos, policía y ambulancias).

2.1.2 Esquemas de transmisión

Son dos los principales esquemas de transmisión en TETRA, según utilicen modulaciones de fase (PSK, *Phase Shift Keying*) o de amplitud en cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*). Estos esquemas se pueden observar en las figuras 2.1 y 2.2 respectivamente.

Como vemos, en ambos esquemas existen los mismos bloques aunque implementados de manera diferente. En modulación de fase tenemos un codificador convolucional y en la modulación de amplitud en cuadratura tenemos una concatenación paralela de códigos convolucionales (PCCC, *Parallel Concatenated Convolutional Codes*), y aunque la función de ambos es la de corregir errores del código, el PCCC lo hace con mayor rendimiento, al concatenar varios codificadores e intercaladores. En la transmisión por modulaciones de fase también tenemos el bloque de codificación diferencial para que la recepción sea inequívoca, pues en este tipo de modulaciones se pueden dar ambigüedades de fase y confundir un símbolo con otro distinto, dando lugar a una recepción errónea de la señal. Por otra parte, en el esquema de transmisión para amplitud en cuadratura encontramos el bloque del

mapeador bit – símbolo, transmitiendo las típicas constelaciones M-QAM (*M-Quadrature Amplitude Modulation*, con $M = 2^n$, siendo n el número de bits por símbolo).

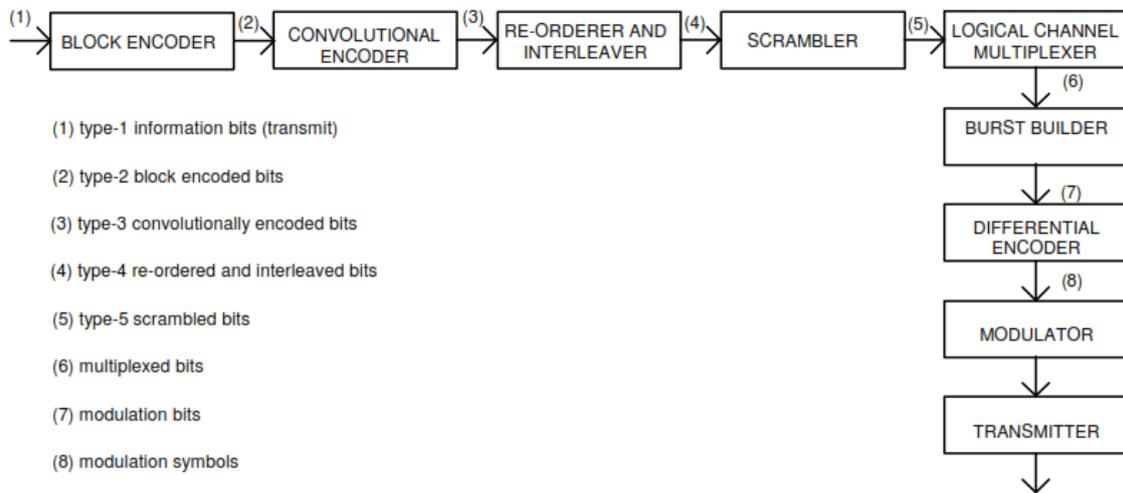


Figura 2.1. Esquema de transmisión TETRA para modulación de fase

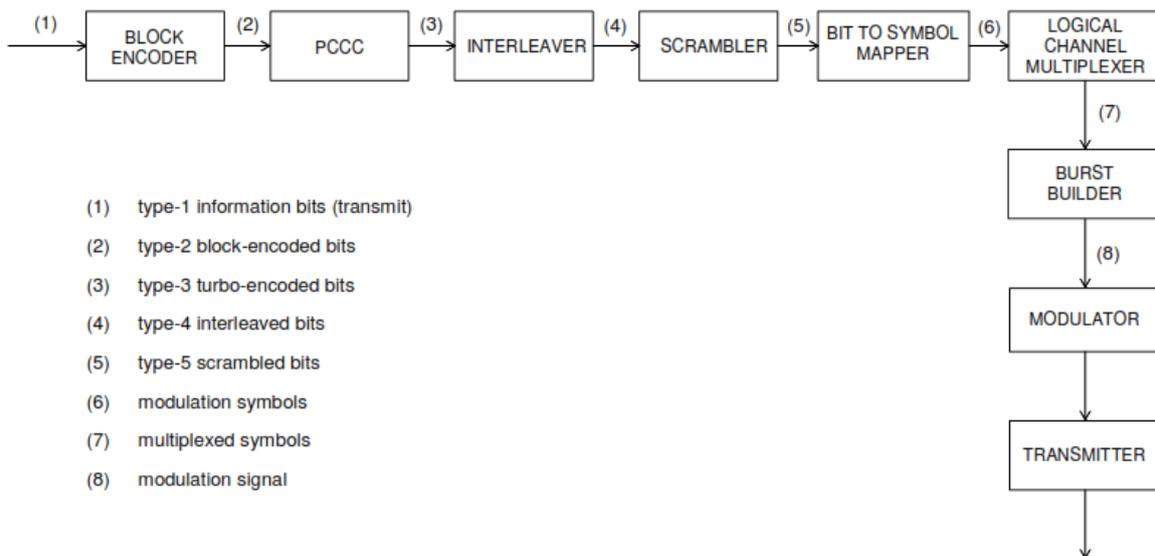


Figura 2.2. Esquema de transmisión TETRA para modulación QAM

2.1.3 Acceso al medio

El acceso al medio se hace por división de tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*), dividiendo en 4 intervalos de tiempo el ancho de banda proporcionado por cada portadora en lugar de usar una portadora para cada canal (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*), como vemos en las figuras 2.3 y 2.4. Para modulaciones de fase, este ancho de banda es de 25 kHz y para modulaciones QAM tenemos anchos de banda de 25, 50, 100 o 150 kHz, en función de la modulación QAM que escojamos y los requisitos de transmisión que queramos para los servicios que vayamos a implementar vía TETRA.

En cuanto a las bandas de frecuencias hábiles para la transmisión por comunicaciones TETRA, dichas bandas pueden encontrarse entre los 100 MHz y 1 GHz, aunque las mas usadas se pueden observar en la tabla 2.1, en la que aparecen las distintas bandas para las comunicaciones descendente (de BS a MS) y ascendente (de MS a BS). Estas bandas son de normativa europea, y dentro de cada país se aplica la normativa correspondiente. Por ejemplo, en España tendríamos que consultar el Cuadro Nacional de Asignación de Frecuencias (CNAF), reglado por la

Secretaría de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información (SETSI), para ver dónde podríamos ubicar dichos servicios TETRA, según su finalidad.

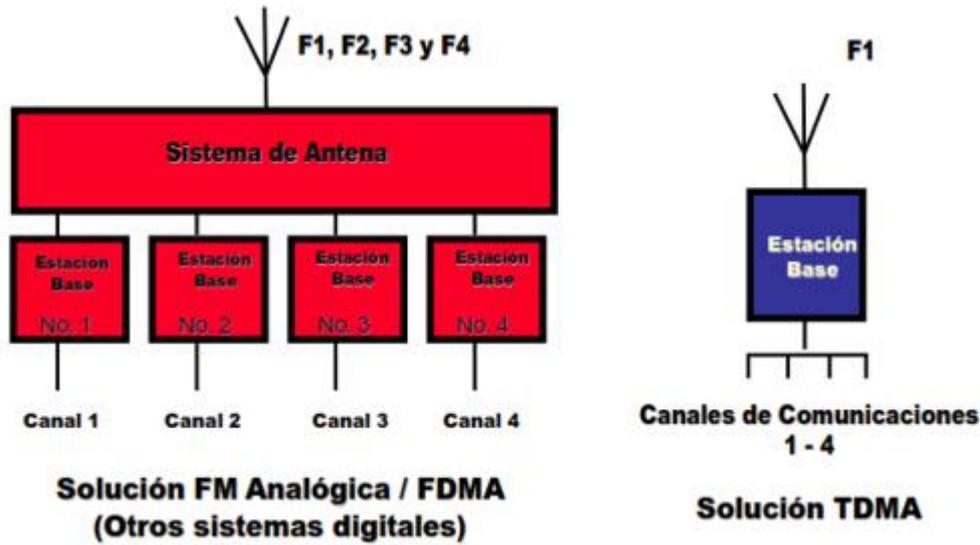


Figura 2.3. Sistemas de acceso al medio FDMA y TDMA



Figura 2.4. Radiocanales en tecnología analógica y en TETRA

	Enlace ascendente	Enlace descendente
Banda 1	870 MHz - 876 MHz	915 MHz - 921 MHz
Banda 2	380 MHz - 390 MHz	390 MHz - 400 MHz
Banda 3	410 MHz - 420 MHz	420 MHz - 430 MHz
Banda 4	450 MHz - 460 MHz	460 MHz - 470 MHz

Tabla 2.1. Bandas de frecuencia TETRA típicas (norma ETSI TS 100392-15)

Además de la multiplexión para el acceso al medio, también es importante el aprovechamiento de los canales en sí. Por ejemplo, podríamos dedicar cada time slot del TDMA a pasar datos de una sola comunicación, pero en caso de que uno de los 2 extremos dejase de transmitir en esa comunicación por un periodo de tiempo estaríamos desaprovechando ese periodo de tiempo en dicho canal. En esto se basan los sistemas de radio convencionales. Por el contrario, TETRA es un sistema troncal de radio, lo que nos ofrece la ventaja de que los usuarios comparten los recursos (slots y canales de radio, en este caso) del sistema siempre que sea posible. En la figura 2.5 encontramos un esquema del aprovechamiento de los canales en un sistema de radio convencional y en otro troncal.

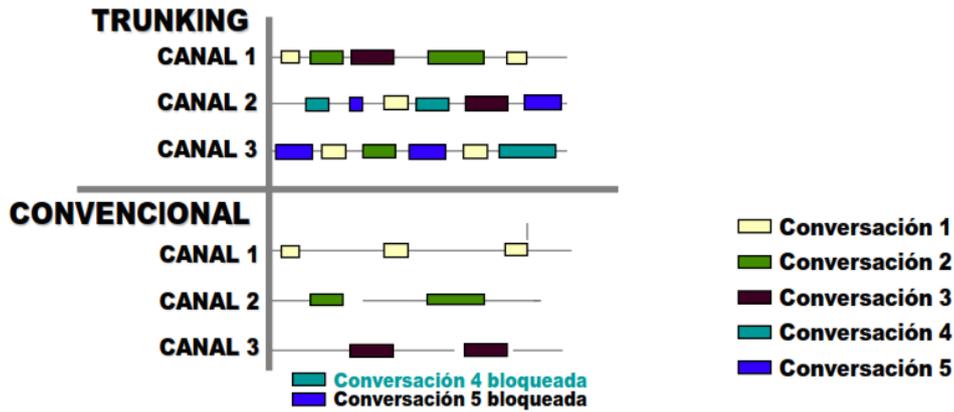


Figura 2.5. Comparación de sistema radio convencional con el sistema de radio troncal

Siguiendo con el ejemplo anterior, ese período de tiempo que la comunicación permanece en silencio podría ser aprovechada por otro usuario que quiera establecer una comunicación usando ese time slot. El sistema troncal de radio reduce el número de canales ocupados y además mejora la eficiencia de los recursos.

2.1.4 Modulación

Como explicamos en el apartado anterior, en el estándar TETRA se utilizan modulaciones de fase y modulaciones de amplitud en cuadratura.

2.1.4.1 Modulaciones de fase

En TETRA se usan dos modulaciones de fase: $\pi/4$ -DQPSK ($\pi/4$ -Differential Quadrature Phase Shift Keying) y también $\pi/8$ -D8PSK. Usan, respectivamente 2 y 3 bits para la codificación de los símbolos. Este tipo de modulación presenta la ventaja de que, si representamos la señal en el plano complejo nunca pasa por el origen, lo que reduce el rango dinámico de las fluctuaciones de la señal y además se presta a una demodulación sencilla. En la figura 2.6 podemos observar la constelación de los símbolos y las transiciones entre ellos de ambas modulaciones.

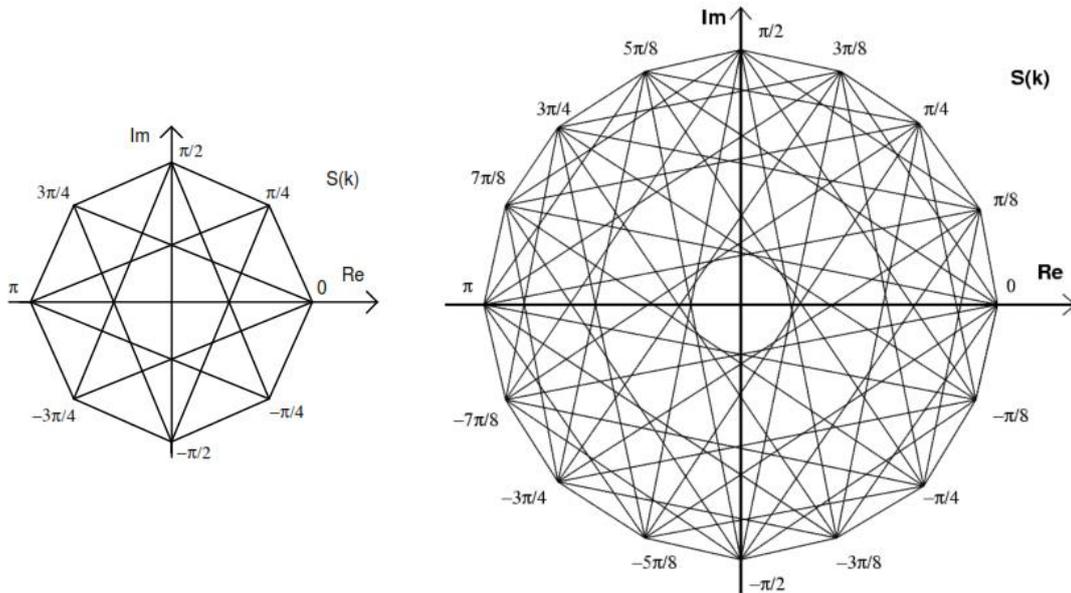


Figura 2.6. Constelación modulaciones $\pi/4$ -DQPSK y $\pi/8$ -D8PSK

2.1.4.2 Modulaciones de amplitud en cuadratura

Para QAM, el rango discreto de canalizaciones en TETRA (de 25 a 150 kHz), proporciona anchos de banda que no son suficientes para distinguir la señal transmitida de los ecos del multitrayecto. Por ello es necesario asegurar que el retraso de la transmisión por el canal sea una pequeña fracción del tiempo de símbolo, para que la interferencia intersimbólica (ISI, *Inter-Symbol Interference*) del canal sea despreciable. Por esta razón, cada portadora en QAM se divide en subportadoras multiplexadas en frecuencia. El enfoque de las subportadoras se usa porque la baja tasa de símbolo en cada subportadora le da a la modulación la resistencia necesaria contra la dispersión temporal de la señal (y por consiguiente, contra el ensanchamiento de pulsos, contra la ISI), sin necesidad de ecualizadores.

En TETRA se usan tres modulaciones QAM: 4-QAM, 16-QAM y 64-QAM. El uso de las subportadoras se aplica de manera que a cada canal de 25 kHz le corresponden 8 subportadoras. Así, para los anchos de banda de 25, 50, 100 y 150 kHz les corresponden 8, 16, 32 y 48 subportadoras, con una tasa de modulación de 2400 baudios por subportadora. De estos símbolos generados en las subportadoras, hay símbolos que transmiten la propia información y otros símbolos de “cabecera” de subportadora, dedicados a sincronización y mantenimiento de la estructura de subportadoras. Estos símbolos caen en la circunferencia unidad dentro del mapa bit-símbolo, tengan la fase que tengan, y se transmiten siempre como símbolos pertenecientes a una 4-QAM, ya se use una 4, 16 o 64-QAM. En la figura 2.7 se muestran las 3 constelaciones con el lugar sobre el que caen los símbolos de cabecera de las subportadoras.

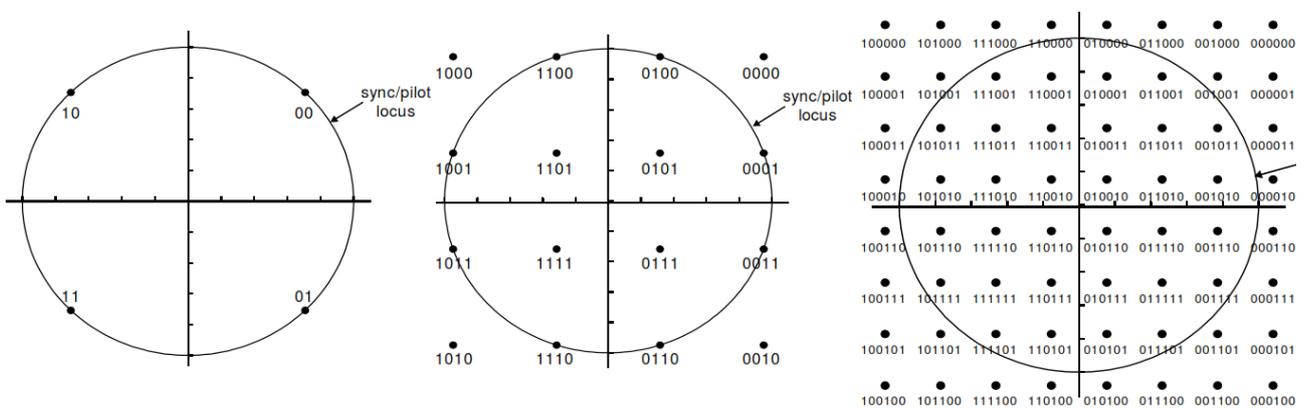


Figura 2.7. Constelaciones QAM

2.1.5 Estructura de tramas

En TETRA hay una estructura de tramas bien definida, como podemos ver en la figura 2.8. De menor a mayor, la jerarquía funciona de la siguiente manera:

- Subslot: es la mitad de un timeslot de TDMA.
- Timeslot: compuesto por 2 subslots, numerados 1 y 2 (SSN, *SubSlot Number*).
- Trama TDMA: formada por 4 timeslots, numerados del 1 a 4 (TN, *Timeslot Number*).
- Multitrama: formada por 18 tramas TDMA, numeradas de la 1 a la 18 (FN, *Frame Number*).
- Hipertrama: formada por 60 multitramas, numeradas de la 1 a la 60 (MN, *Multiframe Number*).

Para asegurar que hay tiempo entre la transmisión y la recepción dentro de una comunicación, TETRA dispone de alineamiento de tramas, que se hace de la siguiente manera: en la BS, el comienzo de una hipertrama, multitrama y trama TDMA en el enlace ascendente debe estar retrasado al menos en 2 timeslots del principio de la hipertrama, multitrama y trama TDMA correspondiente en el enlace descendente.

En la tabla 2.2 podemos ver el número de símbolos por cada timeslot y subslot en función del tipo de modulación que se use.

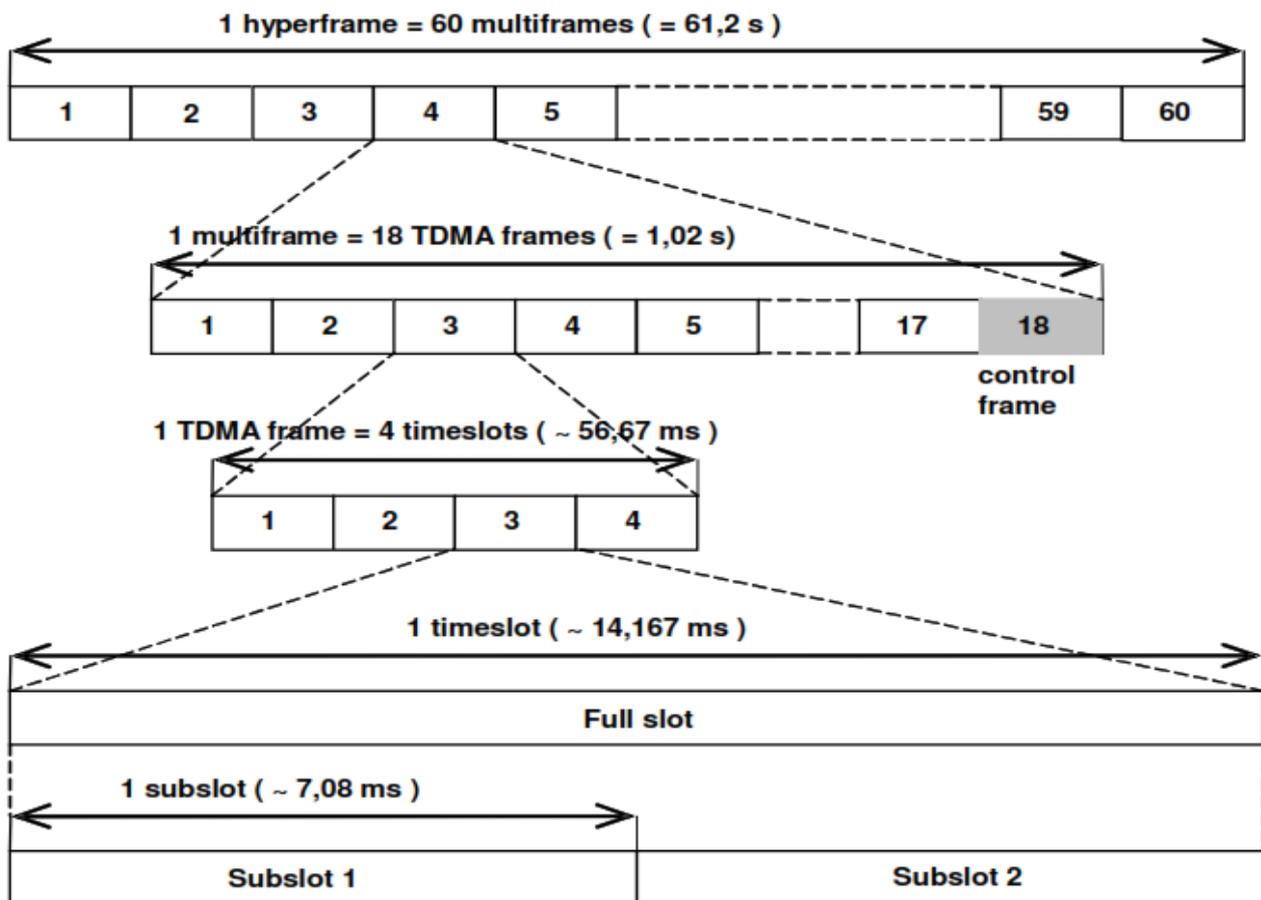


Figura 2.8. Jerarquía de tramas en TETRA

	Número de símbolos	
	Modulación de fase	QAM
Slot	255	34
Subslot	127,5	17

Tabla 2.2. Número de símbolos por cada slot y subslot TETRA

Con esto es fácil deducir las tasas binarias brutas de transmisión según la modulación usada.

Ejemplo: tasa binaria para modulación $\pi/4$ -DQPSK

$$\frac{255 \frac{\text{símbolos}}{\text{slot}} \cdot 2 \frac{\text{bits}}{\text{símbolo}}}{0.014167 \frac{\text{s}}{\text{slot}}} = 36000 \frac{\text{bits}}{\text{s}}$$

2.1.6 Tipos de canales en TETRA

Aunque algunos canales presentan ciertas diferencias según la modulación aplicada sea de fase o QAM, en este apartado se van a describir los canales usados en TETRA de manera genérica. Debemos diferenciar entre canales lógicos y canales físicos.

2.1.6.1 Canales lógicos en TETRA

Los canales lógicos se definen como los trayectos lógicos que siguen las comunicaciones entre dos o más partes, y representan la interfaz entre los protocolos y el sistema de radio.

Los canales lógicos se dividen en dos categorías a su vez: canales de tráfico (TCH, *Traffic CHannel*), que transportan voz o datos usando conmutación de circuitos; y canales de control (CCH, *Control CHannel*), que transportan mensajes de señalización y datos usando conmutación de paquetes.

2.1.6.1.1 Canales de tráfico

Transportan datos del usuario. Hay diferentes canales de tráfico según la aplicación:

- **Canal de tráfico para voz, TCH/S (*Speech Traffic CHannel*).**
- **Canales mixtos de datos y voz**, de tasas netas de 7.2 kbps (TCH/7.2), 4.8kbps (TCH/4.8) y 2.4 kbps (TCH/2.4). Se pueden conseguir tasas netas de 28.8 kbps, 19.2 kbps y 9.6 kbps si utilizamos 4 canales físicos (slots) dedicados a la misma comunicación.

2.1.6.1.2 Canales de control

Transportan información de señalización y datos del usuario usando conmutación de paquetes. Los distintos canales de control son los siguientes:

- **Canal de difusión de control, BCCH (*Broadcast Control CHannel*):** es un canal unidireccional del enlace descendente, usado para difundir información de control a todas las MS. Hay 2 tipos: **canal de difusión de la red, BNCH (*Broadcast Network CHannel*)**, encargado de difundir información de estado de la red a las MS; y **canal de difusión de sincronización, BSCH (*Broadcast Synchronization CHannel*)**, que difunde información acerca de las frecuencias, tiempos y sincronización a las MS.
- **Canal de linealización, LCH (*Linearization CHannel*),** usado por las BS y MS para linealizar sus transmisores, requisito para evitar la interferencia del canal adyacente. Hay 2 tipos: **canal de linealización común, CLCH (*Common Linearization CHannel*)**, compartido por las MS; y **canal de linealización de la BS, BLCH (*BS Linearization CHannel*)**, usado por las BS.
- **Canal de señalización, SCH (*Signalling CHannel*),** compartido por las MS y es usado para transmisión de la señalización común. La transmisión puede dirigirse a una sola MS (unicast), a un grupo de MS (multicast) o a todas las MS (broadcast). Están divididos en 3 categorías: **canal de señalización de tamaño entero, SCH/F (*Full size SCH*)** cuando los mensajes están codificados en un timeslot entero y la señalización se transporta de manera bidireccional; **canal de señalización descendente de medio tamaño, SCH/DH (*Downlink Half size SCH*)** cuando los mensajes se codifican en un subslot; y **canal de señalización ascendente de medio tamaño, SCH/UH (*Uplink Half size SCH*)**, usado para lo mismo que el anterior pero en sentido contrario de la comunicación.
- **Canal de asignación de acceso, AACH (*Access Assignment CHannel*):** deben estar presentes en todos los timeslots transmitidos en el sentido descendente de la comunicación e indica en cada canal físico la asignación de los timeslots para cada comunicación en los enlaces ascendente y descendente.
- **Canal de robo, STCH (*Stealing CHannel*):** se trata de un canal de control, exclusivo en modulación de fase, asociado a un canal de tráfico que temporalmente “roba” una parte del TCH asociado para transmitir mensajes de control. Se puede usar cuando se necesita transmitir señalización urgente, por ejemplo cuando se pretenden tomar canales para el uso de comunicaciones de emergencia que requieren de alta prioridad. En comunicaciones semiduplex, la transmisión de este canal es unidireccional, con el mismo sentido del TCH asociado.
- **Canal de información de slot, SICH-Q (*Slot Information Channel – QAM*):** se trata de un canal exclusivo en modulación QAM e indica el tipo de modulación y codificación usados dentro del slot en el que se mete este canal.

2.1.6.2 Canales físicos en TETRA

Un canal físico está definido por un par de frecuencias de radio (portadoras ascendente y descendente) y un timeslot concreto dentro de la trama TDMA. De esta manera hay 4 canales físicos por cada portadora (los 4 timeslot de la trama TDMA). Los canales lógicos se transportan mapeados en los canales físicos. Hay 3 tipos de canales físicos:

2.1.6.2.1 Canal físico de control, CP (*Control Physical channel*)

Es un canal físico que transporta exclusivamente CCH. Hay dos tipos de CP:

- Canal de control principal, MCCH (*Main Control CHannel*), que, cuando se usa, debe estar asignado al timeslot 1 de la portadora principal.
- Canal de control secundario, SCCH (*Secondary Control CHannel*), usado para extender los mensajes de señalización en caso de ser necesario, para transmitir más información de control de la que lleva el MCCH, o bien el usado por el enlace ascendente para la señalización, al habérselo indicado la BS en el enlace descendente.

2.1.6.2.2 Canal físico de tráfico, TP (*Traffic Physical channel*)

Canal físico que transporta exclusivamente TCH.

2.1.6.2.3 Canal físico no asignado, UP (*Unallocated Physical channel*)

Canal físico que no está asignado a ninguna MS.

2.1.6.3 Ráfagas de datos

Una ráfaga no es más que un timeslot de la portadora de radiofrecuencia modulada por un flujo de datos. Por lo tanto, las ráfagas describen el comportamiento interno de los canales físicos, analizando a qué tareas se dedican los símbolos y bits dentro de un canal físico, ya sea alineamiento de trama, sincronización, datos del usuario, etc. Según la configuración de los símbolos y bits dentro de la ráfaga podemos encontrar ráfagas dedicadas al control del enlace ascendente y/o descendente. No se van a describir, puesto que es una tediosa tarea que se escapa al alcance del actual documento. Como ejemplo, vemos las ráfagas normales de los enlaces ascendente y descendente, así como la ráfaga de sincronización vía enlace descendente en la figura 2.9.

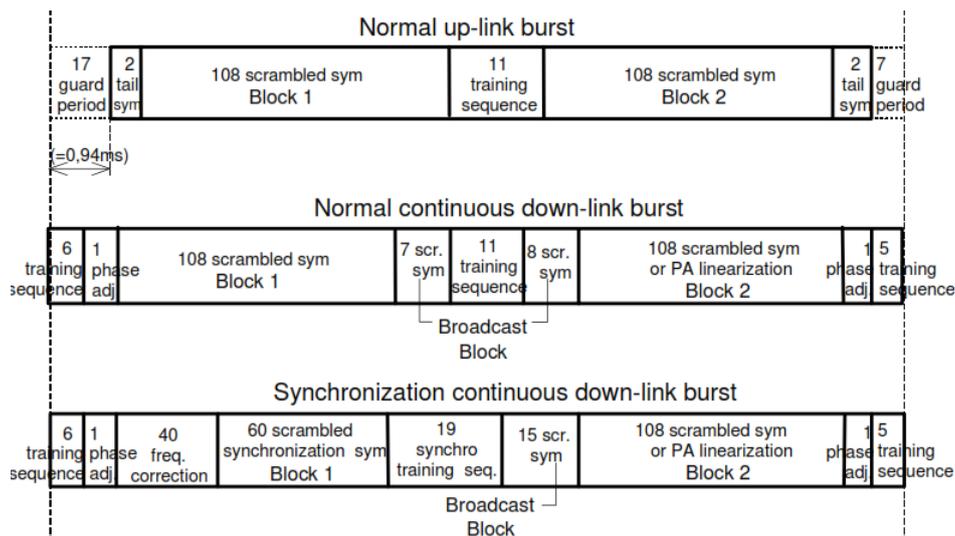


Figura 2.9. Ejemplo de estructura de ráfagas.

2.1.7 Características en transmisión y recepción

2.1.7.1 Sintonización de transmisor con receptor

Las MS en TETRA deben transmitir en la banda reservada para enlace ascendente, mientras que las BS deben transmitir en la banda reservada para el enlace descendente. De esta manera, si denotamos F_{up} a la frecuencia del canal ascendente y F_{down} a la frecuencia del canal descendente, la sintonización debe ser la siguiente:

- De $F_{up,min}$ a $F_{up,max}$ (MHz): transmisión en las MS y recepción en la BS.
- De $F_{down,max}$ a $F_{down,min}$ (MHz): transmisión en la BS y recepción en las MS.

2.1.7.2 Potencia de transmisión

En la tabla 2.3 tenemos los valores nominales de potencia en transmisión tanto de las BS como de las MS, así como los valores para el control adaptativo de potencia por parte de las MS. El control adaptativo de potencia en las MS tiene dos ventajas principales, y es que, minimizando la potencia con la que se comienza a transmitir, ahorramos batería en el terminal y además evitamos posibles interferencias cocanal y de canal adyacente con otros usuarios. Funciona adaptando progresivamente la potencia desde el nivel 7 a los niveles superiores, hasta alcanzar su potencia nominal.

La potencia de transmisión se mide en el conector de la antena transmisora.

Clase (potencia) (BS)	Potencia nominal por portadora (BS)	Clase (potencia) (MS)	Potencia nominal (MS)	Nivel de adaptación (MS)	Potencia del nivel de adaptación (MS)
1 (40W)	46 dBm	1 (30W)	45 dBm	1	45 dBm
2 (25W)	44 dBm	1L (17,5W)	42,5 dBm	2	40 dBm
3 (15W)	42 dBm	2 (10W)	40 dBm	3	35 dBm
4 (10W)	40 dBm	2L (5,6W)	37,5 dBm	4	30 dBm
5 (6,3W)	38 dBm	3 (3W)	35 dBm	5	25 dBm
6 (4W)	36 dBm	3L (1,8W)	32,5 dBm	6	20 dBm
7 (2,5W)	34 dBm	4 (1W)	30 dBm	7	15 dBm
8 (1,6W)	32 dBm	4L (0,56W)	27,5 dBm		
9 (1 W)	30 dBm	5 (0,32W) (solo QAM)	25 dBm		
10 (0,6 W)	28 dBm	5L (0,18W) (solo QAM)	22,5 dBm		

Tabla 2.3. Potencias de transmisión en TETRA

2.1.7.3 Emisiones indeseadas

También existen unas tablas con valores umbrales que las emisiones no deseadas, tanto cercanas como lejanas a la banda de transmisión, no deben sobrepasar. Estos niveles se miden en dBc, que son potencias relativas a la portadora principal (la 'c' corresponde a *carrier*). Estas tablas existen para distintas partes de la ráfaga (parte útil y transitorios

de la ráfaga) así como para canales lógicos específicos, para unas frecuencias (por encima o por debajo de los 700 MHz, por ejemplo) y modulación determinadas. En la tabla 2.4 vemos un ejemplo de este tipo de tablas.

Desplazamiento de frec. (respecto a la portadora)	Máx. Nivel para las clases de potencia 4 y 4L de las MS	Máx. Nivel para otras clases
25 kHz	-55 dBc	-60 dBc
50 kHz	-70 dBc	-70 dBc
75 kHz	-70 dBc	-70 dBc

Tabla 2.4. Ejemplo umbrales de emisiones indeseadas en TETRA (parte útil de la ráfaga, <700MHz, modulación de fase)

2.1.7.4 Requisitos de intermodulación

- En la BS: la señal de intermodulación debe ser atenuada en 70 dB en un ancho de banda de 30kHz. Además, para una señal interferente no modulada con una separación de al menos 500 kHz, la potencia de esta señal debe ser inferior a 30 dB de la potencia de la señal modulada de salida. En cualquier caso, la potencia de las componentes de intermodulación no debe ser mayor de -36dBm.
- En las MS: la intermodulación en este caso puede ser causada por transmisiones vecinas de otras MS. Para una MS operando en su potencia nominal, definida por su clase, debe haber una atenuación de la intermodulación de al menos 60 dB en un ancho de banda de 30kHz. Para la misma señal interferente del caso anterior, la potencia de esta señal debe estar 50 dB por debajo de la potencia de la señal modulada de salida.
- Intermodulación intra-BS: se da cuando hay varios transmisores para una sola antena. En este caso, en un ancho de banda de 30 kHz, las señales de intermodulación no pueden ser superiores a un nivel de -60 dBc en la banda del enlace descendente y en ningún caso deben exceder el valor de -36dBm.

2.1.7.5 Características en recepción

Vamos a ver las más importantes, que son:

- Características de bloqueo: se denomina bloqueo a la capacidad del receptor de recibir la señal modulada deseada en presencia de señales indeseadas de entrada en otras frecuencias distintas a las espúreas o canales adyacentes sin que causen degradación de la señal deseada dentro de un límite específico. Por ejemplo, para la modulación de fase tenemos las siguientes medidas en la tabla 2.5.
- Sensibilidades dinámica y estática de referencia: por ejemplo, para $\pi/4$ -DQPSK, se dan los niveles de sensibilidad (medidos en el conector de la antena supuesta una antena de 50 Ω) que se ven en la tabla 2.6. Es el nivel mínimo de señal que puede ser recibido por el sistema radio receptor, ya sean señales deseadas, señales interferentes o ruido.
- Niveles de relación portadora/interferencia: por ejemplo, para $\pi/4$ -DQPSK, se dan los siguientes niveles de relación portadora/interferencia, vistos en la tabla 2.7.

Desplazamiento de la frec. Nominal del receptor	Nivel de señal interferente
50 kHz – 100 kHz	-40 dBm
100 kHz – 200 kHz	-35 dBm
200 kHz – 500 kHz	-30 dBm
> 500 kHz	-25 dBm

Tabla 2.5. Característica de bloqueo en TETRA (modulación de fase)

	BS	MS
Sens. Dinámica	-106 dBm	-103 dBm
Sens. Estática	-115 dBm	-112 dBm

Tabla 2.6. Sensibilidad del receptor en TETRA (modulación $\pi/4$ -DQPSK)

Interferencia cocanal	$C/I_c = 19$ dB para MS y BS
Interferencia canal adyacente (<700MHz)	$C/I_a = -40$ dB para MS y $C/I_a = -45$ dB para BS
Interferencia canal adyacente (>700MHz)	$C/I_a = -40$ dB para MS y BS

Tabla 2.7. Relación portadora/interferencia en TETRA (modulación $\pi/4$ -DQPSK)

2.2 DMR

2.2.1 Introducción

El estándar DMR (*Digital Mobile Radio*) es un estándar desarrollado por el ETSI en el año 2005 y que se engloba dentro de las PMR. DMR es un estándar abierto que ofrece servicios de voz y datos, así como otros servicios complementarios, que fue concebido y desarrollado como protocolo de radio digital de banda estrecha con el fin de conseguir una mejora en cuanto a eficiencia espectral se refiere con respecto a la radio analógica PMR.

DMR tiene tres modos de funcionamiento básicos:

- Modo 1: funcionamiento sin licencia. En este modo la comunicación se produce entre dos MS sin necesidad de que la comunicación pase por una BS u otra infraestructura de red.
- Modo 2: funcionamiento convencional con licencia. En este modo los usuarios tienen licencias individuales y la comunicación puede ser MS a MS o se puede apoyar en una BS para llevar a cabo la comunicación.
- Modo 3: funcionamiento no convencional con licencia. Se usa un sistema de radio troncal mediante el cual se regulan las comunicaciones. Al igual que en TETRA, este será el modo de funcionamiento que analizaremos, pues es el que usa el sistema de radio troncal y es el que se usa para la solución no comercial, pues aunque DMR tiene su versión para PAMR (*Public Access Mobile Radio*) estamos hablando de PMR en todo momento.

DMR comparte con TETRA las características de robustez y seguridad de las comunicaciones, y por lo general tiene exactamente los mismos usos que TETRA, aunque DMR es un sistema más simple que TETRA como veremos más adelante. Además, DMR se suele emplear en la banda de VHF, lo que hace que si transmitimos en bandas bajas de frecuencia podamos alcanzar mayor área de cobertura con DMR que con TETRA.

Los modos de conversación que hay en DMR son igual que los de TETRA también: se puede hacer una conversación punto a punto entre dos usuarios (unicast), conversaciones en grupo punto a multipunto (multicast) o difusión a todos los terminales dentro de una misma red (broadcast).

2.2.2 Esquema de transmisión

En cuanto a los esquemas de transmisión para DMR comentaremos que es muy similar al de la figura 2.1, quitando el bloque del codificador diferencial y adecuando el modulador a FSK (*Frequency Shift Keying*), debido a que usamos la modulación 4-FSK, y al hecho de que hay 2 canales TDMA en vez de 4 en el multiplexor de canales lógicos.

2.2.3 Acceso al medio

El acceso al medio en DMR se realiza también mediante TDMA, al igual que en TETRA, sólo que en este caso el ancho de banda del canal es de 12.5 kHz por cada portadora, en el que hay diferenciados 2 timeslots para llevar a cabo las distintas comunicaciones. El esquema de este acceso se puede ver enfrentado al analógico correspondiente en la figura 2.9, donde se puede ver la división de los 2 timeslots en el caso de DMR.

Las bandas de frecuencia utilizables para DMR son **aquellas bandas comprendidas entre 30 MHz y 1 GHz dedicadas a las comunicaciones PMR de banda estrecha**, regladas por la correspondiente legislatura de cada país. Por poner un ejemplo, en las notas de utilización nacional del CNAF encontramos la UN-76, referente al uso de canales en la banda 167 – 172 MHz por las empresas nacionales de transporte de gas:

Los canales cuyas frecuencias se indican a continuación se destinan exclusivamente para uso de empresas explotadoras de la red básica nacional de transporte de gas [...] La anchura de banda de emisión será la correspondiente a una canalización máxima de 12,5 kHz.

(Secretaría de Estado de las Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información, 2013)

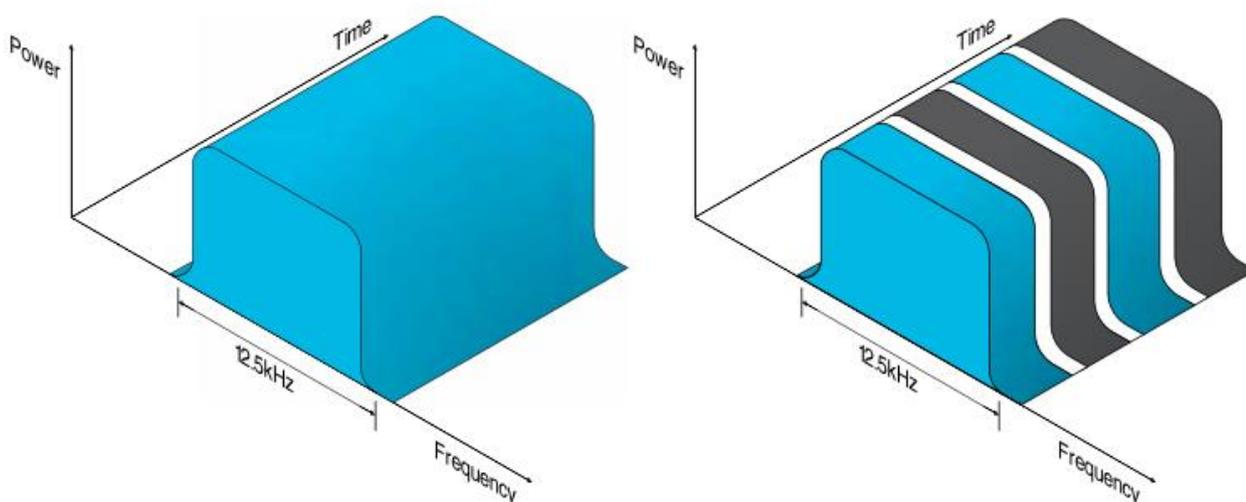


Figura 2.10. Radiocanales en tecnología analógica y en DMR

2.2.4 Modulación

DMR utiliza una modulación 4-FSK, por lo que emplea 2 bits por cada símbolo transmitido. Esta modulación se caracteriza por variar la frecuencia de la señal portadora para transmitir la información de la señal moduladora.

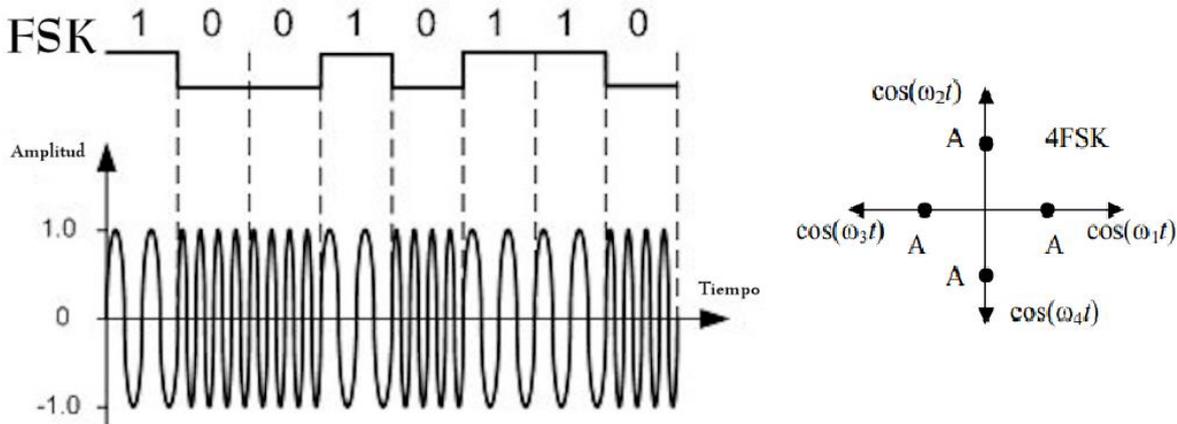


Figura 2.11. Ejemplo de señal modulada BFSK y constelación 4FSK

El hecho de que se trate de una modulación de amplitud constante siempre será bueno para nuestra señal modulada, ya que va a presentar bastante inmunidad frente al ruido, pues lo que importa en la recepción no es la amplitud, sino el número de cruces por cero de la señal. Sólo un ruido tan fuerte capaz de provocar pasos por cero dará lugar a errores en la señal, aunque sí es más sensible a las variaciones de frecuencia. En la figura 2.10 podemos ver cómo la señal moduladora modula a la portadora (vemos una BFSK). Cada combinación posible de los 2 bits que forman esta modulación nos dará un desplazamiento en frecuencia con respecto a la frecuencia de la señal portadora, dando lugar a la modulación 4-FSK. En este caso, en lugar de tener una señal binaria moduladora, tendremos una señal multinivel, en concreto con 4 niveles. Los valores de desplazamiento de frecuencia de la señal portadora para la modulación 4-FSK vienen dados en la siguiente tabla:

Bits de información		Símbolo	Desviación de frecuencia
0	1	+3	+1.944 kHz
0	0	+1	+0.648 kHz
1	0	-1	-0.648 kHz
1	1	-3	-1.944 kHz

Tabla 2.8. Desviación de frecuencia para modulación 4-FSK en DMR

2.2.5 Estructura de tramas

La estructura de tramas en DMR está montada tal que así, de unidades más pequeñas a mayores:

- Ráfaga TDMA: formada por un sólo timeslot, tiene una duración de 30 ms.
- Trama TDMA: formada por dos timeslots (timeslots 1 y 2 de un mismo sentido de la comunicación). Tiene una duración de 60 ms.
- Supertrama: formada por 6 ráfagas o timeslots numerados de la 'A' a la 'F', ubicados los 6 en el mismo timeslot, ya sea el timeslot 1 o 2. Tiene una duración de 360 ms. Esta estructura solamente se usa en las transmisiones de voz.

Hay diferencias entre las tramas transmitidas en el enlace descendente (de BS a MS) y en el enlace ascendente (de

MS a BS), como podemos observar en la figura 2.11. Mientras la BS está continuamente transmitiendo, el enlace descendente está transmitiendo también continuamente, incluso si no hay información para transmitir. Sin embargo, el enlace ascendente deja de estar activo en el momento que la MS no tiene información para transmitir.

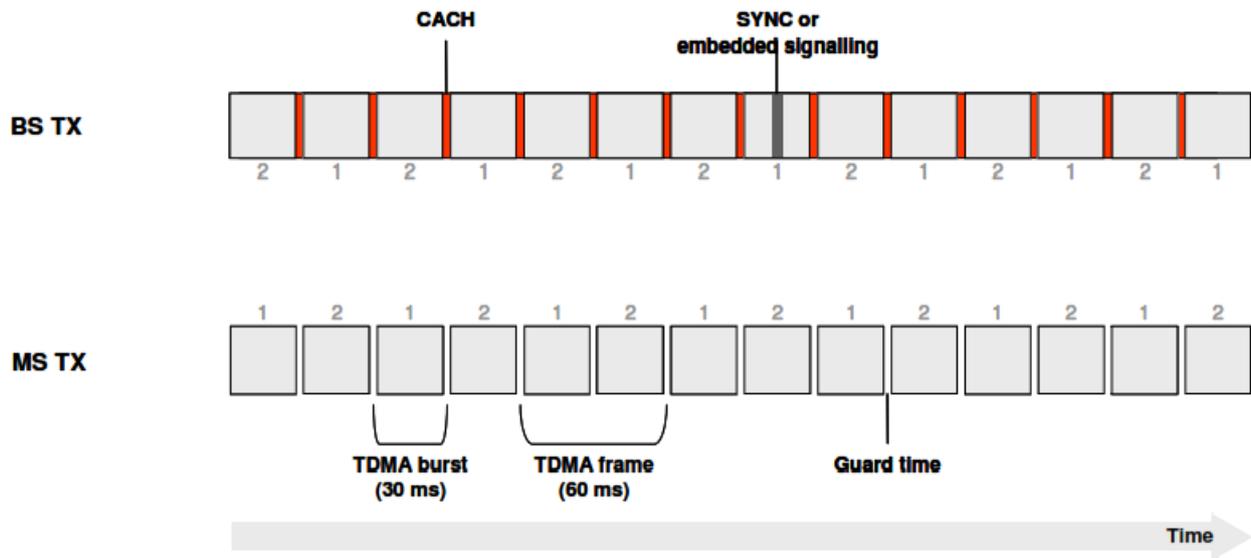


Figura 2.12. Estructura de trama en enlaces ascendente y descendente DMR

Además, como se puede observar, en el enlace ascendente se usa un tiempo de guarda entre ráfagas o timeslots para permitir el efecto del aumento gradual de potencia del amplificador de potencia y los efectos del retraso de propagación de la señal.

La estructura genérica de una ráfaga o timeslot es la siguiente, en la que se puede apreciar la cantidad de bits por timeslot y la duración del mismo:

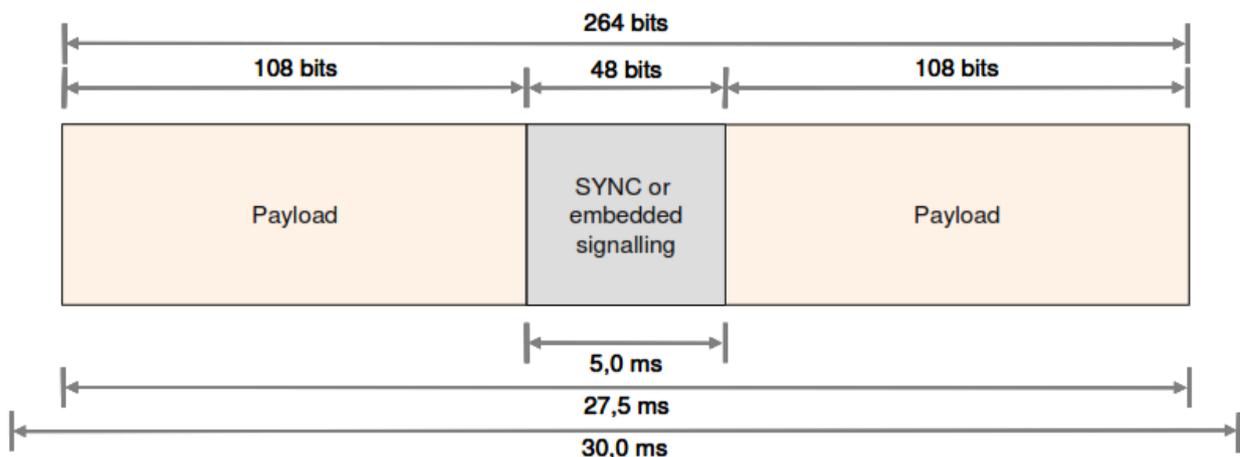


Figura 2.13. Estructura de timeslot en DMR

Como se observa en la figura 2.12, los bits tardan 27.5 ms en transmitirse, pero el tiempo de la transmisión del timeslot es de 30 ms. La diferencia de esos 2.5 ms se debe al empleo de los tiempos de guarda del timeslot (un tiempo de guarda ocupa 1.25 ms), aunque en el canal descendente no vemos esos tiempos de guarda, ya que ese tiempo se aprovecha en transmitir información de señalización mediante el canal de anunciación común, CACH (*Common Announcement CHannel*), formado por 24 bits.

A partir de aquí es sencillo calcular el régimen binario y la tasa de símbolo para los canales ascendente y descendente. Para el canal descendente tenemos que el régimen binario es:

$$R_b = \frac{264 \text{ bits} + 24 \text{ bits (CACH)}}{0.03 \text{ s}} = \frac{9600 \text{ bits}}{\text{s}}$$

Y, al tener 2 bits por símbolo (modulación 4-FSK), tenemos una tasa de símbolo $R_s = 4800$ baudios. En cuanto al canal ascendente, tenemos:

$$R_b = \frac{264 \text{ bits}}{0.03 \text{ s}} = \frac{8800 \text{ bits}}{\text{s}}$$

Lo que se traduce en una tasa de símbolo de $R_s = 4400$ baudios.

2.2.6 Canales y señalización en DMR

Al igual que en el caso de TETRA, diferenciamos entre canales lógicos y físicos, y los primeros se mapean en los segundos para su transmisión. En el caso de canales lógicos distinguimos entre:

- Canales de tráfico, que transportan información en forma de voz o datos.
- Canales de control, que transportan señalización.

Los canales físicos no son más que los timeslots en sí donde se ubica la información. Por cada portadora, por tanto, existen dos canales físicos, ya transporten datos, señalización o una combinación de ambos. Normalmente se dedica el timeslot 1 a transmitir la señalización de control y el timeslot 2 a la transferencia de datos.

La manera que tenemos de transmitir señalización en DMR es mediante 3 campos de señalización, ya mostrados anteriormente en la figura 2.11:

- **Canal de anunciación común, CACH:** está definido entre las ráfagas del enlace descendente, y sirve para la gestión de canales (entramado y acceso) así como para la transmisión de señalización de baja velocidad.

Uno de los propósitos del CACH es indicar el uso del timeslot correspondiente a cada comunicación en el enlace ascendente. Como una BS de dos frecuencias transmite en full-duplex, transmite a la vez que recibe, y debe enviar información de estado a todas las MS que están a la escucha sobre el estado del correspondiente timeslot del enlace ascendente (vacío u ocupado). Cuando una MS quiere transmitir, debe esperar hasta que el correspondiente timeslot ascendente tenga la bandera *Channel State Idle* (estado del canal vacío, CS_Idle) antes de transmitir. De esta manera se reducen las colisiones en la contienda de las MS por transmitir en el timeslot. Vemos este hecho en la figura 2.13, donde se indica mediante el CACH el estado en que se encuentra el timeslot correspondiente en el enlace ascendente, que está retrasado el tiempo de un timeslot (30 ms) con el fin de que haya tiempo de interpretar la información del CACH y decidir qué acción realizar a continuación.

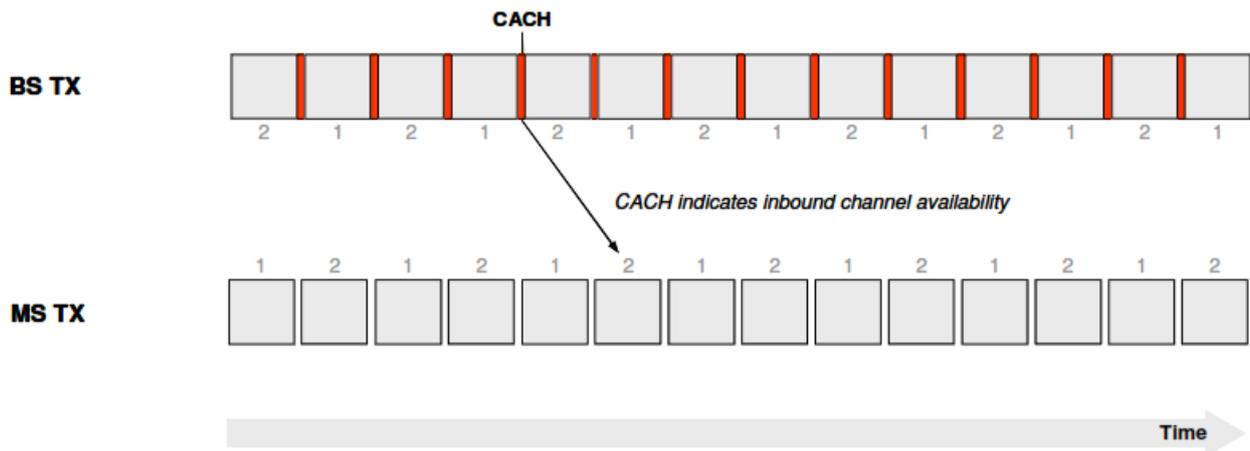


Figura 2.14. Indicación de estado en canal ascendente DMR

Un segundo propósito del CACH es el de indicar los timeslots correspondientes en el enlace descendente y ascendente en una misma comunicación, es decir, se encarga de conservar la estructura de tramas en ambos enlaces, tal y como podemos apreciar en la figura 2.14.

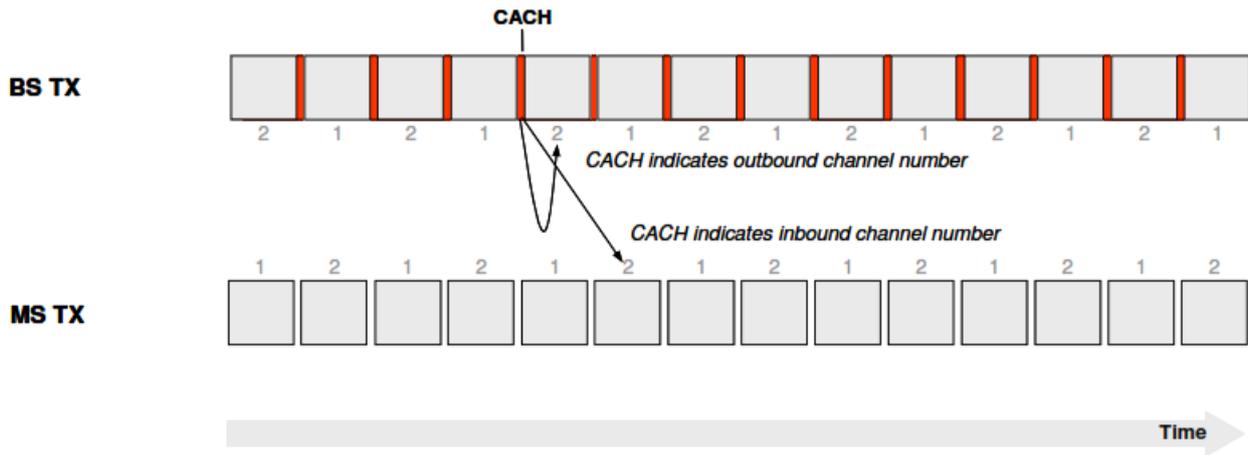


Figura 2.15. Indicación de timeslots en canales ascendente y descendente DMR

Un tercer propósito del CACH es transportar señalización mediante mensajes cortos de control de enlaces. Por ejemplo, en el modo de funcionamiento 3 de DMR, se puede transportar información relativa al uso de códigos de identidad de las MS para quedar registradas en el sistema y que se puedan efectuar las comunicaciones con ellas sin problema alguno.

- **Bits de sincronización, SYNC (SYNChronization):** este campo marca siempre la localización del centro de una ráfaga o timeslot. Una vez que se ha alcanzado una sincronización inicial mediante distintos mecanismos, el receptor usa un patrón de coincidencia para detectar el campo SYNC dentro de la ráfaga para comprobar que el canal aún sigue vivo (a modo de *keepalive*) y determina el tipo de sincronismo para identificar el contenido de la ráfaga. Así se pueden diferenciar ráfagas dedicadas a voz, ráfagas dedicadas a transmisión de datos o señalización de control, diferenciar canal ascendente del descendente, etc.

El timeslot 1 debe contener un campo SYNC en el centro de la trama forzosamente (pues también podría ir señalización empotrada, como vimos en la figura 2.11) para que el receptor detecte la presencia de señal, alcance la sincronización de bits y determine el centro de la ráfaga. El timeslot 2 puede contener el campo SYNC o señalización empotrada, según el tipo de ráfaga y el contexto. La repetición de los mensajes de sincronización depende de si la ráfaga se está usando para transmitir voz o datos, así como si se transmite en el canal ascendente o descendente. Esto lo vemos en la figura 2.16.

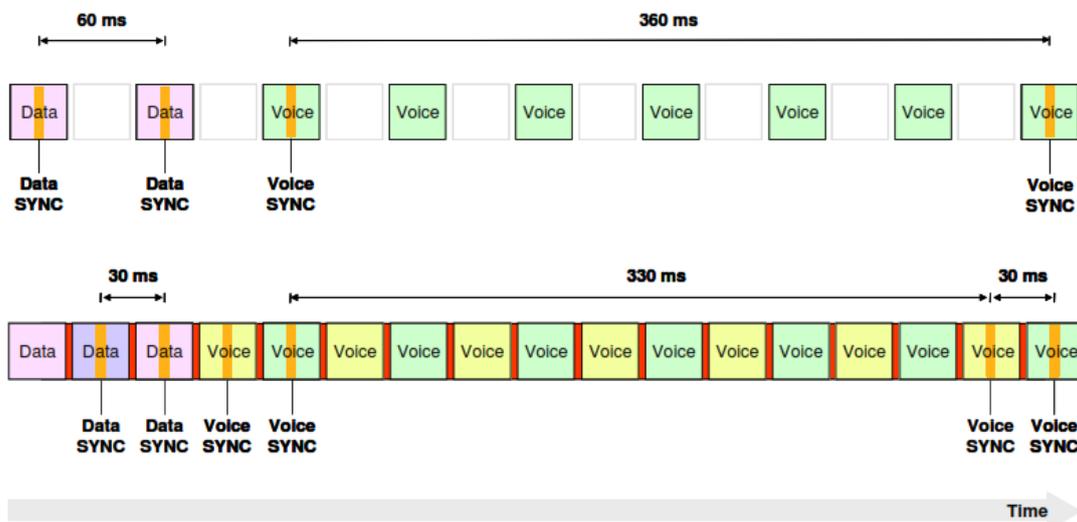


Figura 2.16. Sincronismo en canal ascendente (arriba) y descendente (abajo)

Como se observa, en el canal ascendente, los mensajes de sincronización tienen lugar cada 60 ms para datos y control, y cada 360 ms para voz. Sin embargo, en el canal descendente, al estar la BS continuamente transmitiendo, la sincronización tiene lugar cada 30 ms para datos y control, y cada 330 ms para voz.

- **Señalización empotrada (*embedded signalling*):** Es utilizado principalmente para transmitir el canal del reverso, RC (*Reverse Channel*). El RC transmite información relativa al otro punto de la comunicación, es decir, transmite información relativa al destino de la comunicación, pues los extremos de la comunicación deben tener información de lo que está pasando en el otro extremo de la misma.

Cabe destacar que dentro de la señalización empotrada encontramos el código de color, CC (*Colour Code*), cuya función es proporcionar una manera de distinguir otras comunicaciones superpuestas para detectar interferencia cocanal.

2.2.7 Características en transmisión y recepción

2.2.7.1 Sintonización de transmisor con receptor

Se hace exactamente igual que en TETRA la correspondencia de frecuencias en transmisor y receptor, tal y como vimos en el apartado 2.1.7.1, sólo que adecuando el ancho de banda al DMR y a las frecuencias centrales que corresponda.

2.2.7.2 Potencia de transmisión

En cuanto a la potencia de transmisión en DMR no hay unas clases de potencia tan bien definidas como en el caso de TETRA y tenemos que recurrir a la normativa nacional de cada país. En concreto, en España, para comunicaciones de PMR de canalización de 12.5 kHz nos dan una serie de potencias típicas de transmisión para estos equipos. Estas potencias pueden verse en la tabla 2.9 y, según la normativa publicada en el BOE (BOE-A-2009-5742) son las mismas para todas las bandas de frecuencia que se exponen en dicho documento (bandas 146-174 MHz, 406,1 – 430 MHz y 440 – 470 MHz).

Estaciones fijas (BS)	25 W (44 dBm)
Terminales móviles	10 W (40 dBm)
Terminales portátiles	5 W (37 dBm)

Tabla 2.9. Potencias de transmisión típicas en DMR

2.2.7.3 Emisiones indeseadas

Para la banda de frecuencias entre los 30 MHz y 1 GHz, las emisiones espúreas no deben sobrepasar los -36 dBm mientras que se está transmitiendo, y no deben sobrepasar los -57 dBm mientras el transmisor está en standby.

2.2.7.4 Requisitos de intermodulación

En este caso tenemos dos límites distintos, de los cuales los equipos usados para la transmisión deben ceñirse a uno de ellos:

- En general, para cualquier componente de intermodulación, la atenuación de los mismos debe ser al menos de 40 dB.
- Igual que en el caso de TETRA, para BS situadas en estaciones con varios transmisores o por regulación de las autoridades pertinentes, la atenuación de las componentes de intermodulación debe ser de al menos 70 dB.

2.2.7.5 Características en recepción

Por seguir con la comparación entre ambos sistemas, veremos las mismas características en recepción que en TETRA:

- Característica de bloqueo: el nivel de bloqueo no debe sobrepasar los -23 dBm, es decir, las señales indeseadas en recepción no pueden llegar al receptor con un nivel mayor a los -23 dBm.
- Sensibilidad: para canalización de 12.5 kHz y tasas de transmisión de hasta 9.6 kbps (como es nuestro caso) la sensibilidad en el receptor se fija en -110 dBm.
- Niveles de relación portadora/interferencia: para DMR, los valores C/I vienen dados en la tabla 2.10, donde vemos los niveles con respecto a la interferencia cocanal y a la interferencia de canal adyacente.

Interferencia cocanal	Interferencia canal adyacente
$C/I_c = 12 \text{ dB}$	$C/I_a = -50 \text{ dB}$

Tabla 2.10. Relación portadora/interferencia para DMR

3 METODOLOGÍA EMPLEADA: ICS TELECOM

Siguiendo el desarrollo del presente documento, una vez introducidas las características de los estándares de comunicaciones que vamos a emplear se va a describir la herramienta con la que se trabajará para las simulaciones de las transmisiones por radio mediante TETRA y DMR. Esta herramienta es el software ICS Telecom, desarrollado por la empresa ATDI, empresa dedicada a crear soluciones software para las radiocomunicaciones. Pasamos a dar una descripción resumida de dicha herramienta.

3.1 Introducción

Se denomina **proyecto** al espacio de trabajo de ICS Telecom. El proyecto contiene los enlaces a los archivos que se utilizan para ejecutar el análisis en ICS Telecom.

También es importante definir el concepto de **capa** para nuestro software. Las capas son archivos que dan información diversa en cada punto necesaria para realizar los cálculos: capas cartográficas de información altimétrica, ubicaciones de los emplazamientos (*sites*), información de altura de los edificios, información del tipo de terreno (*clutter*), capa de objetos, localización y parámetros de los elementos de la red, capa de resultados de la simulación y capa de vectores.



Figura 3.1. Organización por capas de ICS Telecom

La información cartográfica es esencial, y se organiza en varias capas diferentes:

- La capa **Digital Elevation Model** (DEM) (*.geo) contiene un valor de **altimetría** para cada punto (*pixel*) del archivo. La información altimétrica puede contener información de tipo edificio (*building*). La información altimétrica es **imprescindible** para que ICS telecom pueda realizar el cálculo de la propagación. La información de la altura de los edificios proporciona aún más potencial al programa al permitir a ICS Telecom calcular la propagación en las ciudades. El archivo *.geo es de tipo Raster de 16 bit codificado en 2 bytes.
- La capa de interiores (*indoor layer*) (*.idr) permite que el sistema calcule la propagación dentro de un edificio. Puede reemplazar el DEM, y contiene por cada punto un código para cada material (es decir, ladrillo, hormigón, madera...). El archivo es de tipo Raster de 16 bit codificado en 2 bytes.
- La capa de mapa (*.img) contiene una imagen resultado de la digitalización de mapas en papel, vía satélite o imágenes aéreas. Por cada punto, el archivo contiene información gráfica geocodificada. Se asocia con un archivo de paleta (*.pal). El archivo de imagen es un Raster de 8 bits codificado en 1 byte.
- La capa *Clutter* (*.sol) contiene información adicional sobre el tipo de terreno y su uso, para tenerlo en cuenta en el cálculo de las atenuaciones, tráfico, etc. El archivo contiene códigos específicos para cada tipo de terreno que haya (urbano, rural, arbolado, etc.). Los códigos pueden seguir las regulaciones CCIR (Comité Consultivo Internacional de Radio) o UER (Unión Europea de

Radiodifusión), o un código definido por el usuario. El archivo *.sol corresponde perfectamente con el archivo DEM. Es un Raster de 8 bits codificados en 1 byte.

- La capa de edificios (*.blg) contiene las alturas de los edificios sobre el nivel del suelo en cada punto. El archivo *.blg corresponde perfectamente con el archivo DEM (rejilla y el paso del archivo idénticos). Es un Raster de 8 bits codificados en 1 byte.

Al iniciar el programa nos encontramos con el *project manager*:

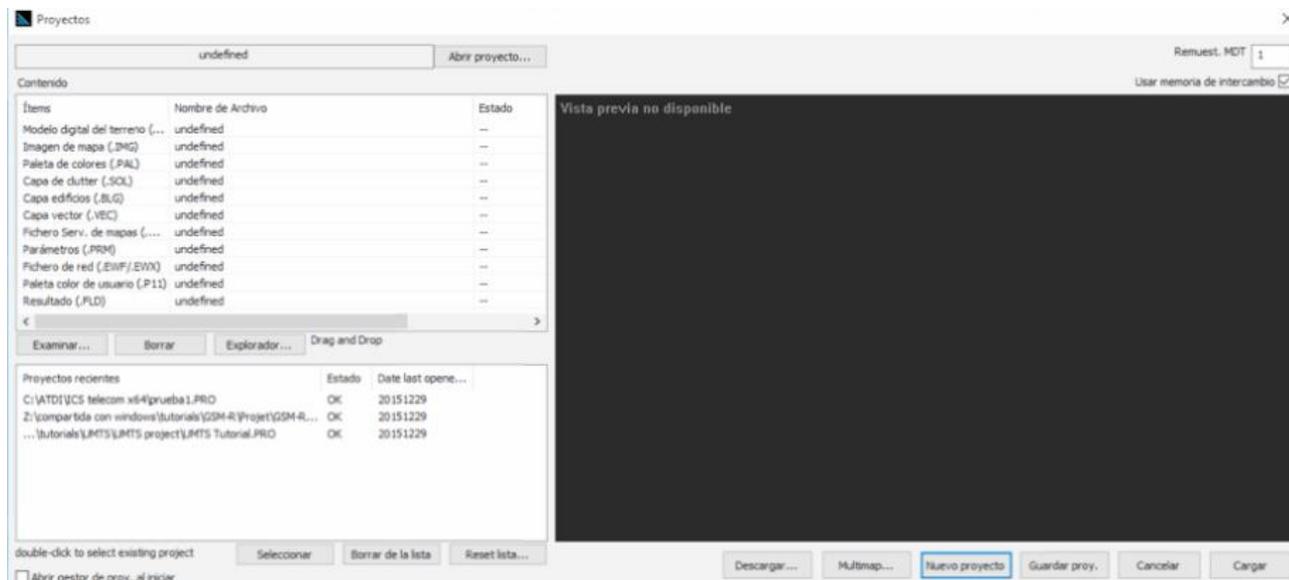


Figura 3.2. Project Manager de ICS Telecom

En esta vista podemos cargar las diferentes capas de un mapa (en la parte izquierda superior de la figura 3.2), cargar proyectos ya guardados (parte izquierda inferior) y ver una vista previa del proyecto (parte derecha de la figura). Las capas y proyectos también se pueden cargar arrastrando directamente los ficheros correspondientes hasta la ventana del *Project Manager*. Cabe decir que para generar un proyecto solamente la capa .geo es obligatoria, sólo con cargar esta capa podremos comenzar a trabajar en ICS Telecom, pero no es lo recomendable, pues cuanto más detalle demos al programa sobre el terreno en el que desplegamos nuestro proyecto, más fieles serán los cálculos realizados.

3.2 Representación gráfica del terreno en ICS telecom

Una vez cargado el proyecto, tendremos el mapa seleccionado del terreno con el que trabajaremos en la pantalla principal¹. Dependiendo de las capas que tengamos, podemos ir de una capa a otra para obtener distintos puntos de vista en el proyecto.

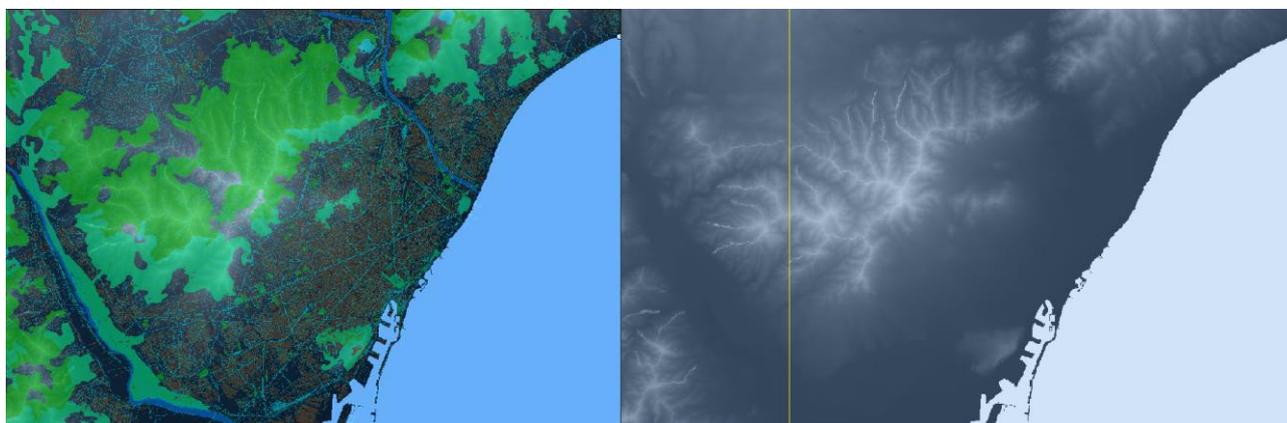


Figura 3.3. Representación de distintas capas en ICS Telecom

¹ La generación de los mapas y sus distintas capas no entran en el alcance del presente documento.

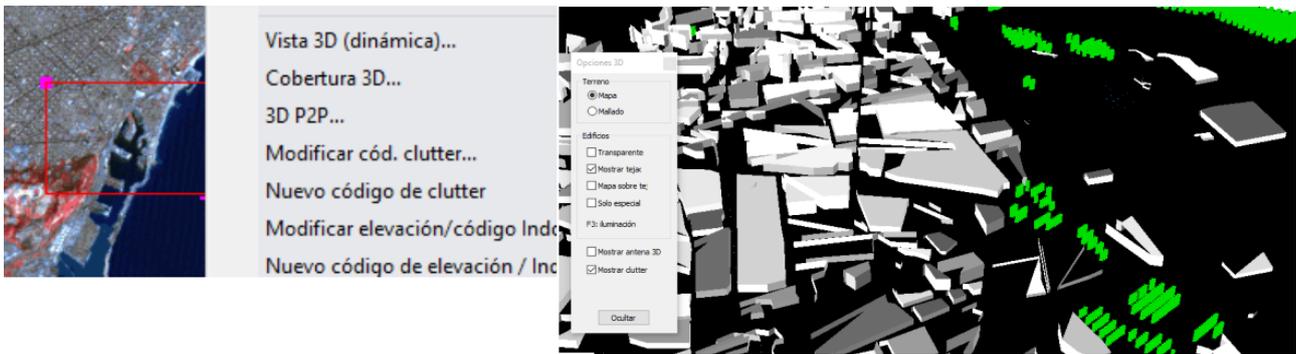


Figura 3.4. Representación 3D de mapa 2D

En la figura 3.3 tenemos una comparativa de las capas clutter y geo del mismo mapa, y a la hora de trabajar con ellas cada una nos presentará distintas opciones. Además podemos obtener una vista en 3D de las secciones que seleccionemos dentro del mapa, siempre y cuando dispongamos de capas que nos den la información necesaria, como por ejemplo la información de la altura de los edificios. Esta característica se muestra en la figura 3.4.

Al situar el cursor sobre el mapa e irnos desplazando sobre el terreno observamos que vamos cambiando de coordenadas en el mapa. Es importante tener en cuenta las coordenadas para saber en qué lugar real de la Tierra irán situados los elementos del proyecto para implementarlos en la realidad. Es por ello que debemos tener en cuenta dicha información y debe ser lo más exacta posible. También es importante saber en qué tipo de terreno nos movemos para definir las características que tendrá la transmisión por radio, información que nos aporta, como ya hemos dicho antes, la capa clutter. Esta información se muestra en la parte superior del proyecto, tal y como muestra la figura 3.5.



Figura 3.5. Visor de coordenadas, cota y tipo de terreno

Puede ser que obtengamos datos de coordenadas en formato distinto del que trabaja ICS Telecom por defecto (4DMS, 4 hace referencia al DATUM u origen de referencia de coordenadas WGS84 y DMS viene de *Degrees, Minutes and Seconds*, o grados, minutos y segundos en español), para lo que la herramienta incorpora un convertor de coordenadas muy útil con lo que podemos trabajar con cualquier tipo de coordenadas.

Otras utilidades que presenta a nivel cartográfico son los filtros de terreno por tipo de terreno, altura, superficie, etc. así como las herramientas de área de mapa, con la que podemos activar rejillas de coordenadas, ver el perfil del terreno desde una línea definida por dos puntos sobre el mapa, etc., aunque no entraremos en detalle en ellas.

3.3 Objetos en ICS Telecom

A la hora de añadir objetos a la red que queremos desplegar debemos tener en cuenta algunas características comunes de estos objetos, lo cual nos va a facilitar el trabajo a la hora de identificar las estaciones y darle ciertos parámetros a las mismas que todas deban llevar: parámetros de identificación de estaciones, opciones de representación de patrones de transmisión de antenas, opciones de representación gráfica de los objetos sobre el mapa, etc. Para ello tenemos una ventana de propiedades de objeto, en la que podemos definir estas características, entre otras, representada en la figura 3.6.

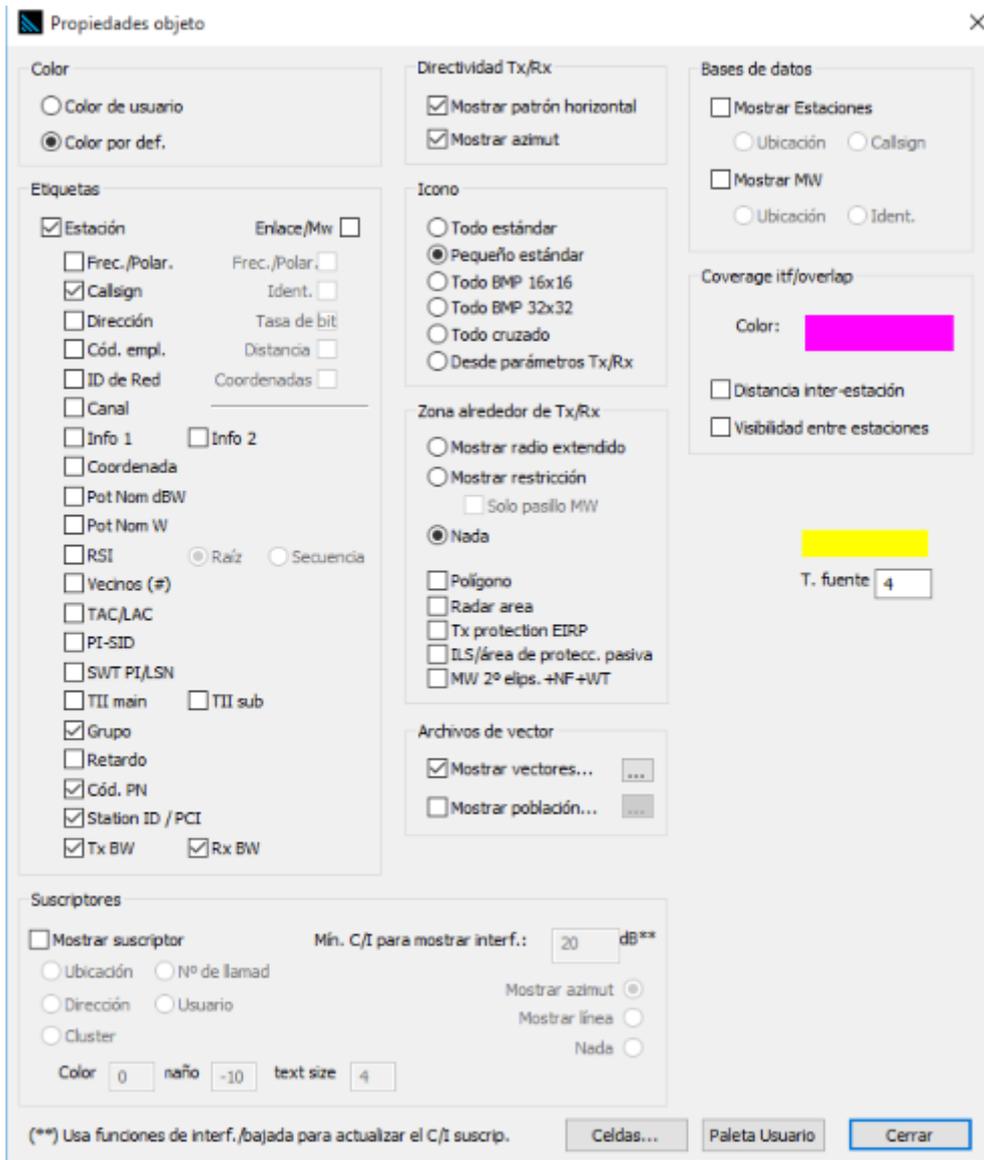


Figura 3.6. Propiedades de objeto en ICS Telecom

En ICS Telecom podemos elegir entre 3 tipos distintos de objetos, según lo que deseemos simular: estaciones fijas, estaciones móviles (estas dos se usan generalmente para simulación multicast o broadcast) o radioenlaces punto a punto (unicast). Para estaciones fijas tenemos el modo Tx/Rx y para estaciones móviles tenemos el modo ruta.

A la hora de colocar objetos debemos de tener en cuenta dos cosas:

- Localización geográfica de dicho elemento.
- Parámetros de radiocomunicación de los elementos.

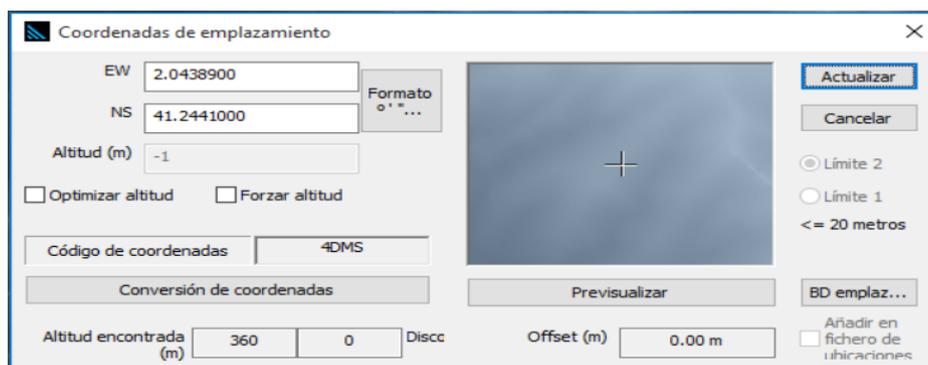


Figura 3.7. Emplazamiento preciso de estaciones en ICS Telecom

Como ejemplo, para ver brevemente algunas opciones de las que nos ofrece ICS Telecom, cogemos las estaciones fijas y vemos cómo localizarlas y cómo configurar los parámetros de las estaciones para la simulación. Así, para la localización, bien podemos ponerla directamente sobre el mapa según la coordenada que marque la barra superior vista en la figura 3.5 o por el contrario, si queremos mayor precisión, podemos situarlas en coordenadas más exactas, como vemos en la figura 3.7.

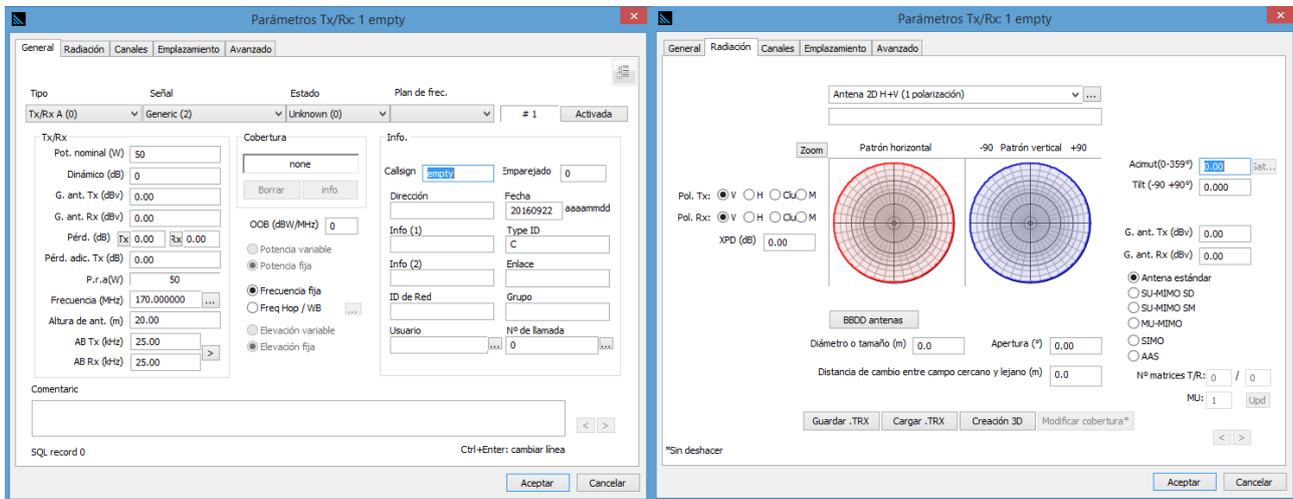


Figura 3.8. Parámetros de una estación

Así mismo, también podemos asignar los parámetros deseados para la transmisión a las estaciones que coloquemos sobre el mapa. En la figura 3.8 se observan las pestañas más importantes a la hora de asignar los parámetros a nuestras estaciones:

- En la pestaña “General” podemos asignar el tipo de estación, tipo de señal a transmitir, potencias, ganancias, frecuencias, identificador de estación, etc.
- En la pestaña “Radiación” podemos ajustar los patrones de radiación de las antenas a nuestro antojo o si lo deseamos, podemos cargar un archivo de antenas del fabricante, el cual nos hará que podamos realizar la simulación con las características de una antena real de un fabricante específico. También podemos indicar parámetros tales como la polarización de la señal transmitida en transmisor y receptor.

Una vez seleccionados los parámetros deseados ya tenemos una estación sobre el mapa con las características que deseamos. A partir de aquí ya podemos añadir más estaciones, borrarla, editar sus parámetros o incluso duplicarla, para el caso en que debamos de poner más de una estación con las mismas características.

3.4 Cálculo de cobertura en ICS Telecom

Para calcular la cobertura lo principal es utilizar el modelo de transmisión adecuado según las características del terreno, la frecuencia utilizada, etc. Esto lo podemos ajustar en ICS Telecom ya sea mediante modelos predefinidos o creando nosotros mismos un modelo de propagación concreto, usando la recomendación de la ITU (*International Telecommunication Union*) que deseemos, ajustando la geometría específica de la difracción de la luz, clima, coeficiente de reflexión, etc. El cuadro donde podemos cambiar todas estas características se ilustra en la figura 3.9. Además tenemos opciones de configurar las características de los distintos tipos de terreno (*clutter*) en cuanto a atenuación y coeficiente de reflexión entre otras.

Para filtrar el análisis de la cobertura a las características que nos interesan, podemos fijar un umbral de cobertura a aplicar al estudio de cobertura. Todas las áreas del terreno que tengan un umbral de cobertura inferior al establecido por nosotros en ICS Telecom no se mostrará en los cálculos. Podemos indicarle al programa que queremos usar un umbral de un tipo de transmisión predefinido. No sólo podemos fijar el umbral de cobertura, sino que además podemos activar una opción para decidir el área de cálculo alrededor del transmisor sobre el que se hará el estudio de cobertura. Así lo vemos en la figura 3.10.

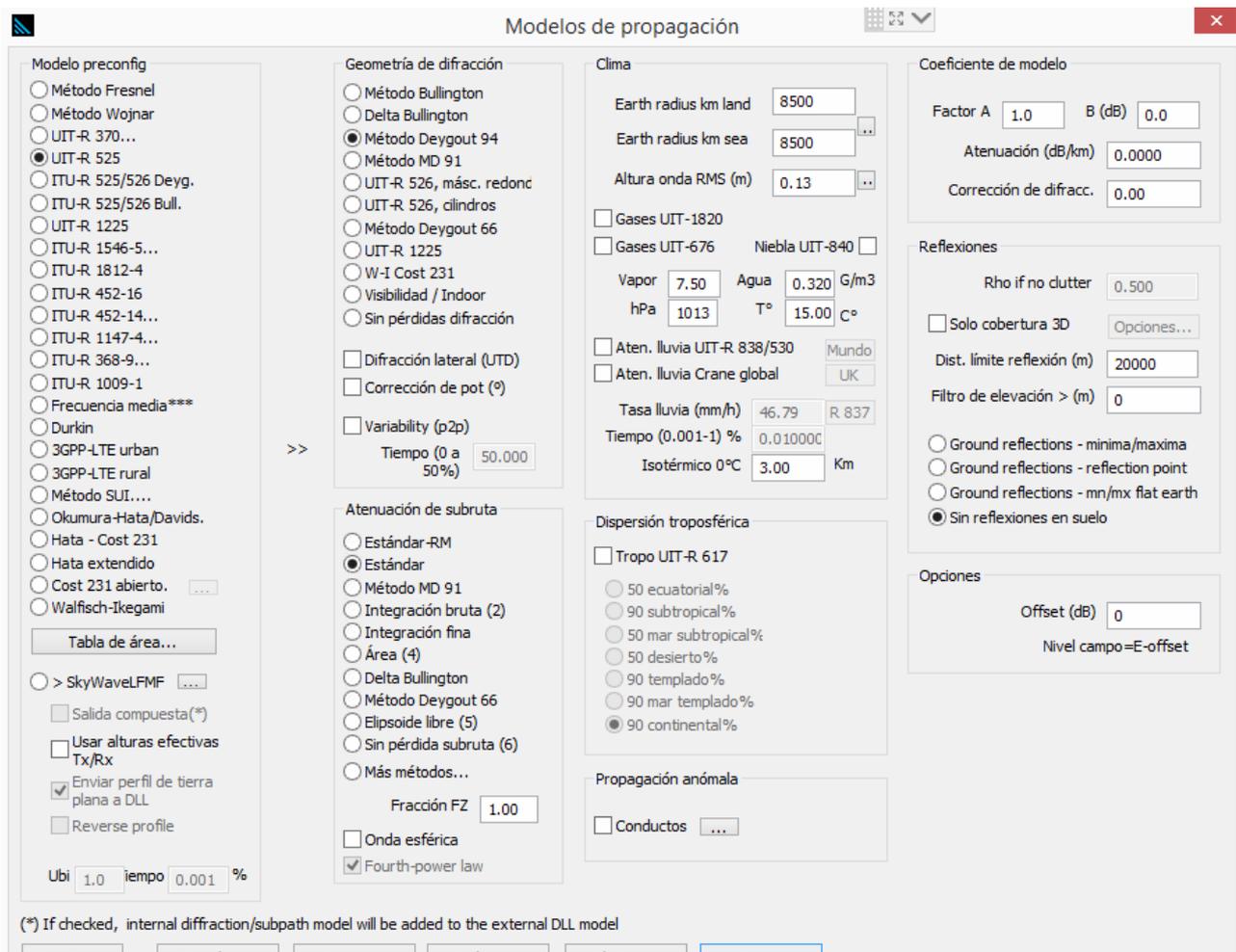


Figura 3.9. Ajuste de modelo de propagación

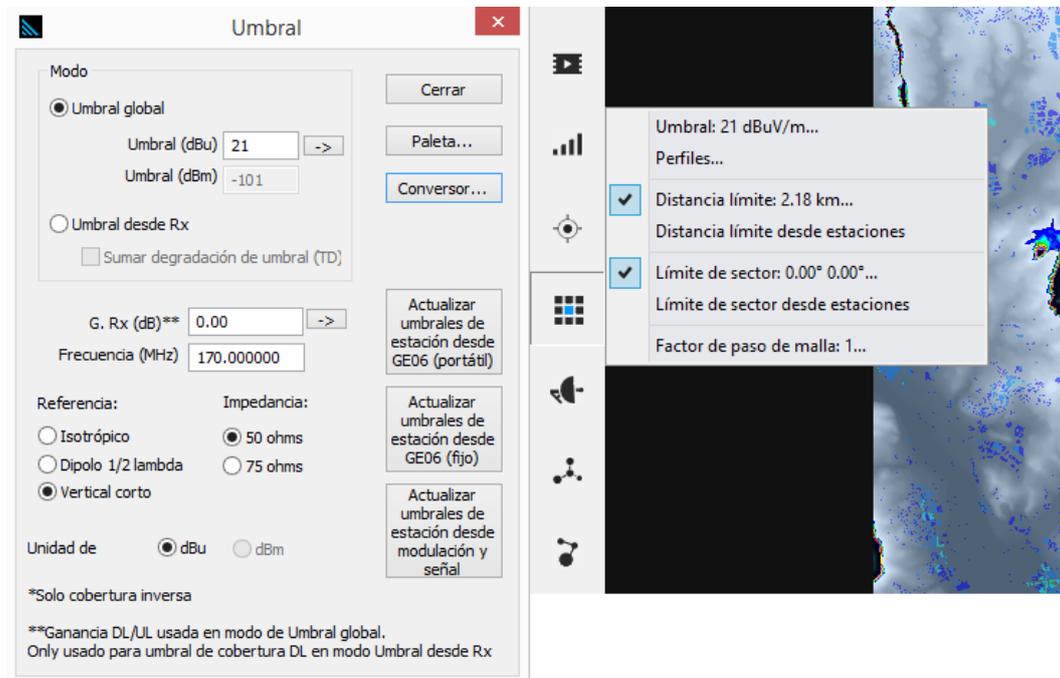


Figura 3.10. Umbrales de cobertura y distancia

Al realizar el cálculo de cobertura vemos cómo se iluminan las áreas cuyo nivel de señal exceda el umbral definido por nosotros. Así mismo, se pueden observar los distintos niveles de intensidad de campo/potencia de señal según la leyenda inferior del programa, como podemos apreciar en la figura 3.11.

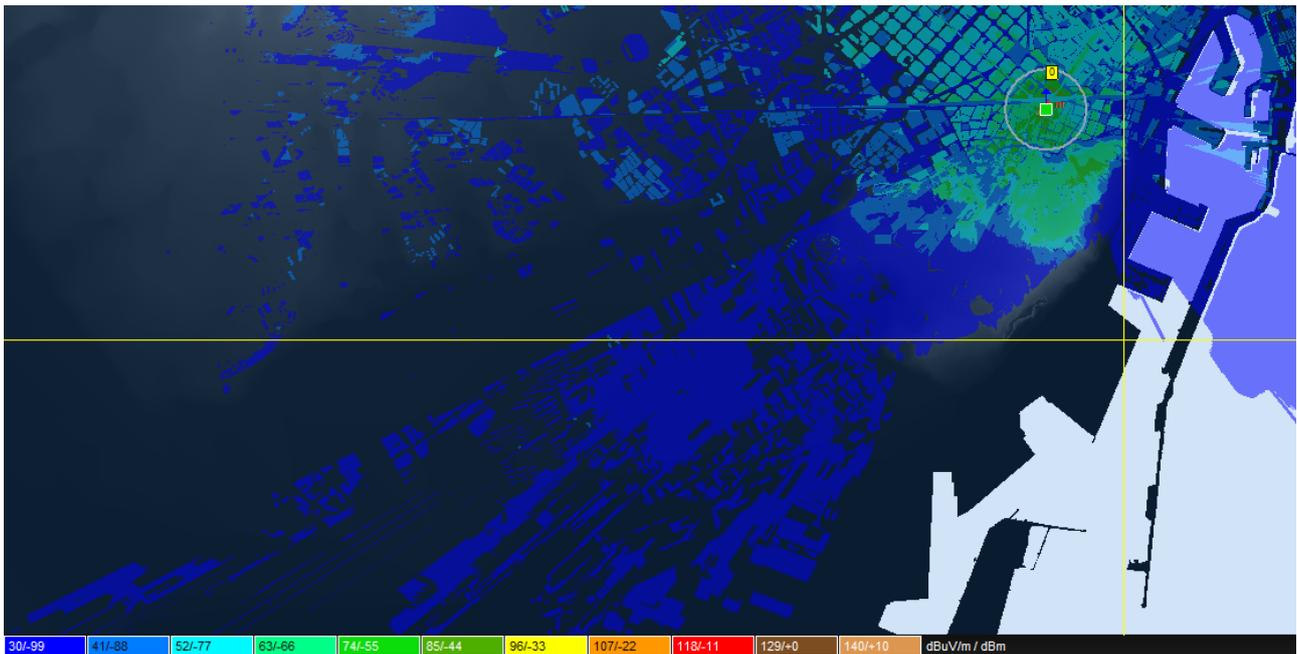


Figura 3.11. Análisis de cobertura y leyenda

Otra opción que nos da el programa es la de ver el perfil de la transmisión y el terreno desde la BS hasta el punto que le indiquemos donde se ubica el receptor, habiendo definido la altura de la antena receptora previamente cuando calculamos la cobertura:

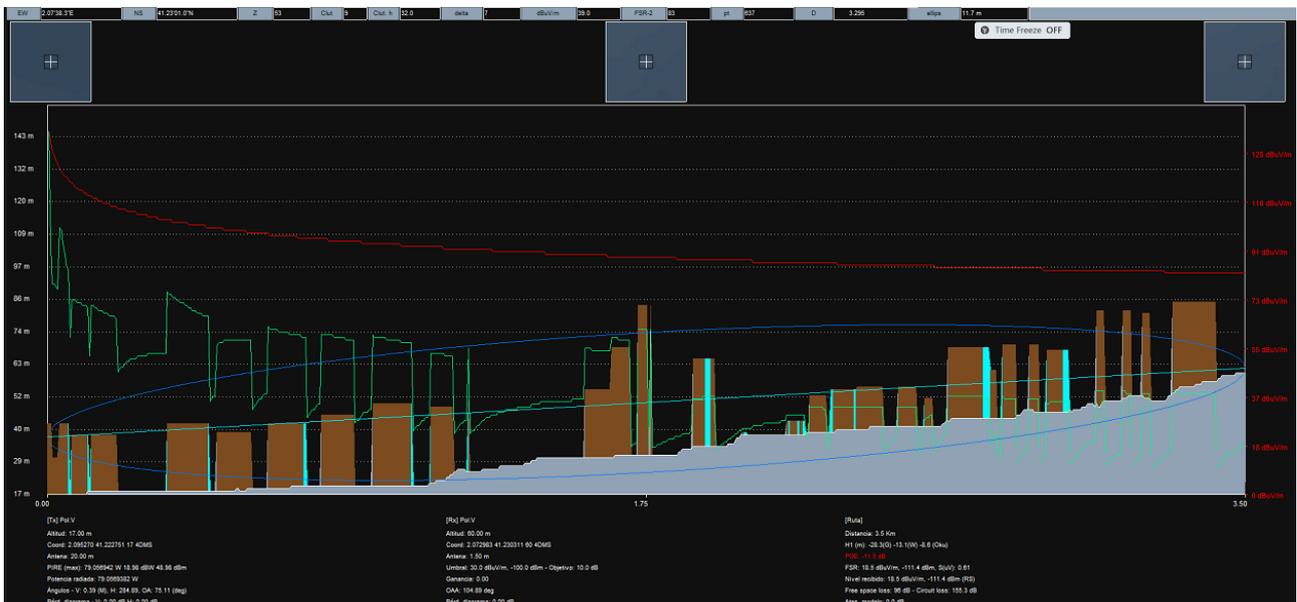


Figura 3.12. Perfil de cobertura

En dicho perfil tenemos diferentes líneas: la roja muestra la potencia de la señal si se transmitiese en espacio libre, la verde es la potencia que va adquiriendo la señal por su recorrido, la celeste es la línea de visión entre TX y RX y la elipse azul representa el elipsoide de la 1ª zona de Fresnel. El área gris que se ve es la elevación del terreno, y los bloques marrones son edificios.

Para ver más tipos de análisis colocamos otra BS con las mismas características que la anterior. Podemos mostrar la cobertura compuesta de las 2 BS:

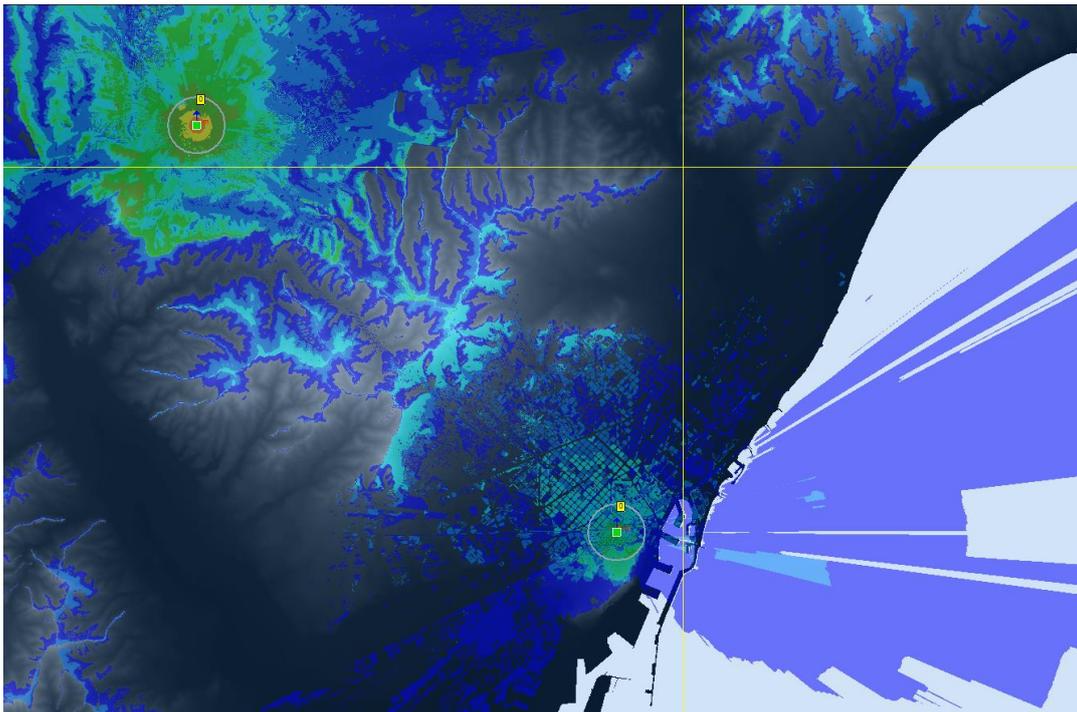


Figura 3.13. Cobertura compuesta

Podemos hacer más análisis: cobertura del mejor servidor, solapamiento de cobertura de varios repetidores, etc. De este último, vemos un ejemplo en la figura 3.14., donde las zonas moradas indican que hay solapamiento de cobertura en dicho área.

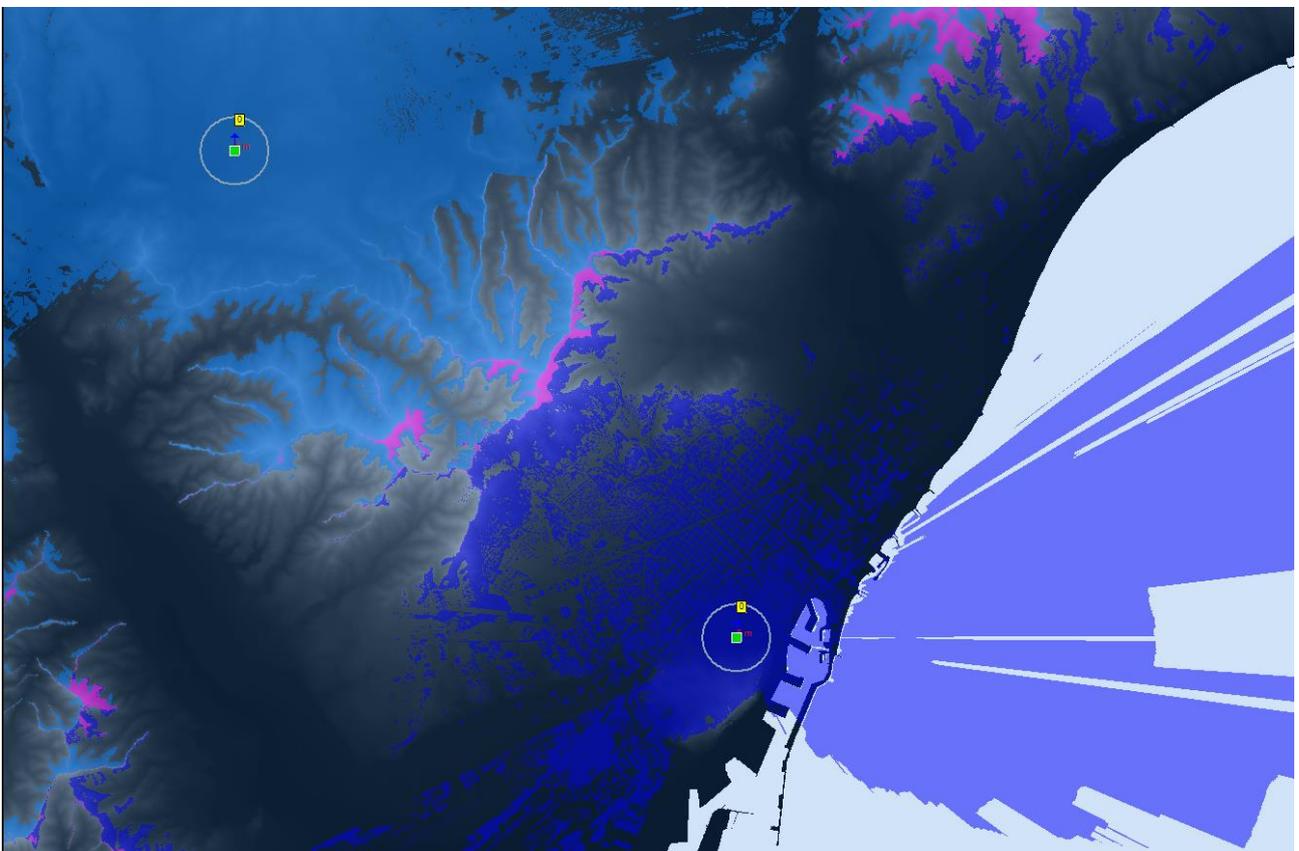


Figura 3.14. Solapamiento de cobertura

4 SIMULACIÓN Y ESTUDIOS DE COBERTURA

Con el fin de mostrar el manejo de la herramienta más profundamente y de la presentación de resultados en una simulación con ICS Telecom, en el siguiente apartado vamos a partir de un ejemplo concreto que nos permita hacer el modelado de una red de radiocomunicaciones PMR, usando los estándares TETRA y DMR vistos con anterioridad. Así, en primer lugar lo haremos con TETRA y luego cambiaremos los elementos necesarios para hacerlo con DMR.

4.1 Contexto y situación

Supongamos que una empresa de suministros (agua, luz, gas...) desea controlar un número de instalaciones suyas vía radio, ya que sale más barato que un despliegue de cableado de datos o fibra, o alquilar dichos servicios cableados a otra empresa que tenga ya una red desplegada para el transporte de datos. Dichas instalaciones están repartidas por el mapa de Barcelona (visto en el apartado anterior para introducir la herramienta ICS Telecom). En la siguiente figura vemos la representación de los centros sobre el mapa de Barcelona. Estos centros harán de suscriptores.

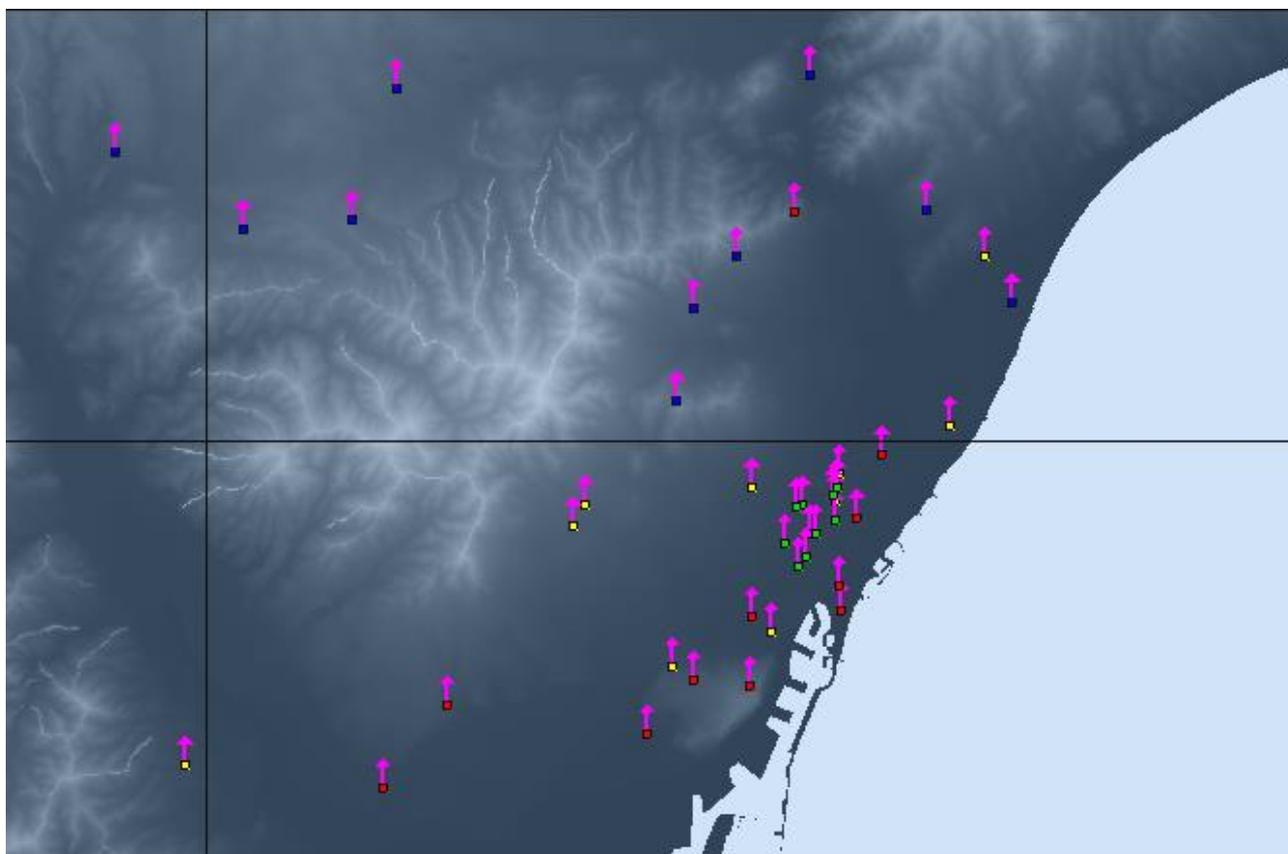


Figura 4.1. Representación de los suscriptores en el mapa

Como vemos en la figura, los puntos representan los suscriptores, y las flechas de color rosa indican hacia dónde tienen que transmitir los suscriptores. Como de entrada aún no tenemos ningún repetidor dentro del mapa, apuntan hacia el norte por defecto.

La idea es que la empresa de suministros desea interactuar remotamente con las instalaciones, para lo que tendrá que instalar una RTU (*Remote Terminal Unit*) en cada una de ellas, mediante las cuales pueden ejecutar maniobras sobre la instalación, recibir estados y alertas de la misma, etc. mediante algún tipo de SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) que no es más que un software empleado para supervisar y controlar a distancia procesos industriales. Estas RTU (que en nuestro caso harán de MS, de suscriptores) tendrán un sistema radiante para comunicar por radio con las BS correspondientes, llegando la información de las RTU a la sede de la empresa que explota las instalaciones.

Nótese que TETRA y DMR están pensados para comunicaciones móviles, pero las RTU en principio permanecerán estáticas conectadas a las instalaciones. Así, la principal ventaja de usar estos estándares (en sus versiones no comerciales) es que no están destinados a las comunicaciones públicas, lo que nos conferirá mayor disponibilidad de la red, al tener concesión de bandas de frecuencia que no se mezclan con las bandas destinadas a servicios públicos y no se saturarán las comunicaciones. Otra ventaja es que se trata de sistemas de comunicación digitales, frente a los sistemas de radio analógicos, cuyas comunicaciones son más vulnerables a la degradación de la señal. Además, por norma general, no todas las RTU estarán transmitiendo datos todo el tiempo, de manera que el empleo de trunking supone una ventaja a la hora de aprovechar los canales disponibles para las comunicaciones. No sólo eso, sino que además la comunicación con las RTU no usa una gran cantidad de datos, pues ni el reporte de estados y/o alarmas de las instalaciones, ni los telemandos que se les hacen a las RTU requieren muchos datos. Este hecho permite que el pequeño ancho de banda usado por TETRA y DMR baste para que la comunicación se establezca.

4.2 Consideraciones generales

Para las simulaciones usando TETRA y DMR, al tratarse de una geografía urbana, usaremos el modelo de propagación descrito en el apartado anterior en la figura 3.9, de modo que usaremos ITU P.525 + geometría de difracción Deygout 94 + atenuación estándar de los subtrayectos.

Al disponer de capa clutter en el mapa, disponemos de las características que tiene cada tipo de terreno, cada clutter con su color, tal y como sigue:

Cód. Clutter	Nombre	Atenuación (dB)	Altura Clutter	Reflexión: Rho (0-1)	Erlang/km2	Factor superf.	Factor difracción	Estación/km2	Des.Est. (dB)	Consejo...
0	Abrir	0.0	0.0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
1	villas	0.0	6	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
2	Suburbano	0.0	8	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
3	urban	0.0	15	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
4	dense urban	0.0	30	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
5	Forestal	0.0	12	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
6	Hidroeléctrico	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
7	high urban	0.0	50	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
8	parque/bosque	0.0	4	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
9 *	roof - building	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
10	rail	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
11	road	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
12 **	airport	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
13 **	port	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
14 **	open rural	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
15 **	mine	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
16 **	indoor 1	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
17 **	indoor 2	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
18 **	indoor 3	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT
19 *	Border*	0.0	0	0.300	1.0000	1.000	1.00	1.000	1.00	Rx MDT

Figura 4.2. Características de clutter

Aquí podemos ver la altura de cada clutter, que no es más que la altura que asignamos a los distintos tipos de terrenos (vegetación, masas de agua, etc.); factor de difracción y factor de altura, que funcionan como correctores de la altura de manera que $H = \text{Altura Clutter} \times \text{Factor Difracción} \times \text{Factor Altura}$; coeficiente de reflexión en cada clutter (rho, que se ha definido a 0.3 en todos los clutters); y las alturas desde dónde se tienen en cuenta las antenas (casillas inferiores derechas). Esto es muy importante, dado que podemos definir si la altura de las antenas, tanto en Tx como

en Rx, se tiene en cuenta sobre el suelo o sobre la misma altura del clutter.

En cuanto al uso de las bandas de frecuencia que se hará, será el de las bandas reservadas a las empresas de transporte de suministros de acuerdo al CNAF, según sus normas UN-74 y UN-76, expuestas en el Anexo A.

4.3 Simulación con TETRA

Para hacer la correspondiente simulación lo primero es definir las características de los equipos que se van a utilizar, tanto en las BS como en las RTU. Luego vamos a implementar la simulación desde dos enfoques distintos, los cuales nos permitirán ver distintas características y opciones del software ICS Telecom.

4.3.1 Características de los equipos

En esta sección vamos a ver las características que debemos implementar en los equipos a la hora de realizar las simulaciones y estudios de cobertura. Muchos de estos valores son los que tendremos que introducir en la pestaña de parámetros que vimos en el apartado anterior, en la figura 3.8.

4.3.1.1 Equipos usados por las RTU (MS)

En primer lugar, vemos en la siguiente tabla las características de las emisoras de radio que van a ir conectadas a las RTU.

Características RF de la emisora radio TETRA para las RTU	
Bandas de frecuencia de emisión	380-430/450-470/806-870 MHz
Ancho de banda del canal RF	25 kHz
Separación Tx/Rx	10 MHz
Potencia RF en Tx	Clase 3 (3W, 35dBm)
Control de potencia RF	4 pasos de 5 dB
Precisión en el nivel de potencia RF	+/- 2 dB
Sensibilidad estática en Rx	-112 dBm mínima / -114 dBm típica
Sensibilidad dinámica en Rx	-103 dBm mínima / -105 dBm típica

Tabla 4.1. Características emisora TETRA para RTU

Nótese que los niveles de potencia y sensibilidad son los que nos entrega el equipo en el conector de la antena. Entre la emisora y la antena existirá una conexión que se modelará como pérdidas adicionales en el transmisor (atenuación en cable y conectores).

Las antenas seleccionadas para colocar a la salida son 2: un modelo omnidireccional, que será con el que trabajemos habitualmente, y otro modelo direccional, para aquellos sitios en los que la señal se reciba más débilmente y sea necesario mejorar su nivel de recepción. En este caso, se van a presentar las características de las antenas junto a su patrón de radiación, que nos aporta una mayor información acerca de la distribución que se hace de la potencia al ser radiada.

Características antena omnidireccional TETRA para RTU	
Banda de frecuencias	380-430 MHz
Polarización	Vertical
Ancho de haz horizontal	360°
Ancho de haz vertical	80°
Ganancia	0 dBd (2.15 dBi)
Impedancia	50 Ω
VSWR	<1.5:1
Potencia máxima de transmisión	150 W

Tabla 4.2. Características antena omnidireccional TETRA para RTU

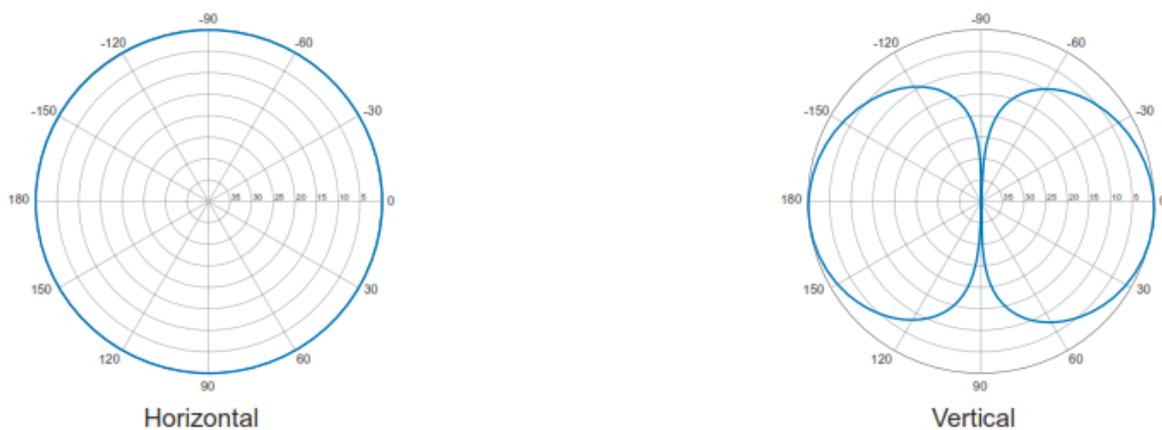


Figura 4.3. Patrón de radiación de antena omnidireccional TETRA para RTU

Aquí vemos que las características de la emisora limitan las capacidades de la antena y viceversa, buscando un perfil más selectivo a la hora de transmitir. Por ejemplo, la emisora TETRA puede transmitir y recibir en 3 bandas de frecuencia distintas, pero el hecho de escoger esta antena nos limita a la banda de 380-430 MHz. Así mismo, aunque la antena tiene capacidad de transmitir hasta a 150 W, la emisora transmite a 3 W.

Es importante que todo el sistema tenga una impedancia en los conectores de 50Ω, pues así evitaremos tener onda reflejada al tener las impedancias adaptadas y lograremos que no se nos dispare el VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), con lo que la eficiencia o rendimiento del sistema (potencia de entrada/potencia de salida) será alto.

El hecho de usar antenas omnidireccionales puede no tener mucho sentido si las RTU están fijas, pues poniendo antenas direccionales apuntando hacia la BS que le corresponda no debería haber problema alguno, incluso se recibiría la señal con mejor calidad, pero cobra sentido si contamos con que puede tener lugar la caída del repetidor y que dicha BS no nos proporcione cobertura. En ese caso, las RTU tienen la capacidad de sintonizarse a la frecuencia de algún repetidor vecino si está dentro de su área de cobertura y es aquí donde el hecho de disponer de antenas omnidireccionales nos facilita la tarea, al distribuirse la misma potencia en todas direcciones.

Características antena direccional TETRA para RTU	
Banda de frecuencias	400 – 440 MHz
Polarización	Vertical
Ancho de haz horizontal	70°
Ancho de haz vertical	52°
Ganancia	7 dBd (9.15 dBi)
Impedancia	50Ω
VSWR	<1.5:1
Relación front-to-back	>16 dB
Potencia máxima	250 W

Tabla 4.3. Características antena direccional TETRA para RTU



Figura 4.4. Patrón de radiación de antena direccional TETRA para RTU

4.3.1.2 Equipos usados por los repetidores (BS)

Características RF de la emisora radio TETRA para las BS	
Bandas de frecuencia	380 – 430/806 – 870 MHz
Potencia RF en Tx	Clase 2 (25 W, 44 dBm)
Sensibilidad estática en Rx	-120 dBm típica (4% BER)
Sensibilidad dinámica en Rx	-113.5 dBm típica (4% BER)
Ancho de banda Tx	25 kHz
Separación Tx/Rx	10 MHz

Tabla 4.4. Características emisora TETRA para BS

Como vemos, las características de la emisora son mejores tanto en términos de potencia como en sensibilidad. Es lógico que así sea, una BS tiene que soportar muchas más comunicaciones que una MS y por ello debe tener mejores prestaciones.

En el caso de los repetidores sólo usaremos antenas omnidireccionales. También se podría optar por una comunicación sectorial con antenas direccionales separadas, por ejemplo, 120° entre sí, pero se ha elegido la opción de colocar sólo antenas omnidireccionales.

Características antena omnidireccional TETRA para BS	
Banda de frecuencias	400 - 440 MHz
Polarización	Vertical
Ancho de haz horizontal	-
Ancho de haz vertical	35°
Ganancia	3 dBd (5.15 dBi)
Impedancia	50 Ω
VSWR	<1.5:1
Potencia máxima de transmisión	150 W

Tabla 4.5. Características antena omnidireccional TETRA para BS

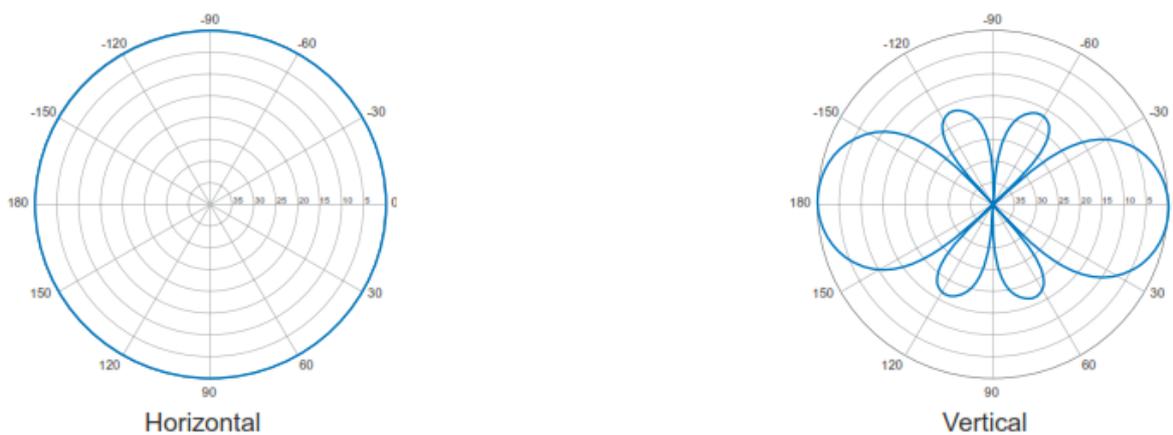


Figura 4.5. Patrón de radiación de antena omnidireccional TETRA para BS

4.3.2 Métodos de simulación

Podemos abordar el problema que se nos plantea de dos maneras distintas. Por una parte podemos fijar los repetidores a una serie de emplazamientos disponibles que nos da empresa que se contrata de telecomunicaciones, y por otra, lo que sería un enfoque completamente distinto es que, fijados los suscriptores (en este caso son fijos) podremos calcular el punto o los puntos donde colocar nuestros repetidores para dar cobertura a todos los suscriptores, siempre y cuando introduzcamos las características que queremos que tengan los repetidores a utilizar.

4.3.2.1 Simulación a partir de los emplazamientos con repetidores

Para realizar la simulación mediante este método recurrimos a ubicar los repetidores en los emplazamientos de que dispone la empresa de telecomunicaciones. Para ello recurrimos a la opción de ICS Telecom de ubicar las estaciones en coordenadas específicas, tal y como vimos en la figura 3.7 en el capítulo anterior.



Figura 4.6. Repetidores y suscriptores TETRA

En la figura 4.6 se pueden observar tanto los repetidores (cuadros verdes grandes) como los suscriptores, que ya habían sido presentados en el planteamiento del problema. Mientras que las flechas de los suscriptores sirven para indicar la dirección hacia el repetidor en el que están suscritos, las flechas azules que se observan en los repetidores indican 0° de la componente acimutal del corte horizontal del patrón de radiación.

A continuación, meteremos primero las BS según sus coordenadas y luego modificaremos algunas de las características de todas las BS a la vez.

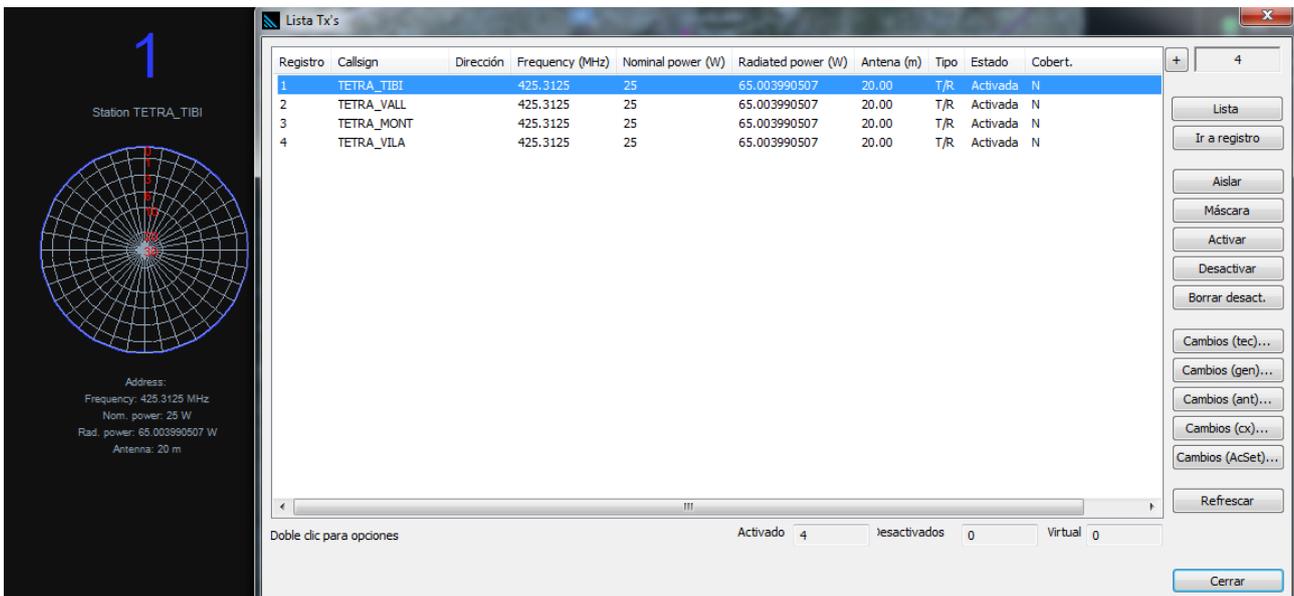


Figura 4.7. Lista de BS TETRA

En la lista de las BS se observa un resumen de las características que se les ha dado a los repetidores, tales como el identificador de llamada, frecuencia en TX, potencia nominal, pira radiada, altura de antena, etc. Pero como bien sabemos hay muchos más parámetros que configurar aparte de los obtenidos de las tablas anteriores. Para ello, se ha cogido el primero de los repetidores, se modifican sus parámetros y los guardamos en un fichero .TRX para luego poder cargarlo en los demás repetidores, de manera que todos tengan los mismos parámetros. Así, los parámetros de las BS de TETRA quedan como vemos en las siguientes figuras (4.8, 4.9, 4.10 y 4.11).

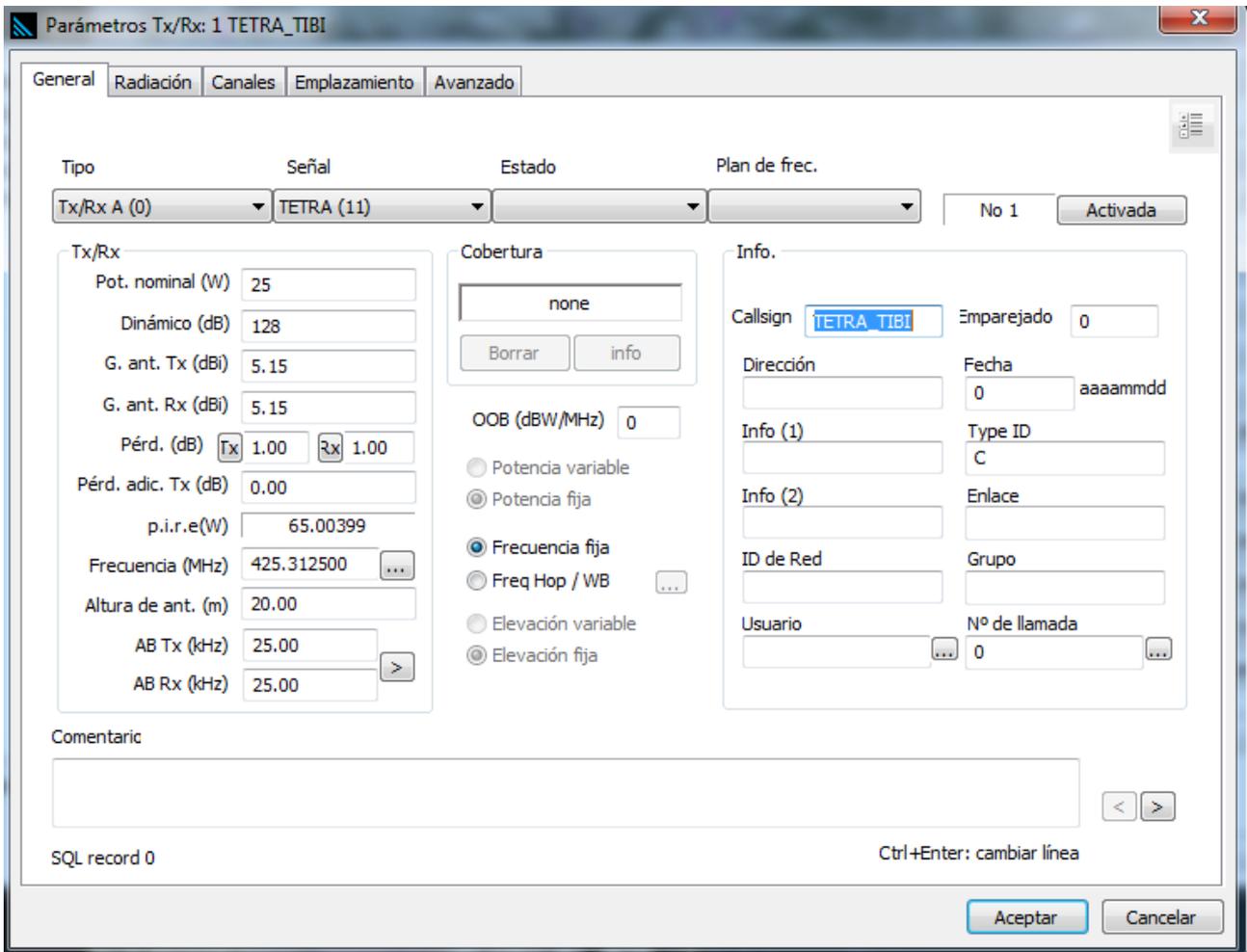


Figura 4.8. Parámetros generales BS TETRA

Aquí ajustamos las características principales del repetidor, tales como frecuencia y potencia de transmisión, tipo de señal (condiciona automáticamente el ancho de banda y la modulación), etc. Fijamos el rango dinámico a 128 dB y consideraremos pérdidas en TX/RX de 1 dB. La frecuencia de transmisión del repetidor debe ser la más alta de las dos posibles del dúplex TX/RX, más que nada por cuestiones de energía. Mientras que los repetidores están siempre alimentados, los terminales móviles (aunque en nuestro caso están fijos) toman la energía de baterías, y para el ahorro de la misma, las MS transmiten en la frecuencia más baja posible. Por ello, si los repetidores trabajan en la frecuencia puesta aquí, las RTU transmitirán 10 MHz por debajo, según las características de separación que vimos en las tablas anteriores que contienen las características de los equipos a utilizar.

Para conseguir el patrón de radiación, hemos cargado un archivo de extensión .PLN con las características de nuestra antena, previamente definidas en las tablas anteriores, ya que ICS telecom nos permite la opción de importar un archivo que contenga características de antenas específicas.

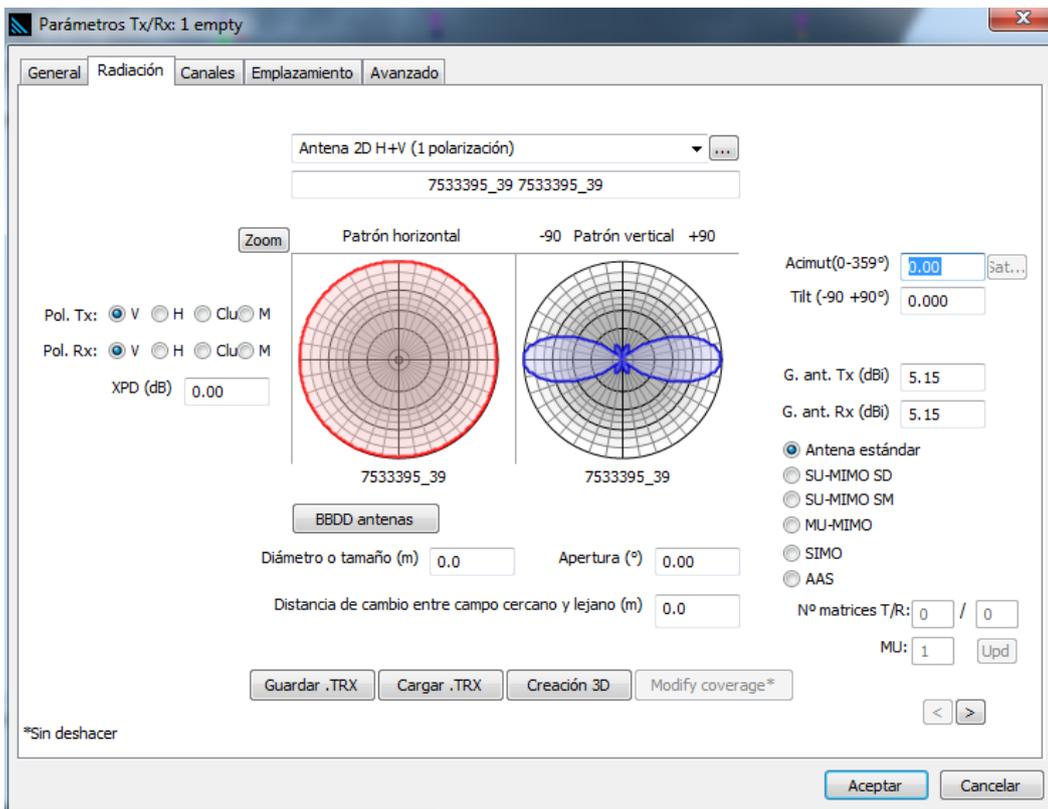


Figura 4.9. Patron radiación BS TETRA

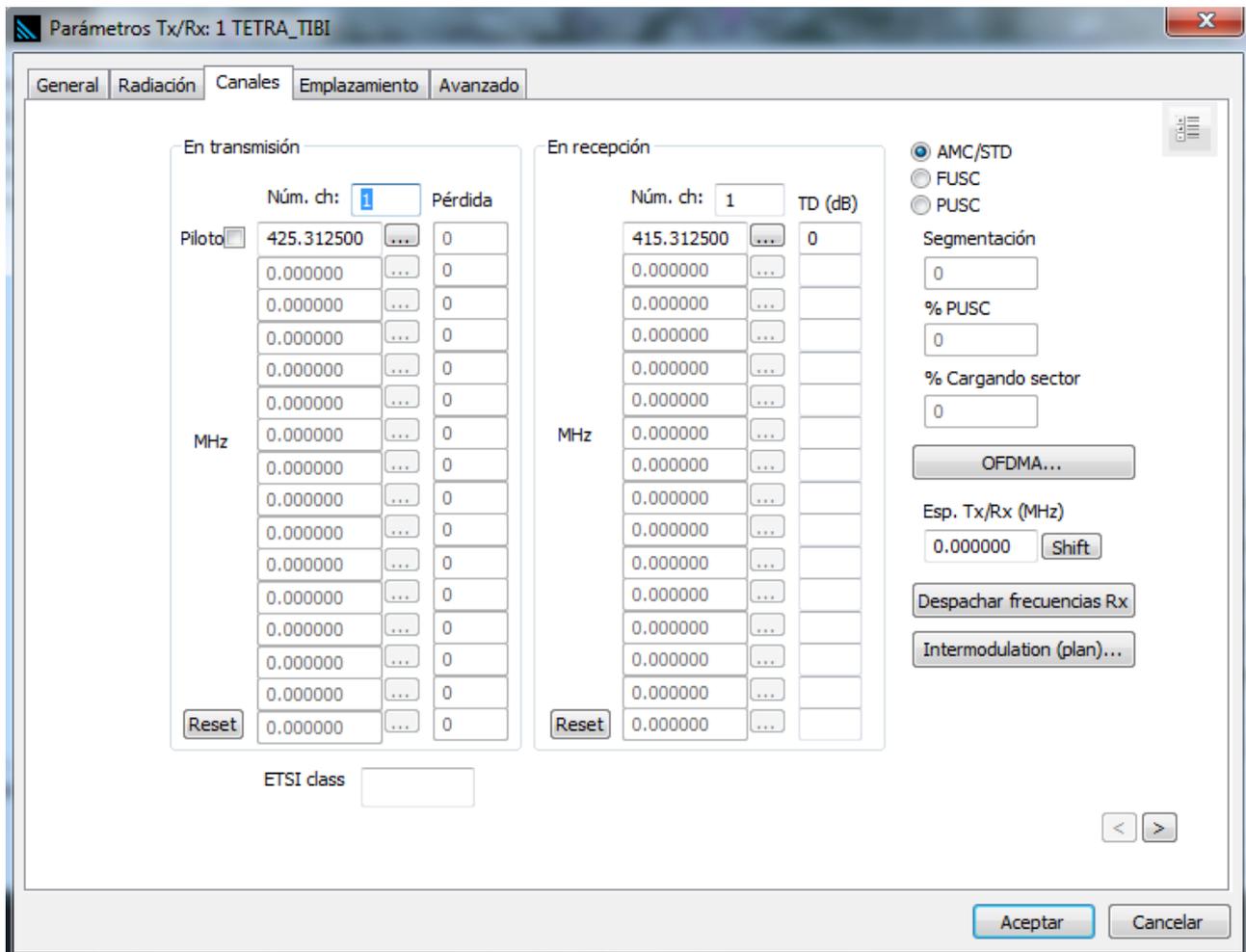


Figura 4.10. Parámetros de los canales BS TETRA

En cuanto a los parámetros de los canales activamos un canal de TX y otro de RX centrados en sus respectivas frecuencias y separados en 10MHz.

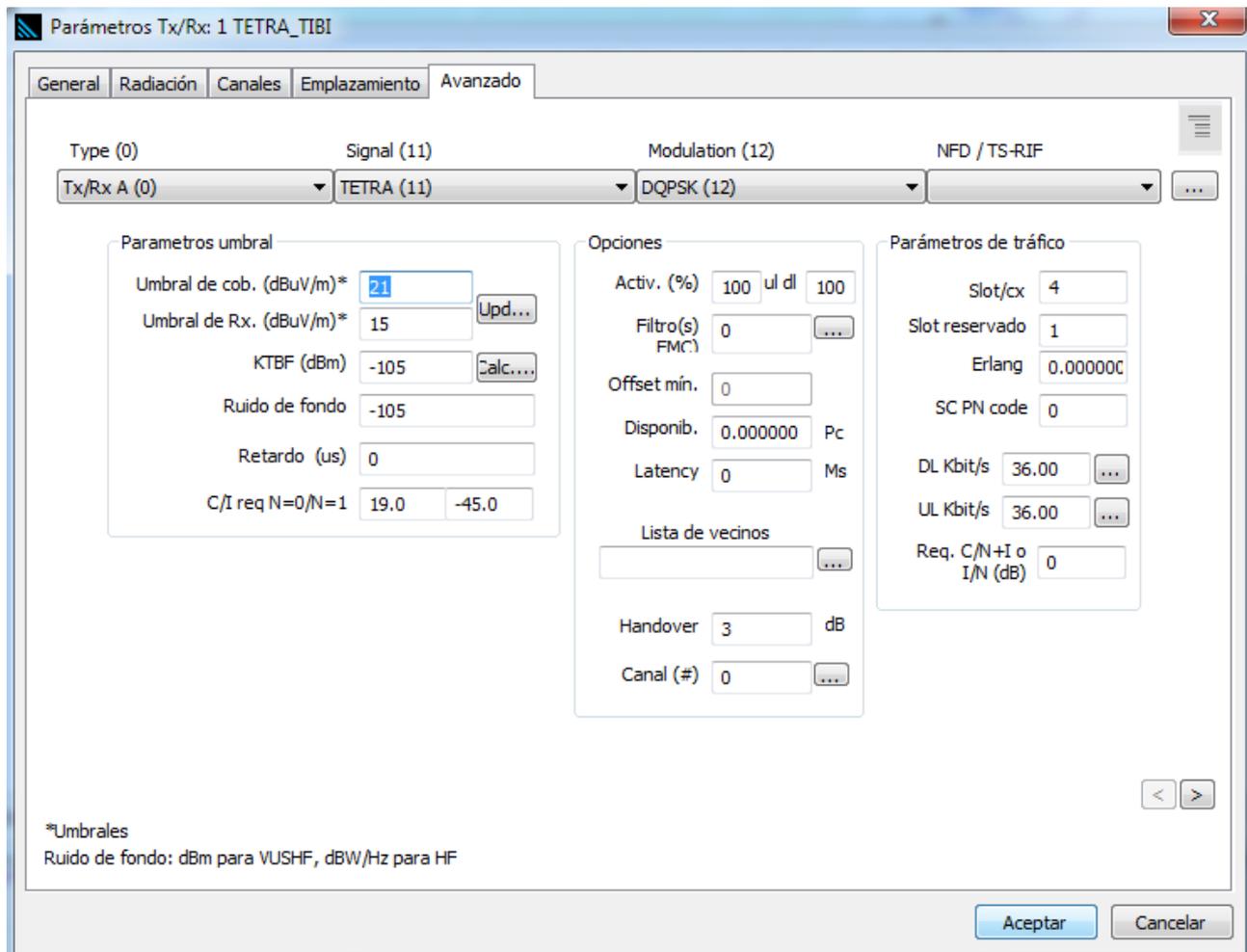


Figura 4.11. Parámetros avanzados BS TETRA

Aquí vemos algunas otras opciones que se nos da como elegir el tipo de modulación para la transmisión, los umbrales de cobertura en TX/RX, el ruido de fondo, la disponibilidad de los enlaces ascendente/descendente, etc. También nos permite ajustar algunos parámetros de tráfico, tales como la tasa binaria y el número de slots por canal. Así, seleccionaremos DQPSK como modulación. Ajustaremos el umbral de cobertura (enlace descendente) en 21 dBuV/m (-109 dBm)² (se ajusta automáticamente según el tipo de señal elegida, al pulsar la casilla “Upd.”) y el umbral de recepción (enlace ascendente) en 15 dBuV/m (-115 dBm). KTBF y ruido de fondo los definiremos iguales, a un nivel de -105 dBm. La relación C/I la fijamos tal y como viene en el estándar TETRA: 19 dB para interferencia cocanal y -45 dB para interferencia de canal adyacente. La actividad de los enlaces ascendente y descendente la fijamos al 100%, potencia inicial radiada 25 W, 4 slots por radiocanal, con 1 slot reservado para el canal de control y 36 kbps de tasa binaria en ambos sentidos de la comunicación.

En cuanto a los suscriptores los configuramos también con las características de los equipos vistos anteriormente. Los configuramos en principio con antenas omnidireccionales y, en caso de ser necesario tras ver los niveles de cobertura, se usará la antena direccional para mejorar el nivel de señal recibido. El rango dinámico en este caso es de unos 110 dB y también se considera 1 dB de pérdidas adicionales. Consideramos el mismo ruido de fondo y KTBF que en los repetidores, además de un 5% de actividad en los canales ascendente y descendente, para que las RTU estén continuamente comunicando el estado de las instalaciones y las correspondientes alarmas.

² A pesar del umbral de -109 dBm, nos quedaremos con todo lo que esté por encima de un nivel de -90 dBm de cobertura en los receptores, para contrarrestar las posibles atenuaciones extra del entorno urbano.

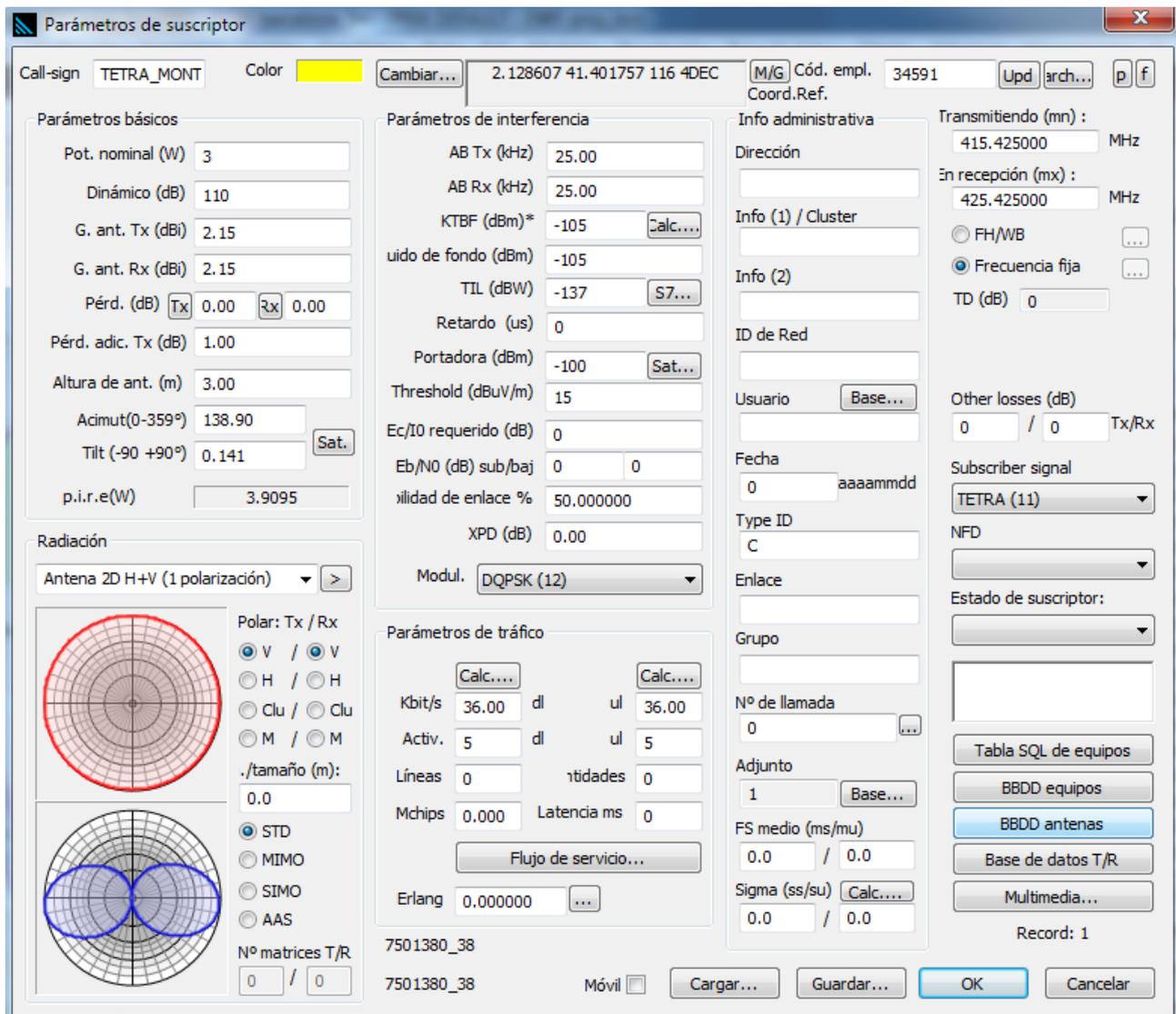


Figura 4.12. Parámetros de los suscriptores TETRA

Ya tenemos las características tanto de las BS como de las MS y se ha fijado el modelo de propagación. Lo próximo es hacer el análisis de cobertura en el menú Cobertura → Cálculo de red → Cobertura FS Tx/Rx. Con esto, ICS Telecom comenzará a hacer los cálculos para ofrecernos el nivel de cobertura que ofrece nuestra red a desplegar. Una vez hecho este cálculo, debemos guardar el archivo, puesto que la simulación tarda un buen rato en llevarse a cabo y además nos servirá a la hora de observar otras características de la red que irán siendo descritas, tales como análisis de interferencia, análisis de cobertura en mejor servidor, etc.

Para los posteriores análisis, como bien hemos comentado, nos hace falta tener calculada la cobertura, hecho que podemos comprobar al listar las BS para saber si ya ha sido calculada o no, al abrir la ventana de parámetros generales de una estación, tal y como se muestra en la figura 4.13.

Tras esto, si vamos a la pestaña de análisis de cobertura nos encontramos con varios análisis distintos, pero los más importantes son el análisis de cobertura compuesta y el de cobertura de mejor servidor. Observamos el análisis de cobertura compuesta en la figura 4.14.

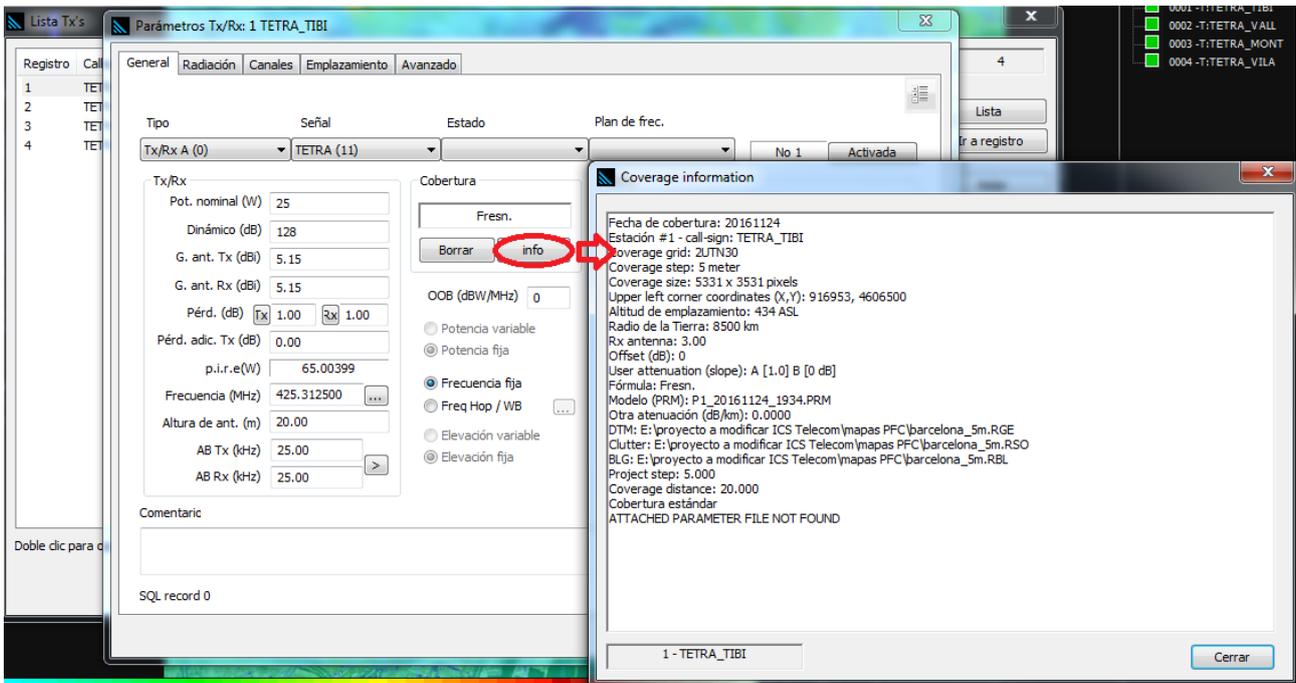


Figura 4.13. Datos cálculo cobertura

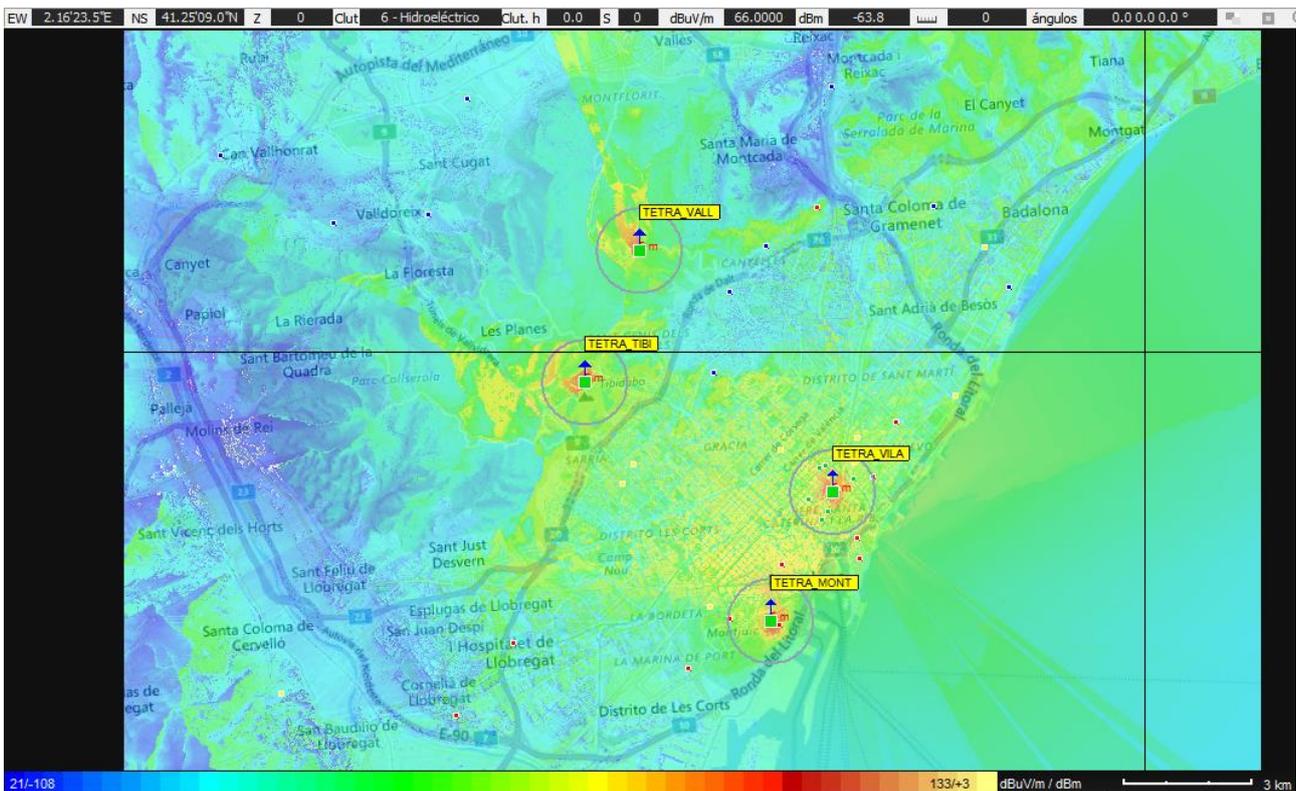


Figura 4.14. Cobertura compuesta TETRA (Caso 1)

El análisis de cobertura compuesta nos muestra los niveles de cobertura asociados a los colores de la paleta, que van desde el umbral que le hemos definido nosotros al proyecto, en azul oscuro, hasta los valores más altos de cobertura, en marrón. En cada punto que vayamos colocando el cursor, obtenemos la mejor medida de cobertura en dicho punto obtenida como resultado de la simulación, reflejada en la parte superior de la ventana, tanto en dBuV/m como en dBm.

En cuanto al análisis de mejor servidor → primer servidor, nos indica las zonas en las que cada servidor ofrece mejor cobertura que los demás. Si el análisis de cobertura compuesta nos muestra el mejor nivel de cobertura en

cada punto del terreno, el análisis de mejor servidor nos muestra qué repetidor es el que produce dicho nivel de cobertura en tal punto.

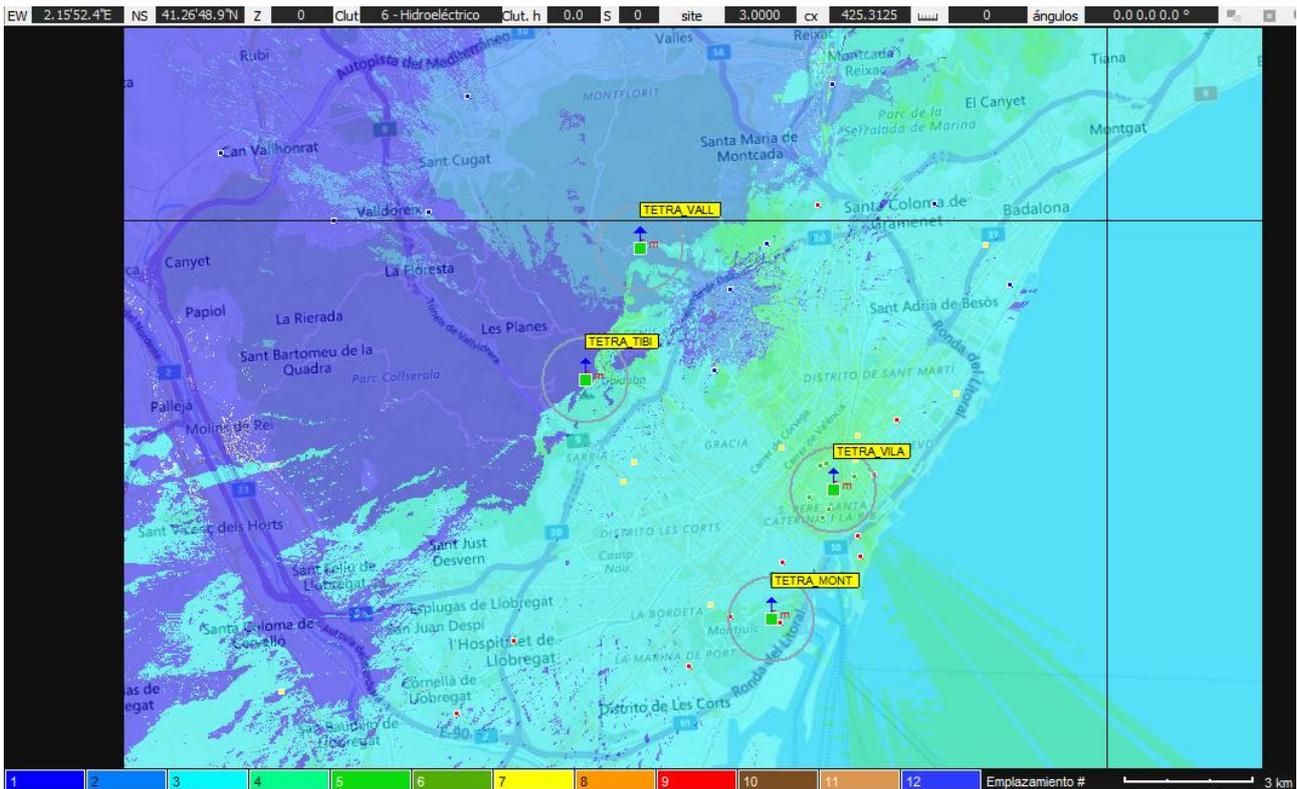


Figura 4.15. Cobertura mejor servidor TETRA (Caso 1)

En este caso, se asocia cada repetidor con un color, y se muestra la zona donde la cobertura de cada uno predomina ante los demás. Como vemos, en este caso los colores por defecto no se distinguen demasiado y pueden dar lugar a confusión. Para que esto no suceda, podemos cambiar los colores de cada servidor en Herramientas → Paleta de usuario, donde podremos cambiar los colores de la leyenda según los niveles de las diferentes medidas (altitudes, cobertura, porcentajes, etc.).

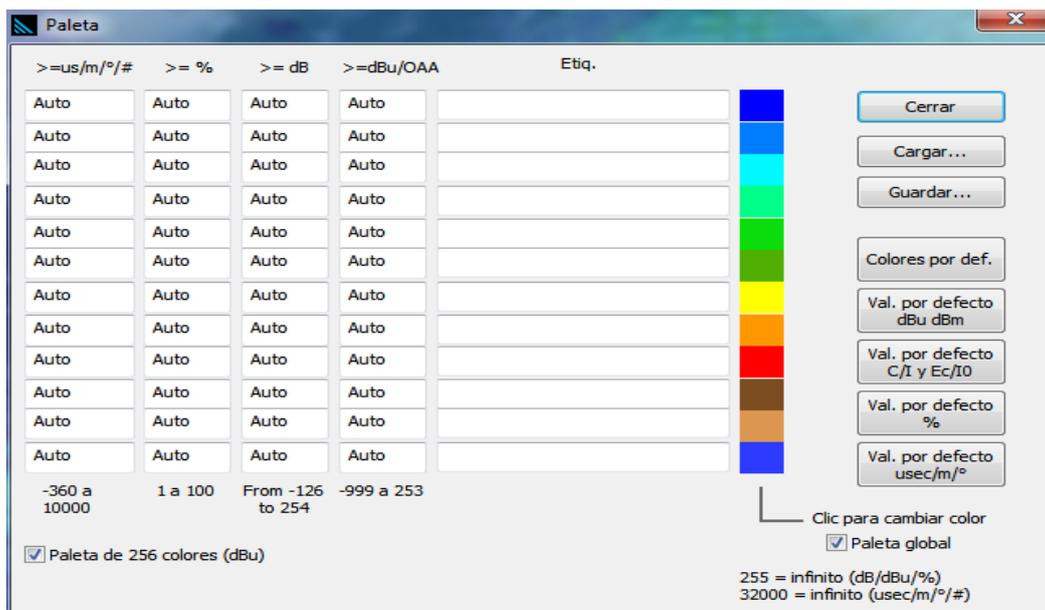


Figura 4.16. Paleta de usuario

Manejando la paleta a nuestro antojo podemos conseguir mayores contrastes para señalar mejor algunas zonas del mapa según qué clasificación queramos hacer, en este caso, la cobertura del mejor servidor quedaría así:

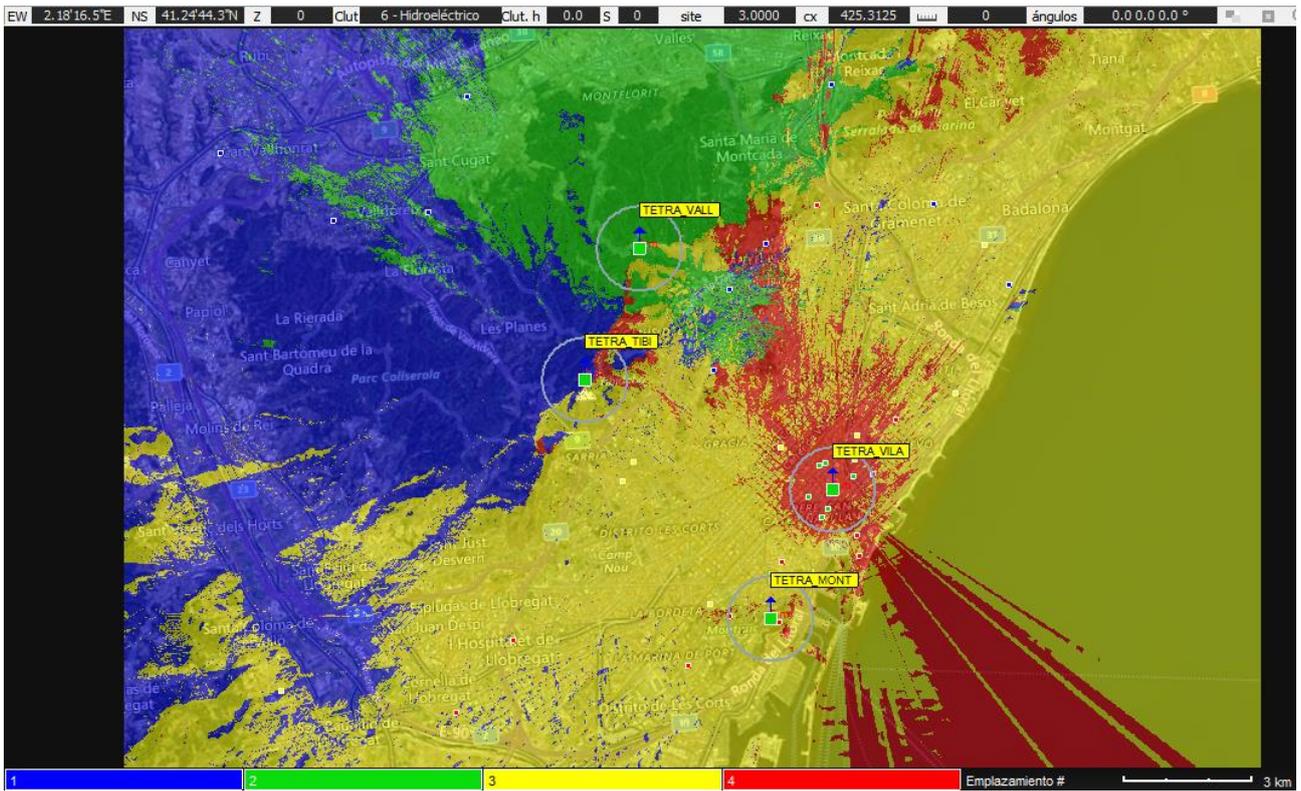


Figura 4.17. Mapa cobertura mejor servidor con contraste

Llegados a este punto, lo próximo es estudiar la interferencia producida en la red. Para ello vamos a recordar un par de conceptos sobre interferencia.

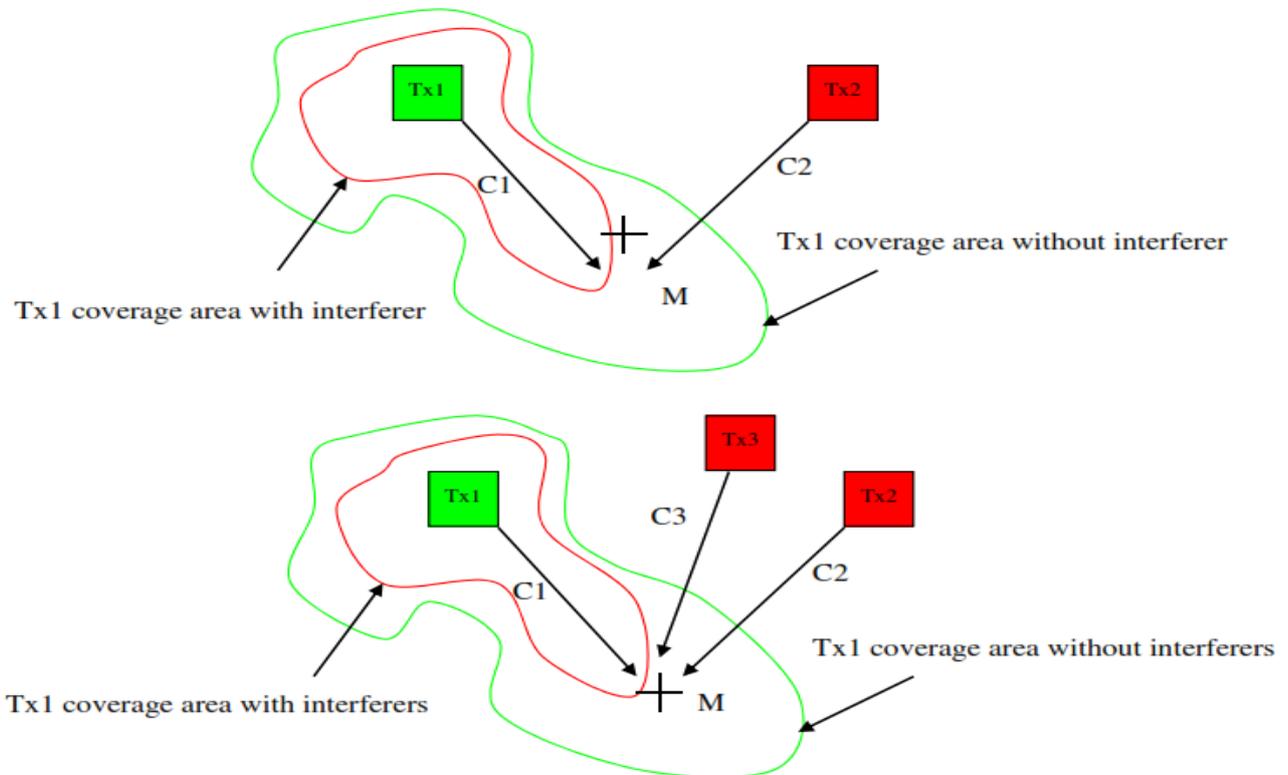


Figura 4.18. Interferencia con uno y varios interferentes

Comenzamos explicando la interferencia con un solo interferente. Para que se produzca interferencia en el punto M por parte de Tx2, siendo C1 la señal deseada, se debe cumplir:

- $C1 \text{ (dB}\mu\text{V/m)} > \text{Umbral cobertura Tx1 (dB}\mu\text{V/m)}$
- $C1/C2 \text{ (dB)} < C/I_{\text{requerido}} \text{ (dB)} - \text{RXAPA (dB)} - \text{XPD (dB)}$

Donde $C/I_{\text{requerido}}$ es la relación portadora/interferencia o relación de protección, RXAPA es la atenuación del patrón de la antena receptora en la dirección de la fuente interferente (*RX Antenna Pattern Attenuation*) y XPD es la discriminación de polarización cruzada (*Cross-Polar Discrimination*).

Definimos la NFS (*Nuisance Field Strength*, nivel de molestia de la comunicación) como:

$$\text{NFS}_2 \text{ (dB}\mu\text{V/m)} = C2 \text{ (dB}\mu\text{V/m)} + C/I_{\text{requerido}} \text{ (dB)} - \text{RXAPA (dB)} - \text{XPD (dB)}$$

Con lo que, redefiniendo la 2ª condición, tenemos que:

$$C1 \text{ (dB}\mu\text{V/m)} < \text{NFS}_2 \text{ (dB}\mu\text{V/m)}$$

Extrapolando al caso en el que tenemos varias fuentes interferentes, las condiciones para la interferencia quedan definidas así:

- $C1 \text{ (dB}\mu\text{V/m)} > \text{Umbral cobertura Tx1 (dB}\mu\text{V/m)}$
- $C1 \text{ (dB}\mu\text{V/m)} < \text{Max}_{j \neq 1} (\text{NFS}_j) \text{ (dB}\mu\text{V/m)}; \forall j \in \mathbb{N}$

En cuanto al RXAPA, este viene definido por el patrón de radiación de la antena, con lo cual este parámetro no lo podemos tocar una vez definido el patrón de radiación de la antena, aunque si podríamos cambiar el tipo de antena a utilizar, pero de momento nos olvidamos de esta opción. La relación de protección la vamos a fijar tal y como dice el estándar TETRA, y hemos definido dicha relación para interferencia cocanal y de canal adyacente tal y como vimos en la Figura 4.11. Entonces cabría modificar la XPD para disminuir la NFS. Esta acción tendría cabida en el caso de haber transmisiones cercanas a nuestras bandas de interés por parte de señales interferentes, pues podríamos configurar el parámetro si la polarización de dicha interferencia es distinta a la que estamos usando nosotros, o bien en el caso de que alguien quisiera transmitir en esta banda simultáneamente en polarización distinta a la que se usará en la red a desplegar. Para reflejar estos casos fijaremos la XPD global en 3 dB. Por ello, los valores de la XPD comparando transmisores y receptores serán como sigue en la tabla 4.6.

		Polarización RX			
		Horizontal	Vertical	Circular	Elíptica
Polarización TX	Horizontal	0 dB	3 dB	3 dB	3 dB
	Vertical	3 dB	0 dB	3 dB	3 dB
	Circular	3 dB	3 dB	0 dB	3 dB
	Elíptica	3 dB	3 dB	3 dB	0 dB

Tabla 4.6. XPD global de 3dB

Con esto, estamos listos para configurar los parámetros del análisis de interferencia. Si vamos a Cobertura → Interferencia de Red → Modo C/I... podemos comenzar a configurar los parámetros para dicho análisis.

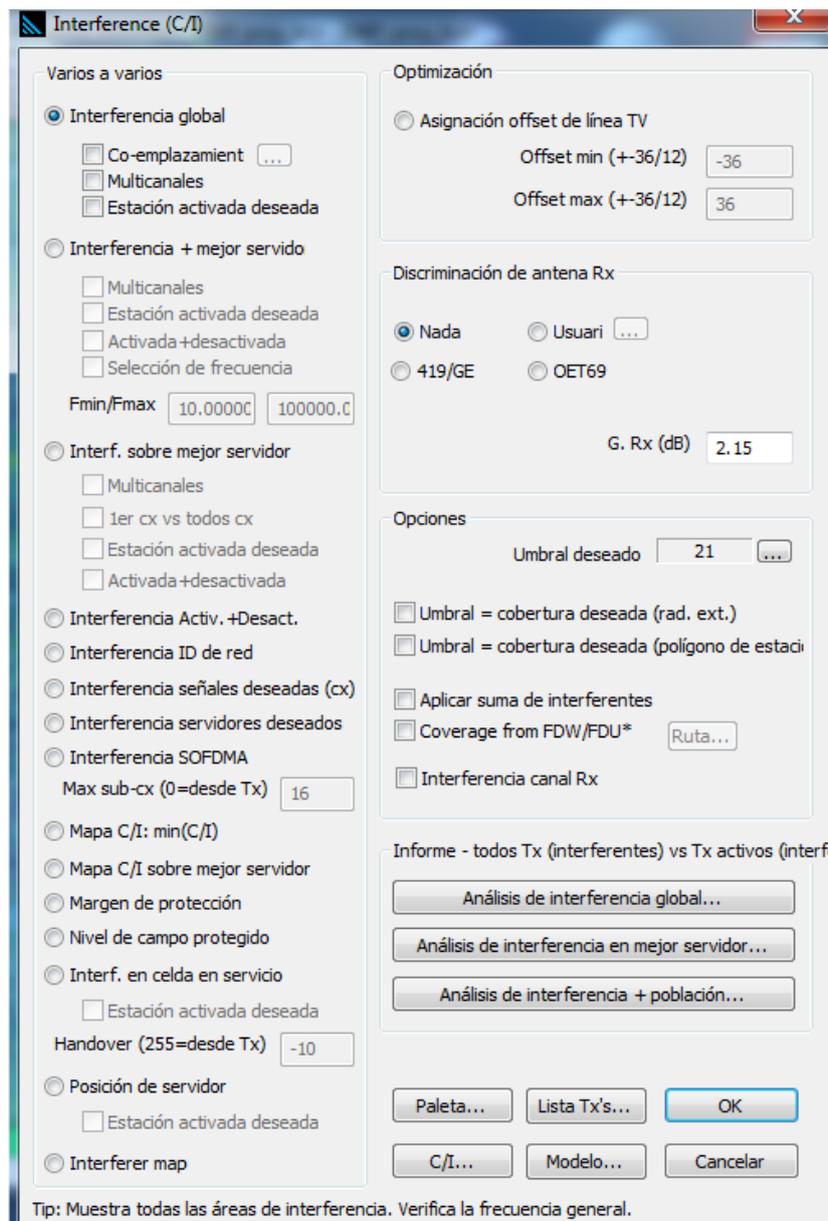


Figura 4.19. Ventana de análisis de interferencia

En esta ventana se nos presentan opciones para configurar los parámetros del análisis y las opciones para las distintas representaciones que queramos hacer de la interferencia (interferencia global, interferencia en el mejor servidor, etc.). Como bien hemos comentado anteriormente, para que el análisis de la interferencia sea posible nos hacen falta conocer 3 cosas: relación de protección, patrón de radiación y discriminación de la polarización cruzada. Para fijar la primera y tercera característica debemos dirigirnos a la opción “C/I...”, mientras que para fijar la segunda debemos hacerlo en el cuadro “Discriminación de antena Rx”. Para ello seleccionaremos la opción de fijar la discriminación de antena Rx por el usuario (figura 4.20), y fijaremos la ganancia de las antenas omnidireccionales de las MS (0 dBd, 2.15 dBi). En la opción “Diagrama-H” cargamos el mismo fichero de antena que hemos usado para la simulación, con el fin de recrear el plano horizontal del patrón de radiación de nuestra antena receptora, para así poder calcular el RXAPA, explicado anteriormente.

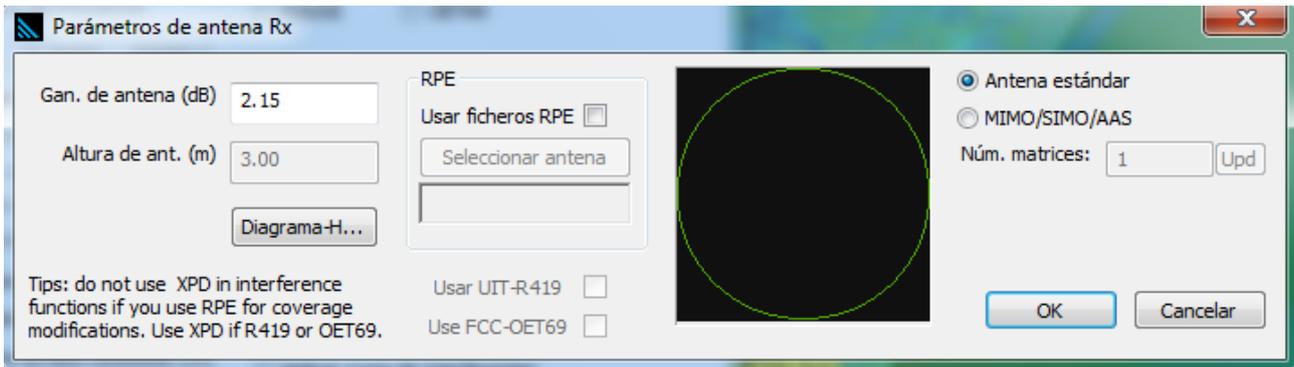


Figura 4.20. Discriminación de antena Rx omnidireccional

Una vez fijada esta característica, vamos a la ventana para fijar las otras dos, en la opción “C/I...”. En esta ventana podremos elegir la relación de protección para el análisis de varias fuentes distintas, de mayor a menor prioridad:

- Prioridad 1: C/I a partir de matrices NFD
- Prioridad 2: Tablas C/I conforme estándares varios
- Prioridad 3: C/I a partir de estaciones Tx/Rx
- Prioridad 4 (por defecto): Máscara C/I (dB) múltiple

Para no complicar el análisis más de lo necesario, y ya que hemos fijado la relación de protección en todas las BS tal y como se mostró en la figura 4.11, marcaremos la casilla de prioridad 3 para coger de ahí el dato. Así mismo, configuramos la opción por defecto para que tenga los mismos niveles C/I para la interferencia cocanal ($N=0$) y la interferencia de canal adyacente ($N=1$), sin hacer distintiva esta relación para el canal piloto.

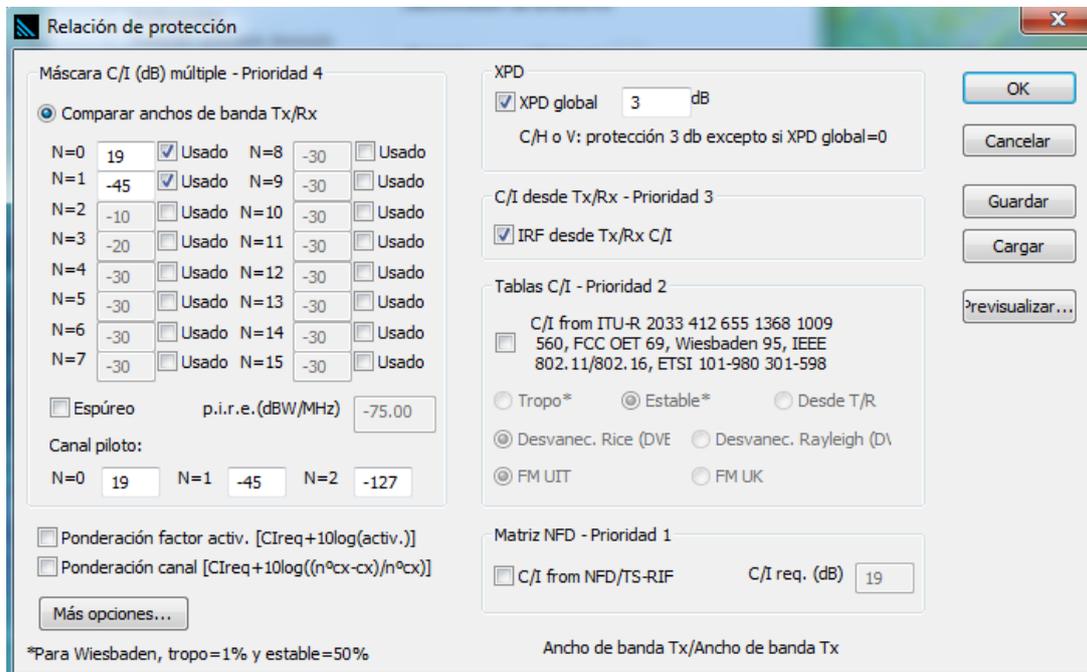


Figura 4.21. Configuración C/I y XPD

También en esta ventana se configura la XPD global, que como comentamos con anterioridad, se fijará en 3 dB. No se efectuarán ponderaciones según el factor de actividad de las BS ni a ningún canal frente a otro a la hora de calcular la C/I, por lo que dejamos esas casillas sin marcar.

En “Más opciones...” podemos filtrar para tener en cuenta o no equipos de ciertas características a la hora de analizar la interferencia, pero para nuestro caso no hace falta cambiar nada en dicha pestaña. Por último, en “Previsualizar...”, sacamos un informe sobre la interferencia antes de elegir ningún análisis en concreto, donde podemos ver qué estaciones interfieren la señal de las estaciones deseadas, las frecuencias de las mismas, la relación C/I entre las mismas y la fuente de la que hemos sacado la C/I. Este informe se muestra en el Anexo B.

Para obtener detalles tras realizar el análisis, nos vamos a las opciones de informe que hay en la ventana de análisis de interferencia.

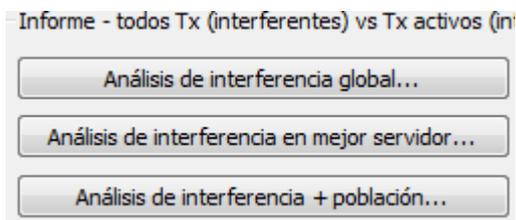


Figura 4.22. Detalle opciones informe

De estos informes nos interesan los dos primeros: interferencia global e interferencia en mejor servidor. El análisis de interferencia + población se basa en la estadística para ver qué porcentaje de la población está interferida según los porcentajes de población definidos en las distintas capas del clutter, y nosotros al tener una población fija y bien definida no nos interesa. Estos informes también se muestran en el Anexo B.

En cuanto a los modos de análisis de la interferencia varios a varios, como muestra la figura 4.19 en su columna izquierda, podemos realizar diferentes tipos de análisis de interferencia según nuestros intereses. Activando estas opciones, además del resumen del análisis en informes, obtendremos los mapas de interferencia. Sus propósitos son variados, pero los más importantes son los 4 siguientes, que son los que me van a aportar mayor cantidad de información:

- **Interferencia global:** cada punto del mapa se considera interferido si al menos una de las señales recibidas en dicho punto es interferida. Muestra un valor en el display de 255 si el punto está interferido en la manera que lo hemos definido antes, o el valor de cobertura en dicho punto, en dBuV/m, en caso de no estar interferido. Los puntos interferidos saldrán del color que hayamos definido en la paleta (por defecto, rosa). Este análisis puede parecer algo inútil si pensamos que hay señales que llegan desde repetidores lejanos que no pretendemos que den cobertura a ese punto al haber otros repetidores que proporcionen mayor cobertura en dicho punto, como pudiera ser, por ejemplo, el mejor servidor. Para nuestro propósito, este análisis es interesante, si consideramos que en el caso de que caiga uno de los repetidores, las MS se podrán resintonizar con otro repetidor, y si dicha señal también está interferida, dicha MS no tendrá ninguna comunicación de respaldo posible. Podemos observar el mapa de interferencia en la figura 4.23.
- **Interferencia sobre mejor servidor:** cada punto del mapa se considera interferido en el caso de que la señal recibida por el mejor servidor en dicho punto esté interferida. Muestra un valor en el display de 255 si el punto está interferido en la manera que lo hemos definido antes, o el número del mejor servidor que proporcione cobertura en dicho punto, en caso de no estar interferido. Los puntos interferidos saldrán del color que hayamos definido en la paleta (por defecto, rosa). Nos va a servir para saber si el sistema puede proporcionar cobertura a las MS funcionando a pleno rendimiento sin que se produzcan interferencias debidas a otros repetidores de nuestra red. Podemos observar el mapa de interferencia en la figura 4.24.
- **Mapa C/I: min (C/I):** Como el caso de la interferencia global, sólo que en este caso se muestra el valor mínimo de C/I en cada punto del mapa. Si filtrásemos por colores mediante la paleta para obtener los puntos con una C/I mayor a la definida para considerar que hay interferencia en un punto (en nuestro caso 19 dB para interferencia cocanal) obtendríamos un mapa muy parecido al de la figura 4.23. En este caso, la señal deseada, C, es la señal proporcionada por cada repetidor, limpia de interferencias. Podemos observar dicho mapa de interferencia en la figura 4.25.
- **Mapa C/I sobre mejor servidor:** es la analogía del caso anterior para el análisis de cobertura en mejor servidor: muestra el mínimo valor de C/I en cada punto del mapa, siendo la señal deseada, C, la señal proporcionada en dicho punto por el mejor servidor. De manera análoga al caso anterior, si filtrásemos por colores en dicho mapa, obtendríamos un mapa muy parecido al de la figura 4.24. Podemos observar el mapa de interferencia en la figura 4.26.

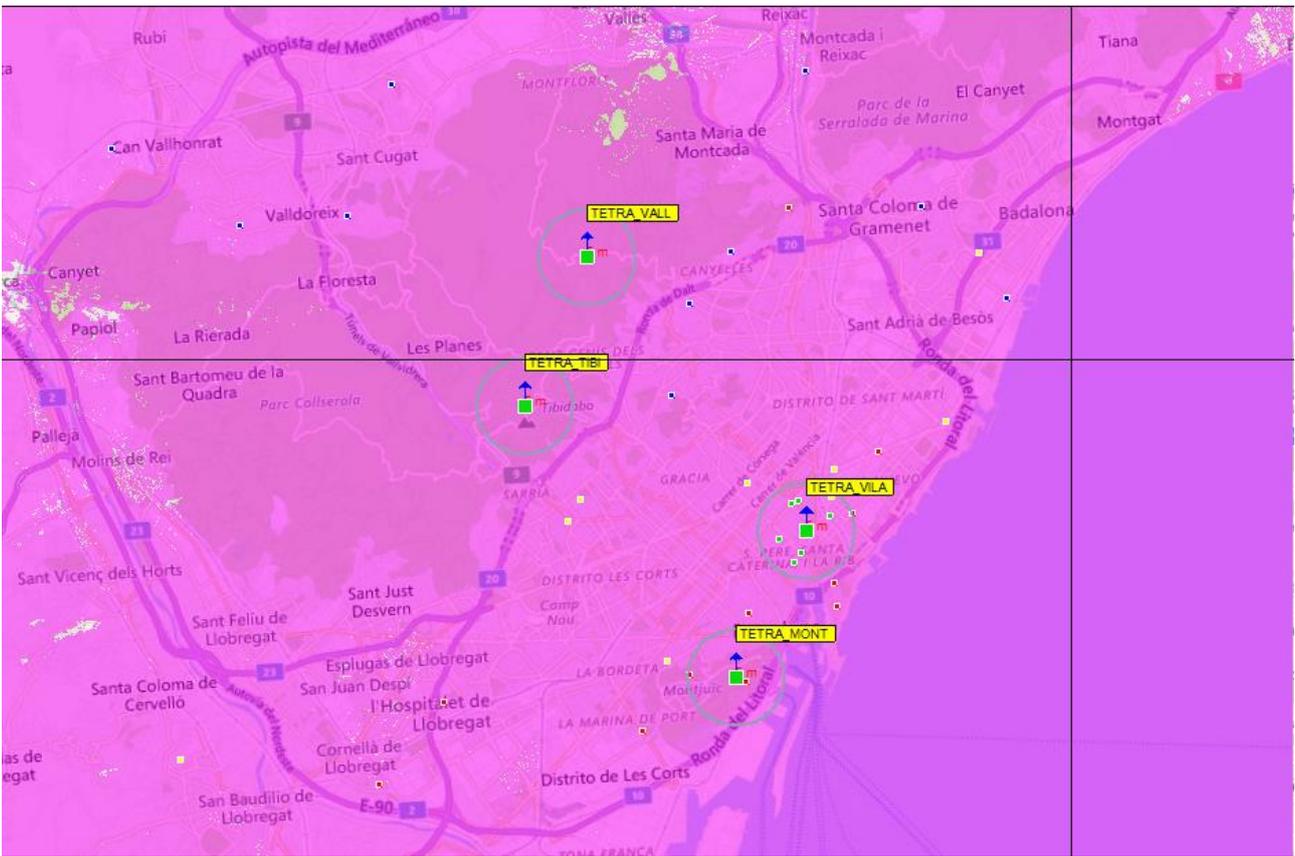


Figura 4.23. Mapa de interferencia global TETRA (Caso 1)

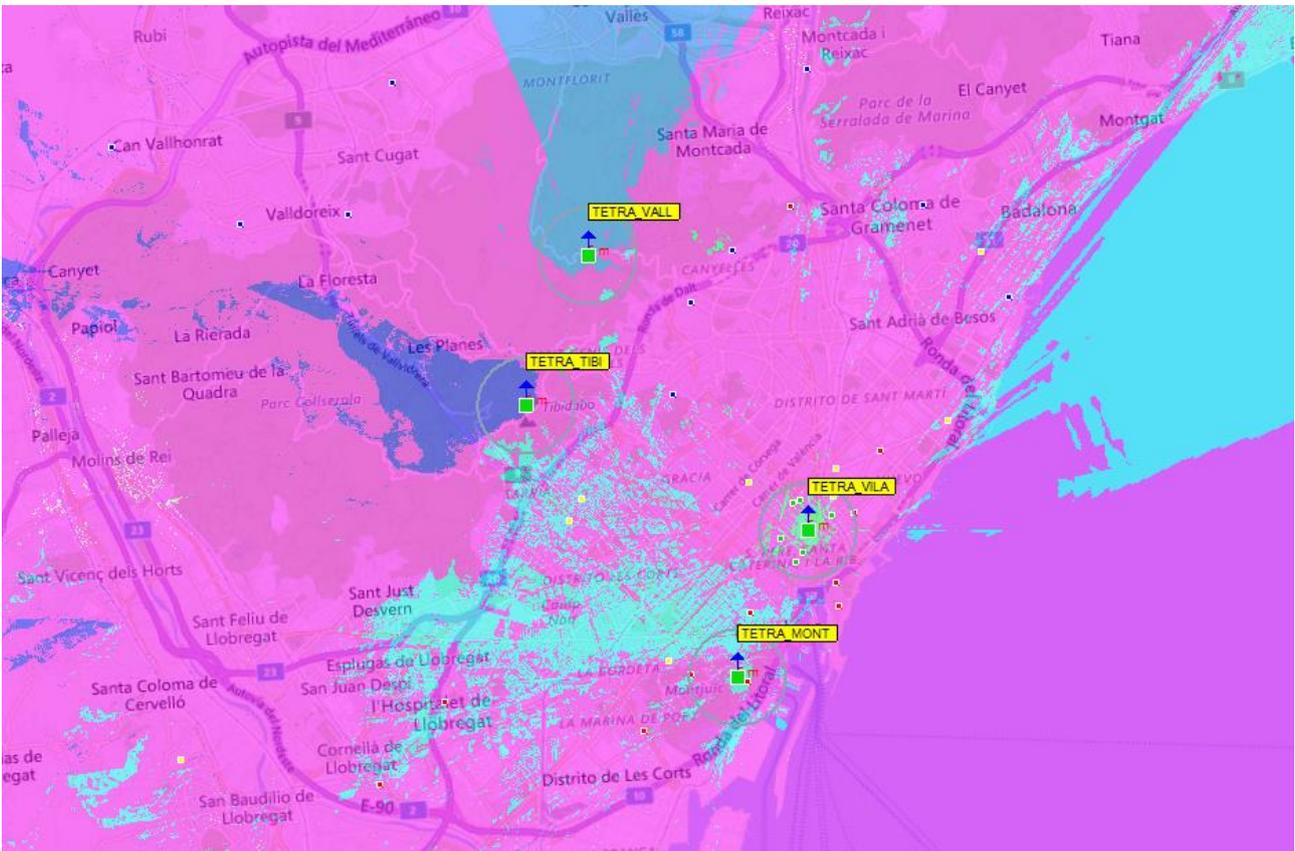


Figura 4.24. Mapa de interferencia en mejor servidor TETRA (Caso 1)

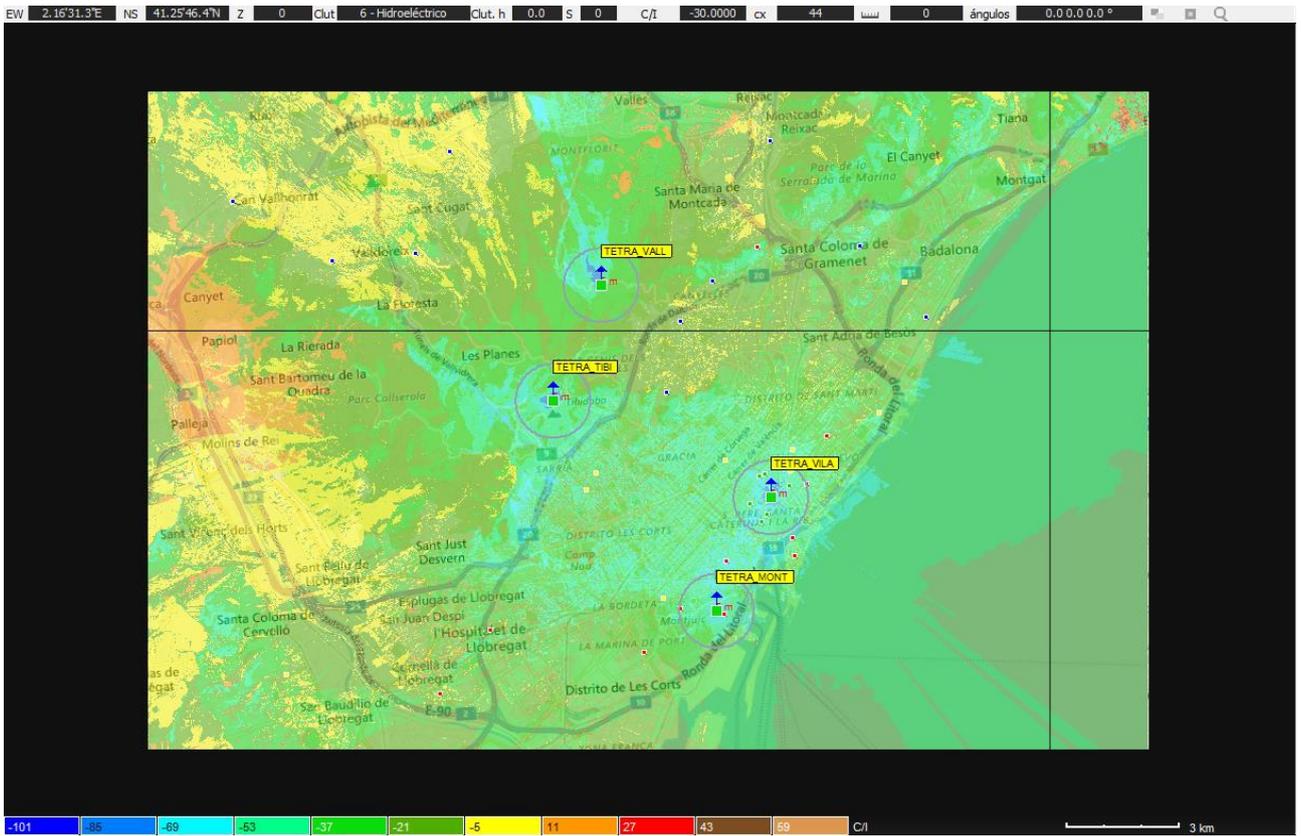


Figura 4.25. Mapa C/I: mínimo C/I global TETRA (Caso 1)

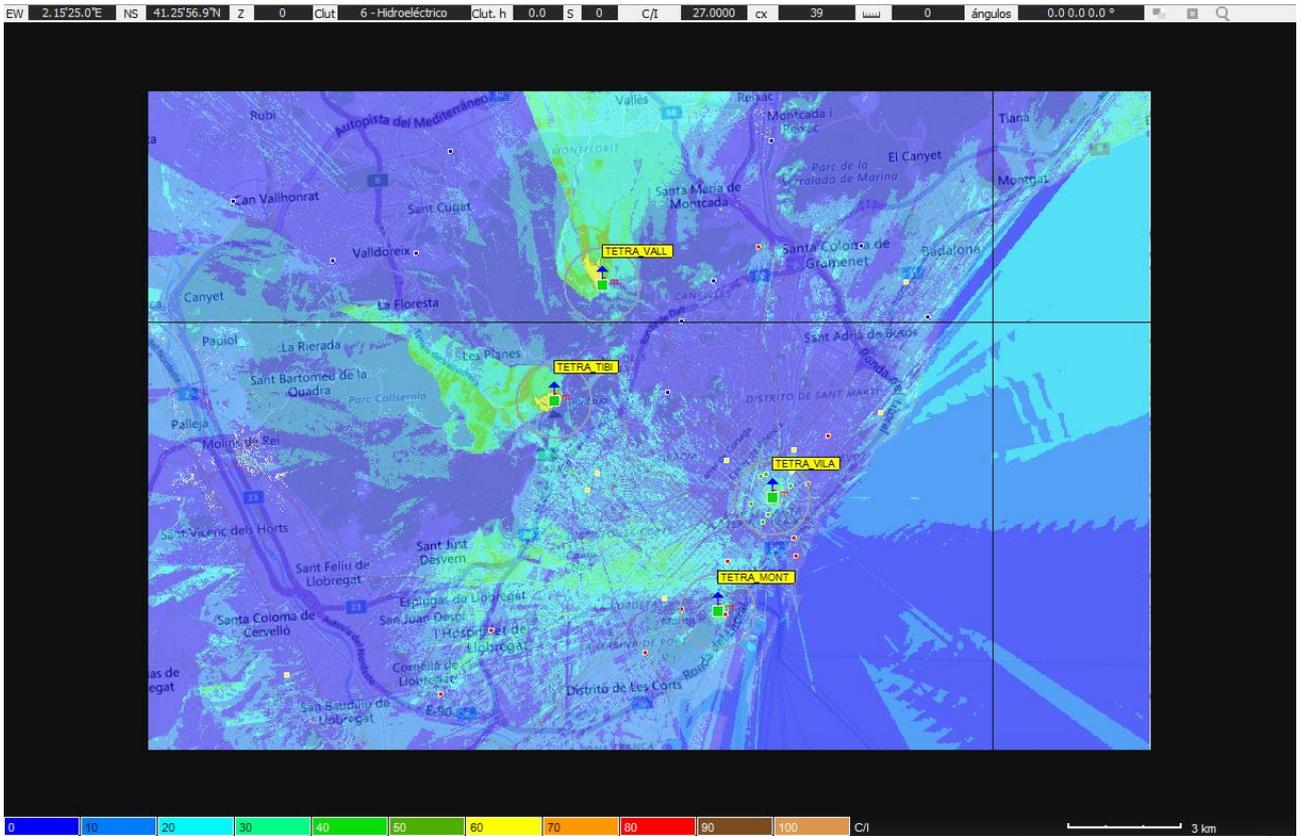


Figura 4.26. Mapa C/I: mínimo C/I en mejor servidor TETRA (Caso 1)

Si queremos analizar los resultados mostrados por los mapas anteriores, o si deseamos ver la interferencia producida en un punto en concreto desglosando los niveles de señal proporcionados en un punto por los distintos repetidores, ICS Telecom tiene una herramienta para hacerlo. Para ello, tendremos que hacer click con el botón derecho en el punto del mapa donde queramos obtener la información y dirigirnos a la opción Análisis P2P→Nivel de Tx recibido (elevación fijada). Tras esto se nos mostrará un cuadro donde debemos introducir el umbral de cobertura por encima del cual estarán las señales a tener en cuenta en dicho punto y la altura de la antena receptora en dicho punto. Introducimos dichos datos y el programa nos generará un informe como el dado en la figura 4.27, donde vemos las señales que hay en ese punto, la frecuencia con la que han sido emitidas, etc., de donde podemos razonar por qué dicho punto está o no interferido.

BST	Callsign	Dirección	FSR dBuV/m	PR dBm	Frec. (MHz)	Dist. (km)	Az (*)	ToA (usec)	Desde	Ruta
3	TETRA_MONT		73.0	-54.64	425.312500 V	9.81	6.32	32.74	Cobertura	nc
4	TETRA_VILA		65.0	-62.64	425.312500 V	6.72	356.84	22.40	Cobertura	nc

Figura 4.27. Informe puntual de señales recibidas

Ejemplo: cálculo de C/I en un punto a partir del informe puntual de señales recibidas:

En el caso de la figura, vemos que se reciben dos señales: una con una potencia de -54.64 dBm y otra con una potencia de -62.64 dBm. Con esto, observando que las señales tienen la misma frecuencia y que la C/I cocanal es de 19 dB, este punto tendrá una C/I de $-54.64 \text{ dBm} - (-62.64 \text{ dBm}) = 8 \text{ dB}$. $8 \text{ dB} < 19 \text{ dB}$, y por tanto dicho punto estará interferido. En caso de que la señal deseada sea la que viene del otro repetidor es peor aún, puesto que tendríamos $-62.64 \text{ dBm} - (-54.64 \text{ dBm}) = -8 \text{ dB} < 19 \text{ dB}$, por lo que también tendríamos interferencia.

Como vemos en los mapas de las figuras 4.23 y 4.24, casi en toda la superficie en la que vamos a situar las remotas existe interferencia entre los repetidores desplegados, con la consecuente degradación de la señal por debajo de la relación de protección. Para mejorar esto debemos de hacer un reajuste de las frecuencias disponibles para nuestro proyecto, con el fin de minimizar los niveles y áreas de interferencia tanto como sea posible. ICS Telecom dispone de una herramienta para llevar a cabo el plan de asignación de frecuencias que deseamos, para lo cual debemos de tener en cuenta cuatro cosas fundamentales:

- La necesidad de establecer un plan de frecuencias surge de minimizar los recursos a utilizar por nuestra red, de manera que se minimice o se anule la interferencia entre los elementos de nuestra propia red, y con elementos de redes externas en caso de tener conocimiento de ellos, usando el menor número de frecuencias posibles.
- El espaciado de las frecuencias dúplex debe estar calculado para no interferir con otras redes.

- El espaciado de los distintos canales de las emisoras colocadas en el mismo emplazamiento o emplazamientos cercanos, organizando el plan de manera que no se interfieran las frecuencias que tengo colocadas en los repetidores, ya sea por interferencia cocanal, interferencia de canal adyacente, etc.
- Las frecuencias que podemos utilizar en nuestra red, dado que el espectro electromagnético es un recurso muy limitado, y debemos asegurarnos desde un principio que las bandas de frecuencia que utilizemos estén totalmente libres para nuestro fin.

Para establecer el plan de asignación de frecuencias nos vamos a “Cobertura→Planificación de red→Asignación de frecuencias de la red” y nos aparecerá la siguiente ventana:

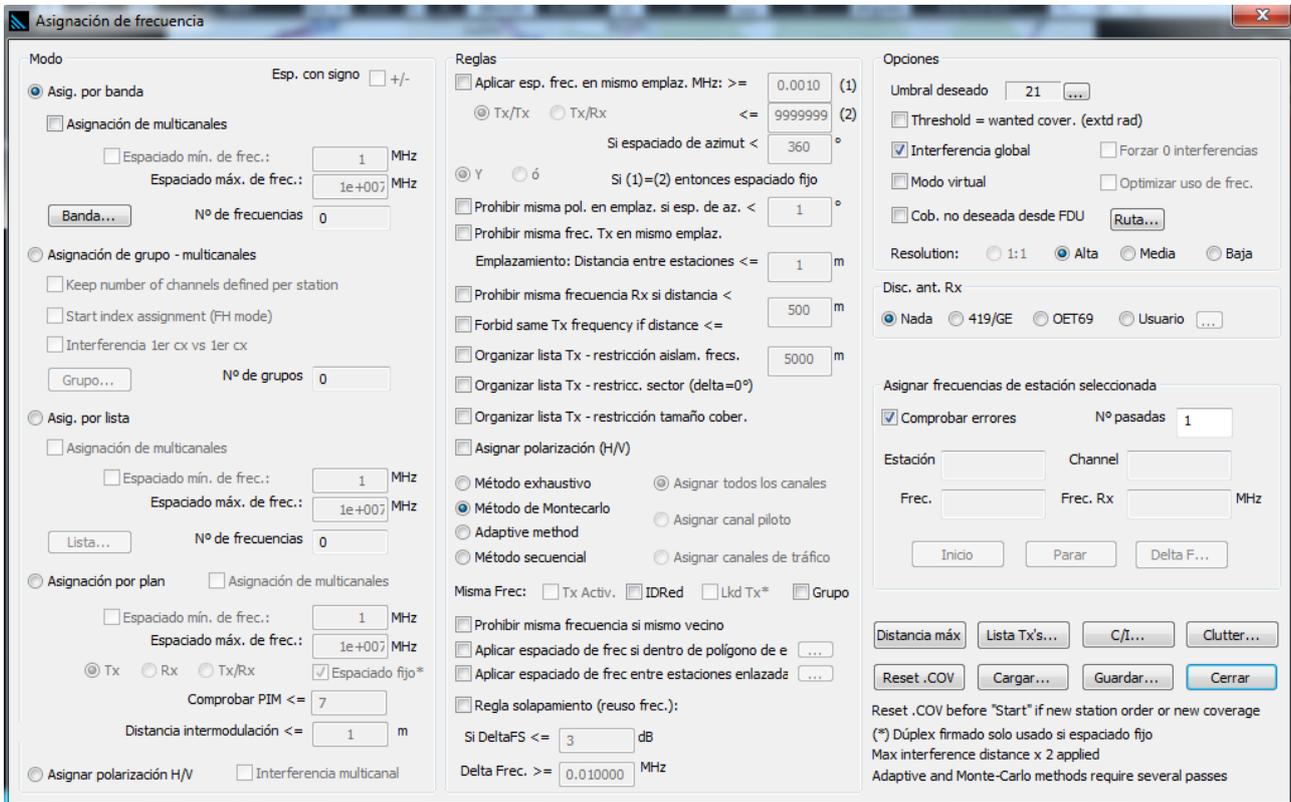


Figura 4.28. Ventana de plan de asignación de frecuencias

Tenemos cuatro modos para la asignación de frecuencias, como podemos ver a la izquierda de la ventana principal de asignación de frecuencias, algunos más útiles que otros según queramos asignación para multicanales, monocanales, etc. En nuestro caso, se empleará la asignación por banda. La banda de frecuencias a asignar en este caso será la banda UHF definida en la UN-74 del CNAF, comprendida entre 425,300 MHz y 425,800 MHz. Consideramos que no tenemos estaciones multicanal o varias estaciones en un mismo emplazamiento, de tal forma que se asignará una frecuencia a cada repetidor. De esta forma, haciendo click en “Banda...”, rellenamos:

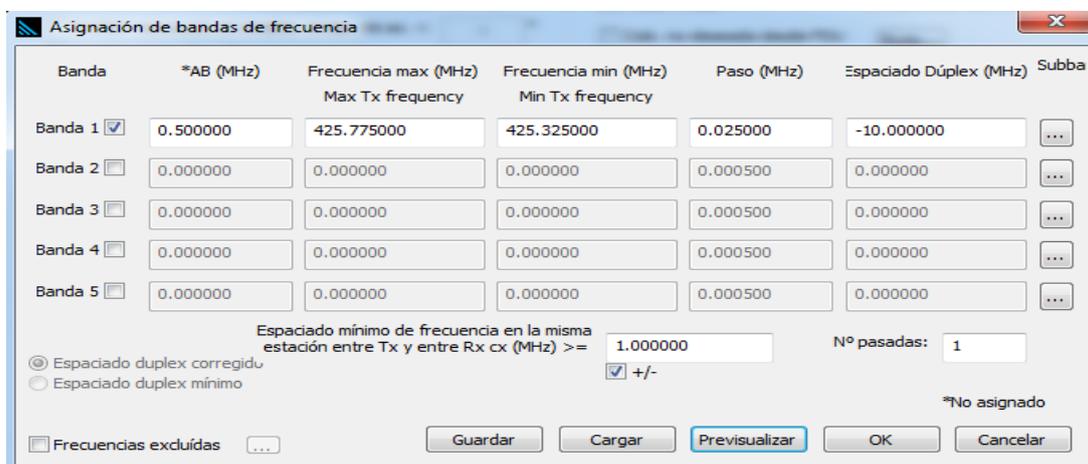


Figura 4.29. Banda a asignar

Si pulsamos sobre “Previsualizar”, la herramienta nos mostrará un informe completo de la atribución de frecuencias que se va a hacer³, disponible en el Anexo C.

En cuanto a las reglas a aplicar en la asignación de frecuencias, disponibles en la columna central de la figura 4.28, existen unas cuantas dedicadas en el caso de que tengamos estaciones multicanales o varias estaciones en un mismo emplazamiento, caso que no es el nuestro, aunque se podrían fijar en caso de ampliación de la red por necesidades de tráfico, tales como aplicar espaciamentos de frecuencia específicos en el mismo emplazamiento según los sectores definidos en el mismo con antenas sectoriales, prohibir la misma frecuencia de transmisión en las estaciones de un mismo emplazamiento, etc. De aquí marcamos:

- Prohibir misma frecuencia de transmisión en el mismo emplazamiento, por si se decidiese ampliar el número de BS en cada emplazamiento por necesidades de tráfico.
- Método de cálculo secuencial, indicado para redes con baja reutilización de frecuencias como puede ser una red TETRA, GSM o redes de difusión. Este método, junto al método adaptativo, son los más indicados para usar en redes con bajo índice de reutilización de frecuencias. La diferencia radica en que el método adaptativo tiene en cuenta la interferencia de las estaciones cuyas nuevas frecuencias no han sido asignadas aún, mientras que el método secuencial no lo hace. A cambio, el método secuencial es mucho más rápido que el adaptativo.
- Regla solapamiento (reuso frec.): antes de la asignación, ICS Telecom comprueba las parejas de BS cuyos puntos en el mapa que reciban cobertura de ambas, la diferencia de ambas coberturas sea menor que “Delta FS”. Todas las parejas de estaciones que cumplan esto anterior deben estar separadas, al menos, una cantidad “Delta Frec.” en frecuencia. Con esto nos aseguramos que en las áreas de traspaso, el traspaso entre 2 estaciones se lleve a cabo en buenas condiciones. Elegimos Delta FS = 3 dB y Delta Frec. = 25 kHz. Esto tendría especial sentido en el caso de realizar migraciones de centros de un sitio a otro, dado que no estamos considerando tener las RTU móviles y, por ello, no se realizará el análisis de traspaso entre los distintos repetidores.

En las opciones, marcaremos:

- Umbral deseado, en 21 dBuV/m, como en todos los cálculos.
- Interferencia global, para que tenga en cuenta la interferencia total en todos los repetidores a la hora de testear la calidad las frecuencias a asignar en ellos.
- Discriminación de antena, tal y como vimos en la figura 4.20.
- Comprobar errores, con lo que corrige posibles errores en los parámetros de las estaciones de acuerdo con la asignación de frecuencias.
- Número de pasadas igual a 2, para asegurarnos de repasar el cálculo de unas frecuencias que me optimicen el funcionamiento de la red.

Con todo esto ya estamos en condiciones de iniciar la asignación de frecuencias haciendo click en “Inicio”. Tras la asignación de frecuencias, nos genera un informe del porcentaje de interferencia global e interferencia en el mejor servidor, que en nuestro caso, al haber seleccionado toda esa banda libremente, tenemos 0% de interferencia en ambos casos⁴ (figura 4.30), dado que todas las frecuencias han sido reasignadas correctamente, espaciadas 50 kHz cada una, evitando así la interferencia de canal adyacente también. La única pega de la asignación de frecuencias es que te desactiva los canales de recepción en la pestaña “Canales” de los parámetros de las estaciones (figura

³ Para que sea efectiva, hay que tener en cuenta que debemos recalcular la cobertura una vez tengamos asignadas las frecuencias.

⁴ Nótese que tenemos 0% porque hemos considerado que tenemos total disponibilidad sobre la banda de 500kHz en UHF, pero en realidad, la asignación de frecuencias en el proyecto es un proceso iterativo, tratando de utilizar las menores bandas de frecuencia posibles.

4.10), cosa que podremos arreglar manualmente si en esta misma ventana, en “Esp. Tx/Rx (MHz)” marcamos -10.000000 (espaciamiento del dúplex) y hacemos click sobre “Despachar frecuencias Rx”.

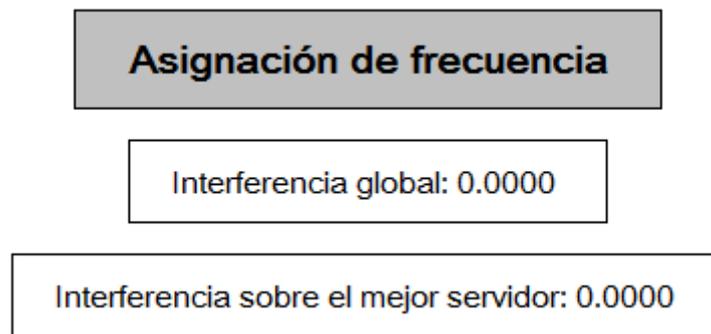


Figura 4.30. Interferencia tras asignación de frecuencias

Con la asignación de frecuencia realizada, al recalculer la cobertura, tenemos exactamente los mismos mapas de las figuras 4.14 y 4.15, y los mapas de interferencia ahora están limpios totalmente, al no existir interferencia alguna. Los mapas de C/I mínimos sí han cambiado con respecto a los de las figuras 4.25 y 4.26, y en ningún caso hay interferencia cocanal ni de canal adyacente, estando todos los niveles de C/I del mapa por encima de los 19 dB.

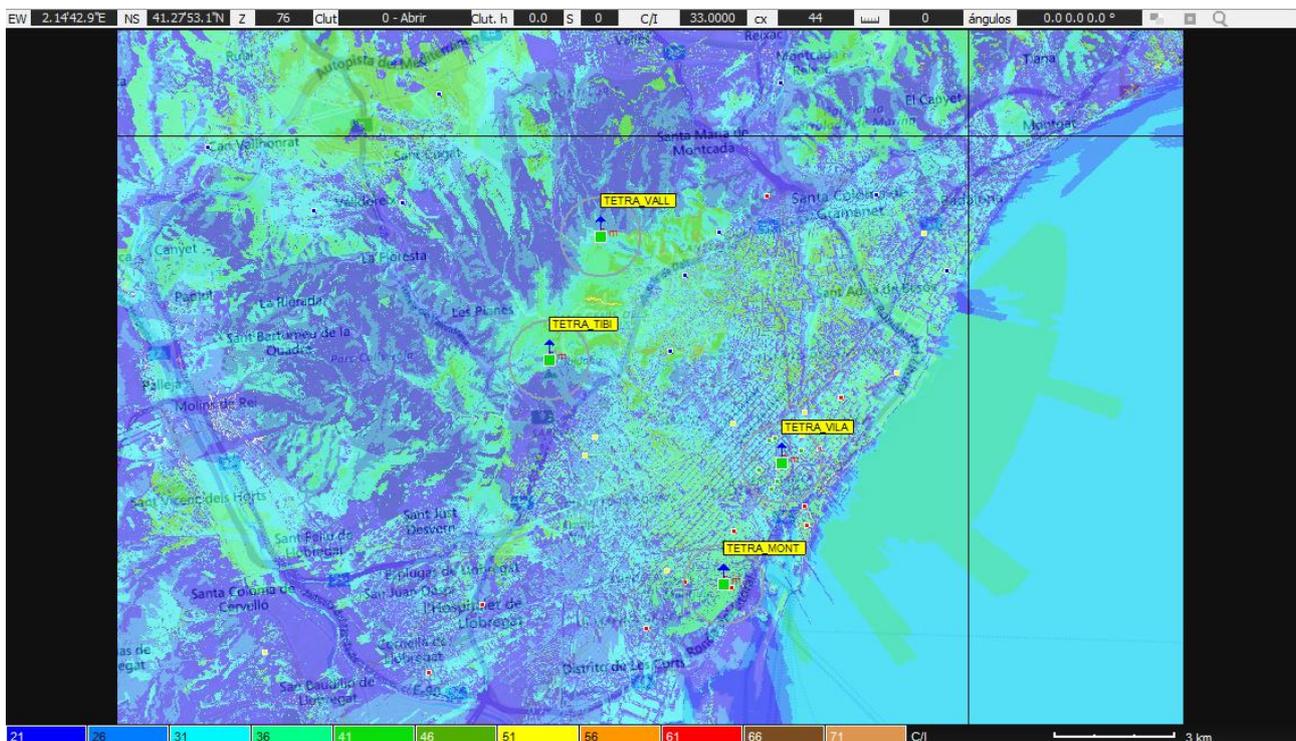


Figura 4.31. Mapa C/I: mínimo C/I global TETRA tras reasignación de frecuencias (Caso 1)

Nótese que la leyenda de colores ha cambiado también con respecto a las de las figuras 4.25 y 4.26, dado que los niveles C/I han aumentado en todo el mapa, tanto en el caso de la C/I global como en el de la C/I en el mejor servidor. Es más, al probar que no existe interferencia, la información que nos están mostrando los mapas son comparaciones entre los niveles de señal de los distintos repetidores en cada punto.

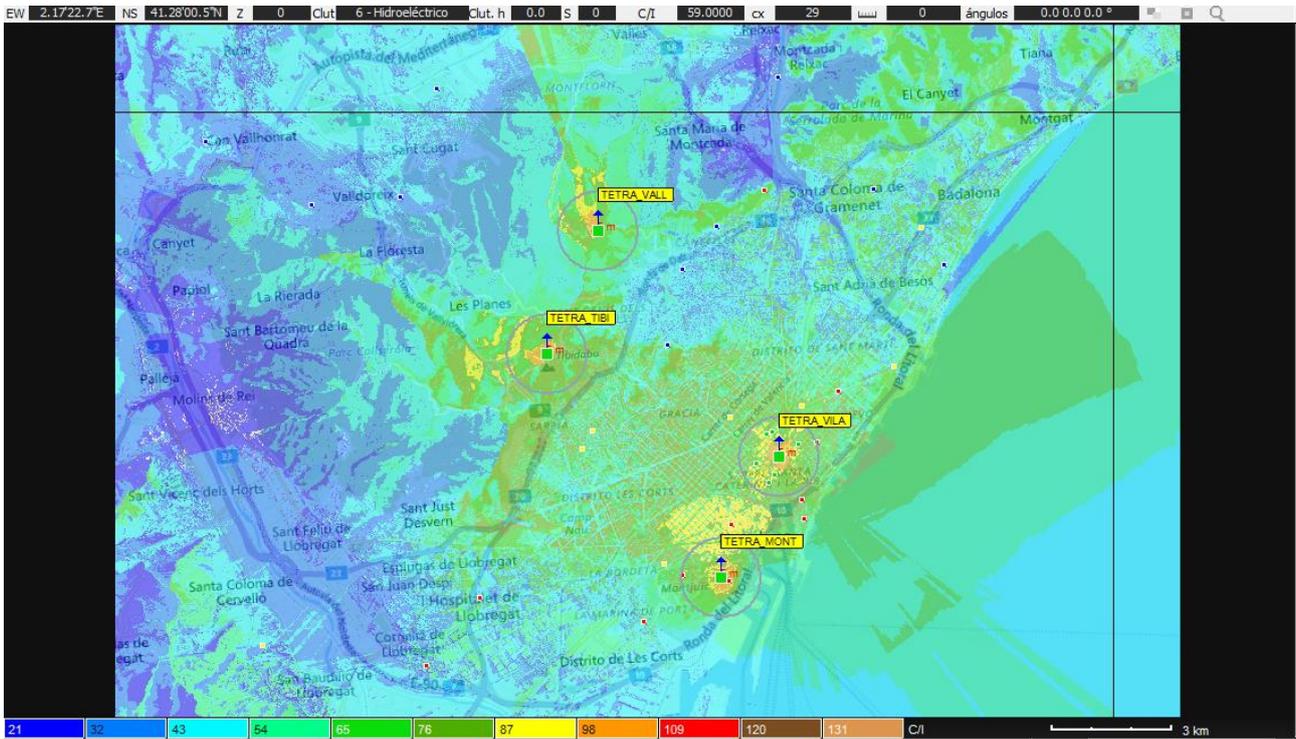


Figura 4.32. Mapa C/I: mínimo C/I en mejor servidor TETRA tras reasignación de frecuencias (Caso 1)

Una vez hemos ajustado las frecuencias de tal modo que no haya interferencias, pasamos a hacer análisis teniendo en cuenta los suscriptores de nuestra red. El primer paso para ello será realizar el emparentamiento de los suscriptores, es decir, asociarlos a repetidores determinados que les den cobertura. Si vamos a Suscriptor → Emparentamiento global... nos aparecerá la siguiente ventana:

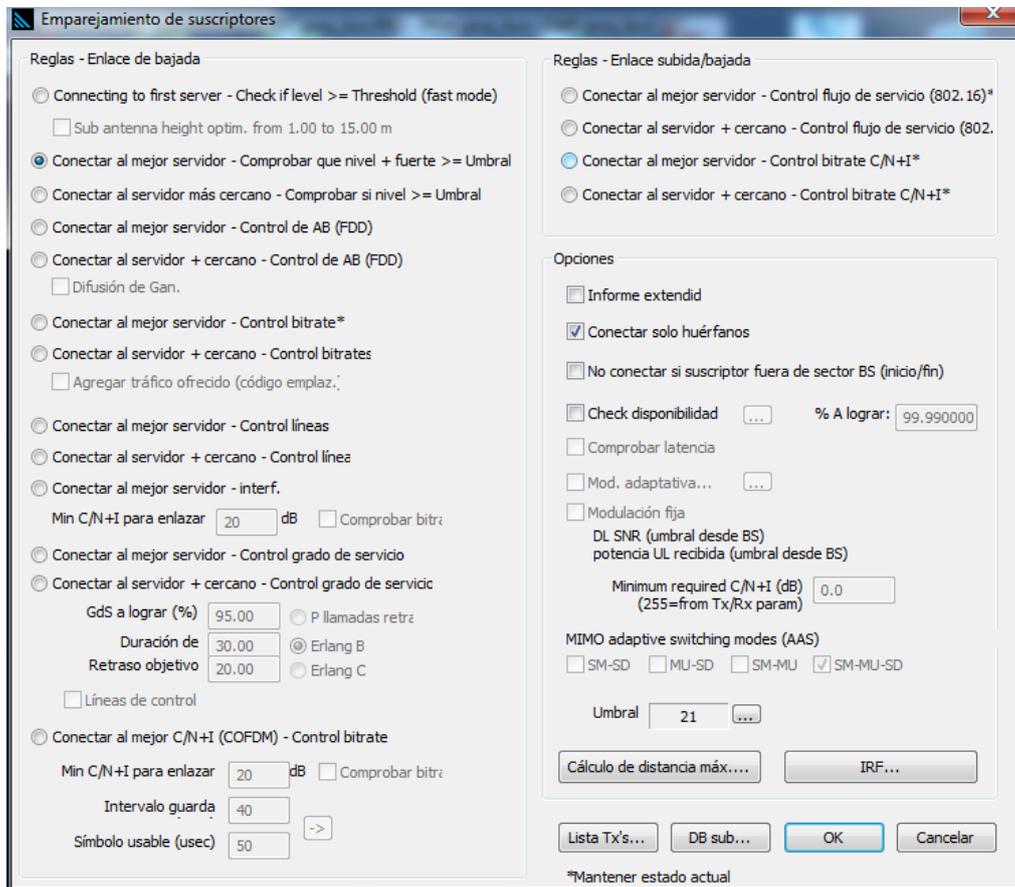


Figura 4.33. Ventana de emparentamiento de suscriptores

A la hora de asignar las reglas del enlace de bajada nos limitaremos en principio a dos opciones que sólo tienen en cuenta requisitos de cobertura, que son:

- Conectar al mejor servidor – comprobar que nivel + fuerte \geq Umbral
- Conectar al servidor más cercano – comprobar si nivel \geq Umbral

De esta manera, los suscriptores se emparentarán bien al repetidor que le ofrezca el mejor nivel de cobertura, o bien al repetidor más cercano que le ofrezca un nivel de señal en recepción mayor que el umbral definido. Hay otras reglas que concretan más según grado de servicio, ancho de banda, etc. pero de momento se verán estas dos reglas.

En opciones marcamos conectar sólo los suscriptores huérfanos. Ajustamos el umbral y la distancia, seleccionamos todos los suscriptores y realizamos el emparentamiento. Al realizar los distintos emparentamientos, obtenemos informes de cada uno de ellos, así como los emparentamientos hechos sobre el mapa. Esto se observa sobre el mapa viendo que los suscriptores ahora tienen flechas rosa apuntando sobre el repetidor con el que estén emparentados.

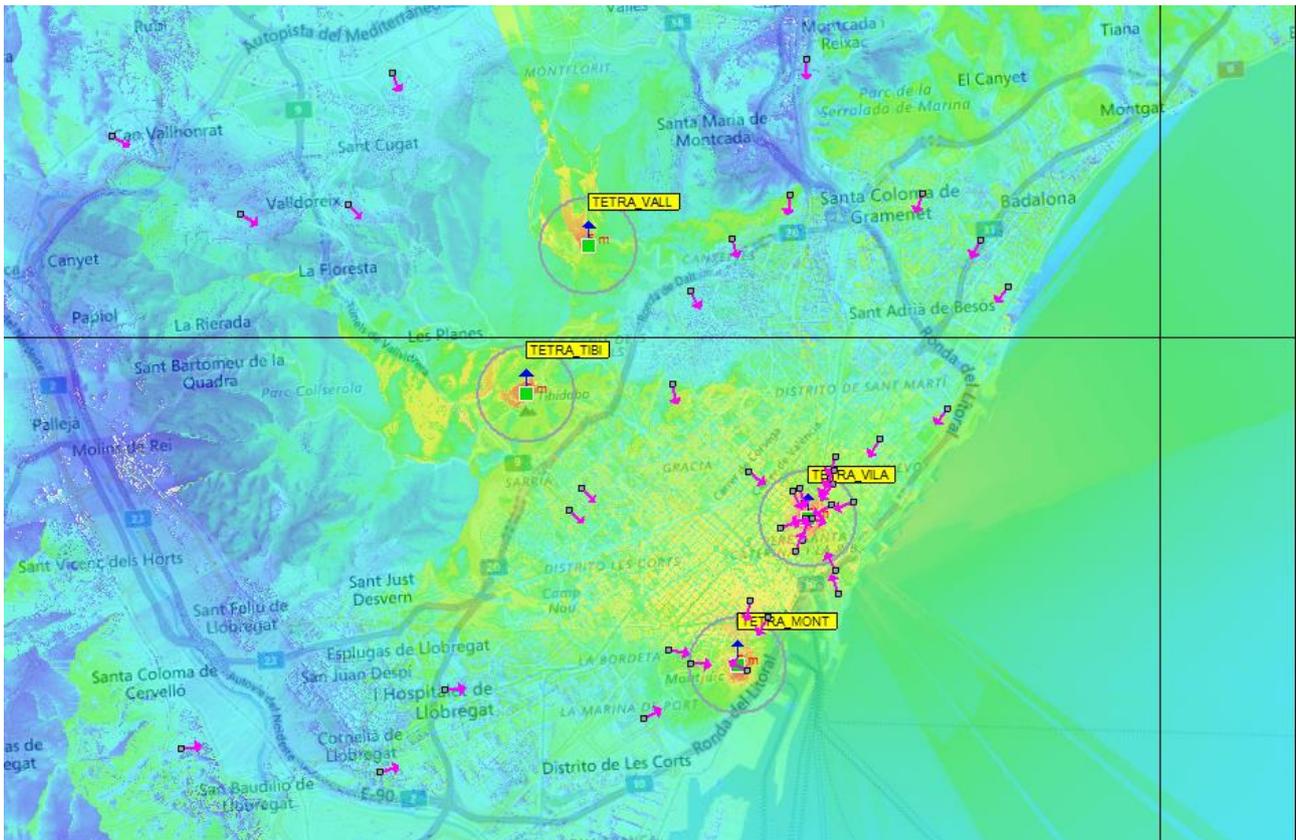


Figura 4.34. Mapa de suscriptores emparentados al mejor servidor TETRA

Nótese que al emparentar los suscriptores con los repetidores, sus antenas se sintonizarán a la frecuencia del repetidor con el que se emparentan, pero además varían su acimutal e incluso su tilt con tal de ajustarse perfectamente a la recepción de la señal que le da el repetidor correspondiente. Dichos parámetros son cambiados automáticamente al realizar el emparentamiento, y se pueden observar en la ventana de parámetros de los suscriptores, como vimos en la figura 4.12.

TRÁFICO DE ESTACIÓN - Enlace de bajada

Estación	BST	Suscriptores	Demanda	GdS B	Líneas	AB (MHz)	Mbits dl	TD dB	plazamie
TETRA_TIBI	1	5	0.00	100.00	0.0	0.13	0.0000	0	5
TETRA_VALL	2	8	0.00	100.00	0.0	0.20	0.0000	0	8
TETRA_MONT	3	8	0.00	100.00	0.0	0.20	0.0000	0	8
TETRA_VILA	4	20	0.00	100.00	0.0	0.50	0.0000	0	20

Total suscriptores en BBDD: 41

Total suscriptores en el mapa: 41

Total suscriptores emparentados (BBDD): 41 (100.00)

Total suscriptores emparentados (selección): 41 (100.00)

Figura 4.37. Informe de suscriptores emparentados al servidor más cercano TETRA

Una vez realizados los dos emparentamientos, con los datos obtenidos se podrían empezar a tomar decisiones respecto al despliegue de la red. Por un lado, si emparentamos los suscriptores con respecto al mejor servidor, vemos que hay sólo 2 RTU conectadas a uno de los repetidores, ya que recibe mejores niveles de cobertura de otros repetidores. Deberíamos valorar si quitar este repetidor. Esto nos daría un ahorro considerable en la red, pues sería un menor gasto en infraestructuras de telecomunicaciones, así como en las concesiones de las bandas de frecuencias por parte del estado, lo cual, además permite una posible optimización de frecuencias con la finalidad de que siga sin haber interferencias en la red utilizando un menor número de bandas de frecuencia. Pero, por otro lado, hay que tener en cuenta las especificaciones de tráfico y de grado de servicio de la red a desplegar, pues puede ser que para cumplir cierto grado de servicio necesitemos un mayor número de repetidores que puedan atender las peticiones de las RTU, teniendo que dejar ese repetidor y que éste dé cobertura a varias RTU a pesar de que lo haga con un menor nivel de cobertura que el mejor servidor. Además de esto, habrá que valorar si en un futuro piensan añadirse instalaciones en la zona y si merece la pena un sobredimensionamiento de la red a tal fin. De todas formas, tomamos el emparentamiento con el mejor servidor para nuestro caso, pues es el que mayores niveles de cobertura nos dará en los suscriptores.

Otro análisis a tener en cuenta desde el punto de vista de los suscriptores es el de los niveles de cobertura que reciben por parte de los repetidores para asegurarnos que la comunicación no tendrá problemas. Esto lo podemos hacer una vez calculada la cobertura global. Esto se puede hacer yendo a Suscriptor→Análisis→Suscriptor/es cubiertos... Este informe lo podemos ver en el Anexo D.

Se pedirá un nivel de señal de unos -90 dBm a la entrada del receptor para asegurar una buena recepción de la señal y contrarrestar posibles atenuaciones extra del entorno urbano, por lo que en aquellos centros donde vemos que el nivel está en torno a esta medida o por debajo del mismo, pondremos antenas directivas como medida para mejorar el margen en dichos centros. Con esto estamos metiendo 17 dB de margen con respecto a la sensibilidad que hemos definido en ICS Telecom (21 dBuV/m, -107 dBm con las antenas de 2,15 dB de ganancia). En el informe del Anexo D se han resaltado en amarillo aquellos centros en los que se colocarán las antenas directivas. Es lógico pensar que estas antenas se colocarán en aquellos centros que estén más alejados de los repetidores o bien en aquellos que estén situados en emplazamientos que no les llega buena señal. También se podrían dar otras soluciones como aumentar potencias, elevar antenas, cambiar de emplazamiento, etc. pero en este caso se ha optado por poner antenas directivas en los demás centros. Las ubicaciones de los centros con antenas directivas se pueden observar en la figura 4.38, y el cambio de patrón de radiación en dichos centros, en la figura 4.39.

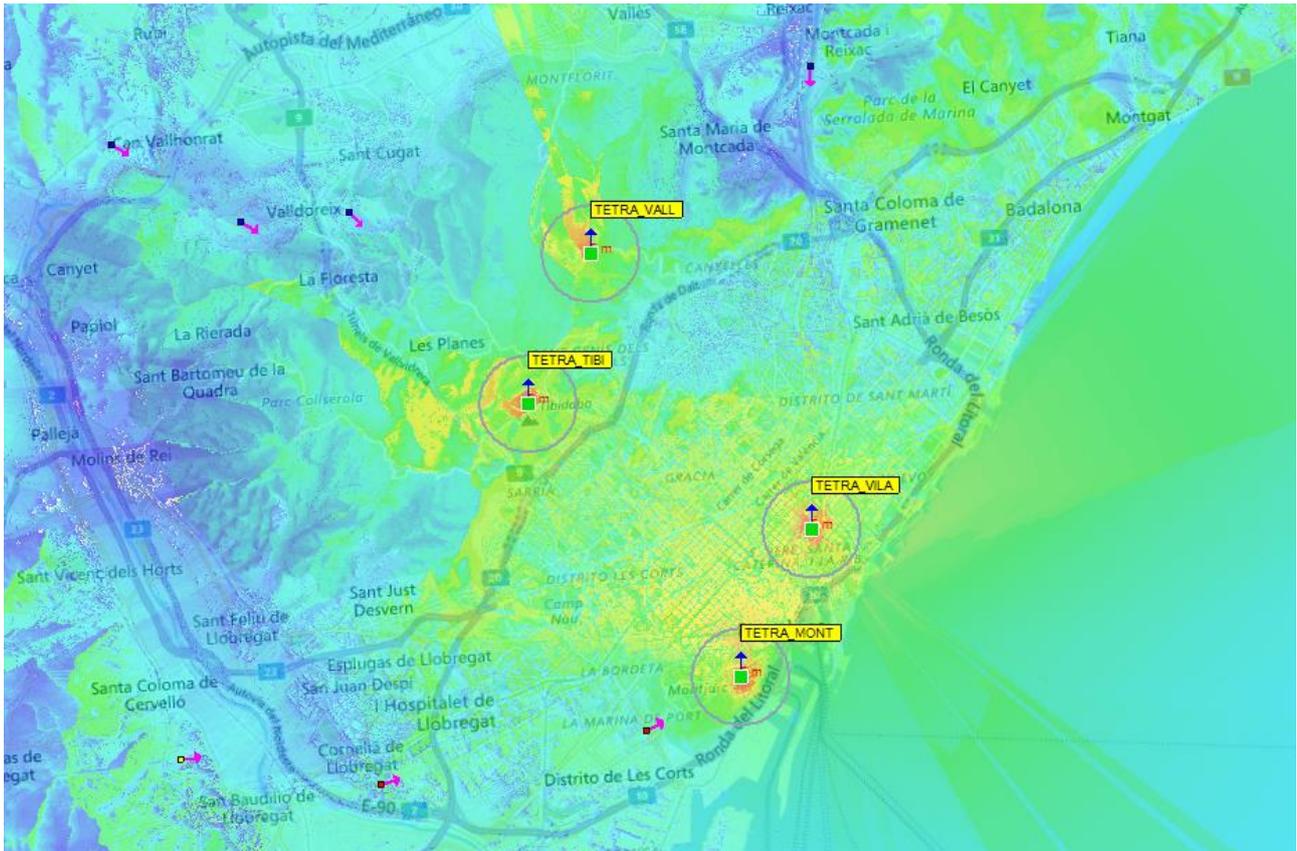


Figura 4.38. Centros con antenas directivas

Parámetros de suscriptor

Call-sign: TETRA_MONT Color: Cambiar... 2.026431 41.357648 30 4DEC M/G Cód. empl. 100540 Upd arch... p f

Coord.Ref.

Parámetros básicos Pot. nominal (W) 3 Dinámico (dB) 110 G. ant. Tx (dBi) 9.15 G. ant. Rx (dBi) 9.15 Pérd. (dB) Tx 0.00 Rx 0.00 Pérd. adic. Tx (dB) 1.00 Altura de ant. (m) 30.00 Acimut(0-359°) 81.48 Tilt (-90 +90°) 0.331 p.i.r.e(W) 19.59391	Parámetros de interferencia AB Tx (kHz) 25.00 AB Rx (kHz) 25.00 KTBf (dBm)* -105 [Calc...] ruido de fondo (dBm) -105 TIL (dBW) -137 [S7...] Retardo (us) 0 Portadora (dBm) -100 [Sat...] Threshold (dBuV/m) 30 Ec/I0 requerido (dB) 0 Eb/N0 (dB) sub/baj 0 0 Calidad de enlace % 50.000000 XPD (dB) 0.00 Modul. DQPSK (12)	Info administrativa Dirección Info (1) / Cluster Info (2) ID de Red Usuario Base... Fecha 0 aaaammdd Type ID C Enlace Grupo Nº de llamada 0 Adjunto 1 Base... Mean FS (ms/mu) 0.0 / 0.0 Sigma (ss/su) Calc... 0.0 / 0.0 Record: 4	Transmitiendo (mn) : 415.425000 MHz En recepción (mx) : 425.425000 MHz <input type="radio"/> FH/WB <input checked="" type="radio"/> Frecuencia fija TD (dB) 0 Initial power (W) 3.000000 [Init] Add. prop. losses (dB) 0 / 0 Tx/Rx Subscriber signal TETRA (11) NFD Estado de suscriptor: Tabla SQL de equipos BBDD equipos BBDD antenas Base de datos T/R Multimedia...
--	--	--	--

Radiación
 Antena 2D H+V (1 polarización) >
 Polar: Tx / Rx
 V / V
 H / H
 Clu / Clu
 M / M
 ./tamaño (m): 0.0
 STD
 MIMO
 SIMO
 AAS
 Nº matrices T/R 0 0 Upd

Parámetros de tráfico
 Calc... Calc...
 Kbit/s 36.00 dl ul 36.00
 Activ. 5 dl ul 5
 Líneas 0 0 0
 Mchips 0.000 Latencia ms 0
 Flujo de servicio...
 Erlang 0.000000 ...
 7042155_16
 7042155_16 Móvil Cargar... Guardar... OK Cancelar

Figura 4.39. Parámetros suscriptor con antena directiva

Debemos tener en cuenta que esta medida se toma sólo por tema de atenuaciones que no hayamos tenido en cuenta que puedan degradar la señal y hacer que no la recibamos. Con esta medida no estamos mejorando la relación señal a ruido, ya que con la nueva ganancia de la señal se amplifican tanto la señal deseada como el ruido recibido. Así pues, si determinamos la relación señal a ruido podremos ver con el informe del Anexo D si hay algún centro que pudiera verse afectado por el ruido. Del estándar TETRA tenemos la siguiente tabla para modulación $\pi/4$ -DQPSK:

Modelo de propagación	BER
Estático	0.01 %
Típico urbano (50km/h)	0.4 %
Terreno montañoso (200km/h)	3 %
Test ecualizador (200km/h)	2 %

Tabla 4.7. BER nominales en TETRA para modulación $\pi/4$ -DQPSK

Por lo tanto debemos asegurar una BER de 10^{-2} en todo momento, dado que nuestro caso es el estático. Si nos vamos a la gráfica de la modulación, lo relacionaremos con el correspondiente valor E_b/N_0 :

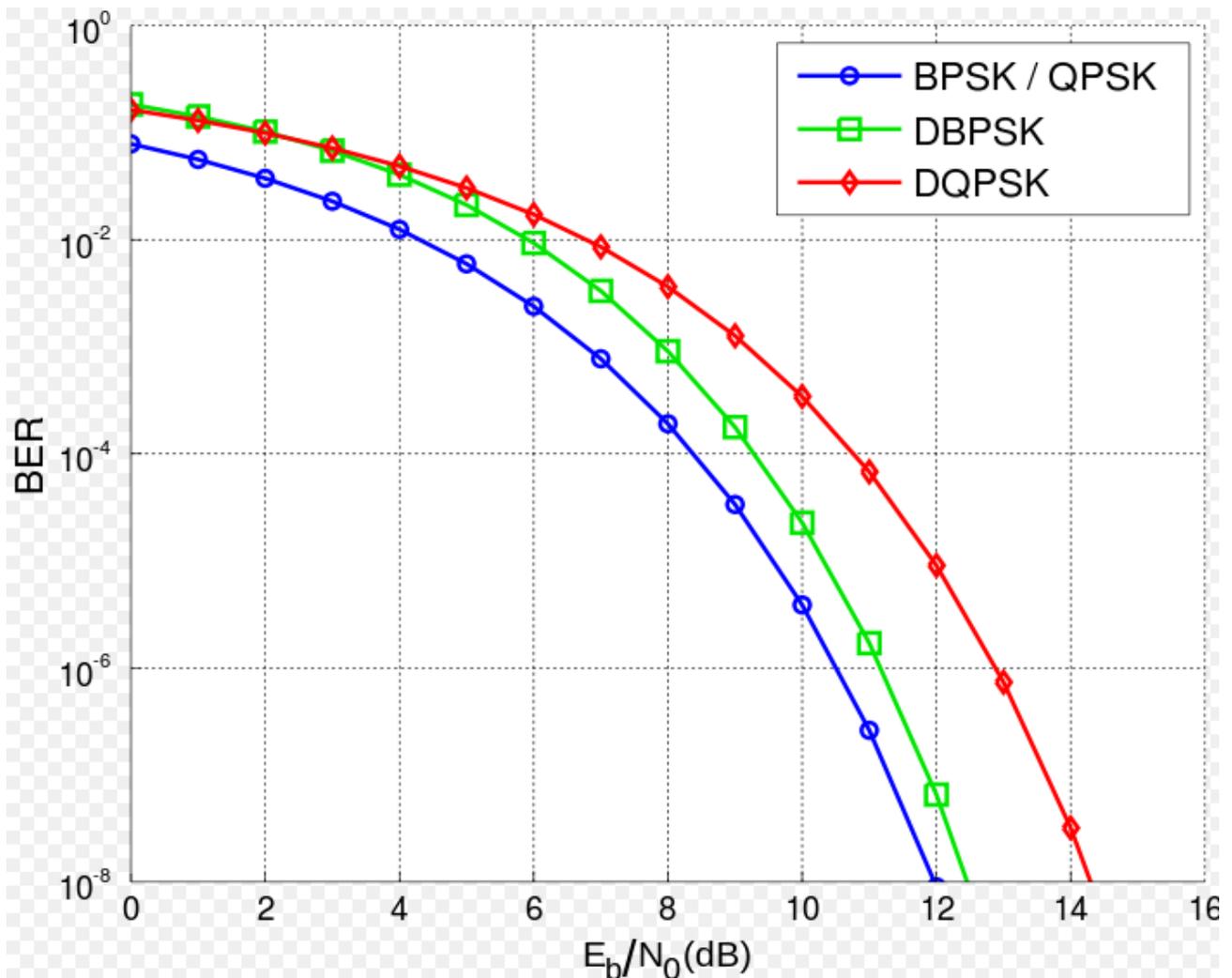


Figura 4.40. Relación BER - E_b/N_0 para modulación DQPSK

Como se puede observar en la gráfica, para una BER de 10^{-2} obtenemos una E_b/N_0 de unos 7 dB, de donde, calculando:

$$\frac{C}{N} (dB) = \frac{E_b}{N_0} (dB) + 10 \log(R_b) - 10 \log(B)$$

En nuestro caso, $R_b = 36\text{kbps}$ y $B = 25\text{kHz}$, con lo que tenemos que $C/N = 8,58\text{ dB}$ como mínimo para garantizar la BER comentada anteriormente. Si la potencia de ruido de fondo la establecimos en -105 dBm , esto quiere decir que los centros que reciban una potencia menor de $-105\text{ dBm} + 8,58\text{ dB} = -96,42\text{ dBm}$ se verán afectados por el ruido y no se podrá garantizar en ellos que la BER esté por debajo de 10^{-2} . Dependiendo del tipo de antena que utilicemos, tendremos los siguientes niveles mínimos de señal para cumplir la relación C/N , dado que la ganancia se aplica también al ruido:

- Antena omnidireccional, $G = 2,15\text{ dBi} \rightarrow P_{Rx} = -105\text{ dBm} + 2,15\text{ dBi} + 8,58\text{ dB} = -94,27\text{ dBm}$
- Antena directiva, $G = 9,15\text{ dBi} \rightarrow P_{Rx} = -105\text{ dBm} + 9,15\text{ dBi} + 8,58\text{ dB} = -87,27\text{ dBm}$

Viendo el informe sólo tendríamos un centro que se vería afectado por el ruido (resaltado en rojo), sería el suscriptor nº 29, con un nivel de potencia recibida de $-97,61\text{ dBm}$ con antena omnidireccional. En este centro habría que adoptar alguna medida como cambiar de emplazamiento o elevar la antena, dado que no tocamos la potencia.

Podríamos hacer cálculos de cobertura ahora en el enlace ascendente. Para ello nos vamos a “Suscriptores→Punto a punto→Suscriptor a estación conectada...”. Así podemos ver los valores que reciben los repetidores desde los suscriptores. Antes de generar el informe nos presentará una ventana para detallar la disponibilidad del perfil, donde se nos presentan varios métodos de cálculo de la disponibilidad de los enlaces, así como la opción de hacer un modelado con lluvia, cosa que no haremos, pues las atenuaciones por lluvia comienzan a tenerse en cuenta para frecuencias mayores a 6 GHz .

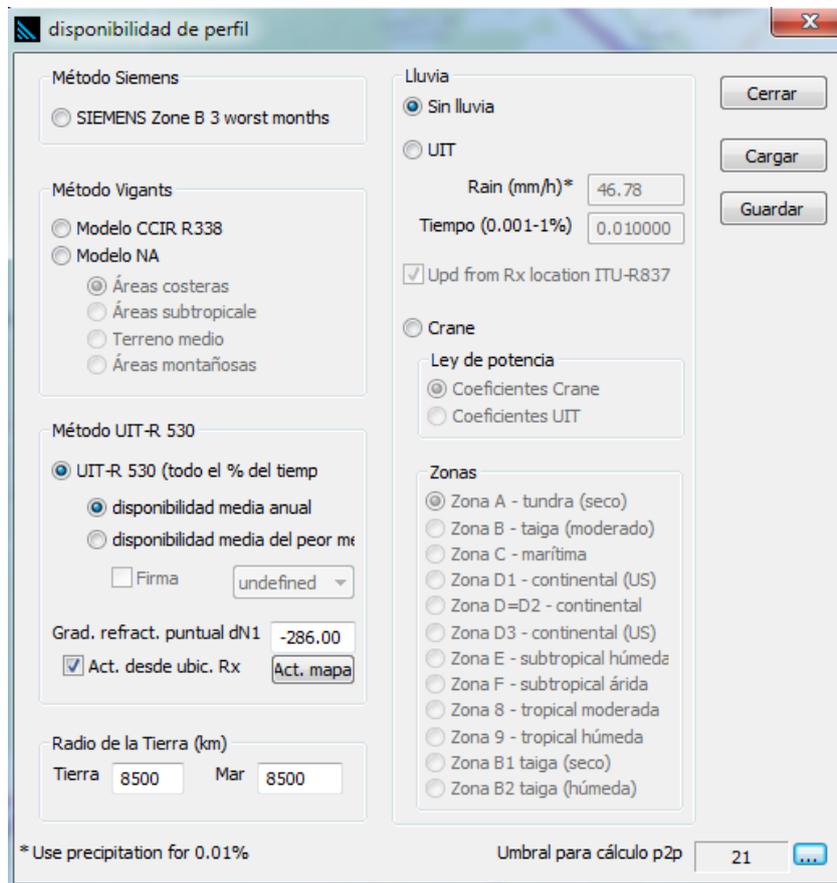


Figura 4.41. Ventana de disponibilidad de perfil

Tras esto y tras ajustar el umbral, obtendremos el informe en el que podemos observar los valores de intensidad de campo y potencia recibidos en los repetidores por parte de cada suscriptor, así como la disponibilidad de los enlaces. En este caso, relajaremos un poco las especificaciones y nos valdrán valores de potencia mayor o igual a -96 dBm . En cuanto al ruido, para cumplir especificaciones, debemos tener en recepción señales que estén por encima de la SNR más la ganancia de las antenas menos las pérdidas en RX por parte de los repetidores, esto es:

$$P_{Rx} = -105\text{ dBm} + 5,15\text{ dB} - 1\text{ dB} + 8,58\text{ dB} = -92,27\text{ dBm}$$

Toda señal recibida en los repetidores por debajo de esta potencia se verá afectada por el ruido. En este caso el ruido es más restrictivo que el margen definido. Esto se puede observar en el Anexo D también, pues hay algunas señales recibidas que llegan por debajo de los $-92,27\text{ dBm}$. Como en esta ocasión no podemos ajustar la ganancia

receptora en los repetidores (suponemos que no hay otro modelo de antena disponible) sólo nos queda jugar con las antenas de los suscriptores en transmisión. Por ello, modificamos las antenas de aquellos centros en los que no se hayan modificado anteriormente en cuyo enlace ascendente se reciba una potencia menor de -92,27 dBm en los repetidores, o estén próximos a estos valores. También podemos encontrar este informe en el Anexo D con las antenas cambiadas, donde vemos que hemos mejorado el nivel de recepción en varios casos. A los centros en los que, pese a cambiar las antenas sigan dando estos valores de potencia en la recepción de los repetidores, se le deben practicar otras soluciones, tales como elevación de las antenas o cambio de emplazamiento de la misma.

Por último, queda ver si el dimensionamiento de la red es correcto en términos de tráfico. Para ello, lo primero que debemos hacer es definir el tráfico que tendrá cada una de las RTU en la hora más cargada. Vamos a suponer que en la hora más cargada, cada RTU esté mandando y recibiendo información un total de 1 minuto entre varias llamadas que se hagan. Esto equivale a un tráfico de $1/60 = 0.01666$ erlangs por cada remota, con lo que modificamos este valor en los parámetros de los suscriptores en el campo apropiado para ello (ver figura 4.12). A continuación nos dirigimos a Suscriptor→Tráfico→Asignación de dispositivo... Nos aparecerá una ventana en la que debemos de configurar los parámetros para realizar el análisis de tráfico.

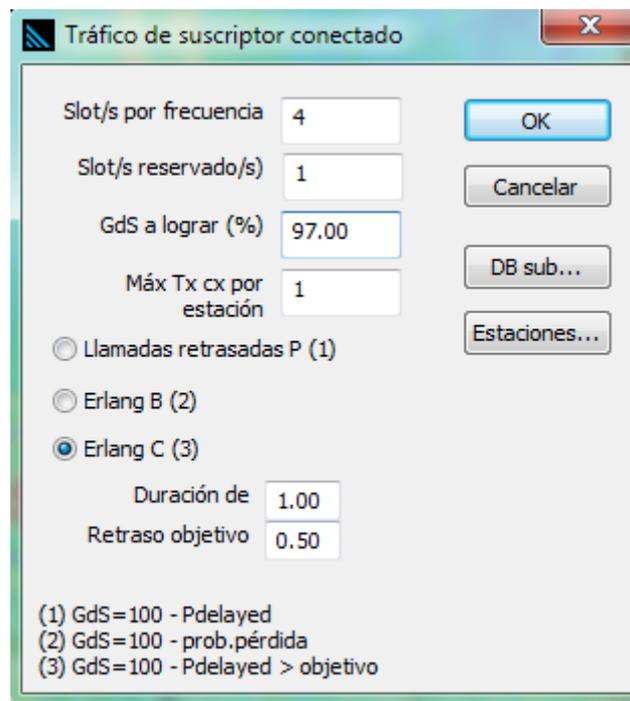


Figura 4.42. Ventana de parámetros de tráfico

En esta ventana se pueden ajustar los parámetros de tráfico de las BS: el número de slots por cada frecuencia (4 para TETRA), el nº de slots reservados (1 slot para el canal de control), el grado de servicio a lograr (GdS, supondremos el 97%) y el nº de radiocanales por cada estación (en nuestro caso 1, pues sólo tenemos una BS por emplazamiento). El modelo será de llamadas en espera, pues al tratarse de una red troncal no podemos permitir perder esas llamadas, por lo que escogemos Erlang C, y fijamos la duración media de la llamada de 1 segundo y el retraso objetivo medio será de medio segundo. Al presionar “OK” el programa nos generará un informe en el que nos muestra el grado de servicio que oferta cada repetidor, así como el tráfico ofrecido por el mismo, que en este caso, coincide con el demandado. Si el GdS que nos muestra el informe está por encima del que hemos introducido como parámetro, entonces la red está bien dimensionada de cara al tráfico que circulará por la misma. Este informe se puede ver en el Anexo E y, como se puede observar, se cumplen las especificaciones correctamente.

4.3.2.2 Simulación a partir de la planificación futura

Para intentar optimizar la red, dado que hemos visto que algunos centros tienen problemas para cumplir los márgenes impuestos y/o problemas de ruido, vamos a realizar el diseño de nuestra red a partir de los suscriptores. Lo que haremos será calcular el emplazamiento de los repetidores teniendo en cuenta las características tanto de los repetidores como de los suscriptores. Seremos más restrictivos con los umbrales a la hora de calcular la cobertura, y no los fijaremos a los valores de sensibilidad que nos da ICS Telecom, sino que los fijaremos a los niveles deseados que hemos comentado antes: -90 dBm para la recepción de los suscriptores (38 dBuV/m para antenas de ganancia 2.15 dBi) y -96 dBm para la recepción en los repetidores (28 dBuV/m para antenas de ganancia 5.15 dBi). Para ello

partimos de la situación vista en la figura 4.1.

Para utilizar esta función de ICS Telecom necesitamos que todos los suscriptores estén huérfanos, es decir, sin emparentar a ninguna estación. Una vez hecho esto nos vamos a Suscriptor→Planificación futura.... Debemos poner los parámetros de las estaciones que queramos crear tal y como lo hicimos en el caso anterior, así como los parámetros de los suscriptores, con la modificación de los umbrales comentada anteriormente.

En cuanto a los parámetros para la planificación futura en sí, indicaremos que se haga con un máximo de 3 emplazamientos, con una sola estación por emplazamiento. Emparentaremos los suscriptores al mejor servidor, siempre y cuando este dé un nivel de cobertura mayor al del umbral especificado.

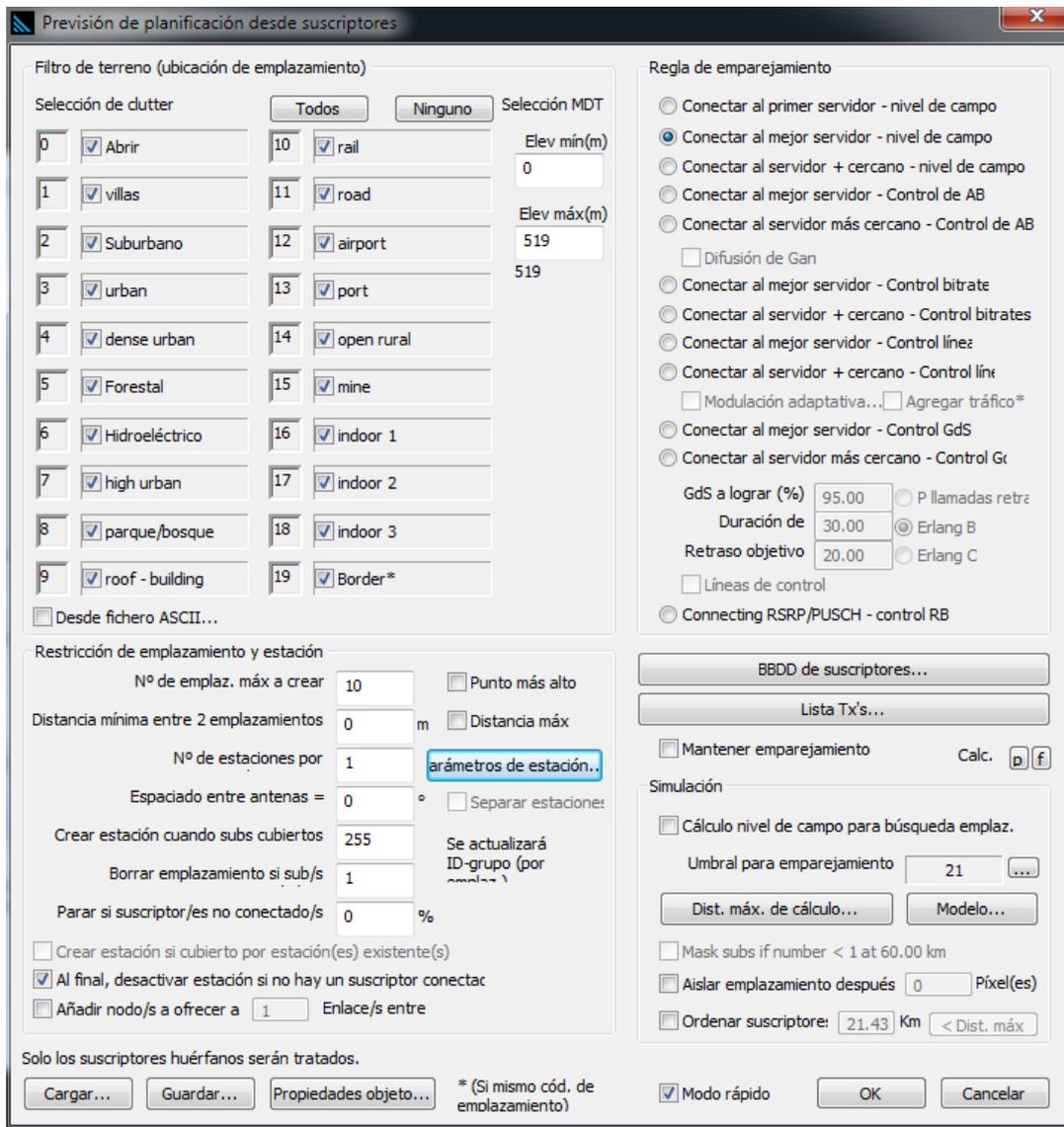


Figura 4.43. Ventana de planificación futura

Una vez que ejecutemos la planificación futura, el programa nos dará un informe con datos sobre las estaciones creadas relativas al número de suscriptores emparentados, grado de servicio, etc. como el que vemos en la figura 4.44⁵. Además, tras ejecutar la planificación futura, también aparecen las estaciones sobre el mapa.

En el caso anterior era una empresa la que nos daba directamente los emplazamientos donde irían colocados los repetidores, pero esta vez no tenemos emplazamientos predefinidos, dado que los estamos buscando con tal de que se cumplan las especificaciones definidas anteriormente. Esto nos obliga a comprobar sobre el mapa que los emplazamientos están en lugares factibles, en los que sea físicamente posible instalar las BS con sus correspondientes torres. No nos valdría, por ejemplo, que estos emplazamientos se fueran a instalar en medio de una carretera o de las vías del tren.

⁵ Los resultados de tráfico que se muestran sólo son aproximados, pues falta por llevar a cabo la asignación de dispositivos, como vimos en el caso anterior.

TRÁFICO DE ESTACIÓN - Enlace de bajada

Estación	BST	Suscriptores	Entidades	Demanda	GdS B	Líneas	AB (MHz)	Mbits dl	TD dB	plazamie
c837275	1	39	0	0.65	97.60	0.0	0.98	0.0000	0	39
c129093	2	2	0	0.03	100.00	0.0	0.05	0.0000	0	2

Total suscriptores en BBDD: 41

Total suscriptores en el mapa: 41

Total suscriptores emparentados (BBDD): 41 (100.00)

Total parented entities (base): 0 (0.00 pc)

Total suscriptores emparentados (selección): 41 (100.00)

Figura 4.44. Informe tras planificación futura TETRA

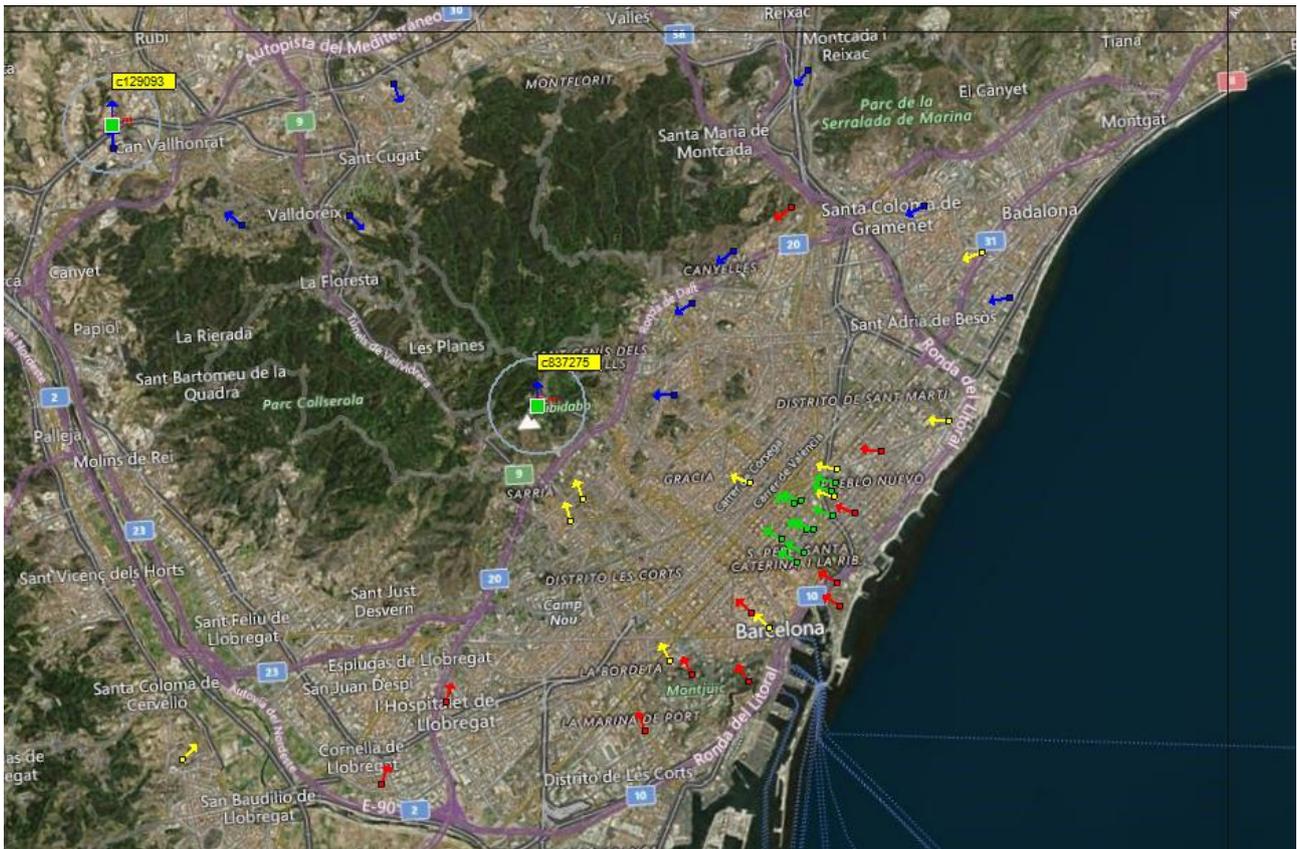


Figura 4.45. Vista general tras planificación futura TETRA



Figura 4.46. Ubicación de emplazamientos TETRA en el mapa

Una vez comprobado que los repetidores están correctamente ubicados, comprobamos que se cumplen los requisitos de los umbrales que hemos definido en cuanto a cobertura (-90 dBm de recepción en enlace descendente y -96 dBm en enlace ascendente), que se pueden consultar en el Anexo D.

Nótese que en esta ocasión aún no hemos realizado el cálculo de cobertura global desde los repetidores, con lo que no deberíamos ver la cobertura que tienen los suscriptores cubiertos con el método empleado anteriormente. En principio se debería hacer este cálculo con el fin de eliminar la interferencia con el plan de asignación de frecuencias. El realizar el plan de asignación de frecuencias influye en el cálculo de las potencias de recepción, dado que el cálculo depende del logaritmo de la frecuencia en megahercios. En nuestro caso apenas influye, dado que la diferencia entre los distintos canales de frecuencia posibles es del orden de los kilohercios, y sólo influye en algunos decimales. Así pues, para hacer la comprobación de los niveles de cobertura, nos vamos a Suscriptor → Punto a punto → Estación a suscriptor conectado... El análisis es muy similar al que comentamos en el caso anterior para el enlace ascendente, sólo que en este caso el análisis es sobre el enlace descendente, aunque la ventana para configuración de parámetros de este análisis es exactamente igual que la de la figura 4.41. También ejecutamos el análisis para el enlace ascendente, y se muestran los resultados de ambos análisis en el Anexo D, donde se puede ver que la cobertura cumple con los umbrales definidos en ambos sentidos.

Una vez hecha esta comprobación, vamos a comprobar los requisitos de tráfico. El informe dado de la planificación futura nos muestra que una de las dos estaciones tiene bastante carga de tráfico, rozando el grado de servicio que definimos al principio (97%). Esto es un cálculo que hace el programa por defecto, dado que aún no le hemos indicado los parámetros de tráfico de los repetidores. Indicando los parámetros de tráfico tal y como se hizo en el caso anterior (figura 4.42), obtenemos el informe de tráfico con los datos corregidos, disponible en el Anexo E. Como vemos, ya no está tan cargada la estación y puede hacer frente sin problemas al intercambio de tráfico con los suscriptores.

A continuación, pasamos a hacer el cálculo de cobertura de este caso, para poder ver a nivel global cómo se distribuye la cobertura de los repetidores en el mapa. En este caso seleccionamos 38 dBuV/m como umbral deseado, tal y como describimos anteriormente. Este cálculo se puede observar sobre el mapa de la figura 4.47.

En este caso se observan en el mapa partes que no están cubiertas, debido a que hemos aumentado el umbral de cobertura a considerar con respecto al caso anterior. Como se puede observar también, todos los suscriptores caen dentro de dicho umbral. Otro punto de vista importante es el de la cobertura en el mejor servidor, para ver qué área abarcan las zonas de mejor cobertura por parte de cada uno de los repetidores, tal y como podemos ver en la figura 4.48.

Una vez hemos realizado el cálculo de la cobertura, podremos ver la interferencia causada en las zonas de solapamiento de cobertura de ambos repetidores, dado que para el análisis inicial los hemos ajustado a la misma frecuencia. Con respecto al caso anterior, debemos decir que se configuran todos los parámetros exactamente igual, excepto el umbral, que en este caso lo situamos en 38 dBuV/m como se ha venido haciendo. Los informes derivados de la previsualización de la relación de protección, así como los de análisis de interferencia global e interferencia en mejor servidor de este caso también los podemos encontrar en el Anexo B.

También se recogen aquí los correspondientes mapas de interferencia de este caso en las figuras 4.49, 4.50, 4.51 y 4.52. Al igual que en los mapas de cobertura, se observa que el área interferida es menor en este caso que en el anterior debido al umbral utilizado en los cálculos, pero también se debe a que el número de repetidores en este caso

es menor, con lo que hay menos interferencia.

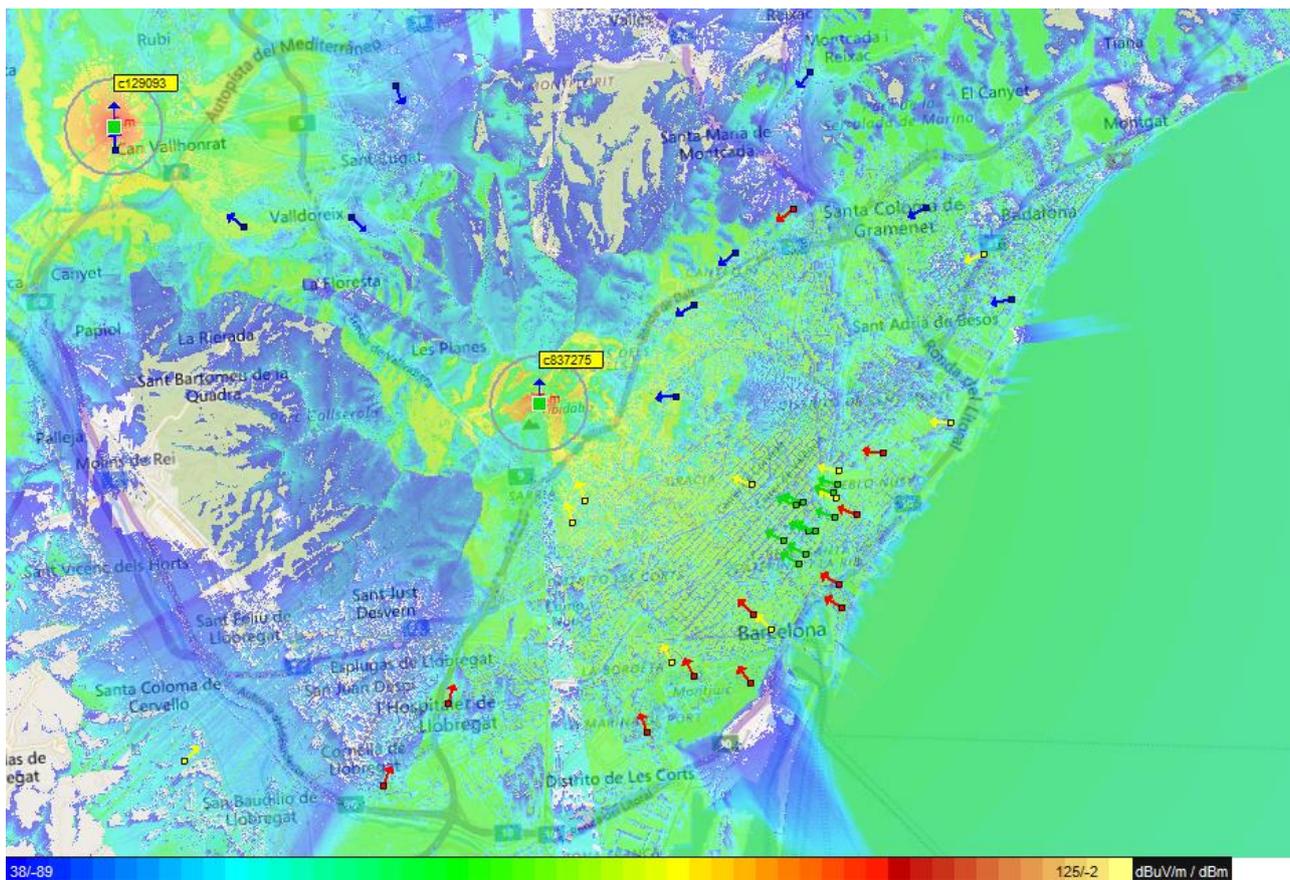


Figura 4.47. Cobertura compuesta TETRA (Caso 2)

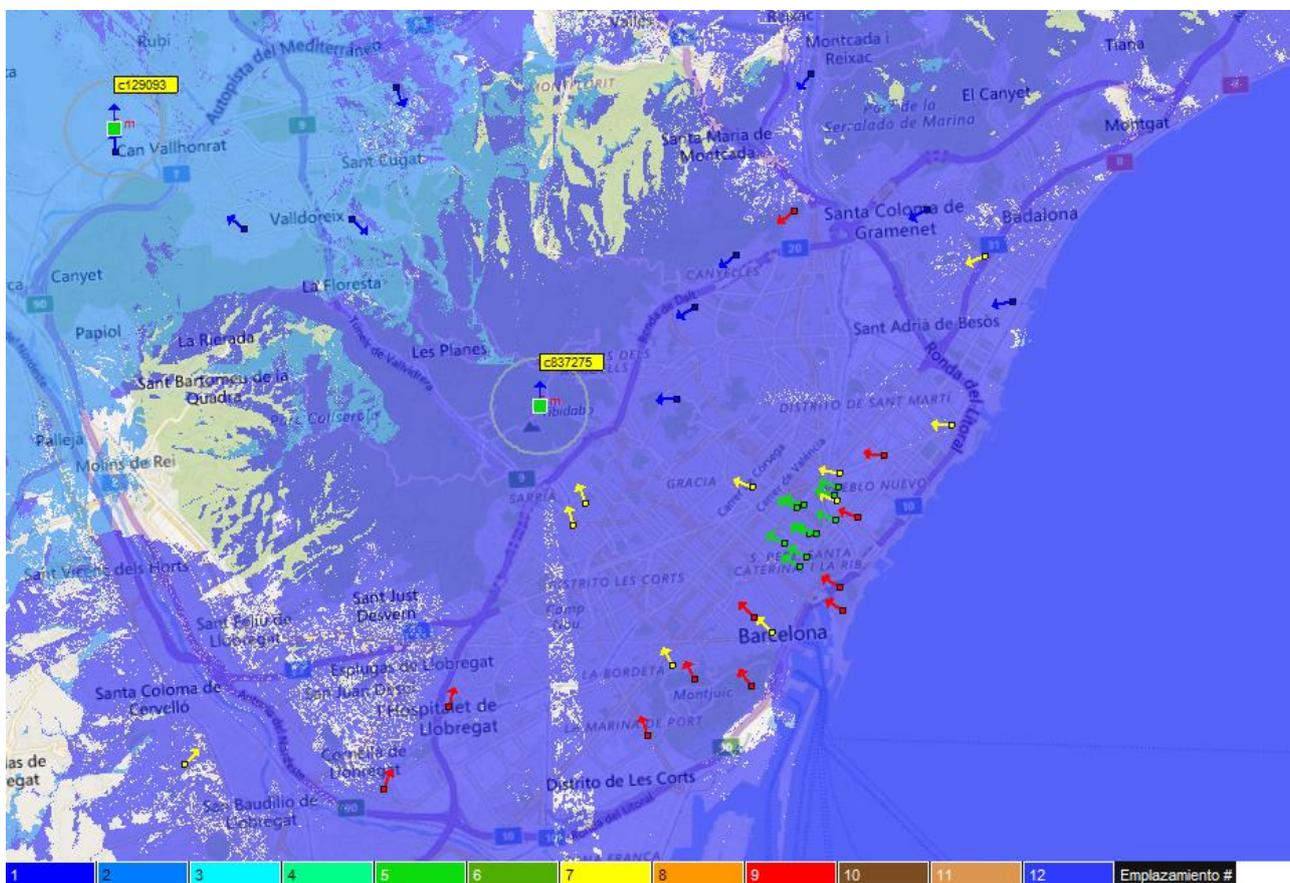


Figura 4.48. Cobertura en mejor servidor TETRA (Caso 2)

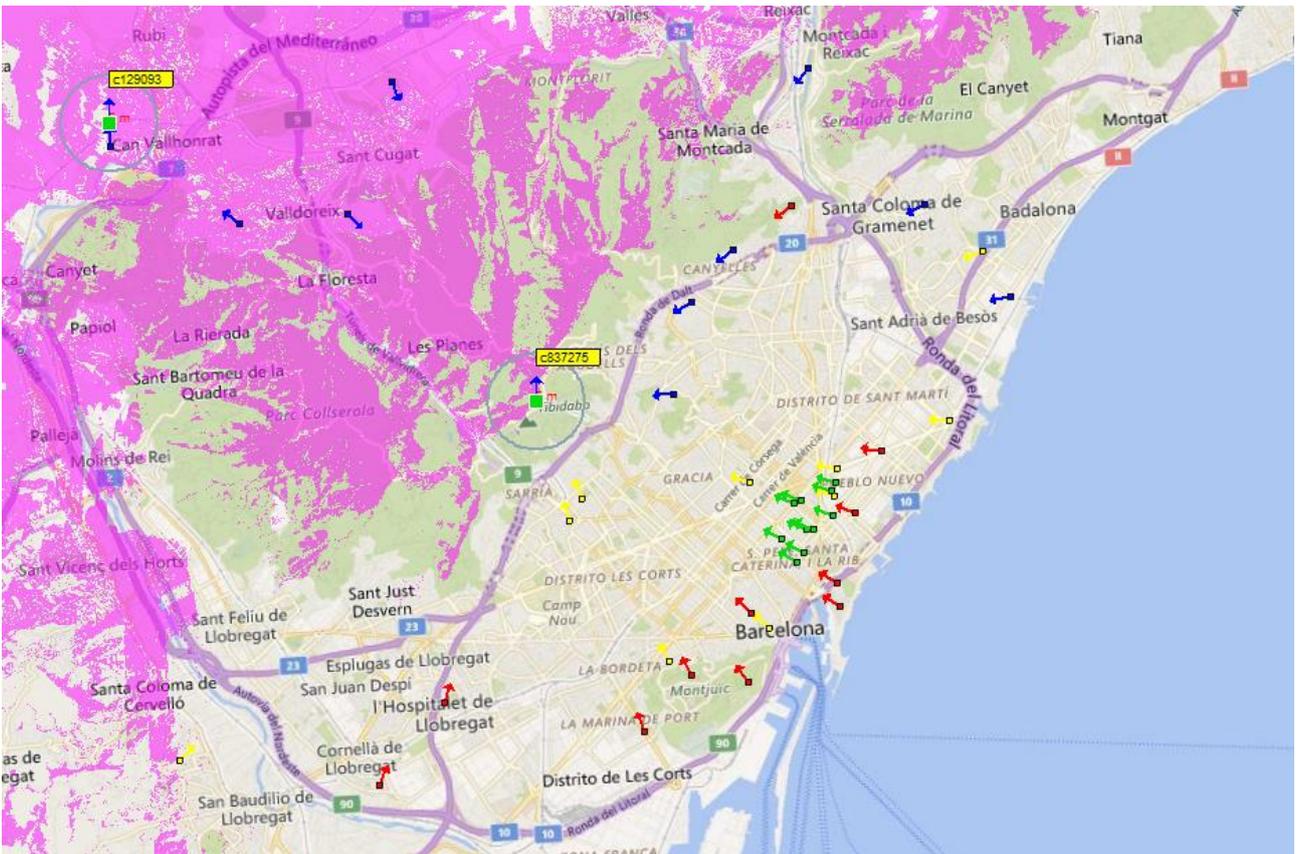


Figura 4.49. Interferencia global TETRA (Caso 2)

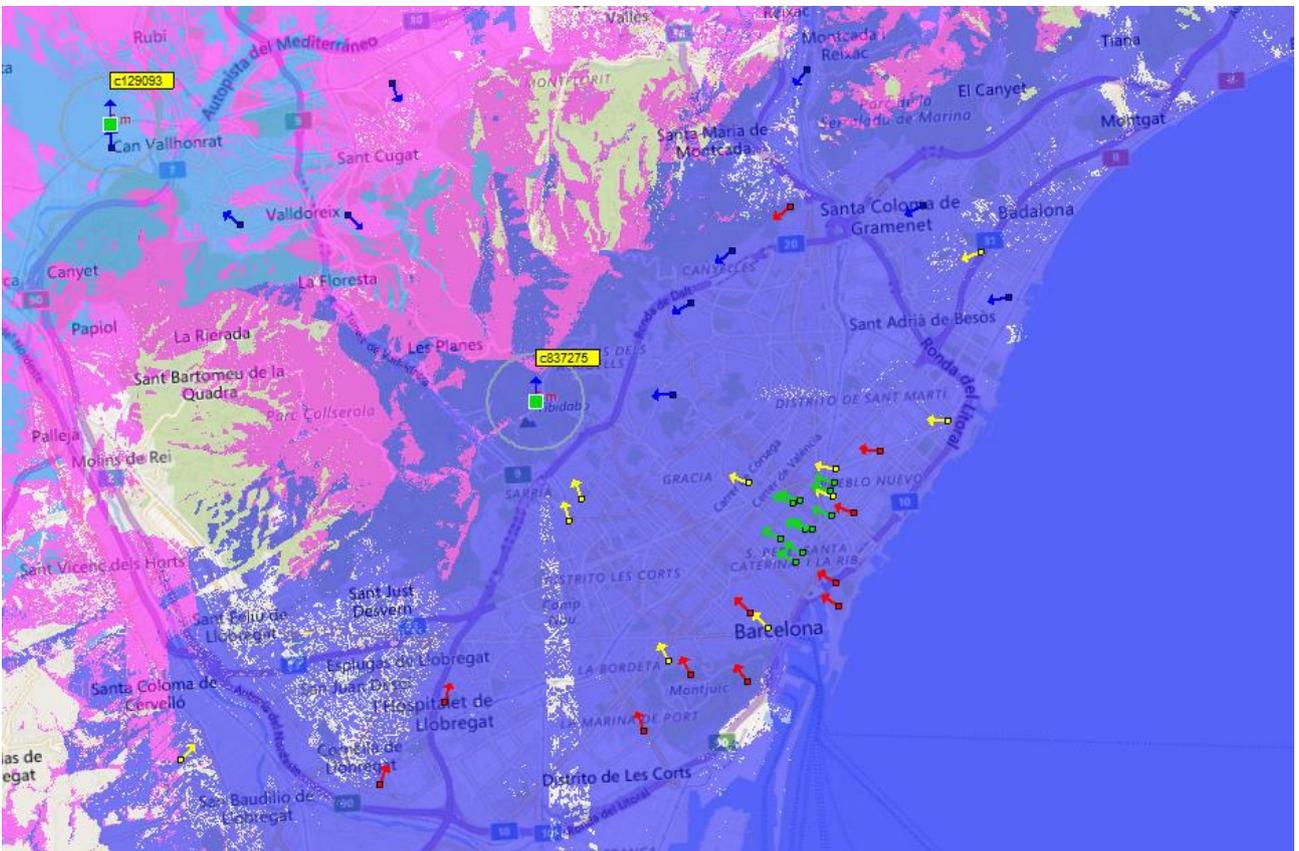


Figura 4.50. Interferencia sobre mejor servidor TETRA (Caso 2)

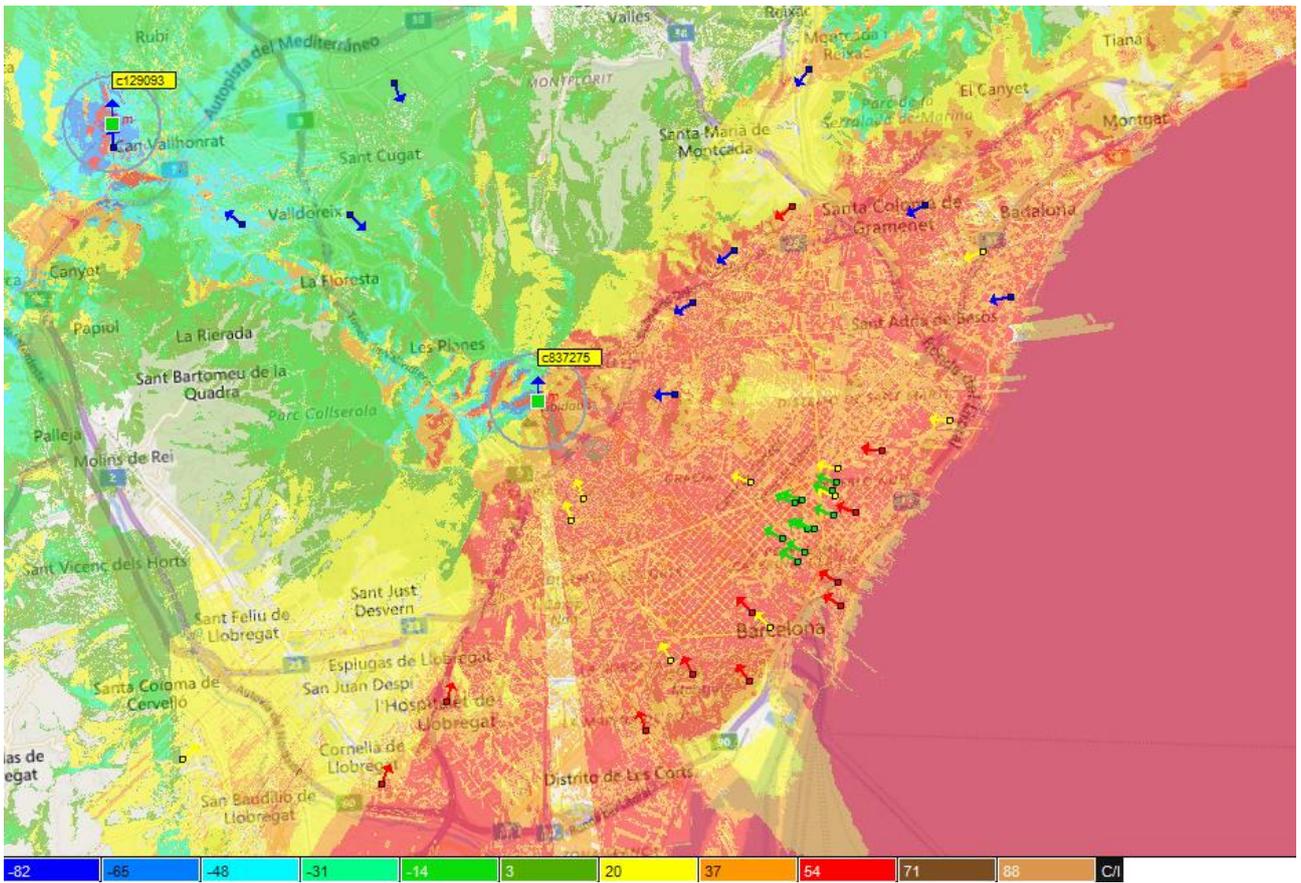


Figura 4.51. Mapa C/I: mínimo C/I TETRA (Caso 2)

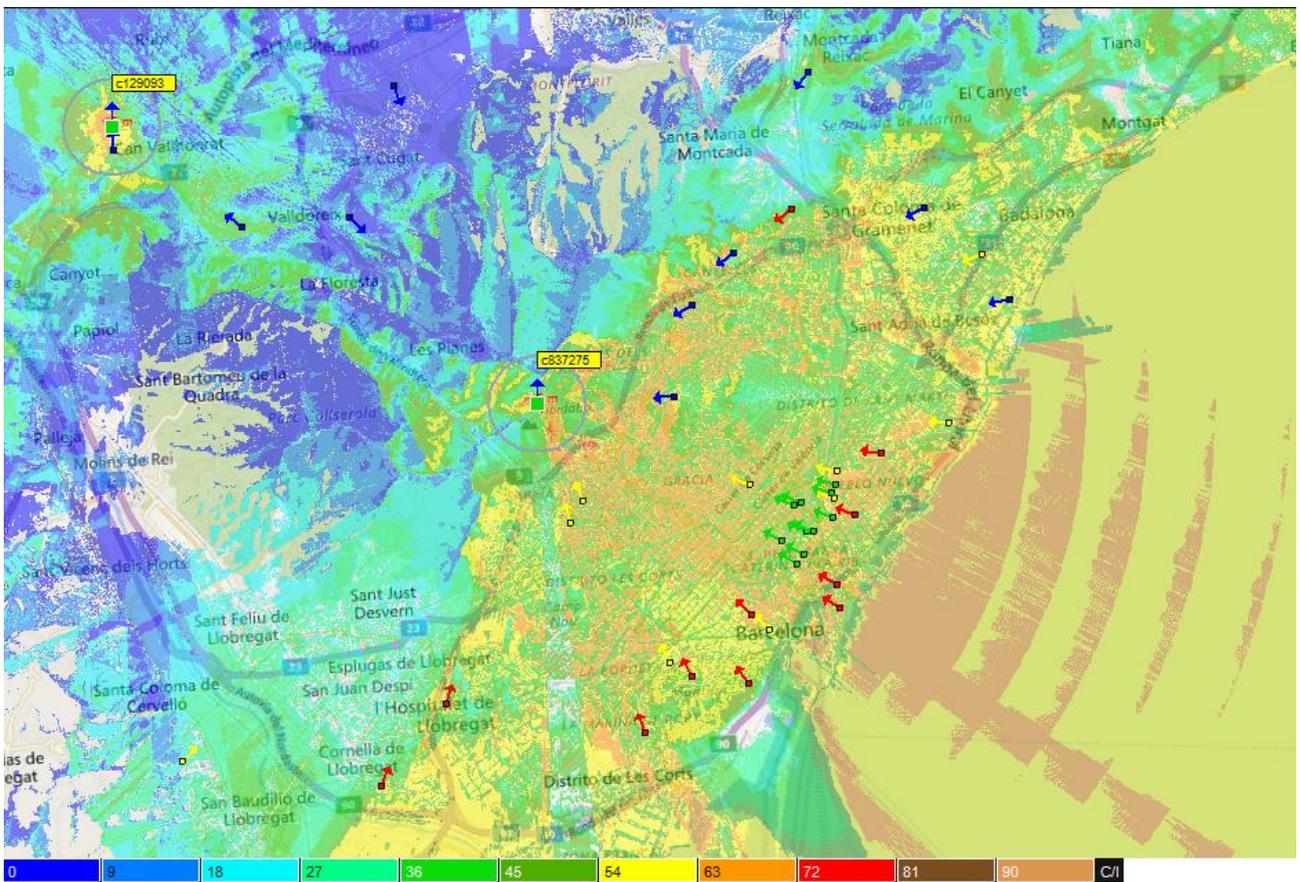


Figura 4.52. Mapa C/I: mínimo C/I sobre mejor servidor TETRA (Caso 2)

En este caso, como ya tenemos los suscriptores correctamente emparentados y no tenemos por qué hacer modificaciones en los mismos, disponemos de una herramienta para ver qué suscriptores están siendo interferidos, tanto a nivel global como en el mejor servidor. Para ello, debemos ir a Suscriptor→Análisis→Suscriptor/es en área interferida. Esto nos mostrará los suscriptores que están en el área interferida si previamente hemos realizado el análisis de interferencia global o el de mejor servidor (figuras 4.49 y 4.50 respectivamente). Si quisiéramos ver los valores C/I en cada uno de los suscriptores para los casos de interferencia global e interferencia en el mejor servidor no tendríamos más que realizar los análisis de los mapas C/I (figuras 4.51 y 4.52 respectivamente) y, acto seguido, nos dirigimos a Suscriptor→Análisis→Suscriptor/es cubiertos... En este caso nos vale comprobar el hecho de que hay suscriptores interferidos globalmente y en el mejor servidor para realizar un reajuste de frecuencias en las estaciones.



Figura 4.53. Suscriptores interferidos de manera global TETRA (Caso 2)



Figura 4.54. Suscriptores interferidos en el mejor servidor TETRA (Caso 2)

Como observamos existen suscriptores interferidos, por lo que debemos de realizar un reajuste de frecuencias. Este reajuste se efectuará con el mismo plan de asignación de frecuencias del caso anterior. Lo único que cambia con respecto al caso anterior a la hora de configurar los parámetros para establecer el plan de asignación de frecuencias es el umbral elegido y el número de repetidores.

Tras el reajuste de las frecuencias de los repetidores hemos reducido la interferencia total a cero, al igual que en el caso anterior, y los dos radiocanales quedan espaciados en 50kHz también. Los mapas C/I en este caso quedan como vemos en las figuras 4.55 y 4.56.

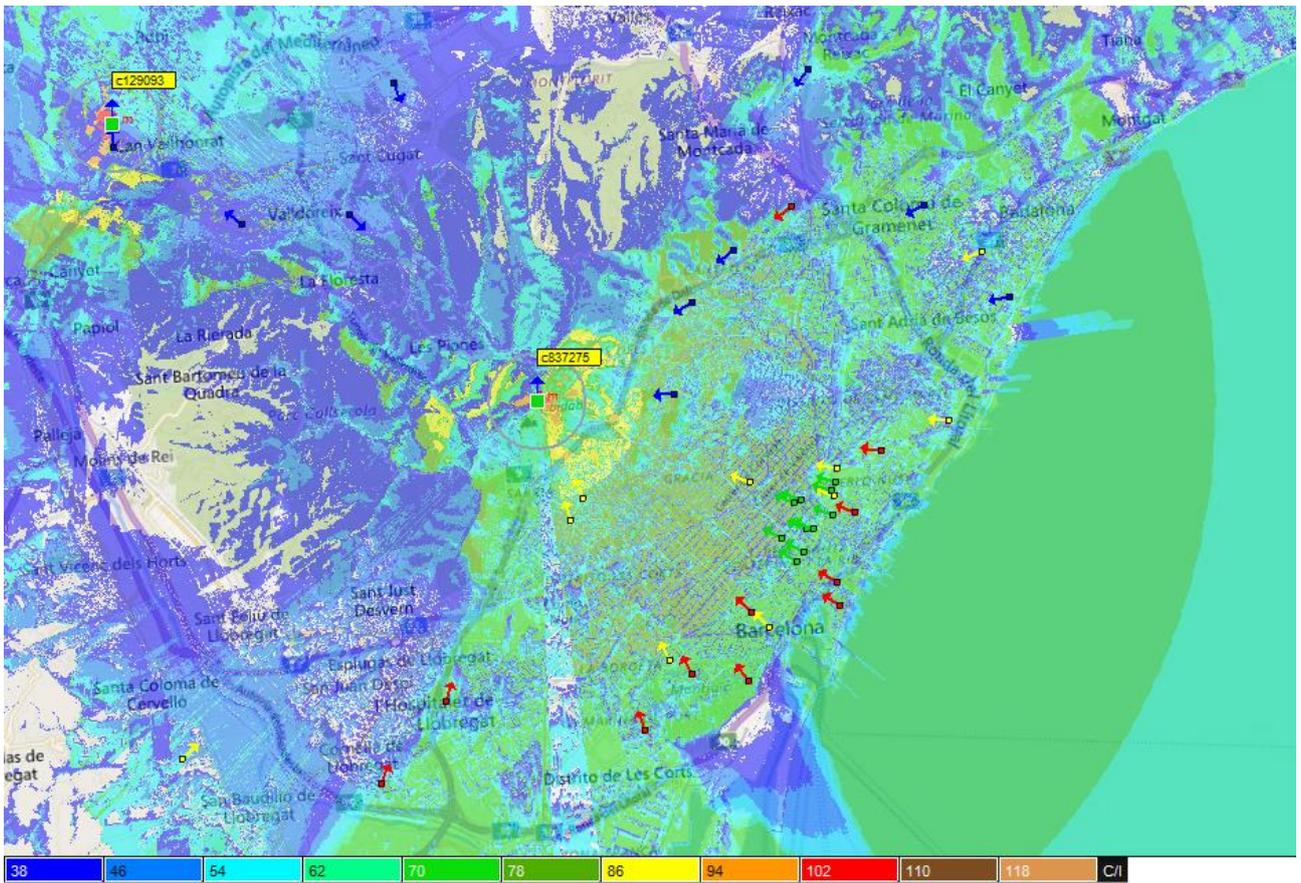


Figura 4.55. Mapa C/I: mínimo C/I global tras reasignación de frecuencias TETRA (caso 2)

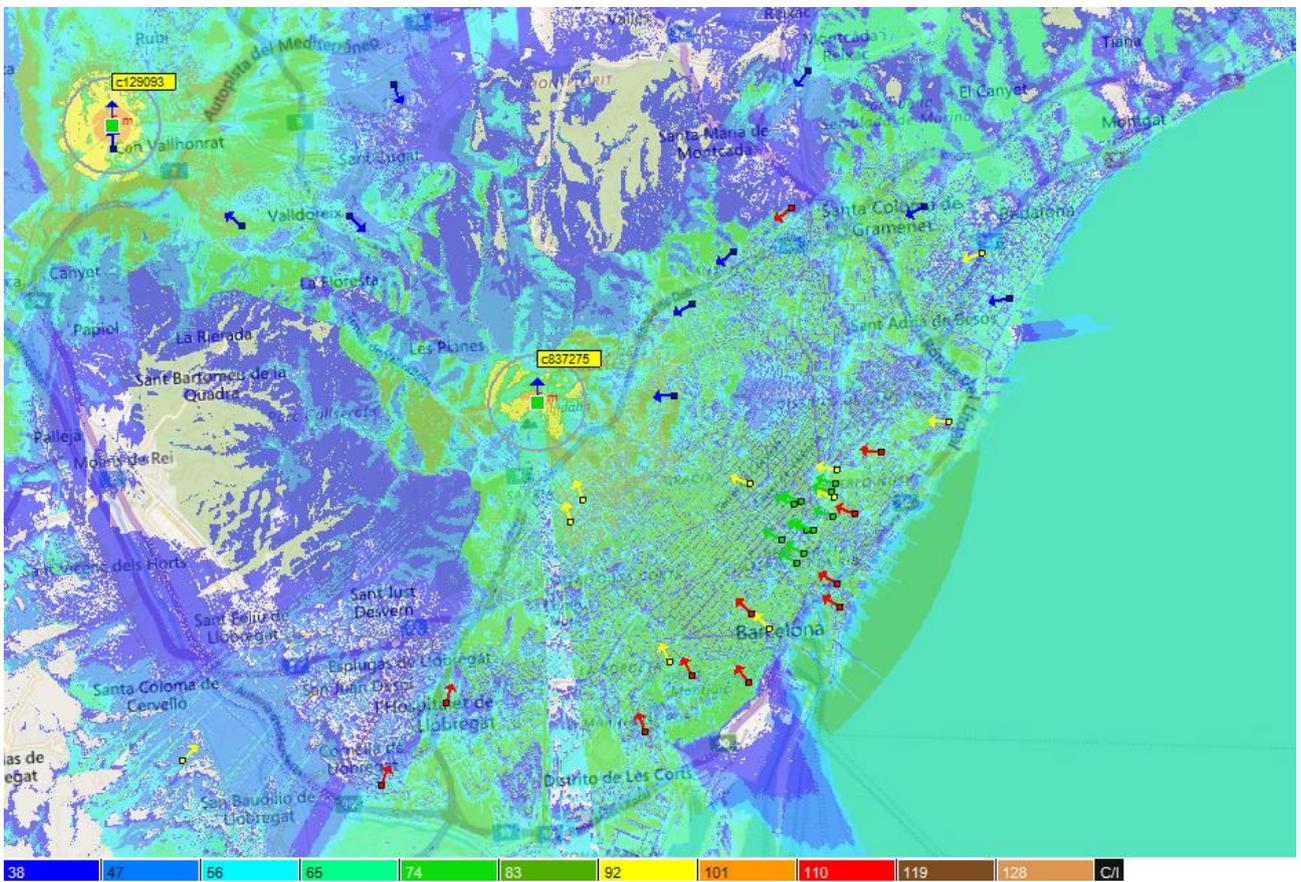


Figura 4.56. Mapa C/I: mínimo C/I en mejor servidor tras reasignación de frecuencias TETRA (caso 2)

Por último, se ha realizado de nuevo el análisis punto a punto entre repetidores y suscriptores, observando que los niveles de potencia recibidos son los mismos que al hacer la comprobación inicial, pues el cambio de frecuencias ha sido prácticamente irrelevante para este cálculo, al tratarse de unos cambios poco significativos. Lo que sí debemos ver es si se cumple la SNR en la red. Para esto último, recordamos que, en el enlace descendente, los suscriptores deben recibir señales con una potencia mayor a -94,27 dBm para las antenas omnidireccionales de ganancia $G = 2.15$ dBi, y en el enlace ascendente, los repetidores deben recibir una potencia mayor a -92,27 dBm para las antenas de ganancia $G = 5.15$ dBi.

Si observamos en el Anexo D, vemos que en el enlace descendente se cumple la SNR correctamente, pero en el ascendente tenemos 3 casos que no cumplen con la SNR, y 2 casos que cumplen con la SNR pero algo ajustados. Por ello, vamos a dotar a dichos centros de antenas directivas, para que así se pueda cumplir la SNR en el enlace ascendente. Esto, a su vez, nos cambia el valor de potencia recibida en dichos suscriptores, por lo que se muestra también el informe del enlace descendente tras el cambio de las antenas en dichos centros en el Anexo D.

4.4 Simulación con DMR

Al igual que con las simulaciones en TETRA, en primer lugar se definirán las características de los equipos utilizados para después realizar la simulación de forma análoga a TETRA, con sus correspondientes casos.

4.4.1 Características de los equipos

Como hemos hecho con TETRA, vamos a ver los equipos usados ahora en DMR. Las características vistas aquí son las que tendremos que introducir en las ventanas de parámetros correspondientes tanto de las BS como de las MS.

4.4.1.1 Equipos usados por las RTU (MS)

En este caso, las RTU tendrán un solo tipo de antena disponible (antena direccional), al contrario que el caso de TETRA, donde disponíamos de antenas omnidireccionales y direccionales.

Las características de las emisoras de radio son las siguientes:

Características RF de la emisora radio DMR para las RTU	
Bandas de frecuencia de emisión	136-174/400-470/762-870 MHz
Ancho de banda del canal RF	12.5 kHz
Separación Tx/Rx	4.6 MHz
Potencia RF en Tx	10W (40dBm)
Precisión en el nivel de potencia RF	+/- 2 dB
Sensibilidad en Rx	-119 dBm (5% BER)

Tabla 4.8. Características emisora DMR para RTU

Características antena DMR para RTU	
Banda de frecuencias	160 – 174 MHz
Polarización	Vertical
Ancho de haz horizontal	66°
Ancho de haz vertical	58°
Ganancia	6 dBd (8.15 dBi)
Impedancia	50Ω
VSWR	<1.5:1
Relación front-to-back	>16 dB
Potencia máxima	150 W

Tabla 4.9. Características antena DMR para RTU

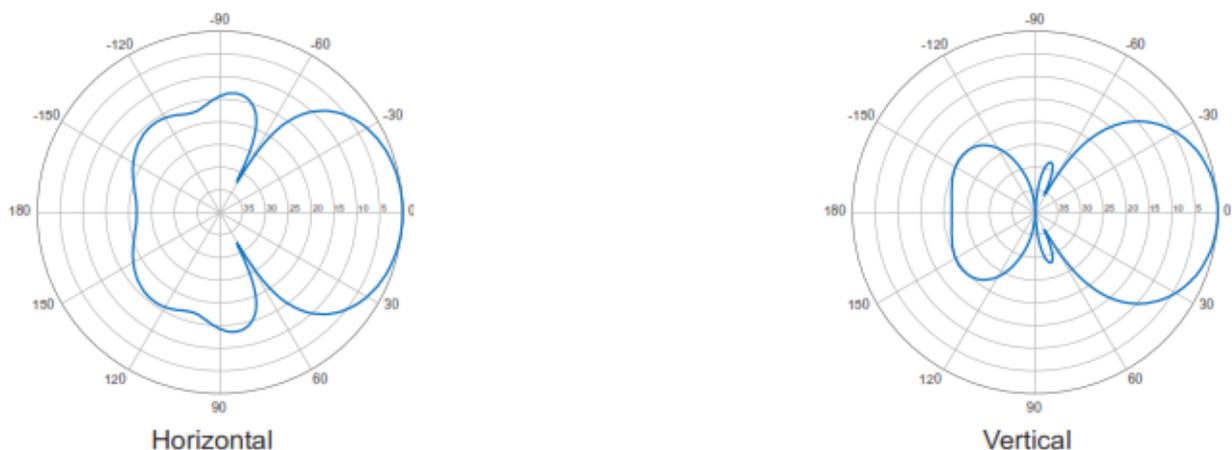


Figura 4.57. Patrón de radiación de antena DMR para RTU

La antena empleada limita el uso de las bandas de frecuencia de la emisora a la banda utilizable en VHF, (160 -174 MHz). Aunque la antena pueda admitir una potencia máxima de 150W, la emisora queda configurada a 10W.

4.4.1.2 Equipos usados por los repetidores (BS)

Características RF de la emisora radio DMR para las BS	
Bandas de frecuencia de emisión	136-174/400-480/470-520/762-870/927-941 MHz
Ancho de banda del canal RF	12.5 kHz
Separación Tx/Rx	4.6 MHz
Potencia RF en Tx	25W (44 dBm)
Sensibilidad en Rx	-120 dBm (5% BER)

Tabla 4.10. Características emisora DMR para BS

Características antena DMR para BS	
Banda de frecuencias	163 – 174 MHz
Polarización	Vertical
Ancho de haz horizontal	-
Ancho de haz vertical	35°
Ganancia	3 dBd (5.15 dBi)
Impedancia	50Ω
VSWR	<1.5:1
Potencia máxima	100 W

Tabla 4.11. Características antena DMR para BS

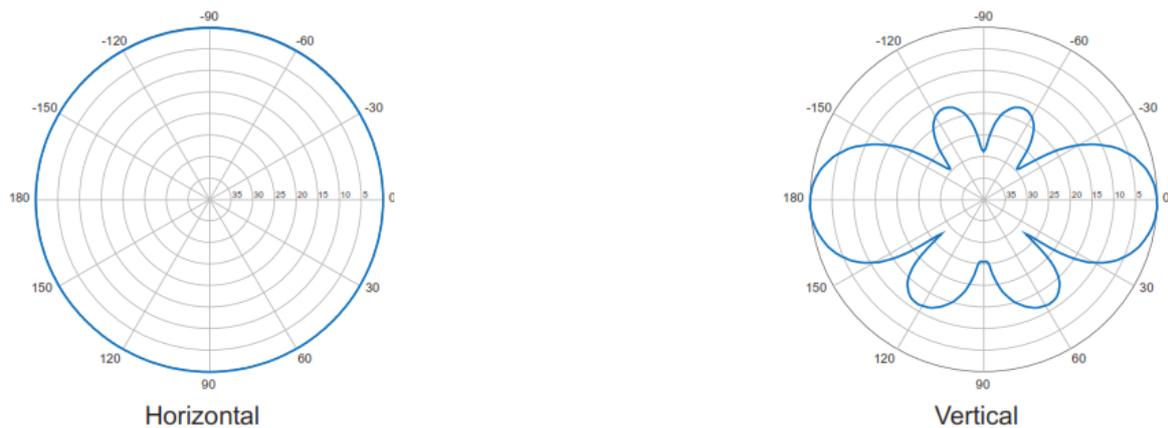


Figura 4.58. Patrón de radiación de antena DMR para BS

4.4.2 Métodos de simulación

Al igual que en el caso anterior hemos hecho con TETRA, con DMR veremos los dos casos distintos: simulación con repetidores en emplazamientos fijos y simulación a partir de la planificación futura.

4.4.2.1 Simulación a partir de los emplazamientos con repetidores

En este caso tendremos los repetidores en los mismos emplazamientos que con TETRA, solo que ahora haremos una migración de tecnología a DMR y así podremos comparar las distintas situaciones. Para ello mantenemos tanto repetidores como suscriptores en los mismos emplazamientos que vimos en la figura 4.6, pero configuramos los parámetros tanto de repetidores como de suscriptores de acuerdo a la nueva tecnología, tal y como hicimos con TETRA en las figuras de la 4.8 a la 4.12. Por hacer resumen de las características que tendrán los repetidores, las más importantes son:

- Potencia transmisión: 25W
- Tipo de señal / modulación: DMR / 4FSK
- Ganancia antena: 5.15 dBi
- Pérdidas Tx/Rx: 1 dB
- Frecuencia Tx/Rx: 171.5 MHz / 166.9 MHz

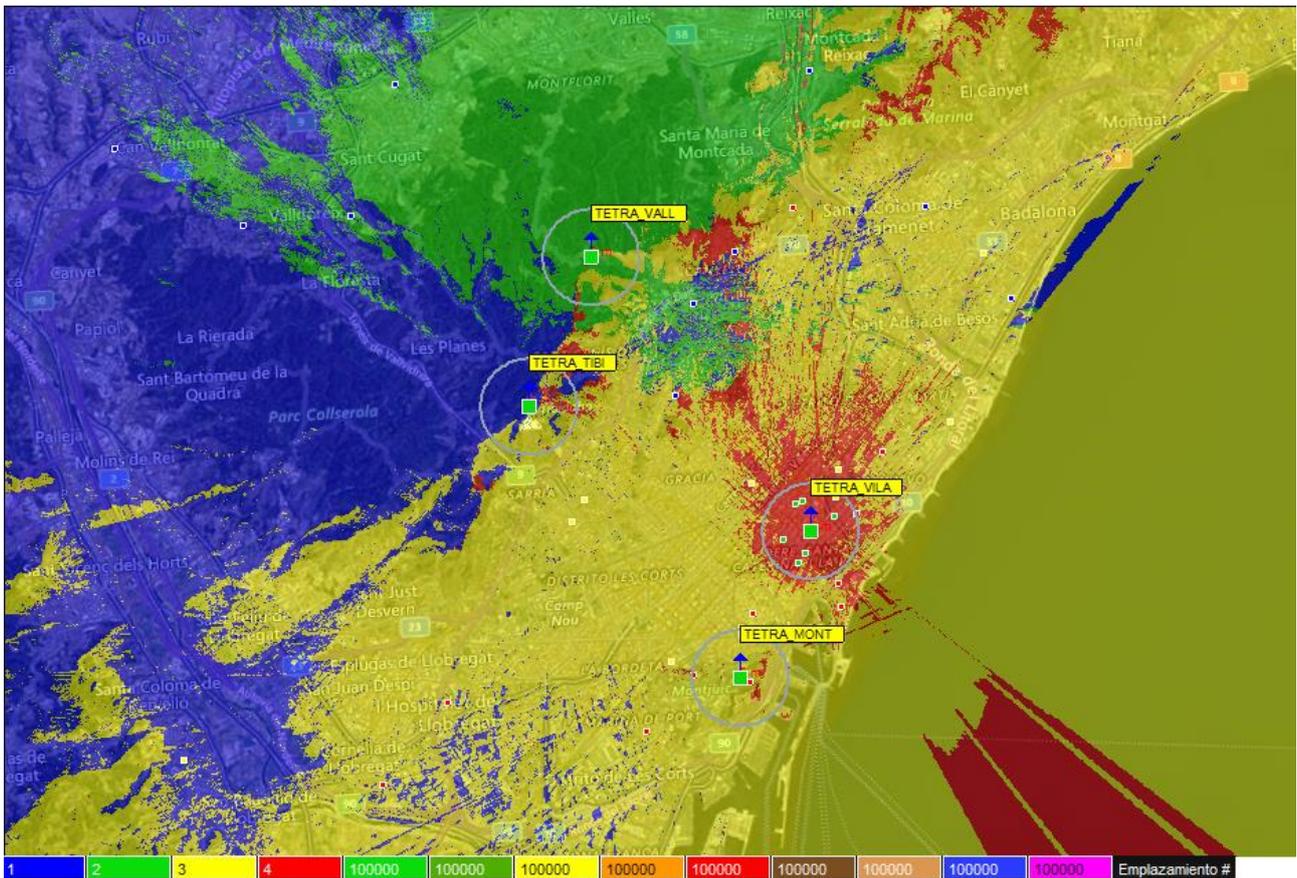


Figura 4.60. Mapa de cobertura en mejor servidor DMR (Caso 1)

Este último hecho nos puede hacer pensar que la interferencia será mayor que en el caso de TETRA. Evidentemente, si se trata de interferencia sobre sistemas externos al nuestro, posiblemente provoquen más interferencia de la que provocarían los repetidores de TETRA (dentro de su frecuencia, obviamente), pero no sobre nuestra red, ya que debemos tener en cuenta dos factores:

- Relación de protección: el estándar DMR establece que la relación C/I sea de 12 dB sobre el mismo radiocanal, por lo que es 7 dB menos restrictiva que la relación C/I de TETRA, que es de 19 dB según el estándar.
- Atenuación del patrón de antena: en este caso todas las antenas de los suscriptores son directivas en vez de omnidireccionales, por lo que las señales que la antena recibe serán atenuadas en mayor medida siempre y cuando no se reciban por la acimutal de mayor ganancia del patrón de radiación.

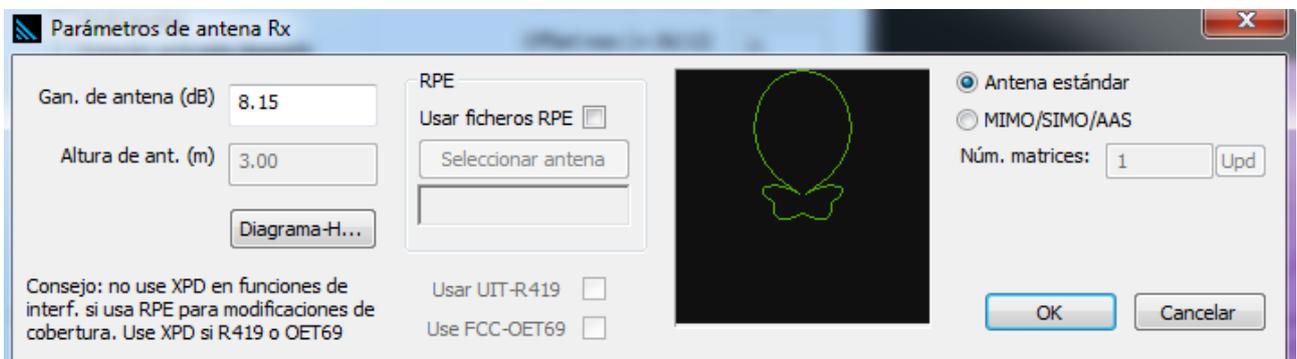


Figura 4.61. Discriminación de antena Rx en DMR

Así, repitiendo los pasos vistos anteriormente para realizar los análisis de interferencia, obtenemos los correspondientes informes, que se pueden consultar en el Anexo B, y los mapas de interferencia.

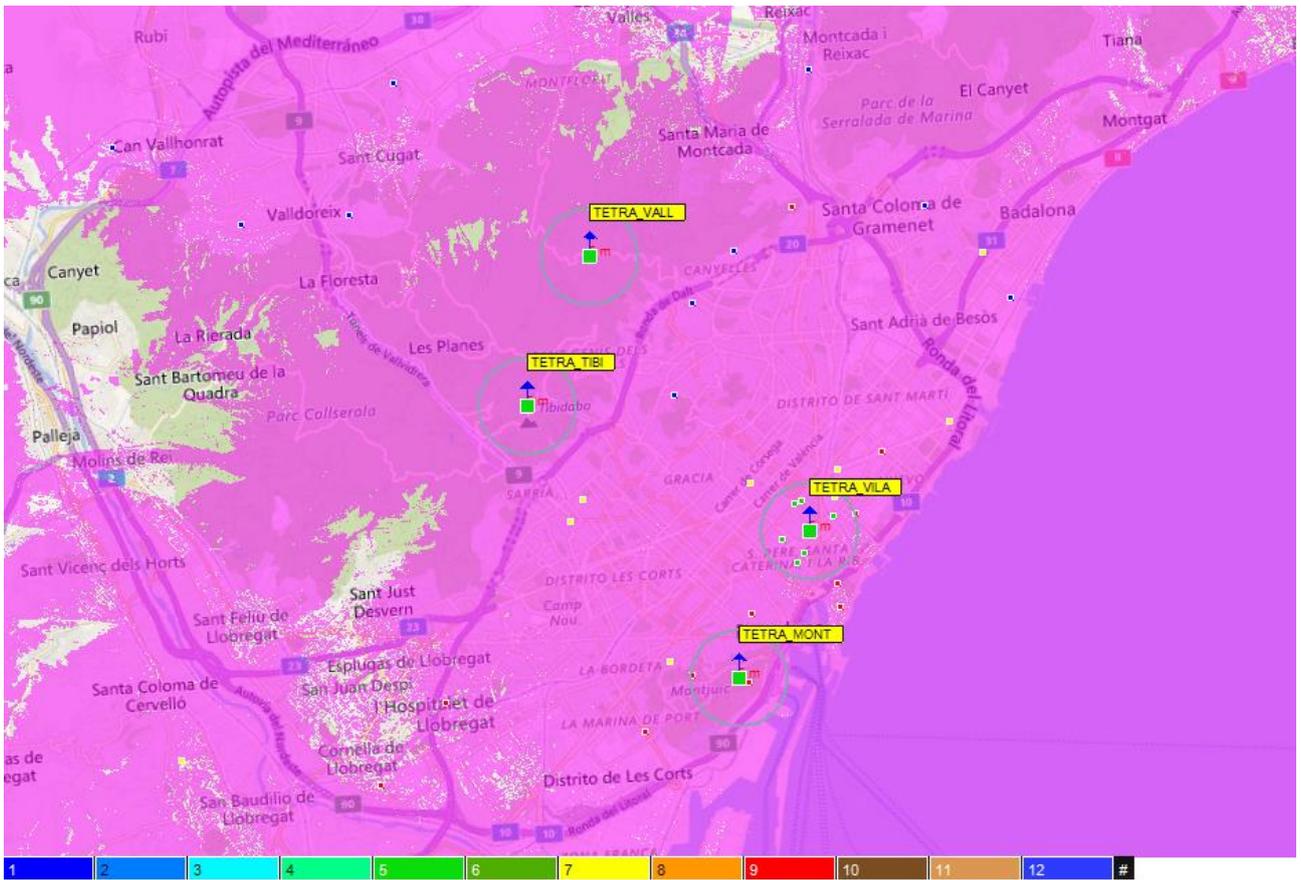


Figura 4.62. Mapa interferencia global DMR (Caso 1)

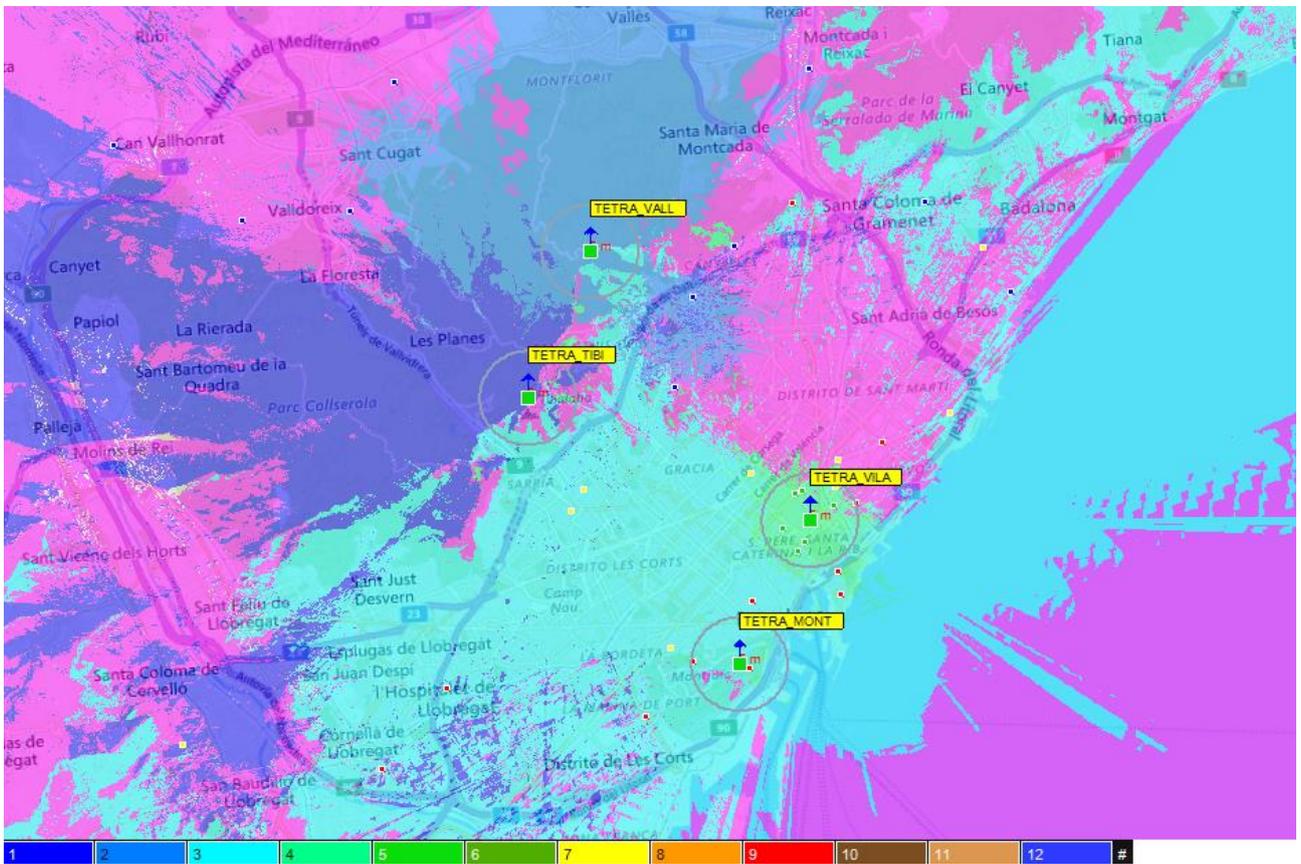


Figura 4.63. Mapa interferencia en mejor servidor DMR (Caso 1)

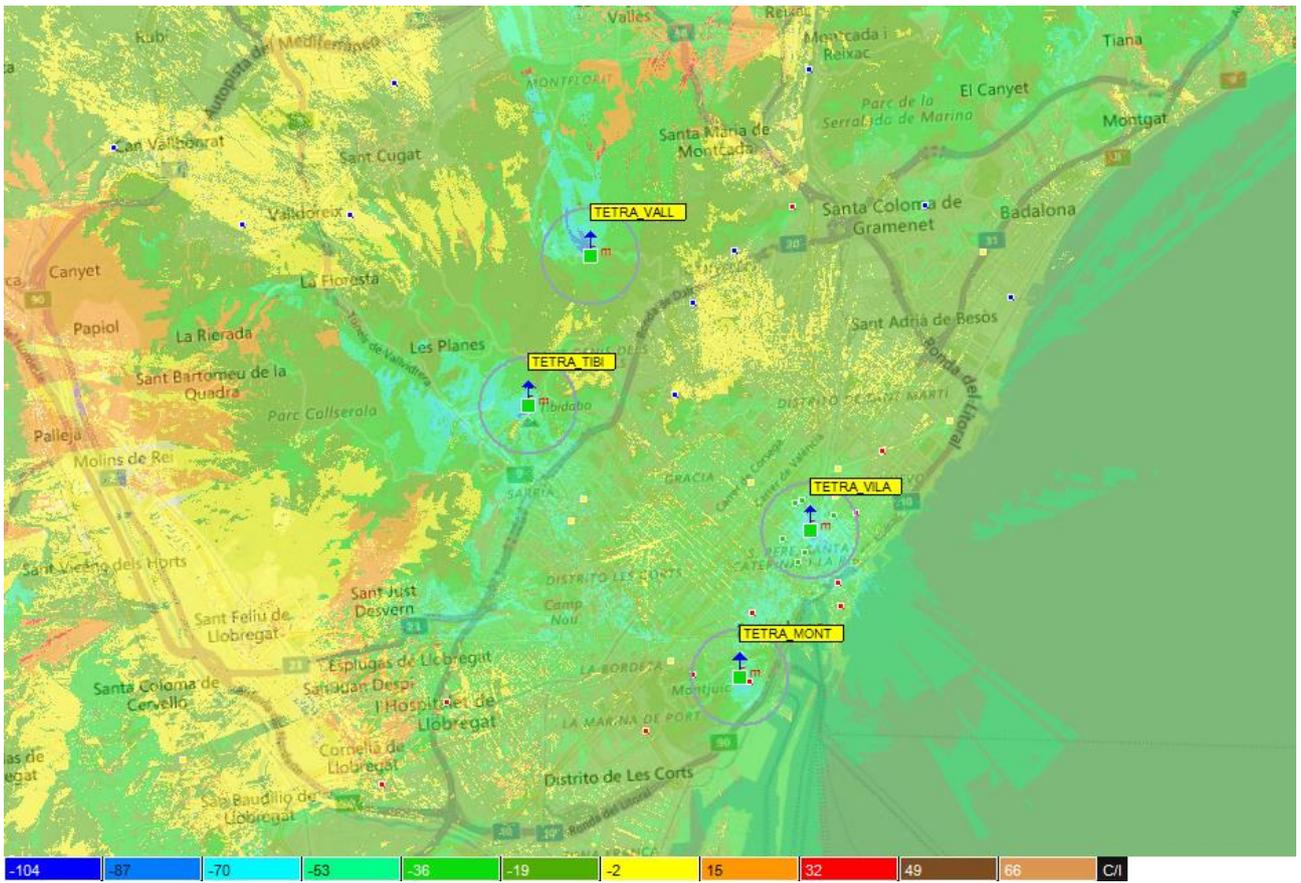


Figura 4.64. Mapa C/I: mínimo C/I global DMR (Caso 1)

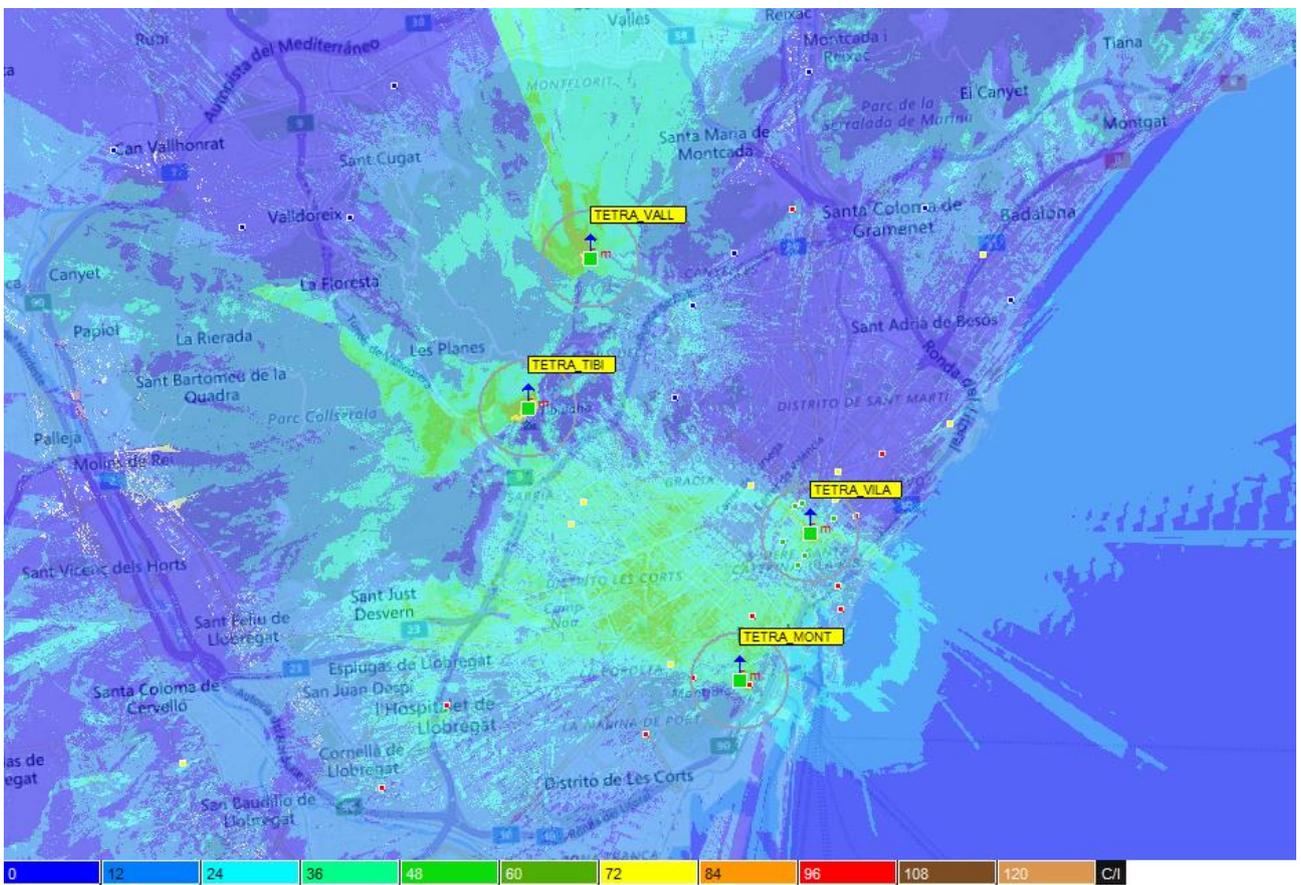


Figura 4.65. Mapa C/I: mínimo C/I en mejor servidor DMR (Caso 1)

Para anular la interferencia, como en el caso anterior, vamos a establecer un plan de asignación de frecuencias. En este caso, el plan de asignación de frecuencias es distinto en cuanto a las frecuencias utilizadas, al espaciamento de los canales dúplex y al ancho de banda de los canales utilizados. Usaremos la banda VHF de la norma UN-74 del CNAF, comprendida entre 171,5 MHz y los 172,1 MHz, y sus respectivas frecuencias dúplex, espaciadas 4,6 MHz por debajo. Podemos consultar el resumen de este plan de asignación de frecuencias en el Anexo C. Los mapas C/I tras dicha asignación quedan reflejados en las figuras 4.66 y 4.67.

Tras el ajuste de las frecuencias debemos proceder al emparentamiento de suscriptores con los repetidores, ya que de esta manera podremos efectuar el análisis de cobertura sobre los suscriptores, así como el análisis de tráfico. Hacemos este emparentamiento con los dos métodos vistos en el caso anterior: emparentamiento al mejor servidor y al servidor más cercano. En este caso sólo vamos a presentar los informes, pues los mapas son parecidos a los de las figuras 4.34 y 4.36, solo que con algunos suscriptores apuntando a distintos repetidores. Lo interesante es el número de suscriptores emparentados en cada repetidor en cada uno de los casos. Nótese que en esta ocasión ya disponemos del tráfico generado por cada una de las RTU, con lo que los informes del emparentamiento de suscriptores ya nos van a dar el cálculo aproximado⁶ del tráfico que van a cursar los repetidores.

Por regla general, el emparentamiento con el servidor más cercano hace un reparto más equitativo de suscriptores emparentados en cada uno de los repetidores, aunque no proporciona los mejores niveles de potencia en Tx/Rx. El reparto más equitativo mejorará las especificaciones de tráfico en detrimento de los niveles de potencia en Tx/Rx, por lo que tenemos que dar una solución de compromiso. En un principio intentaremos cumplir todos los requisitos emparentando las remotas al mejor servidor.

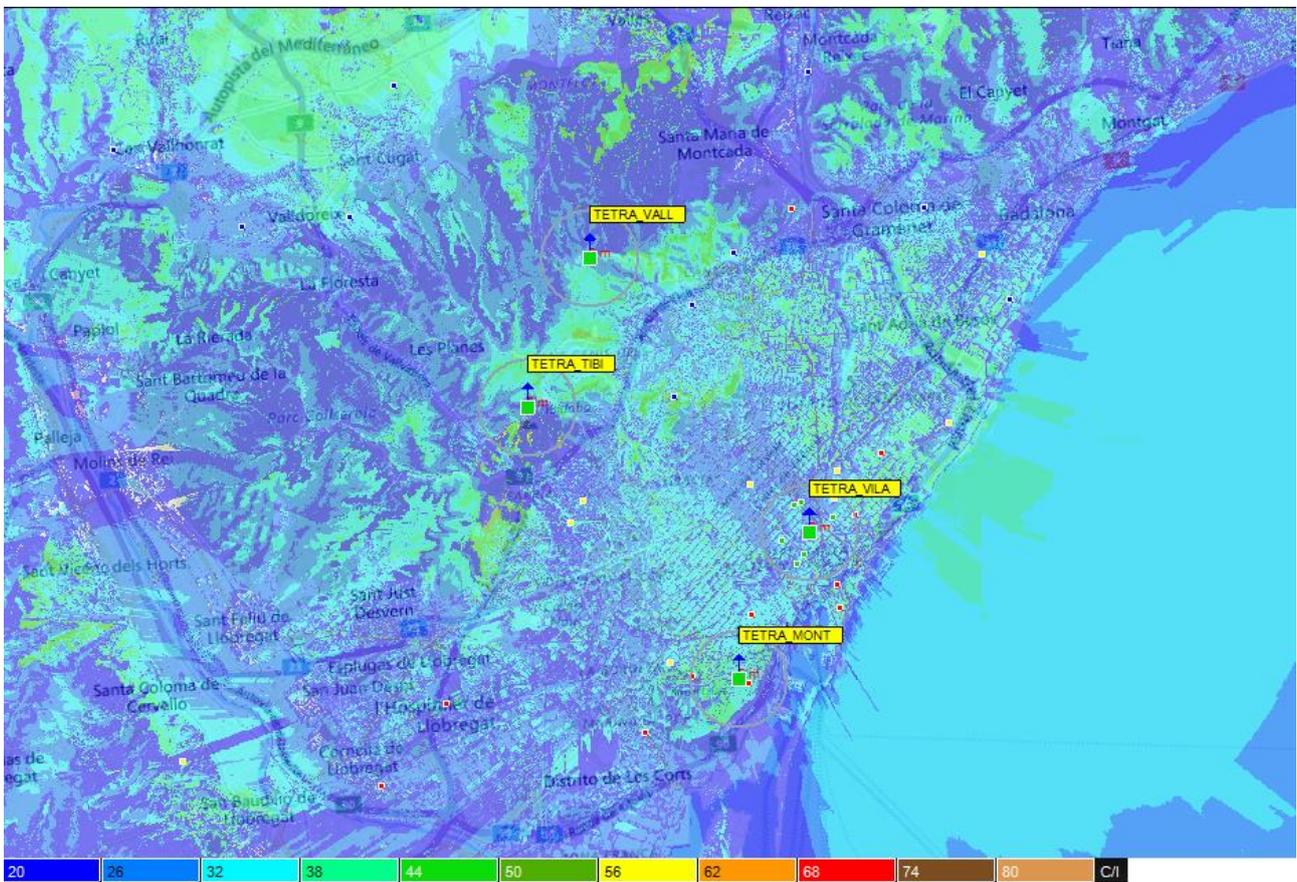


Figura 4.66. Mapa C/I: mínimo C/I global DMR tras ajuste de frecuencias (Caso 1)

⁶ Tampoco será el tráfico real en este caso, pues falta por ajustar la distribución empleada (Erlang B, Erlang C...) realizada en la asignación de dispositivos.



Figura 4.67. Mapa C/I: mínimo C/I en mejor servidor DMR tras ajuste de frecuencias (Caso 1)

TRÁFICO DE ESTACIÓN - Enlace de bajada

Estación	BST	Suscriptores	Entidades	Demanda	GdS B	Líneas	AB (MHz)	Mbits dl	TD dB	plazamie
TETRA_TIBI	1	4	0	0.07	93.75	0.0	0.05	0.0000	0	4
TETRA_VALL	2	4	0	0.07	93.75	0.0	0.05	0.0000	0	4
TETRA_MONT	3	18	0	0.30	76.93	0.0	0.23	0.0000	0	18
TETRA_VILA	4	15	0	0.25	80.01	0.0	0.19	0.0000	0	15

Total suscriptores en BBDD: 41

Total suscriptores en el mapa: 41

Total suscriptores emparentados (BBDD): 41 (100.00)

Total parented entities (base): 0 (0.00 pc)

Total suscriptores emparentados (selección): 41 (100.00)

Figura 4.68. Informe suscriptores emparentados al mejor servidor en DMR

TRÁFICO DE ESTACIÓN - Enlace de bajada

Estación	BST	Suscriptores	Entidades	Demanda	GdS B	Líneas	AB (MHz)	Mbits dl	TD dB	plazamie
TETRA_TIBI	1	6	0	0.10	90.91	0.0	0.07	0.0000	0	6
TETRA_VALL	2	6	0	0.10	90.91	0.0	0.07	0.0000	0	6
TETRA_MONT	3	8	0	0.13	88.24	0.0	0.10	0.0000	0	8
TETRA_VILA	4	21	0	0.35	74.08	0.0	0.26	0.0000	0	21

Total suscriptores en BBDD: 41

Total suscriptores en el mapa: 41

Total suscriptores emparentados (BBDD): 41 (100.00)

Total parented entities (base): 0 (0.00 pc)

Total suscriptores emparentados (selección): 41 (100.00)

Figura 4.69. Informe suscriptores emparentados al servidor más cercano en DMR

En este caso vemos que tampoco es tan equitativo dicho reparto, y además puede que las especificaciones de tráfico definidas anteriormente no se alcancen en ninguno de los 2 casos. Nos quedamos con el emparentamiento en mejor servidor, por proseguir la comparación con el caso que definimos en TETRA, en el cual también nos quedamos con dicho emparentamiento.

Pasamos a analizar la cobertura en el enlace descendente. Para ello, primero debemos definir la relación señal a ruido, al igual que lo hicimos en el caso anterior. Usamos una BER de 10^{-2} , BER utilizada en los tests de sensibilidad para los equipos de DMR, dado que el estándar en sí no define otra BER distinta para este tipo de sistemas. Además, así podemos comparar con el caso de TETRA, al haber seleccionado la misma BER que hicimos en el caso anterior.

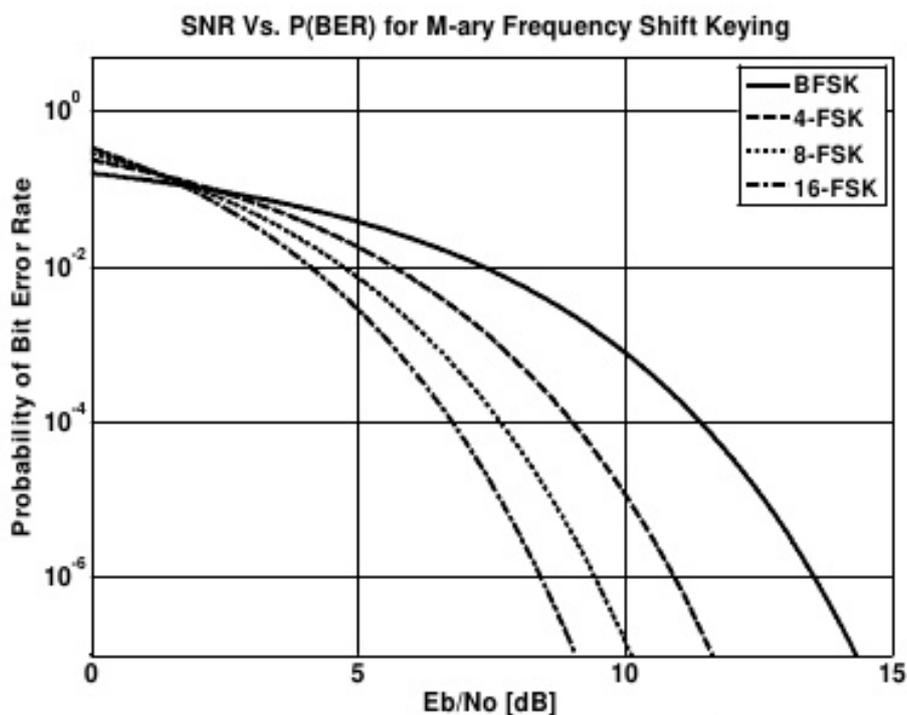


Figura 4.70. Relación BER – E_b/N_0 para modulación 4FSK

Para este caso, tenemos que la relación E_b/N_0 es de unos 6 dB. Aplicando de nuevo la ecuación vista anteriormente para calcular la relación señal a ruido, teniendo en cuenta que en este caso $R_b = 9,6$ kbps y $B = 12,5$ kHz, tenemos una relación señal a ruido de 4,85 dB.

Para este caso tenemos que todas las antenas que se utilizan son directivas, con ganancia de 8.15 dBi. Con esto, para que se cumpla la relación SNR se debe cumplir que el mínimo nivel de señal recibido en los suscriptores debe ser:

$$P_{Rx} = -110 \text{ dBm} + 8.15 \text{ dBi} + 4.85 \text{ dB} = -97 \text{ dBm}$$

Todo lo recibido por debajo de este nivel de señal estará afectado por el ruido en el canal descendente. En cuanto al canal ascendente, el cálculo para este nivel mínimo de señal recibida en los repetidores, contando con las pérdidas en recepción, es el siguiente:

$$P_{Rx} = -110 \text{ dBm} + 5.15 \text{ dBi} - 1 \text{ dB} + 4.85 \text{ dB} = -101 \text{ dBm}$$

Del segundo caso de TETRA aprendimos que se puede ver el nivel recibido en los suscriptores sin haber calculado la cobertura previamente, usando el análisis punto a punto. Por paralelismo con el primer caso de TETRA, haremos el análisis de suscriptores cubiertos en base a la cobertura calculada para el enlace descendente, y el análisis punto a punto para el enlace ascendente. Y, como en el caso anterior, consideraremos buenos niveles de recepción -90 dBm en el enlace descendente y -96 dBm en enlace ascendente. En este caso, el margen es menor con respecto a los definidos para TETRA, pues en este caso tenemos que el umbral en el enlace descendente es de -94 dBm y en el enlace ascendente es de -102 dBm, por lo que tendríamos de margen +4 dB y +6 dB respectivamente con respecto al umbral definido.

Podemos ver los informes de cobertura en enlace descendente y ascendente en el Anexo D. Como vemos, hay un solo suscriptor, resaltado en amarillo, que no cumple con los márgenes definidos, pero en ninguno de los dos enlaces se ve afectado por ruido en algún momento. Para que cumpla los márgenes se puede estudiar una elevación de antenas o cambio del emplazamiento de la misma, para ver si ganamos en potencia recibida, al igual que planteamos en el caso de TETRA, pues en ningún caso se contempla un aumento de potencia en transmisión, principalmente por temas de posibles interferencias con sistemas externos al nuestro.

Por último quedaría realizar el análisis de tráfico. Como vimos cuando realizamos el emparentamiento, el estudio aproximado del tráfico parece indicar que no se cumplirán las especificaciones que hemos definido para TETRA (GoS, Grade of Service, del 97%, duración media 1s, retraso medio 0.5s en Erlang C). Realizamos la asignación de dispositivo como vimos en la figura 4.42, cambiando el número de slots por frecuencia a 2, con 1 slot reservado para el canal de control. Con esto obtenemos el informe de tráfico del Anexo E.

Viendo el informe del anexo, confirmamos lo que se anunciaba en el emparentamiento, que no se cumplen las especificaciones de tráfico vistas en TETRA. Para intentar cumplir las mismas vamos a proponer dos soluciones, cada una con sus respectivos informes:

- Aumento del retraso medio de la comunicación: si aumentamos el retraso medio objetivo para la comunicación de las RTU incrementaremos el GoS, a costa de asumir que una RTU tardará más en comunicar en promedio que en el caso anterior, en el caso de que la llamada de dicha RTU no pueda ser atendida de inmediato al estar el canal ocupado. Como se muestra en el informe del Anexo E, si ajustamos este retraso objetivo medio a 3.5s, el GoS se cumple para todos los repetidores usando un solo radiocanal por cada uno de ellos.
- Aumento de radiocanales por repetidor: esta solución es más cara que la anterior, pues requiere un gasto mayor en infraestructuras de comunicación, así como en la asignación de las correspondientes bandas de frecuencia. Para ello, utilizamos una configuración tal que, en cada emplazamiento se asocian 2 BS con tal fin de tener 2 radiocanales con 2 timeslots cada una: una con el slot de control y el de tráfico, y la otra con 2 slots de tráfico, controlada por el slot de control de la primera BS. El GoS en este caso se cumple en mejores condiciones que en el caso anterior en el que aumentamos el retraso objetivo.

Con ambas soluciones se cumpliría con creces el GoS establecido, sólo dependerá de la calidad/precio que estemos dispuestos a dar a nuestra red, dado que la segunda solución es más cara que la primera.

4.4.2.2 Simulación a partir de la planificación futura

Por paralelismo con el caso anterior, realizamos el diseño a partir de los suscriptores, teniendo en cuenta que vamos a utilizar los umbrales deseados. En el caso del enlace descendente tendremos un umbral de -90 dBm (24 dBuV/m

con antenas de ganancia 8.15 dBi en VHF) y en el enlace ascendente un umbral de -96 dBm (21 dBuV/m con antenas de ganancia 5.15 dBi en VHF). Nos vamos al menú de planificación futura de la pestaña de suscriptores, tal y como vimos en la figura 4.43, y colocamos en este caso los datos de los repetidores DMR. El emparentamiento lo realizamos también con el mejor servidor. Tras efectuar el análisis nos genera el informe que vemos en la figura 4.71, en el cual podemos observar resultados aproximados de tráfico de la red. Se observa que no se cumple el GoS requerido de primeras, cosa que intentaremos solucionar después.

TRÁFICO DE ESTACIÓN - Enlace de bajada

Estación	BST	Suscriptores	Entidades	Demanda	GdS B	Líneas	AB (MHz)	Mbits dl	TD dB	iplazamie
c966399	1	41	0	0.68	59.42	0.0	0.51	0.0000	0	41



Figura 4.71. Informe tras planificación futura DMR

En principio vemos que solo es necesario un repetidor para cumplir los requisitos de cobertura, al que se emparentan todos los suscriptores. Queda efectuar la comprobación de que el repetidor está en un sitio en el que se pueda ubicar físicamente sin ningún tipo de impedimento, como en el caso de TETRA.



Figura 4.72. Detalle de ubicación del emplazamiento DMR

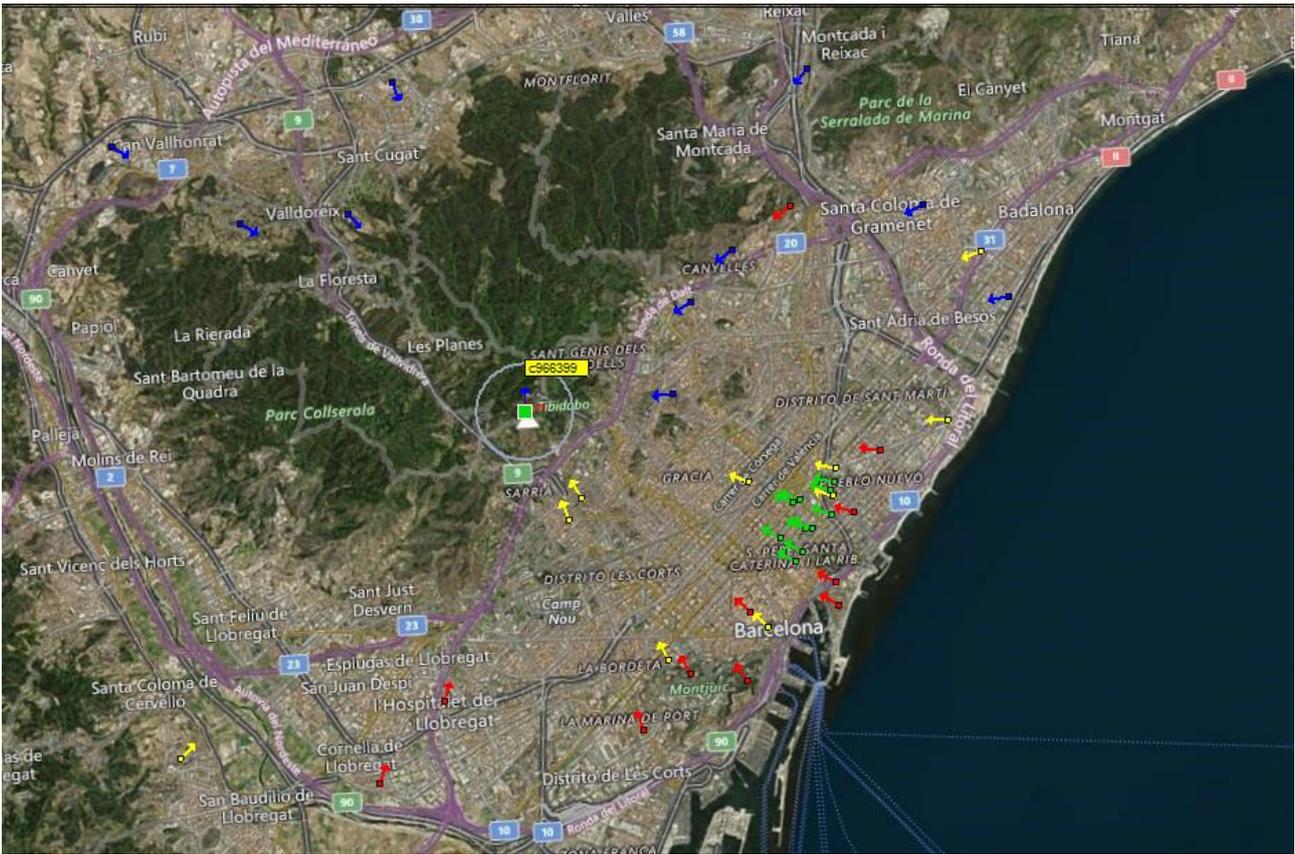


Figura 4.73. Vista general planificación futura DMR

Realizamos los correspondientes análisis P2P en enlace descendente y ascendente para probar que los niveles de cobertura están dentro de los umbrales definidos. Estos informes se presentan en el Anexo D.

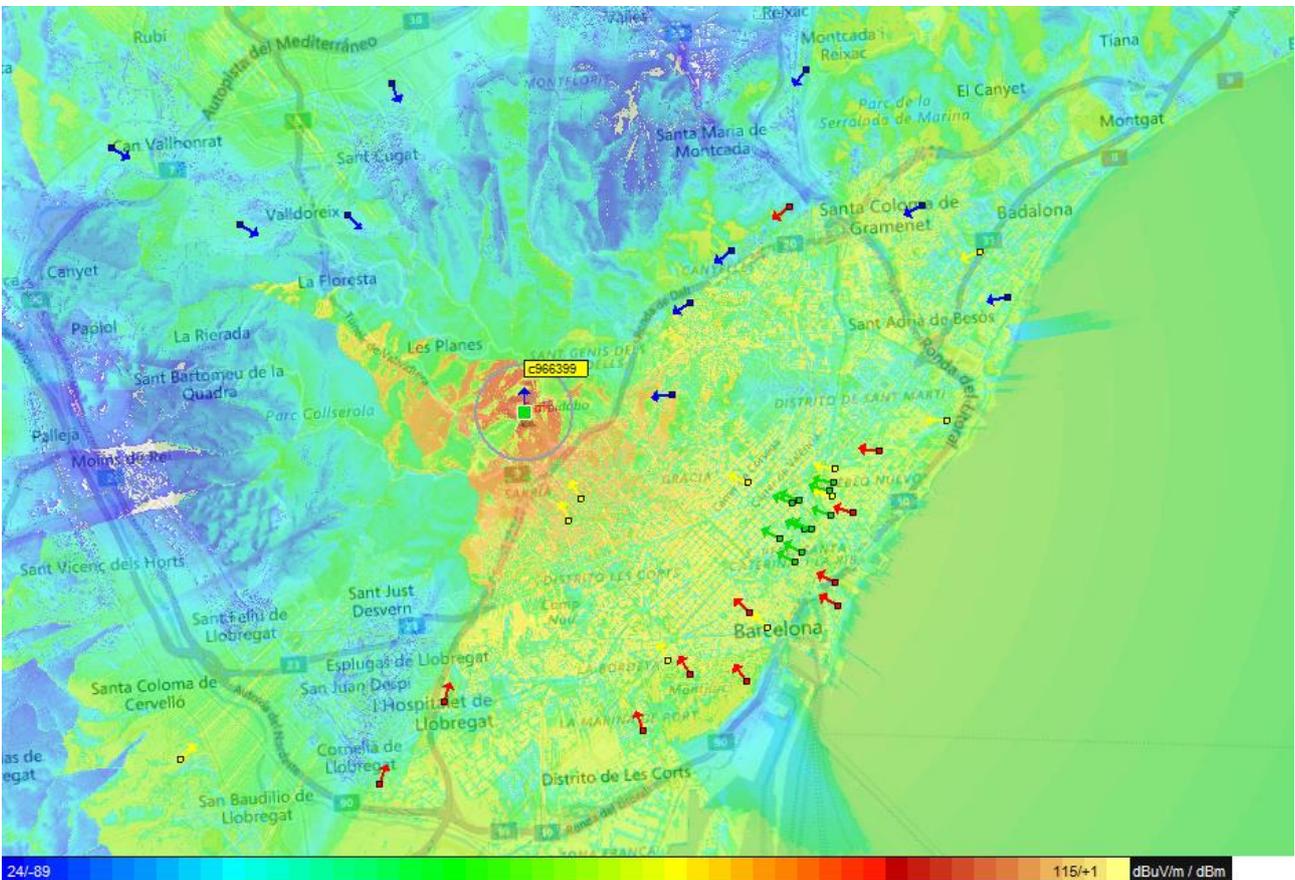


Figura 4.74. Mapa cobertura compuesta DMR (Caso 2)

Al cumplir con los umbrales definidos, también cumplimos con la relación SNR usada para enlaces ascendente y descendente, tal y como se comprobó en el caso anterior de DMR.

También hay que destacar que, al tener un solo repetidor no se van a producir interferencias internas en nuestra red, por lo que en principio no hay que efectuar un plan de frecuencias concreto.

En cuanto al asunto del tráfico, con la asignación de dispositivos pertinente (figura 4.42), obtenemos el nuevo informe de tráfico, disponible en el Anexo E, y vemos que tampoco se cumple el GoS definido. Para resolverlo, en este caso podemos efectuar una de las 2 soluciones vistas en el caso anterior de DMR: o bien asumir que tendré un mayor retraso en las comunicaciones al tener llamadas encoladas durante más tiempo, o bien instalar otra BS en el repetidor. En el caso de aumentar el tiempo de espera en cola de las llamadas tampoco cumplimos el GoS en este caso, sin embargo, si en la asignación de dispositivos ponemos otro repetidor más (esto es, otro radiocanal (Cx)), se observa que el GoS se cumple con creces. Lo que nos debemos de preocupar a la hora de dar esta solución es de utilizar un radiocanal distinto del que usa la primera BS instalada, dentro del plan de frecuencias definido para el primer caso de DMR, con el fin de que no exista interferencia alguna dentro de nuestra propia red. Podemos consultar ambos informes en el Anexo E y comprobar, que con esta última opción, sí logramos tener un GoS apropiado.

5 RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados que se han ido obteniendo a lo largo de las simulaciones residen en los documentos gráficos e informativos que hemos podido obtener gracias a ICS Telecom, vistos inmediatamente después de cada análisis que se ha realizado, así como recurriendo a los anexos del presente documento para ver la información obtenida en los distintos informes generados por la herramienta software. Estos resultados han sido comentados brevemente con el fin de ver si se van cumpliendo las especificaciones que pretendemos dar a nuestra red.

Las soluciones dadas anteriormente se han priorizado con respecto a las mejores opciones de cobertura en todo momento. De ahí que cuando se ha presentado alguna disyuntiva en cuanto al emparentamiento de suscriptores se haya elegido la opción de emparentar con el mejor servidor. Si bien puede parecer la mejor opción, a veces es preferible practicar otro tipo de soluciones, pese a no cumplir los requerimientos en el propio diseño de la red con software, pues se trata de simulaciones y no de un caso real. Por ejemplo, podrían relajarse un poco las especificaciones de cobertura con el fin de que la red nos permita un tránsito de tráfico óptimo por la misma. Es más, como hemos podido ir viendo en los distintos resultados, hay casos en los que no se cumplen las especificaciones de cobertura y sería necesario revisar y probar las instalaciones en campo haciendo alguna que otra modificación a las mismas. Así pues, dichas simulaciones no presentan soluciones 100% fiables, pero podemos obtener una previsión bastante aproximada a lo que después nos encontraremos al poner en servicio la infraestructura de nuestra red, pues una buena planificación y diseño previo nos pueden ahorrar mucho trabajo al hacerlo.

5.1 Discusión

Vistos los resultados de las soluciones dadas a nuestro problema, podríamos comparar los aspectos más relevantes de las mismas, punto por punto.

5.1.1 Cobertura

En cuanto a cobertura se refiere DMR es más robusto que TETRA. Independientemente de la ganancia de las antenas utilizadas en recepción, y para un mismo nivel de intensidad de campo en el receptor, se puede demostrar que la potencia recibida en los suscriptores es mayor que en TETRA, debido al hecho de usar una banda de frecuencias menores (VHF) que las usadas por TETRA (UHF). La explicación de este hecho viene dada por la ecuación de Friis del cálculo de potencia recibida en función de la intensidad de campo recibida:

$$P_r(dBm) = E(dB\mu V/m) - 20 \log_{10} f(MHz) - 77.2 + G_r$$

Donde P_r es la potencia recibida en un punto, E la intensidad de campo en dicho punto y G_r la ganancia de la antena receptora. Si tenemos en cuenta que en DMR las frecuencias utilizadas para la transmisión de repetidores están en torno a los 171 MHz y en TETRA están en torno a los 425 MHz, esto nos da una diferencia de unos 8 dB entre un caso y otro, pues $20 \log(425) \approx 52.57$ y $20 \log(171) \approx 44.65$, y es un término de la ecuación que resta al resultado. Si además tenemos en cuenta que en DMR hemos utilizado sólo antenas directivas con ganancia de 8.15 dBi para los suscriptores, esto hará posible una recepción de cobertura aún mayor que en TETRA en el cómputo global (antenas omnidireccionales de 2.15 dBi, aunque algunas son directivas de 9.15 dBi).

Esta información no es tan fácil de observar si miramos solamente los mapas de cobertura de ambas tecnologías, pero sí es más intuitivo al comparar los niveles de cobertura recibidos por los suscriptores en los informes del Anexo D, en el cual hay centros para los cuales ni siquiera se cumplen los requisitos de cobertura con TETRA, mientras que para DMR sí que se cumplen dichos requisitos para los mismos centros.

Dentro de cada una de las tecnologías, los resultados de cobertura son mejores en los casos en los que hemos calculado el emplazamiento de los repetidores con la herramienta de planificación futura, ya que estamos forzando los niveles de cobertura que los suscriptores deben de tener en la red.

5.1.2 Interferencia

Aunque lo que nos interesa en este caso es la interferencia interna de nuestra propia red, también debemos valorar

la interferencia externa que podamos transmitir o recibir en nuestros equipos. De esta manera, si nos ponemos en lugar de un receptor de una red externa sintonizado a las frecuencias de los repetidores de nuestra red, sería más frecuente que se viese interferido por una transmisión en DMR que en TETRA, por el hecho anteriormente explicado referente a la cobertura. Aclaramos que esto no debería pasar al tener unas bandas de frecuencia asignadas, con lo que dentro de ellas no debería de interferirse la comunicación, así como nosotros no deberíamos interferir las comunicaciones de terceros.

Internamente, la interferencia en el caso de DMR es menor que en TETRA, pues la relación C/I que debe cumplirse en DMR (12 dB para cocanal, -50 dB para canal adyacente) es menor que la que debe cumplirse en TETRA (19 dB para cocanal, -45 dB para canal adyacente). Además, la RXAPA de las antenas omnidireccionales es menor que en las directivas, siempre y cuando la interferencia no se reciba por las acimutales con mayor directividad en estas últimas, ya que las antenas omnidireccionales no discriminan las señales recibidas por cualquier acimutal. Nótese que en este caso hablamos siempre de interferencia en el sentido descendente de la comunicación, ya que los repetidores están en transmisión continua y los suscriptores no, además de suponer que cuando estos quieren comunicarse lo hacen en períodos tan breves de tiempo que no suelen coincidir con otros suscriptores transmitiendo, y si lo hacen, lo hacen por escucha activa del canal, con lo que los suscriptores observan cuando el canal está ocupado y cuando no.

Si bien todo esto es cierto, con los planes de frecuencia llevados a cabo conseguimos anular la interferencia por completo. Debemos tener en cuenta que podemos asignar las bandas de frecuencia libremente al suponer que disponemos de suficientes bandas de frecuencia para utilizar en nuestro caso, pero no siempre es así, dado que el espectro electromagnético es un recurso escaso y valioso y debe optimizarse en la medida de lo posible. Se podrían haber ensayado soluciones que aprovecharan más este recurso, pero se ha decidido anular la interferencia totalmente con el fin de que nuestra red tenga un buen respaldo en caso de posibles caídas de los repetidores de la red.

Dentro de TETRA y de DMR tendremos una interferencia menor en los casos que ubicamos los repetidores en posiciones optimizadas según la cobertura de los suscriptores, ya que son soluciones que emplean un menor número de repetidores en la red. Tal es así que en el segundo caso de DMR sólo tenemos un repetidor, y no tenemos interferencia alguna, al no tener nada que interfiera en nuestra propia red.

5.1.3 Ruido

Se han escogido diferentes niveles de ruido de fondo para TETRA y DMR conforme a los niveles medios de sensibilidad que vienen establecidos en el documento ETSI EN 300 113-1 acerca de las comunicaciones PMR en anchos de banda de 25, 20 y 12.5 kHz, del cual se ha extraído la siguiente tabla:

Ancho de banda del canal	Tasa de transmisión	Sensibilidad media
12,5 kHz	9,6 kbit/s o menos	-110 dBm
	Entre 9,6 kbit/s y 16 kbit/s	-105 dBm
	Entre 16 kbit/s y 38,4 kbit/s	-98 dBm
	Más de 38,4 kbit/s	-93 dBm
20 o 25 kHz	9,6 kbit/s o menos	-110 dBm
	Entre 16 kbit/s y 38,4 kbit/s	-105 dBm
	Entre 38,4 kbit/s y 76,8 kbit/s	-98 dBm
	Más de 76,8 kbit/s	-93 dBm

Tabla 5.1. Niveles de sensibilidad media comunicaciones PMR

Para poder hacer la comparación de la relación señal a ruido, se ha escogido una BER de 10^{-2} , la que venía empleada en el caso estático de TETRA, y así podíamos ver la SNR a cumplir en cada caso, que para el caso de TETRA es 8,58 dB y para el caso de DMR es de 4,85 dB.

Este hecho no sólo depende del nivel de ruido (incluyendo el ancho de banda y la tasa de transmisión, como se ha visto en la tabla) y la BER, sino también de las modulaciones empleadas en uno y otro caso. En el caso de TETRA empleamos $\pi/4$ -DQPSK y en el caso de DMR empleamos 4-FSK, pero esto sólo nos aporta una diferencia de 1 dB en un caso respecto a otro, pues en TETRA tenemos E_b/N_0 de unos 7 dB, mientras que en DMR es de unos 6 dB.

Se observa que la SNR a cumplir es menor en el caso DMR a costa de tener una menor tasa de transmisión y ancho de banda, aunque esto dará en conjunto una menor velocidad de transmisión de los datos para una misma transmisión en TETRA y DMR. Esto tiene su inconveniente como vamos a explicar a continuación.

5.1.4 Tráfico

Debemos tener en cuenta que nos encontramos en el diseño de una red troncal, por lo que debemos diseñar la red en régimen de llamadas en espera y no en régimen de llamadas perdidas. Por ello hemos utilizado la distribución Erlang C para los cálculos de tráfico, con un tiempo medio de duración de la llamada de 1 segundo y un tiempo de espera medio de la llamada de 0.5 segundos en cola.

En términos de tráfico, TETRA es mucho mejor que DMR. El hecho de disponer de 2 timeslots más por cada BS para la transmisión de datos a una mayor velocidad da una ventaja mucho mayor a TETRA, dado que el tráfico generado por los suscriptores es el mismo en ambos casos. Si además, consideramos el mismo tiempo medio de ocupación del canal para un caso y otro (1 segundo) significa que para la transmisión de un paquete de datos en TETRA, al transmitir a mayor velocidad, habrá un menor número de ocupaciones del canal que si transmitimos el mismo paquete en DMR. Por ello, como se observa en los resultados de los anexos, para lograr el mismo GoS en los 2 casos, se propone que en DMR se tomen otras medidas como aumentar el tiempo medio de espera en cola de las llamadas o colocar BS adicionales en los emplazamientos. El primer método es menos recomendable dado que contribuye a la congestión de la red, al estar los mensajes encolados durante mayor tiempo. Por contraposición, el segundo caso es mejor, pero sale más caro poner nuevas BS en los emplazamientos y un peor aprovechamiento del espectro disponible, pues tendríamos que habilitar un nuevo radiocanal por cada nueva BS instalada.

5.1.5 Robustez de la red

Cuando hablamos de robustez de la red lo hacemos en el sentido de que, en caso de alguna avería dentro de la misma, el impacto sea mínimo. Por ejemplo, como comentamos anteriormente, en caso de caída de alguno de los repetidores, tanto las emisoras TETRA como las DMR tienen capacidad de autosintonización a la frecuencia de aquellos repetidores de los que reciban un mayor nivel de potencia en recepción, de manera que la comunicación con dicha instalación no se vea cortada.

En este caso las dos redes diseñadas en TETRA son más robustas que las dos diseñadas en DMR. Este hecho se debe a que en TETRA usamos antenas omnidireccionales en los suscriptores, facilitando que puedan recibir señal en cualquiera de las componentes acimutales por las que le llegue la potencia de los distintos repetidores, siempre y cuando se supere el umbral de recepción establecido (y se cumpla la relación SNR, por supuesto). En cambio, en DMR sólo usamos antenas direccionales apuntando al repetidor con el que están emparentados los centros y, a pesar de que puede ser que capten potencia de otro repetidor (siempre y cuando la potencia de este le llegue por las acimutales en las que el patrón de radiación de la antena sea mayor), esto no será lo habitual, y complicará que en caso de caída de algún repetidor dichos centros sigan comunicando.

Al comparar en las mismas tecnologías, por lo general, las redes que dispongan de un mayor número de repetidores siempre serán más robustas que las que tienen menos, pues tienen un mayor número de opciones para comunicar en caso de avería.

5.1.6 Ampliación de la red

Al hablar en este caso de ampliación de la red, hay que entender que nos referimos a colocar un mayor número de suscriptores para que comuniquen con los repetidores de la red. La discusión acerca de qué solución es la mejor con vistas a una futura ampliación de la red se puede hacer desde dos puntos de vista distintos:

- Cobertura: los diseños en DMR cubren un área mayor que los diseños en TETRA, con lo que habrá un mayor número de emplazamientos en los que se pueden colocar los nuevos centros.
- Tráfico: los diseños en TETRA tienen mayores prestaciones de tráfico, lo que permitirá a los repetidores soportar un mayor número de centros estableciendo comunicación con ellos.

Comparando ambos casos, quizás la mejor opción sea TETRA, dado que ya vimos que las prestaciones de tráfico en DMR son bastante más pobres que en TETRA. Independientemente de la ubicación de los nuevos centros en caso de ampliación de la red, se incrementa el número de suscriptores a los que los repetidores darán servicio, por lo que en cualquier caso, esto supondrá un incremento del tráfico en la red, increment que se soportaría mejor con TETRA.

5.1.7 Aspectos económicos

Indiscutiblemente, una mayor calidad en el despliegue de la red supone un mayor coste. A la vista de todo lo comentado hasta ahora, parece que los equipos TETRA poseen mayores prestaciones que los DMR en general, por lo que no es de extrañar que los equipos sean más caros.

Independientemente de qué tecnología pueda resultar más cara, también tendremos que tener en cuenta los gastos a la hora de desplegar nuestra red. Por ejemplo, si los emplazamientos los desplegamos por nuestra cuenta es más probable que nos salga más caro en conceptos de pagos a los dueños del terreno y documentación para la autorización del despliegue que si nos lo alquila una empresa externa que posea infraestructura de red colocada en el terreno en el que queremos efectuar el despliegue. Es por eso que, en general, saldrá más barato el alquiler a terceros que el despliegue por cuenta propia.

Además, debemos de tener en cuenta también el gasto que suponen las licencias para el uso de las bandas de frecuencia que necesitemos. Partimos de la base de que un mayor número de frecuencias supondrá un mayor gasto, y que las bandas de 25 kHz saldrán más caras que las de 12,5 kHz, dado que ocupan mayor espacio en el espectro electromagnético. Esto repercute en que, a mayor número de BS que tengamos, mayor gasto por licencias de bandas de frecuencia.

5.2 Conclusiones

A nivel personal, teniendo en cuenta la discusión anterior y los resultados, la mejor opción sería montar una red TETRA con libre disponibilidad de situar los repetidores donde quisiéramos. Basándonos en que no tenemos otras antenas disponibles para los casos aquí expuestos y que no se van a tocar los parámetros de potencia, este diseño cumple correctamente las prestaciones de cobertura sobre las instalaciones que queremos controlar remotamente, así como las prestaciones de tráfico, el disponer de una red más robusta que en DMR y la posibilidad de ampliar la red sin comprometer los parámetros de tráfico. Puede ser más cara que otras opciones, pero este diseño funcionará mejor que los demás en términos generales.

Por supuesto, esta es una opinión a nivel personal, puesto que la elección de una propuesta de diseño de red dependerá de varios factores a considerar por parte del cliente, factores que se centran en la relación de compromiso calidad/precio. Por una parte debemos decir que no es aconsejable desde el punto de vista económico tener la máxima calidad en la red, a no ser que te lo puedas permitir sin suponer un riesgo económico elevado, pues tener un servicio que vaya cumpliendo los objetivos sin disponer siempre de los mejores equipos, ya que “no es más feliz el que más tiene, sino el que menos necesita”. Por otra parte, bien cierto es que “lo barato sale caro”: puede ser que un cliente quiera gastar lo mínimo posible en la red pero que tenga que estar reparando equipos o reubicando antenas de centros frecuentemente, para lo que se debe pagar un servicio técnico que se encargue de estas tareas así como de mantener la red.

Es por todo esto por lo que el presente documento se debe tomar como posibles alternativas de una propuesta inicial de diseño de red, en el que se expone, con resultados simulados, que planteamiento inicial puede ser el mejor, y, a partir de ahí, ir concretando más la idea de red que tiene en mente el cliente.

Para terminar, se expone a modo de resumen un cuadrante con las fortalezas/debilidades de cada uno de los diseños de red aquí expuestos en cuanto a las características discutidas anteriormente, con el fin de facilitar que el cliente pueda formar su propia conclusión acerca de los diseños aquí presentados.

	TETRA caso 1	TETRA caso 2	DMR caso 1	DMR caso 2
Cobertura	▲▲	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲▲
Interferencia*	▲▲	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲▲
Ruido	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲▲	▲▲▲▲
Tráfico	▲▲▲▲	▲▲▲▲	▲	▲
Robustez red	▲▲▲▲	▲▲▲	▲▲	▲
Ampliación red	▲▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲	▲▲
Coste	▲▲	▲▲	▲▲▲	▲▲▲▲

Tabla 5.2. Resumen características de los distintos diseños

▲▲▲▲ Excelente ▲▲▲ Bueno ▲▲ No muy bueno ▲ Malo

*Cuando nos referimos a interferencia, nos referimos a la interferencia que podemos recibir en nuestra red, no a la que transmitimos a redes externas.

Anexo A: Normas CNAF utilizadas

UN - 74 Empresas de servicios (electricidad)

Las bandas de frecuencias:

166,900 MHz - 167,500 MHz
171,500 MHz - 172,100 MHz
415,300 MHz - 415,800 MHz
425,300 MHz - 425,800 MHz

se destinan para uso exclusivo de las empresas productoras y distribuidoras de energía eléctrica. Para usos de voz podrán ser utilizados anchos de banda máximos correspondientes a una canalización de 12,5 kHz y en el caso de aplicaciones de datos anchos de banda correspondientes a una canalización máxima de 25 kHz.

UN - 76 Empresas de servicios (gas)

Los canales cuyas frecuencias se indican a continuación se destinan exclusivamente para uso de las empresas explotadoras de la red básica nacional de transporte de gas.

Canales dúplex:

167,5125 MHz, 172,1125 MHz
167,5250 MHz, 172,1250 MHz
167,5375 MHz, 172,1375 MHz
167,5500 MHz, 172,1500 MHz
167,5625 MHz, 172,1625 MHz
167,5750 MHz, 172,1750 MHz
167,5875 MHz, 172,1875 MHz
167,6000 MHz, 172,2000 MHz

La anchura de banda de emisión será la correspondiente a una canalización máxima de 12,5 kHz.

Anexo B:

Informes de interferencia

B.0 Informes TETRA caso 1

Informe de relación de protección definida:

Deseado	Frec. MHz	Polar.	No deseado	Frec. MHz	Polar.	C/I dB	IRF dB	Desde
0001 – TETRA_TIBI	425.312500	V	0002 – TETRA_VALL	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0001 – TETRA_TIBI	425.312500	V	0003 – TETRA_MONT	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0001 – TETRA_TIBI	425.312500	V	0004 – TETRA_VILA	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0002 – TETRA_VALL	425.312500	V	0001 – TETRA_TIBI	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0002 – TETRA_VALL	425.312500	V	0003 – TETRA_MONT	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0002 – TETRA_VALL	425.312500	V	0004 – TETRA_VILA	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0003 – TETRA_MONT	425.312500	V	0001 – TETRA_TIBI	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0003 – TETRA_MONT	425.312500	V	0002 – TETRA_VALL	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0003 – TETRA_MONT	425.312500	V	0004 – TETRA_VILA	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0004 – TETRA_VILA	425.312500	V	0001 – TETRA_TIBI	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0004 – TETRA_VILA	425.312500	V	0002 – TETRA_VALL	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx
0004 – TETRA_VILA	425.312500	V	0003 – TETRA_MONT	425.312500	V	19	0	C/I Tx-Rx

Tabla B.1. Informe de relación de protección TETRA (Caso 1)

Informe de interferencia global:

#	Callsign	Wanted Freq (MHz)	Pol.	#	Callsign	Unwanted Freq (MHz)	Pol.	C/I-req (dB)	% interf.	Covered area (km2)	Interfered área (km2)
1	TETRA_TIBI	425.3125	V	2	TETRA_VALL	425.3125	V	19	80.24	457.160	366.845
1	TETRA_TIBI	425.3125	V	3	TETRA_MONT	425.3125	V	19	86.94	457.160	397.439
1	TETRA_TIBI	425.3125	V	4	TETRA_VILA	425.3125	V	19	72.41	457.160	331.019
2	TETRA_VALL	425.3125	V	1	TETRA_TIBI	425.3125	V	19	94.54	347.211	328.238
2	TETRA_VALL	425.3125	V	3	TETRA_MONT	425.3125	V	19	84.20	347.211	292.344
2	TETRA_VALL	425.3125	V	4	TETRA_VILA	425.3125	V	19	77.55	347.211	269.251
3	TETRA_MONT	425.3125	V	1	TETRA_TIBI	425.3125	V	19	59.03	395.968	233.726
3	TETRA_MONT	425.3125	V	2	TETRA_VALL	425.3125	V	19	35.50	395.968	140.573
3	TETRA_MONT	425.3125	V	4	TETRA_VILA	425.3125	V	19	75.11	395.968	297.430
4	TETRA_VILA	425.3125	V	1	TETRA_TIBI	425.3125	V	19	79.69	329.606	262.663

4	TETRA_VILA	425.3125	V	2	TETRA_VALL	425.3125	V	19	67.62	329.606	222.864
4	TETRA_VILA	425.3125	V	3	TETRA_MONT	425.3125	V	19	99.66	329.606	328.494

Tabla B.2. Informe de interferencia global TETRA (Caso 1)

Informe de interferencia en el mejor servidor:

#	Callsign	Wanted Freq (MHz)	Pol.	#	Callsign	Unwanted Freq (MHz)	Pol.	C/I-req (dB)	% interf.	Covered area (km2)	Interfered área (km2)
1	TETRA_TIBI	425.3125	V	2	TETRA_VALL	425.3125	V	19	62.78	120.402	75.5897
1	TETRA_TIBI	425.3125	V	3	TETRA_MONT	425.3125	V	19	56.48	120.402	68.0057
1	TETRA_TIBI	425.3125	V	4	TETRA_VILA	425.3125	V	19	14.43	120.402	17.3729
2	TETRA_VALL	425.3125	V	1	TETRA_TIBI	425.3125	V	19	64.53	52.5428	33.9080
2	TETRA_VALL	425.3125	V	3	TETRA_MONT	425.3125	V	19	32.33	52.5428	16.9890
2	TETRA_VALL	425.3125	V	4	TETRA_VILA	425.3125	V	19	24.24	52.5428	12.7371
3	TETRA_MONT	425.3125	V	1	TETRA_TIBI	425.3125	V	19	43.27	255.954	110.744
3	TETRA_MONT	425.3125	V	2	TETRA_VALL	425.3125	V	19	17.58	255.954	44.9885
3	TETRA_MONT	425.3125	V	4	TETRA_VILA	425.3125	V	19	64.14	255.954	164.179
4	TETRA_VILA	425.3125	V	1	TETRA_TIBI	425.3125	V	19	22.89	41.1169	9.41298
4	TETRA_VILA	425.3125	V	2	TETRA_VALL	425.3125	V	19	14.08	41.1169	5.78883
4	TETRA_VILA	425.3125	V	3	TETRA_MONT	425.3125	V	19	97.30	41.1169	40.0078

Tabla B.3. Informe de interferencia en mejor servidor TETRA (Caso 1)

B.1 Informes TETRA caso 2

Informe de relación de protección definida:

Deseado	Frec. MHz	Pol.	No deseado	Frec. MHz	Pol.	C/I dB	IRF dB	Desde
0001-c837275	425.325	V	0002-c129093	425.325	V	19	0.0	C/I Tx-Rx
0002-c129093	425.325	V	0001-c837275	425.325	V	19	0.0	C/I Tx-Rx

Tabla B.4. Informe de relación de protección TETRA (Caso 2)

Informe de interferencia global:

#	Callsign	Wanted Freq (MHz)	Pol.	#	Callsign	Unwanted Freq (MHz)	Pol.	C/I-req (dB)	% interf.	Covered area (km2)	Interfered área (km2)
1	0001-c837275	425.325	V	2	0002-c129093	425.325	V	19	22.97	405.463	93.1504
2	0002-c129093	425.325	V	1	0001-c837275	425.325	V	19	67.67	92.5954	62.6594

Tabla B.5. Informe de interferencia global TETRA (Caso 2)

Informe de interferencia en el mejor servidor:

#	Callsign	Wanted Freq (MHz)	Pol.	#	Callsign	Unwanted Freq (MHz)	Pol.	C/I-req (dB)	% interf.	Covered area (km2)	Interfered área (km2)
1	0001-c837275	425.325	V	2	0002-c129093	425.325	V	19	12.75	357.952	45.6403
2	0002-c129093	425.325	V	1	0001-c837275	425.325	V	19	57.54	70.4972	40.5612

Tabla B.6. Informe de interferencia en el mejor servidor TETRA (Caso 2)

B.2. Informes DMR caso 1

Informe de relación de protección definida:

Deseado	Frec. MHz	Polar.	No deseado	Frec. MHz	Polar.	C/I dB	IRF dB	Desde
0001 – TETRA_TIBI	171.500000	V	0002 – TETRA_VALL	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0001 – TETRA_TIBI	171.500000	V	0003 – TETRA_MONT	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0001 – TETRA_TIBI	171.500000	V	0004 – TETRA_VILA	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0002 – TETRA_VALL	171.500000	V	0001 – TETRA_TIBI	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0002 – TETRA_VALL	171.500000	V	0003 – TETRA_MONT	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0002 – TETRA_VALL	171.500000	V	0004 – TETRA_VILA	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0003 – TETRA_MONT	171.500000	V	0001 – TETRA_TIBI	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0003 – TETRA_MONT	171.500000	V	0002 – TETRA_VALL	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0003 – TETRA_MONT	171.500000	V	0004 – TETRA_VILA	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0004 – TETRA_VILA	171.500000	V	0001 – TETRA_TIBI	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0004 – TETRA_VILA	171.500000	V	0002 – TETRA_VALL	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx
0004 – TETRA_VILA	171.500000	V	0003 – TETRA_MONT	171.500000	V	12	0	C/I Tx-Rx

Tabla B.7. Informe de relación de protección DMR (Caso 1)

Informe de interferencia global:

#	Callsign	Wanted Freq (MHz)	Pol.	#	Callsign	Unwanted Freq (MHz)	Pol.	C/I-req (dB)	% interf.	Covered area (km2)	Interfered área (km2)
1	TETRA_TIBI	171.5000	V	2	TETRA_VALL	171.5000	V	12	55.98	452.174	253.134
1	TETRA_TIBI	171.5000	V	3	TETRA_MONT	171.5000	V	12	68.34	452.174	309.022
1	TETRA_TIBI	171.5000	V	4	TETRA_VILA	171.5000	V	12	46.13	452.174	208.574
2	TETRA_VALL	171.5000	V	1	TETRA_TIBI	171.5000	V	12	84.53	325.590	275.229
2	TETRA_VALL	171.5000	V	3	TETRA_MONT	171.5000	V	12	65.98	325.590	214.808
2	TETRA_VALL	171.5000	V	4	TETRA_VILA	171.5000	V	12	59.64	325.590	194.169

3	TETRA_MONT	171.5000	V	1	TETRA_TIBI	171.5000	V	12	29.78	379.207	112.929
3	TETRA_MONT	171.5000	V	2	TETRA_VALL	171.5000	V	12	9.000	379.207	34.1122
3	TETRA_MONT	171.5000	V	4	TETRA_VILA	171.5000	V	12	36.60	379.207	138.793
4	TETRA_VILA	171.5000	V	1	TETRA_TIBI	171.5000	V	12	55.82	298.963	166.879
4	TETRA_VILA	171.5000	V	2	TETRA_VALL	171.5000	V	12	33.22	298.963	99.3030
4	TETRA_VILA	171.5000	V	3	TETRA_MONT	171.5000	V	12	95.95	298.963	286.849

Tabla B.8. Informe de interferencia global DMR (Caso 1)

Informe de interferencia en el mejor servidor:

#	Callsign	Wanted Freq (MHz)	Pol.	#	Callsign	Unwanted Freq (MHz)	Pol.	C/I-req (dB)	% interf.	Covered area (km2)	Interfered área (km2)
1	TETRA_TIBI	171.5000	V	2	TETRA_VALL	171.5000	V	12	21.73	123.655	26.8725
1	TETRA_TIBI	171.5000	V	3	TETRA_MONT	171.5000	V	12	18.61	123.655	23.0068
1	TETRA_TIBI	171.5000	V	4	TETRA_VILA	171.5000	V	12	0.682	123.655	0.84320
2	TETRA_VALL	171.5000	V	1	TETRA_TIBI	171.5000	V	12	28.14	58.1592	16.3648
2	TETRA_VALL	171.5000	V	3	TETRA_MONT	171.5000	V	12	2.266	58.1592	1.31775
2	TETRA_VALL	171.5000	V	4	TETRA_VILA	171.5000	V	12	0.414	58.1592	0.24085
3	TETRA_MONT	171.5000	V	1	TETRA_TIBI	171.5000	V	12	11.60	261.986	30.3811
3	TETRA_MONT	171.5000	V	2	TETRA_VALL	171.5000	V	12	1.461	261.986	3.82650
3	TETRA_MONT	171.5000	V	4	TETRA_VILA	171.5000	V	12	29.71	261.986	77.8310
4	TETRA_VILA	171.5000	V	1	TETRA_TIBI	171.5000	V	12	3.510	25.2740	0.88705
4	TETRA_VILA	171.5000	V	2	TETRA_VALL	171.5000	V	12	0.188	25.2740	0.04748
4	TETRA_VILA	171.5000	V	3	TETRA_MONT	171.5000	V	12	76.22	25.2740	19.2628

Tabla B.9. Informe de interferencia en el mejor servidor DMR (Caso 1)

Anexo C:

Informes de los planes de atribución de frecuencias

C.0. Plan de atribución de frecuencias en TETRA

Rango	Tx frec. (MHz)	Rx frec. (MHz)	Atribuible
1	425.325000	425.325000	Sí
2	425.350000	425.350000	Sí
3	425.375000	425.375000	Sí
4	425.400000	425.400000	Sí
5	425.425000	415.425000	Sí
6	425.450000	415.450000	Sí
7	425.475000	415.475000	Sí
8	425.500000	415.500000	Sí
9	425.525000	415.525000	Sí
10	425.550000	415.550000	Sí
11	425.575000	415.575000	Sí
12	425.600000	415.600000	Sí
13	425.625000	415.625000	Sí
14	425.650000	415.650000	Sí
15	425.675000	415.675000	Sí
16	425.700000	415.700000	Sí
17	425.725000	415.725000	Sí
18	425.750000	415.750000	Sí
19	425.775000	415.775000	Sí

Tabla C.1. Atribución de frecuencias en TETRA

C.1. Plan de atribución de frecuencias en DMR

Rango	Tx freq. (MHz)	Rx freq. (MHz)	Atribuible
1	171.500000	166.900000	Sí
2	171.512500	166.912500	Sí
3	171.525000	166.925000	Sí
4	171.537500	166.937500	Sí
5	171.550000	166.950000	Sí
6	171.562500	166.962500	Sí
7	171.575000	166.975000	Sí
8	171.587500	166.987500	Sí
9	171.600000	167.000000	Sí
10	171.612500	167.012500	Sí
11	171.625000	167.025000	Sí
12	171.637500	167.037500	Sí
13	171.650000	167.050000	Sí
14	171.662500	167.062500	Sí
15	171.675000	167.075000	Sí
16	171.687500	167.087500	Sí
17	171.700000	167.100000	Sí
18	171.712500	167.112500	Sí
19	171.725000	167.125000	Sí
20	171.737500	167.137500	Sí
21	171.750000	167.150000	Sí
22	171.762500	167.162500	Sí
23	171.775000	167.175000	Sí
24	171.787500	167.187500	Sí
25	171.800000	167.200000	Sí
26	171.812500	167.212500	Sí
27	171.825000	167.225000	Sí
28	171.837500	167.237500	Sí
29	171.850000	167.250000	Sí
30	171.862500	167.262500	Sí

31	171.875000	167.275000	Sí
32	171.887500	167.287500	Sí
33	171.900000	167.300000	Sí
34	171.912500	167.312500	Sí
35	171.925000	167.325000	Sí
36	171.937500	167.337500	Sí
37	171.950000	167.350000	Sí
38	171.962500	167.362500	Sí
39	171.975000	167.375000	Sí
40	171.987500	167.387500	Sí
41	172.000000	167.400000	Sí
42	172.012500	167.412500	Sí
43	172.025000	167.425000	Sí
44	172.037500	167.437500	Sí
45	172.050000	167.450000	Sí
46	172.062500	167.462500	Sí
47	172.075000	167.475000	Sí
48	172.087500	167.487500	Sí
49	172.100000	167.500000	Sí

Tabla C.2. Atribución de frecuencias en DMR

Anexo D: Informes de cobertura

D.0. Informes TETRA caso 1

Informe de suscriptores cubiertos con antenas omnidireccionales y directivas:

#	Subscriber address	Call-sign	Bit rate Mbit/s	Value (dBuV/m)	Value (dBm, G=2.15)	Value (dBm, G=9.15)
1	34591	TETRA_MONT	0.036	53	-74,6177786	-67,6177786
2	D4500	TETRA_MONT	0.036	71	-56,6177786	-49,6177786
3	10612	TETRA_MONT	0.036	56	-71,6177786	-64,6177786
4	100540	TETRA_TIBI	0.036	41	-86,6177786	-79,6177786
5	BA08244	TETRA_MONT	0.036	76	-51,6177786	-44,6177786
6	100171	TETRA_VILA	0.036	72	-55,6177786	-48,6177786
7	59137	TETRA_MONT	0.036	54	-73,6177786	-66,6177786
8	103792	TETRA_MONT	0.036	48	-79,6177786	-72,6177786
9	20777	TETRA_VILA	0.036	78	-49,6177786	-42,6177786
10	BA90065	TETRA_MONT	0.036	65	-62,6177786	-55,6177786
11	VA04807	TETRA_TIBI	0.036	40	-87,6177786	-80,6177786
12	BT461	TETRA_VALL	0.036	38	-89,6177786	-82,6177786
13	BE137	TETRA_TIBI	0.036	38	-89,6177786	-82,6177786
14	VA09710	TETRA_TIBI	0.036	43	-84,6177786	-77,6177786
15	65994	TETRA_TIBI	0.036	34	-93,6177786	-86,6177786
16	67749	TETRA_MONT	0.036	53	-74,6177786	-67,6177786
17	66813	TETRA_MONT	0.036	69	-58,6177786	-51,6177786
18	D3640	TETRA_VILA	0.036	64	-63,6177786	-56,6177786
19	D2816	TETRA_VALL	0.036	49	-78,6177786	-71,6177786
20	69054	TETRA_VILA	0.036	48	-79,6177786	-72,6177786
21	100535	TETRA_VILA	0.036	81	-46,6177786	-39,6177786
22	LL08560	TETRA_TIBI	0.036	42	-85,6177786	-78,6177786
23	58305	TETRA_MONT	0.036	77	-50,6177786	-43,6177786
24	BA05809	TETRA_MONT	0.036	73	-54,6177786	-47,6177786
25	63105	TETRA_MONT	0.036	90	-37,6177786	-30,6177786
26	66510	TETRA_MONT	0.036	61	-66,6177786	-59,6177786
27	D0197	TETRA_VILA	0.036	74	-53,6177786	-46,6177786

28	65253	TETRA_MONT	0.036	41	-86,6177786	-79,6177786
29	G2982	TETRA_MONT	0.036	30	-97,6177786	-90,6177786
30	66200	TETRA_VILA	0.036	72	-55,6177786	-48,6177786
31	102469	TETRA_MONT	0.036	98	-29,6177786	-22,6177786
32	68191	TETRA_VILA	0.036	98	-29,6177786	-22,6177786
33	BA90596	TETRA_VILA	0.036	92	-35,6177786	-28,6177786
34	66903	TETRA_VILA	0.036	85	-42,6177786	-35,6177786
35	104435	TETRA_VILA	0.036	74	-53,6177786	-46,6177786
36	33559	TETRA_VILA	0.036	113	-14,6177786	-7,617778601
37	BA94009	TETRA_VILA	0.036	93	-34,6177786	-27,6177786
38	D3272	TETRA_VILA	0.036	62	-65,6177786	-58,6177786
39	BA91264	TETRA_VILA	0.036	68	-59,6177786	-52,6177786
40	BA94044	TETRA_VILA	0.036	66	-61,6177786	-54,6177786
41	55436	TETRA_VILA	0.036	84	-43,6177786	-36,6177786

Tabla D.1. Suscriptores cubiertos TETRA (Caso 1)

Análisis P2P cobertura enlace ascendente:

#	Suscriptor	Callsign	FSR (dBuV/m) antes de cambiar antenas	P _{Rx} (dBm) antes de cambiar antenas	FSR (dBuV/m) después de cambiar antenas	P _{Rx} (dBm) después de cambiar antenas
1	34591	TETRA_MONT	36.3	-89.1	43.5	-82.0
2	D4500	TETRA_MONT	57.0	-68.4	57.0	-68.4
3	10612	TETRA_MONT	43.5	-82.0	43.5	-82.0
4	100540*	TETRA_TIBI	32.1	-93.3	32.1	-93.3
5	BA08244	TETRA_MONT	63.4	-62.1	63.4	-62.1
6	100171	TETRA_VILA	57.2	-68.2	57.2	-68.2
7	59137	TETRA_MONT	37.1	-88.3	37.1	-88.3
8	103792	TETRA_MONT	35.6	-89.8	42.7	-82.7
9	20777	TETRA_VILA	66.0	-59.4	66.0	-59.4
10	BA90065	TETRA_MONT	52.5	-72.9	52.5	-72.9
11	VA04807*	TETRA_TIBI	31.8	-93.6	31.8	-93.6
12	BT461*	TETRA_VALL	32.0	-93.5	32.0	-93.5
13	BE137*	TETRA_TIBI	33.2	-92.2	33.2	-92.2
14	VA09710	TETRA_TIBI	27.8	-97.7	34.9	-90.6
15	65994*	TETRA_TIBI	25.3	-100.1	25.3	-100.1

16	67749	TETRA_MONT	40.9	-84.5	40.9	-84.5
17	66813	TETRA_MONT	56.2	-69.3	56.2	-69.3
18	D3640	TETRA_VILA	51.3	-74.1	51.3	-74.1
19	D2816	TETRA_VALL	34.9	-90.5	42.1	-83.4
20	69054	TETRA_VILA	32.7	-92.8	39.8	-85.7
21	100535	TETRA_VILA	68.3	-57.1	68.3	-57.1
22	LL08560	TETRA_TIBI	26.0	-99.4	33.2	-92.3
23	58305	TETRA_MONT	64.3	-61.2	64.3	-61.2
24	BA05809	TETRA_MONT	60.6	-64.8	60.6	-64.8
25	63105	TETRA_MONT	77.7	-47.7	77.7	-47.7
26	66510	TETRA_MONT	42.8	-82.7	42.8	-82.7
27	D0197	TETRA_VILA	59.9	-65.6	59.9	-65.6
28	65253*	TETRA_MONT	35.4	-90.0	35.4	-90.0
29	G2982*	TETRA_MONT	21.9	-103.5	21.9	-103.5
30	66200	TETRA_VILA	58.7	-66.8	58.7	-66.8
31	102469	TETRA_MONT	83.6	-41.9	83.6	-41.9
32	68191	TETRA_VILA	86.1	-39.3	86.1	-39.3
33	BA90596	TETRA_VILA	80.0	-45.4	80.0	-45.4
34	66903	TETRA_VILA	72.0	-53.5	72.0	-53.5
35	104435	TETRA_VILA	61.5	-63.9	61.5	-63.9
36	33559	TETRA_VILA	101.0	-24.4	101.0	-24.4
37	BA94009	TETRA_VILA	80.4	-45.0	80.4	-45.0
38	D3272	TETRA_VILA	45.9	-79.6	45.9	-79.6
39	BA91264	TETRA_VILA	53.2	-72.3	53.2	-72.3
40	BA94044	TETRA_VILA	50.8	-74.6	50.8	-74.6
41	55436	TETRA_VILA	66.5	-58.9	66.5	-58.9

Tabla D.2. Cobertura en enlace ascendente TETRA (Caso 1)

*Ya se había cambiado la antena en estos centros por necesidad de cobertura en enlace descendente.

Filas en amarillo: suscriptores en los que se han cambiado las antenas y las medidas de cobertura están correctas y sin afectación por el ruido.

Filas en rojo: suscriptores en los que no se cumplen los requisitos de cobertura y/o se ven afectados por el ruido.

D.1. Informes TETRA caso 2

Análisis P2P cobertura enlace descendente:

#	Suscriptor	Callsign	P _{Rx} (dBm) antes	P _{Rx} (dBm) después	Modulación
1	34591	c837275	-74.8	-74.8	F: DQPSK
2	D4500	c837275	-57.4	-57.4	F: DQPSK
3	10612	c837275	-71.4	-71.4	F: DQPSK
4	100540	c837275	-73.0	-73.0	F: DQPSK
5	BA08244	c837275	-43.8	-43.8	F: DQPSK
6	100171	c837275	-51.2	-51.2	F: DQPSK
7	59137	c837275	-72.0	-72.0	F: DQPSK
8	103792	c837275	-66.7	-66.7	F: DQPSK
9	20777	c837275	-65.9	-65.9	F: DQPSK
10	BA90065	c837275	-49.2	-49.2	F: DQPSK
11	VA04807*	c837275	-81.6	-74.5	F: DQPSK
12	BT461	c837275	-69.6	-69.6	F: DQPSK
13	BE137	c129093	-45.5	-45.5	F: DQPSK
14	VA09710	c837275	-75.9	-75.9	F: DQPSK
15	65994	c129093	-28.8	-28.8	F: DQPSK
16	67749	c837275	-69.0	-69.0	F: DQPSK
17	66813	c837275	-55.0	-55.0	F: DQPSK
18	D3640	c837275	-67.8	-67.8	F: DQPSK
19	D2816	c837275	-46.8	-46.8	F: DQPSK
20	69054	c837275	-60.6	-60.6	F: DQPSK
21	100535	c837275	-51.8	-51.8	F: DQPSK
22	LL08560	c837275	-63.3	-63.3	F: DQPSK
23	58305	c837275	-52.1	-52.1	F: DQPSK
24	BA05809	c837275	-76.1	-76.1	F: DQPSK
25	63105	c837275	-50.9	-50.9	F: DQPSK
26	66510*	c837275	-82.1	-75.0	F: DQPSK
27	D0197	c837275	-52.5	-52.5	F: DQPSK
28	65253	c837275	-75.7	-75.7	F: DQPSK
29	G2982*	c837275	-84.2	-77.1	F: DQPSK

30	66200	c837275	-52.4	-52.4	F: DQPSK
31	102469	c837275	-56.3	-56.3	F: DQPSK
32	68191	c837275	-75.1	-75.1	F: DQPSK
33	BA90596	c837275	-51.3	-51.3	F: DQPSK
34	66903	c837275	-51.1	-51.1	F: DQPSK
35	104435	c837275	-67.9	-67.9	F: DQPSK
36	33559	c837275	-52.6	-52.6	F: DQPSK
37	BA94009	c837275	-50.4	-50.4	F: DQPSK
38	D3272	c837275	-75.8	-75.8	F: DQPSK
39	BA91264*	c837275	-86.1	-78.9	F: DQPSK
40	BA94044*	c837275	-83.9	-76.7	F: DQPSK
41	55436	c837275	-51.6	-51.6	F: DQPSK

Tabla D.3. Cobertura en enlace descendente TETRA (Caso 2)

*Antenas cambiadas debido a necesidad de cobertura en el enlace ascendente.

Análisis P2P cobertura enlace ascendente:

#	Suscriptor	Callsign	FSR (dBuV/m) antes de cambiar antenas	P _{Rx} (dBm) antes de cambiar antenas	FSR (dBuV/m) después de cambiar antenas	P _{Rx} (dBm) después de cambiar antenas
1	34591	c837275	40.8	-84.6	40.8	-84.6
2	D4500	c837275	58.1	-67.4	58.1	-67.4
3	10612	c837275	44.1	-81.3	44.1	-81.3
4	100540	c837275	42.5	-83.0	42.5	-83.0
5	BA08244	c837275	71.6	-53.8	71.6	-53.8
6	100171	c837275	64.3	-61.2	64.3	-61.2
7	59137	c837275	43.5	-81.9	43.5	-81.9
8	103792	c837275	48.7	-76.7	48.7	-76.7
9	20777	c837275	49.6	-75.8	49.6	-75.8
10	BA90065	c837275	66.2	-59.2	66.2	-59.2
11	VA04807	c837275	33.9	-91.5	41.1	-84.4
12	BT461	c837275	45.9	-79.6	45.9	-79.6
13	BE137	c129093	69.9	-55.5	69.9	-55.5
14	VA09710	c837275	39.6	-85.9	39.6	-85.9
15	65994	c129093	86.6	-38.8	86.6	-38.8
16	67749	c837275	46.5	-79.0	46.5	-79.0

17	66813	c837275	60.4	-65.0	60.4	-65.0
18	D3640	c837275	47.7	-77.8	47.7	-77.8
19	D2816	c837275	68.7	-56.8	68.7	-56.8
20	69054	c837275	54.9	-70.5	54.9	-70.5
21	100535	c837275	63.6	-61.8	63.6	-61.8
22	LL08560	c837275	52.2	-73.3	52.2	-73.3
23	58305	c837275	63.4	-62.1	63.4	-62.1
24	BA05809	c837275	39.4	-86.0	39.4	-86.0
25	63105	c837275	64.5	-60.9	64.5	-60.9
26	66510	c837275	33.4	-92.0	40.5	-84.9
27	D0197	c837275	62.9	-62.5	62.9	-62.5
28	65253	c837275	39.8	-85.6	39.8	-85.6
29	G2982	c837275	31.5	-94.0	38.6	-86.8
30	66200	c837275	63.0	-62.4	63.0	-62.4
31	102469	c837275	59.1	-66.3	59.1	-66.3
32	68191	c837275	40.5	-84.9	40.5	-84.9
33	BA90596	c837275	64.2	-61.3	64.2	-61.3
34	66903	c837275	64.4	-61.1	64.4	-61.1
35	104435	c837275	47.6	-77.9	47.6	-77.9
36	33559	c837275	62.8	-62.7	62.8	-62.7
37	BA94009	c837275	65.0	-60.4	65.0	-60.4
38	D3272	c837275	39.8	-85.6	39.8	-85.6
39	BA91264	c837275	29.5	-95.9	36.6	-88.8
40	BA94044	c837275	31.7	-93.8	38.8	-86.6
41	55436	c837275	63.9	-61.6	63.9	-61.6

Tabla D.4. Cobertura enlace ascendente TETRA (Caso 2)

Filas en amarillo: suscriptores en los que se han cambiado las antenas y las medidas de cobertura están correctas y sin afectación por el ruido.

D.2. Informes DMR caso 1

Informe de suscriptores cubiertos:

#	Subscriber address	Call-sign	Bit rate Mbit/s	Value (dBuV/m)	Value (dBm, G=8.15)
1	34591	TETRA_MONT	0.0096	53	-60,70992221
2	D4500	TETRA_MONT	0.0096	71	-42,70992221
3	10612	TETRA_MONT	0.0096	53	-60,70992221
4	100540	TETRA_TIBI	0.0096	41	-72,70992221
5	BA08244	TETRA_MONT	0.0096	75	-38,70992221
6	100171	TETRA_VILA	0.0096	71	-42,70992221
7	59137	TETRA_MONT	0.0096	51	-62,70992221
8	103792	TETRA_MONT	0.0096	41	-72,70992221
9	20777	TETRA_VILA	0.0096	74	-39,70992221
10	BA90065	TETRA_MONT	0.0096	64	-49,70992221
11	VA04807	TETRA_VALL	0.0096	38	-75,70992221
12	BT461	TETRA_VALL	0.0096	36	-77,70992221
13	BE137	TETRA_TIBI	0.0096	32	-81,70992221
14	VA09710	TETRA_VALL	0.0096	43	-70,70992221
15	65994	TETRA_TIBI	0.0096	30	-83,70992221
16	67749	TETRA_MONT	0.0096	46	-67,70992221
17	66813	TETRA_MONT	0.0096	68	-45,70992221
18	D3640	TETRA_VILA	0.0096	56	-57,70992221
19	D2816	TETRA_VALL	0.0096	50	-63,70992221
20	69054	TETRA_MONT	0.0096	46	-67,70992221
21	100535	TETRA_VILA	0.0096	78	-35,70992221
22	LL08560	TETRA_TIBI	0.0096	39	-74,70992221
23	58305	TETRA_MONT	0.0096	73	-40,70992221
24	BA05809	TETRA_MONT	0.0096	70	-43,70992221
25	63105	TETRA_MONT	0.0096	89	-24,70992221
26	66510	TETRA_MONT	0.0096	59	-54,70992221
27	D0197	TETRA_MONT	0.0096	71	-42,70992221
28	65253	TETRA_MONT	0.0096	37	-76,70992221
29	G2982	TETRA_MONT	0.0096	23	-90,70992221

30	66200	TETRA_VILA	0.0096	68	-45,70992221
31	102469	TETRA_MONT	0.0096	95	-18,70992221
32	68191	TETRA_VILA	0.0096	101	-12,70992221
33	BA90596	TETRA_VILA	0.0096	92	-21,70992221
34	66903	TETRA_VILA	0.0096	83	-30,70992221
35	104435	TETRA_VILA	0.0096	77	-36,70992221
36	33559	TETRA_VILA	0.0096	113	-0,709922208
37	BA94009	TETRA_VILA	0.0096	92	-21,70992221
38	D3272	TETRA_VILA	0.0096	60	-53,70992221
39	BA91264	TETRA_VILA	0.0096	68	-45,70992221
40	BA94044	TETRA_VILA	0.0096	66	-47,70992221
41	55436	TETRA_VILA	0.0096	80	-33,70992221

Tabla D.5. Suscriptores cubiertos DMR (Caso 1)

Filas en rojo: suscriptores en los que no se cumplen los requisitos de cobertura y/o se ven afectados por el ruido.

Análisis P2P cobertura enlace ascendente:

#	Suscriptor	Callsign	FSR (dBuV/m)	P _{Rx} (dBm)
1	34591	TETRA_MONT	51.0	-66.5
2	D4500	TETRA_MONT	69.6	-47.9
3	10612	TETRA_MONT	52.0	-65.5
4	100540	TETRA_TIBI	40.2	-77.3
5	BA08244	TETRA_MONT	73.8	-43.7
6	100171	TETRA_VILA	70.1	-47.5
7	59137	TETRA_MONT	48.9	-68.7
8	103792	TETRA_MONT	39.4	-78.1
9	20777	TETRA_VILA	72.4	-45.1
10	BA90065	TETRA_MONT	63.6	-53.9
11	VA04807	TETRA_VALL	33.5	-84.1
12	BT461	TETRA_VALL	34.9	-82.6
13	BE137	TETRA_TIBI	30.3	-87.2
14	VA09710	TETRA_VALL	42.2	-75.3
15	65994	TETRA_TIBI	28.7	-88.8
16	67749	TETRA_MONT	45.1	-72.4

17	66813	TETRA_MONT	66.7	-50.8
18	D3640	TETRA_VILA	54.8	-62.7
19	D2816	TETRA_VALL	49.1	-68.4
20	69054	TETRA_MONT	44.2	-73.3
21	100535	TETRA_VILA	76.8	-40.7
22	LL08560	TETRA_TIBI	38.1	-79.4
23	58305	TETRA_MONT	71.9	-45.6
24	BA05809	TETRA_MONT	68.6	-48.9
25	63105	TETRA_MONT	87.6	-29.9
26	66510	TETRA_MONT	57.1	-60.4
27	D0197	TETRA_MONT	69.6	-48.0
28	65253	TETRA_MONT	35.8	-81.7
29	G2982	TETRA_MONT	19.3	-98.2
30	66200	TETRA_VILA	70.0	-47.5
31	102469	TETRA_MONT	94.2	-23.3
32	68191	TETRA_VILA	100.4	-17.2
33	BA90596	TETRA_VILA	91.1	-26.4
34	66903	TETRA_VILA	82.3	-35.2
35	104435	TETRA_VILA	76.0	-41.5
36	33559	TETRA_VILA	112.4	-5.1
37	BA94009	TETRA_VILA	90.9	-26.6
38	D3272	TETRA_VILA	58.7	-58.9
39	BA91264	TETRA_VILA	67.3	-50.2
40	BA94044	TETRA_VILA	65.0	-52.5
41	55436	TETRA_VILA	79.5	-38.1

Tabla D.6. Cobertura enlace ascendente DMR (Caso 1)

D.3. Informes DMR caso 2

Análisis P2P enlace descendente:

#	Suscriptor	Callsign	P _{Rx} (dBm) antes	Modulación
1	34591	c966399	-57.4	F: 4FSK
2	D4500	c966399	-43.5	F: 4FSK
3	10612	c966399	-55.4	F: 4FSK
4	100540	c966399	-42.5	F: 4FSK
5	BA08244	c966399	-29.4	F: 4FSK
6	100171	c966399	-38.6	F: 4FSK
7	59137	c966399	-54.5	F: 4FSK
8	103792	c966399	-46.6	F: 4FSK
9	20777	c966399	-50.9	F: 4FSK
10	BA90065	c966399	-37.1	F: 4FSK
11	VA04807*	c966399	-70.4	F: 4FSK
12	BT461	c966399	-61.1	F: 4FSK
13	BE137	c966399	-57.1	F: 4FSK
14	VA09710	c966399	-61.7	F: 4FSK
15	65994	c966399	-68.6	F: 4FSK
16	67749	c966399	-54.4	F: 4FSK
17	66813	c966399	-43.0	F: 4FSK
18	D3640	c966399	-68.7	F: 4FSK
19	D2816	c966399	-34.0	F: 4FSK
20	69054	c966399	-44.6	F: 4FSK
21	100535	c966399	-38.3	F: 4FSK
22	LL08560	c966399	-42.6	F: 4FSK
23	58305	c966399	-38.3	F: 4FSK
24	BA05809	c966399	-68.2	F: 4FSK
25	63105	c966399	-38.0	F: 4FSK
26	66510*	c966399	-64.2	F: 4FSK
27	D0197	c966399	-39.1	F: 4FSK
28	65253	c966399	-56.9	F: 4FSK
29	G2982*	c966399	-66.0	F: 4FSK

30	66200	c966399	-40.4	F: 4FSK
31	102469	c966399	-42.8	F: 4FSK
32	68191	c966399	-58.1	F: 4FSK
33	BA90596	c966399	-37.6	F: 4FSK
34	66903	c966399	-37.7	F: 4FSK
35	104435	c966399	-52.1	F: 4FSK
36	33559	c966399	-40.3	F: 4FSK
37	BA94009	c966399	-37.0	F: 4FSK
38	D3272	c966399	-59.8	F: 4FSK
39	BA91264*	c966399	-68.4	F: 4FSK
40	BA94044*	c966399	-66.1	F: 4FSK
41	55436	c966399	-38.9	F: 4FSK

Tabla D.7. Cobertura enlace descendente DMR (Caso 2)

Análisis P2P enlace ascendente:

#	Suscriptor	Callsign	FSR (dBuV/m)	P _{Rx} (dBm)
1	34591	c966399	55.5	-62.0
2	D4500	c966399	69.3	-48.2
3	10612	c966399	57.5	-60.1
4	100540	c966399	70.3	-47.2
5	BA08244	c966399	83.4	-34.1
6	100171	c966399	74.1	-43.4
7	59137	c966399	58.3	-59.2
8	103792	c966399	66.2	-51.3
9	20777	c966399	61.9	-55.6
10	BA90065	c966399	75.7	-41.8
11	VA04807	c966399	42.3	-75.3
12	BT461	c966399	51.3	-66.2
13	BE137	c966399	55.7	-61.8
14	VA09710	c966399	51.2	-66.4
15	65994	c966399	44.3	-73.2
16	67749	c966399	58.4	-59.1
17	66813	c966399	69.7	-47.8
18	D3640	c966399	44.2	-73.3

19	D2816	c966399	78.8	-38.7
20	69054	c966399	68.3	-49.2
21	100535	c966399	74.5	-43.0
22	LL08560	c966399	70.1	-47.4
23	58305	c966399	74.5	-43.0
24	BA05809	c966399	44.7	-72.9
25	63105	c966399	74.7	-42.8
26	66510	c966399	48.7	-68.8
27	D0197	c966399	73.7	-43.9
28	65253	c966399	56.0	-61.6
29	G2982	c966399	47.0	-70.5
30	66200	c966399	72.3	-45.2
31	102469	c966399	70.0	-47.5
32	68191	c966399	54.8	-62.7
33	BA90596	c966399	75.2	-42.3
34	66903	c966399	75.0	-42.5
35	104435	c966399	60.8	-56.8
36	33559	c966399	72.5	-45.1
37	BA94009	c966399	75.8	-41.8
38	D3272	c966399	53.0	-64.5
39	BA91264	c966399	44.5	-73.0
40	BA94044	c966399	46.7	-70.8
41	55436	c966399	73.8	-43.7

Tabla D.8. Cobertura enlace ascendente DMR (Caso 2)

Anexo E: Informes de tráfico

E.0. Informes TETRA caso 1

Tráfico de red:

#	Estación	GoS (%)	Tráfico ofrecido (E)	Nº slots disponibles por emplazamiento	Nº radiocanales por emplazamiento
1	TETRA_TIBI	100	0.08	3	1
2	TETRA_VALL	100	0.07	3	1
3	TETRA_MONT	99.80	0.38	3	1
4	TETRA_VILA	99.99	0.15	3	1

Tabla E.1. Tráfico TETRA (Caso 1)

E.1. Informes TETRA caso 2

Tráfico de red:

#	Estación	GoS (%)	Tráfico ofrecido (E)	Nº slots disponibles por emplazamiento	Nº radiocanales por emplazamiento
1	c837275	99.06	0.65	3	1
2	c129093	100	0.03	3	1

Tabla E.2. Tráfico TETRA (Caso 2)

E.2. Informes DMR caso 1

Tráfico de red sin modificación alguna:

#	Estación	GoS (%)	Tráfico ofrecido (E)	Nº slots disponibles por emplazamiento	Nº radiocanales por emplazamiento
1	TETRA_TIBI	95.82	0.07	1	1
2	TETRA_VALL	95.82	0.07	1	1
3	TETRA_MONT	78.87	0.30	1	1
4	TETRA_VILA	82.83	0.25	1	1

Tabla E.3. Tráfico DMR (Caso 1)

Tráfico de red permitiendo mayor retraso medio de llamada:

#	Estación	GoS (%)	Tráfico ofrecido (E)	Nº slots disponibles por emplazamiento	Nº radiocanales por emplazamiento
1	TETRA_TIBI	99.75	0.07	1	1
2	TETRA_VALL	99.75	0.07	1	1
3	TETRA_MONT	97.41	0.30	1	1
4	TETRA_VILA	98.19	0.25	1	1

Tabla E.4. Tráfico DMR con retraso medio aumentado (Caso 1)

Tráfico de red instalando BS adicional en cada emplazamiento:

#	Estación	GoS (%)	Tráfico ofrecido (E)	Nº slots disponibles por emplazamiento	Nº radiocanales por emplazamiento
1	TETRA_TIBI	100	0.07	3	2
2	TETRA_VALL	100	0.07	3	2
3	TETRA_MONT	99.90	0.30	3	2
4	TETRA_VILA	99.94	0.25	3	2

Tabla E.5. Tráfico DMR con BS adicional en cada emplazamiento (Caso 1)

E.3. Informes DMR caso 2

Tráfico de red sin modificación alguna:

#	Estación	GoS (%)	Tráfico ofrecido (E)	Nº slots disponibles por emplazamiento	Nº radiocanales por emplazamiento
1	c966399	41.70	0.68	1	1

Tabla E.6. Tráfico DMR (Caso 2)

Tráfico de red permitiendo mayor retraso medio de llamada:

#	Estación	GoS (%)	Tráfico ofrecido (E)	Nº slots disponibles por emplazamiento	Nº radiocanales por emplazamiento
1	c966399	77.47	0.68	1	1

Tabla E.7. Tráfico DMR con retraso medio aumentado (Caso 2)

Tráfico de red instalando BS adicional en cada emplazamiento:

#	Estación	GoS (%)	Tráfico ofrecido (E)	Nº slots disponibles por emplazamiento	Nº radiocanales por emplazamiento
1	c966399	98.91	0.68	3	2

Tabla E.8. Tráfico DMR con BS adicional en cada emplazamiento (Caso 2)

BIBLIOGRAFÍA

- Alberto García Pérez – *Comunicaciones TETRA: la red de las fuerzas de seguridad*. Disponible en: http://www.acta.es/medios/articulos/comunicacion_e_informacion/003001.pdf
- AMPER Curso Sistema TETRA-1.0 – *Sistema TETRA: DIPC R8.2 con redundancia geográfica*
- ATDI Training Resources – *Tutorial TETRA network design with ICS designer*
- ATDI Training Resources – *Network design and analysis for TETRA and GSM*
- ATDI Training Resources – *Coordinate conversion: grid codes*
- ATDI Training Resources – *Frequency Assignment and Interference Calculation of Base Stations*
- Boletín Oficial del Estado – *BOE-A-2009-5742: Resolución de 17 de marzo de 2009, de la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información, por la que se publican los requisitos técnicos de la interfaces reglamentadas IR-118 a IR-123 relativas a los equipos radioeléctricos del servicio móvil terrestre de voz y datos para redes móviles privadas y redes móviles de acceso público (PMR/PAMR)*
- Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Sevilla – *Asignatura TPSR. Práctica 3: introducción a ICS Telecom de ATDI*
- Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Sevilla – *Asignatura TPSR. Práctica 4: Planificación UMTS. Primera parte.*
- Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Sevilla – *Asignatura TPSR. Práctica 5: Planificación UMTS. Segunda parte.*
- ETSI TS 100 392-2 – *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI)*
- ETSI TS 100 392-15 – *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 15: TETRA frequency bands, duplex spacings and channel numbering*
- ETSI TS 102 361-1 – *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol*
- ETSI TS 102 361-4 – *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Digital Mobile Radio (DMR) Systems; Part 4: DMR trunking protocol*
- ETSI EN 300 113-1 – *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Land mobile service; Radio equipment intended for the transmission of data (and/or speech) using constant or non-constant envelope modulation and having an antenna connector; Part 1: Technical characteristics and methods of measurement*
- Radio Digital URE – *Qué es DMR*. Disponible en: <https://radiodigital.ure.es/red-dmr/que-es-dmr/>
- Secretaría de Estado de las Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información (SETSI) – *Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (16-04-2015)*
- Secretaría de Estado de las Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información (SETSI) – *Notas UN CNAF 2013 (Actualizado según Orden IET/614/2015)*
- TAIT Communications TaitNet DMR – *DMR Introduction Training Manual*
- Wikipedia – *Professional Mobile Radio (PMR)*. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Professional_mobile_radio#Introduction

