



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena | Campus  
de Excelencia  
Internacional

*Evolución de la Red de Radiocomunicaciones  
Digitales de Emergencias de la Región de  
Murcia (Red RADIECARM)*

*Doctorado en Tecnologías de la Información y  
las Comunicaciones*

*Autor: Diego del Rey Carrión*

*Directores: Leandro Juan Llácer*

*José Víctor Rodríguez Rodríguez*

*Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)*

*Cartagena (2019)*





**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE  
TESIS DOCTORAL POR EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS**

D. Leandro Juan Llácer y José Víctor Rodríguez, Directores de la Tesis doctoral  
EVOLUCIÓN DE LA RED DE RADIOCOMUNICACIONES DIGITALES  
DE EMERGENCIAS DE LA REGIÓN DE MURCIA (RED RADIECARM)

**INFORMAN:**

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D. Diego del Rey Carrión, dentro del Programa de Doctorado Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, dando mi conformidad para que sea presentada ante el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado para ser autorizado su depósito.

X Informe positivo sobre el plan de investigación y documento de actividades del doctorando emitido por el Director/ Tutor (**RAPI**).

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- Ciencias
- Ciencias Sociales y Jurídicas
- Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 15 de julio de 2019

EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS

Fdo.: Leandro Juan Llácer

Fdo.: José Víctor Rodríguez Rodríguez

**COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO**





**CONFORMIDAD DE DEPÓSITO DE TESIS DOCTORAL**  
**POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA**

D. Jorge Larrey Ruiz, Presidente/a de la Comisión Académica del Programa Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

**INFORMA:**

Que la Tesis Doctoral titulada, “EVOLUCIÓN DE LA RED DE RADIOCOMUNICACIONES DIGITALES DE EMERGENCIAS DE LA REGIÓN DE MURCIA (RED RADIECARM)”, ha sido realizada, dentro del mencionado Programa de Doctorado, por D. Leandro Juan Llácer, bajo la dirección y supervisión del Dr. Leandro Juan Llácer y del Dr. José Víctor Rodríguez Rodríguez.

En reunión de la Comisión Académica, visto que en la misma se acreditan los indicios de calidad correspondientes y la autorización del Director de la misma, se acordó dar la conformidad, con la finalidad de que sea autorizado su depósito por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado.

X Evaluación positiva del plan de investigación y documento de actividades por el Presidente de la Comisión Académica del programa (**RAPI**).

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- Ciencias
- Ciencias Sociales y Jurídicas
- Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 12 de julio de 2019

EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA

JORGE|  
LARREY|  
RUIZ

Firmado digitalmente por JORGE|  
LARREY|RUIZ  
Nombre de reconocimiento (DN):  
cn=JORGE|LARREY|RUIZ,  
serialNumber=,  
givenName=JORGE, sn=LARREY  
RUIZ, ou=Ciudadanos, o=ACCV,  
c=ES  
Fecha: 2019.07.12 17:59:59 +02'00'

Fdo: Jorge Larrey Ruiz

**COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO**



*A mi familia.*





## Índice

<b>RESUMEN</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.2 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	5
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>7</b>
2.1 DEFINICIONES .....	7
2.2 ESTADO DE LAS REDES DE EMERGENCIA .....	11
2.2.1 Posibles configuraciones.....	11
2.2.2 Situación de las redes PMR digitales en Europa y España .....	14
2.3 EVOLUCIÓN DE LAS REDES DE EMERGENCIA .....	16
2.3.1 Nuevos servicios y funcionalidades .....	16
2.3.2 Posibles soluciones.....	18
2.3.3 Primeros pasos hacia la banda ancha BB-PPDR.....	20
<b>3. ANÁLISIS DE LAS POSIBLES SOLUCIONES DE RED</b> .....	<b>23</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	23
3.2 CONSIDERACIONES .....	23
3.2.1 Disponibilidad de espectro.....	23
3.2.2 Limitaciones financieras.....	29
3.2.3 Estándares y tecnologías disponibles y su evolución .....	31
3.2.4 Posibilidades que ofrecen las redes móviles públicas .....	36
3.2.5 Proyectos BB-PPDR.....	42
3.3 CONCLUSIONES .....	52
<b>4. SELECCIÓN Y PLANIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE RED PREVISTA PARA LA EVOLUCIÓN DE LA RED RADIECARM</b> .....	<b>55</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	55
4.2 SELECCIÓN DE LA SOLUCIÓN DE RED .....	55
4.3 ARQUITECTURA DE RED .....	57
4.4 ESTUDIO DE COBERTURA RADIOELÉCTRICA .....	70
4.4.1 Consideraciones de diseño .....	72
4.4.1.1 Escenario .....	72
4.4.1.2 Herramienta de planificación.....	74
4.4.1.3 Bandas de frecuencia .....	74
4.4.1.4 Información geográfica .....	75
4.4.1.5 Calidad de servicio .....	75
4.4.1.6 Modelo de propagación .....	76
4.4.1.7 Balance de enlace .....	78
4.4.1.8 Cálculo de cobertura radioeléctrica .....	79
4.4.1.9 Metodología para la planificación de la nueva red LTE .....	80
4.4.2 Resultados y discusión.....	81
4.4.2.1 La red TETRA existente.....	81
4.4.2.2 La nueva red LTE.....	83
4.5 CONCLUSIONES .....	85
<b>5. CONCLUSIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>89</b>



## Resumen

La Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM) dispone de su propia red de radiocomunicaciones móviles de emergencia, denominada Red RADIECARM (abreviatura de Radiocomunicaciones Dlgitales de Emergencias de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia), destinada a satisfacer las necesidades de los servicios de emergencias implantados en su ámbito territorial. Al igual que ocurre con la mayor parte de las redes de emergencia existentes en Europa, la Red RADIECARM está diseñada específicamente para garantizar las comunicaciones frente a situaciones de misión crítica y está basada en la tecnología digital de banda estrecha TETRA, que proporciona una buena comunicación de voz y servicios de datos de baja velocidad.

Teniendo en cuenta las crecientes necesidades de comunicación de los servicios de emergencias en los próximos años, una de las claves más importantes de las redes de emergencia es cómo pueden evolucionar para incorporar el servicio de banda ancha móvil, ya ampliamente extendido en las redes móviles públicas.

La tesis aquí propuesta plantea cómo puede evolucionar la Red RADIECARM de modo que pueda soportar las cada vez mayores velocidades de transmisión de datos requeridas por los usuarios en los próximos años. Para ello, se realiza, en primer lugar, un estudio de necesidades para determinar la situación de partida y los requisitos de los usuarios. A continuación, se analizan las posibles soluciones de red, seleccionando aquella que se considera más apropiada. Por último, se planifica el desarrollo de la solución seleccionada, que incluye la arquitectura de red y un estudio de cobertura radioeléctrica.

Los resultados muestran que LTE (y su evolución) es la solución tecnológica más adecuada para satisfacer las futuras necesidades de comunicación de banda ancha de los usuarios de la Red RADIECARM, aunque la red TETRA actual deberá mantenerse en funcionamiento el tiempo necesario para llevar a cabo tanto el despliegue del futuro sistema LTE como la migración completa de TETRA a LTE (al menos hasta el año 2025). Por tanto, la evolución prevista de la red RADIECARM está basada en un modelo de implementación híbrido TETRA-LTE. Además, el análisis llevado a cabo en esta tesis indica que, en la Región de Murcia, para macroceldas ubicadas en entorno rural, el número de emplazamientos LTE necesarios es un factor de 2.4 más que para la red TETRA, si se desea mantener la misma calidad de servicio (90% de cobertura para toda la región y 85% para terminos municipales).



# **Abstract**

## **EVOLUTION OF THE EMERGENCY DIGITAL RADIOCOMMUNICATION NETWORK OF THE REGION OF MURCIA (RADIECARM NETWORK)**

The Autonomous Community of the Region of Murcia (Comunidad Autónoma de la Región de Murcia - CARM) has its own emergency mobile radiocommunication network, called RADIECARM, designed to meet the needs of emergency services implanted in its territorial scope. As with most existing emergency networks in Europe, the RADIECARM network is specifically designed to guarantee communications against mission critical situations and is based on TETRA digital narrow-band technology, which provides good communication of voice and low speed data services.

Taking into account the growing communication needs of emergency services in the coming years, one of the most important keys of emergency networks is how they can evolve to incorporate the mobile broadband service, already widespread in public mobile networks.

The thesis hereby presented analyzes how the RADIECARM network can evolve so that it can support the increasing data transmission speeds required by users in the coming years. To this end, a needs assessment is carried out in order to determine the starting situation and the requirements of the users. Next, the possible network solutions are properly analyzed, selecting the one that is considered most appropriate. Finally, the development of the selected solution is planned, which includes the network architecture and a radio planning analysis.

The results show that LTE (and its evolution) is the most appropriate technological solution to satisfy the future broadband communication needs of the RADIECARM network users, although the current TETRA network should remain in operation the time necessary to carry out both the deployment of the future LTE system and the complete migration from TETRA to LTE (at least until the year 2025). Therefore, the expected evolution of the RADIECARM network is based on a TETRA-LTE hybrid implementation model. In addition, the analysis carried out in this thesis indicates that, in the Region of Murcia, for macrocells located in rural areas, the number of LTE sites required is a factor of 2.4 more than for the TETRA network, if it is desired to maintain the same quality of service (90% coverage for the entire region and 85% for municipal terms).



## Lista de figuras

<b>Figura 1</b>	<i>Bloques de alto nivel de la solución BB-PPDR híbrida.....</i>	<i>58</i>
<b>Figura 2</b>	<i>Arquitectura de red PPDR.....</i>	<i>66</i>
<b>Figura 3</b>	<i>(a) Torre de telecomunicaciones con antena y soporte (b) Equipo de estación base TETRA.....</i>	<i>72</i>
<b>Figura 4</b>	<i>(a) Vehículo de tracción a las cuatro ruedas con la antena TETRA (b) Equipo de estación móvil TETRA.....</i>	<i>73</i>
<b>Figura 5</b>	<i>Modelo de terreno digital (raster), emplazamientos (puntos vectoriales) y áreas municipales (polígonos vectoriales).....</i>	<i>73</i>
<b>Figura 6</b>	<i>Comparación entre las medidas y el modelo de propagación.....</i>	<i>77</i>
<b>Figura 7</b>	<i>Diagrama de flujo propuesto para planificar la nueva red LTE.....</i>	<i>80</i>
<b>Figura 8</b>	<i>Cobertura radioeléctrica (a) Sistema TETRA con 16 emplazamientos (b) Sistema LTE con 34 emplazamientos.....</i>	<i>83</i>
<b>Figura 9</b>	<i>Cobertura radioeléctrica optimizada LTE (39 emplazamientos).....</i>	<i>84</i>





## **Lista de tablas**

<b>Tabla 1</b>	<i>Ejemplos de sistemas móviles utilizados por la protección pública.....</i>	<b>11</b>
<b>Tabla 2</b>	<i>Funcionalidades de las redes de emergencia y capacidades necesarias .....</i>	<b>16</b>
<b>Tabla 3</b>	<i>Hitos en la evolución futura de las redes PPDR en Europa.....</i>	<b>56</b>
<b>Tabla 4</b>	<i>Pérdida adicional obtenida para los diferentes tipos de entornos considerados .....</i>	<b>77</b>
<b>Tabla 5</b>	<i>Error medio y desviación estándar de la diferencia entre el modelo de propagación y las mediciones para cada ruta .....</i>	<b>78</b>
<b>Tabla 6</b>	<i>Balance de enlaces para los sistemas TETRA y LTE.....</i>	<b>78</b>
<b>Tabla 7</b>	<i>Porcentaje de cobertura radioeléctrica en áreas municipales .....</i>	<b>82</b>
<b>Tabla 8</b>	<i>Porcentaje de cobertura radioeléctrica en parques naturales .....</i>	<b>85</b>



## **Acrónimos**

2G	<i>2<sup>nd</sup> Generation (Mobile Communications)</i>
3G	<i>3<sup>rd</sup> Generation (Mobile Communications)</i>
3GPP	<i>3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project</i>
4G	<i>4<sup>th</sup> Generation (Mobile Communications)</i>
5G	<i>5<sup>th</sup> Generation (Mobile Communications)</i>
APCO	<i>Association of Public-Safety Communications Officials</i>
BB	<i>BroadBand</i>
BB-PPDR	<i>BroadBand Public Protection and Disaster Relief</i>
CARM	<i>Comunidad Autónoma de la Región de Murcia</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CEPT	<i>European Conference of Post and Telecommunications Administrations</i>
CMR	<i>Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (ITU)</i>
CNAF	<i>Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias</i>
COIT	<i>Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación</i>
COWs	<i>Cell On Wheels</i>
CRS	<i>Control Room Systems</i>
DL	<i>Down Link</i>
DMO	<i>Direct Mode of Operation</i>
DMR	<i>Digital Mobile Radio</i>
DR	<i>Disaster Relief</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
ECC	<i>Electronic Communications Committee (CEPT)</i>
eNB	<i>evolved NodeB</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Radio Access Network</i>
FDD	<i>Frecuency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frecuency Division Multiple Access</i>
GCSE	<i>Group Communication Service Enablers</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HSPA	<i>High-Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Server</i>
IMS	<i>IP Multimedia System</i>
IMT	<i>ITU global standard for International Mobile Telecommunications</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union – Radio sector</i>
LMR	<i>Land Mobile Radio</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MBMS	<i>Multimedia Broadcast/Multicast Service</i>
MCPTT	<i>Mission Critical Push To Talk</i>
MESA	<i>Mobility Emergency Safety Applications (Partnership project ETSI-TIA)</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MNO	<i>Mobile Network Operator</i>
MPS	<i>Multimedia Priority Service</i>
MVNO	<i>Mobile Virtual Network Operator</i>
NB	<i>NarrowBand</i>
NPSTC	<i>National Public Safety Telecommunications Council</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PAMR	<i>Public Access Mobile Radio</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
P-GW	<i>PDN Gateway</i>

<i>P25</i>	<i>Project 25</i>
<i>PMR</i>	<i>Professional / Private Mobile Radio</i>
<i>PoC</i>	<i>Push-to-talk over Cellular</i>
<i>PP</i>	<i>Public Protection</i>
<i>PP1</i>	<i>Day-to-day PP operations</i>
<i>PP2</i>	<i>Large emergency and/or public events PP operations</i>
<i>PPDR</i>	<i>Public Protection and Disaster Relief</i>
<i>PPDR-TC</i>	<i>Public Protection and Disaster Relief – Transformation Center (EU project)</i>
<i>ProSe</i>	<i>Proximity Services</i>
<i>PSS</i>	<i>Public Safety and Security</i>
<i>PTT</i>	<i>Push To Talk</i>
<i>QoS</i>	<i>Quality of Service</i>
<i>RADIECARM</i>	<i>RAdiocomunicaciones DIgitales de Emergencias de la CARM</i>
<i>RAN</i>	<i>Radio Access Network</i>
<i>SC-FDMA</i>	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
<i>S-GW</i>	<i>Serving Gateway</i>
<i>SIM</i>	<i>Suscriber Identity Module</i>
<i>SIRDEE</i>	<i>Sistema de Radiocomunicaciones Digitales de Emergencia del Estado</i>
<i>SLA</i>	<i>Service Level Agreement</i>
<i>SOWs</i>	<i>System On Wheels</i>
<i>SRDoc</i>	<i>System Reference Document</i>
<i>TCCA</i>	<i>Tetra and Critical Communications Association</i>
<i>TDD</i>	<i>Time Division Duplex</i>
<i>TDMA</i>	<i>Time Division Multiple Access</i>
<i>TEDS</i>	<i>TETRA Enhanced Data Service</i>
<i>TETRA</i>	<i>TErrestrial Trunked RAdio</i>
<i>UE</i>	<i>User Equipment</i>
<i>UHF</i>	<i>Ultra High Frequency (300 MHz – 3 GHz)</i>
<i>UL</i>	<i>Up Link</i>
<i>UMTS</i>	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
<i>USIM</i>	<i>Universal Suscriber Identity Module</i>
<i>VHF</i>	<i>Very High Frequency (30 MHz – 300 MHz)</i>
<i>WAN</i>	<i>Wide Area Network</i>
<i>WB</i>	<i>WideBand</i>
<i>WGFM</i>	<i>Working Group on Frequency Management (ECC)</i>
<i>Wi-Fi</i>	<i>Wireless Fidelity standard (IEEE 802.11)</i>
<i>WiMAX</i>	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

# 1. Introducción y objetivos

## 1.1 Motivación y objetivos

A finales de la década de los años 1990, la mayor parte de los servicios públicos de emergencias con implantación en el ámbito territorial de la Región de Murcia disponía de su propia red de radio PMR de tecnología analógica convencional procedente de los años ochenta, o bien utilizaba los servicios PAMR que ofrecía la tecnología troncal (*trunking*) analógica de los años noventa. Esta situación presentaba los siguientes inconvenientes [REY2004]:

- Existían numerosas redes heterogéneas, de modo que un terminal no podía comunicarse con otro perteneciente a una red distinta.
- Normalmente, se presentaban problemas de saturación y de cobertura (sobre todo en redes monocanales), así como otros derivados de la obsolescencia de la tecnología empleada.
- Existía una escasa, cuando no nula, capacidad para transmitir datos.

El autor de la presente tesis realizó, en el curso académico 1999/2000, el trabajo de investigación titulado “Planificación de sistemas *trunking* digital (TETRA) en entornos abiertos” [REY2000], dentro del Programa de doctorado “Comunicaciones”, organizado por el Departamento de Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. Dicho trabajo de investigación supuso el primer paso en el proceso de implantación de una nueva red TETRA de emergencia en el ámbito de la Región de Murcia, conforme a los puntos básicos que se resumen a continuación:

### A) OBJETO:

Considerando el estándar TETRA como la tecnología más adecuada para dar respuesta a las necesidades de radiocomunicaciones móviles de los servicios de emergencias, se trataba de planificar una red PMR de emergencia de ámbito regional basada en dicha tecnología. Se establecieron para ello los siguientes datos básicos de partida:

- Ámbito territorial: Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM).
- Usuarios: Servicios de emergencias implantados en esta Comunidad.
- Tipo de entorno: Planificación en entornos abiertos.

### B) HIPÓTESIS DE PARTIDA:

Los servicios de emergencias implantados en la CARM eran conscientes de las limitaciones que presentaban sus sistemas móviles PMR analógicos y de la necesidad de migrar hacia la tecnología digital TETRA, que estaba ya disponible en el mercado. No obstante, existían varios factores que dificultaban y retrasaban la adopción de la nueva tecnología, entre los que destacaba el factor económico: para cada servicio de urgencia considerado por separado, contratar una nueva red o servicio TETRA en aquel entonces era mucho más caro que mantener la red existente.

El citado trabajo de investigación [REY2000] planteó una situación de partida en la que todos los servicios implicados se habían puesto de acuerdo para utilizar una sola red TETRA de ámbito regional. Esta decisión no sólo minimizaba el problema económico (al repartirse los costes de inversión entre los usuarios), sino que presentaba mejoras sustanciales respecto a la situación previa:

- Mejora en la coordinación en las emergencias, al permitir la comunicación entre los mandos y operativos de los diferentes servicios con una única plataforma radio.
- Posibilidad de desarrollo de nuevas aplicaciones, basada en la mayor capacidad de transmisión de datos de la tecnología TETRA.

### C) CONCLUSIONES:

Con las citadas premisas, [REY2000] abordó tres aspectos básicos desde el punto de vista de los potenciales usuarios de la nueva red de emergencias propuesta:

- Elaboración de un (primer borrador de) pliego de condiciones técnicas, donde se recogieran las necesidades básicas demandadas por los usuarios.
- Realización de un estudio de cobertura que permitiera dimensionar y ubicar los emplazamientos mínimos necesarios de arranque de la nueva red, de acuerdo con los objetivos de calidad de cobertura planteados. En este sentido, se propuso una red compuesta por 14 estaciones base.
- Realización de un estudio de tráfico que permitiera dimensionar el número de radiocanales necesarios en cada emplazamiento para conseguir el grado de servicio especificado. Así, se estimaron necesarios un total de 21 radiocanales.

Consciente de las posibilidades que ofrecían las nuevas tecnologías digitales, la Asamblea Regional de la CARM, en sesión celebrada el día 22 de febrero de 2001, aprobó por unanimidad una moción sobre el inicio de los estudios e implantación progresiva de una plataforma única de radiocomunicaciones de emergencia de ámbito regional [ASA2001].

Con esta decisión, la Región de Murcia se situó en el grupo de CCAA pioneras en la implantación de una única red de emergencia propia, junto con el País Vasco, Cataluña y Canarias.

La implantación de la nueva plataforma radio, denominada Red RADIECARM (abreviatura de Radiocomunicaciones Dlgitales de Emergencias de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia), constituyó un hito de indudable interés estratégico para esta región, principalmente por dos motivos:

- En primer lugar, porque permitió que todos los servicios de emergencias pudieran integrarse en una única red adaptada a sus necesidades, facilitando las tareas de coordinación entre los distintos operativos.
- Y, por otro lado, porque la nueva red digital sirvió de soporte para la implantación de nuevos servicios avanzados en el ámbito de los distintos sectores asistenciales, como la localización de recursos móviles en tiempo real o la incorporación de terminales de datos en vehículos para consulta y envío de información, que mejoraban notablemente la eficacia y la calidad de servicio ofrecida a los ciudadanos en situaciones de emergencia.

La implantación de la nueva red digital correspondió a la Dirección General competente en Emergencias y Protección Civil de la CARM y al Consorcio de Extinción de Incendios y Salvamento de la CARM que, para ello, contaron con la colaboración de la Universidad Politécnica de Cartagena [PAR2002, PAR2004], habida cuenta de la complejidad técnica inherente a un proyecto de estas características. De esta manera, la implantación del sistema RADIECARM se desarrolló en tres fases:

Fase 1. Estudios preliminares de ingeniería.

Fase 2. Implantación y pruebas de un prototipo.

Fase 3. Implantación y explotación de la red.

Tras completarse con éxito las dos primeras fases, el 23 de mayo de 2003, el Consorcio de Extinción de Incendios y Salvamento de la CARM publicó en el BOE el anuncio de contratación del contrato denominado “Suministro e implantación del sistema RADIECARM” [CON2003], que supuso el inicio de la citada fase 3.

Por otro lado, el 6 de de abril de 2005, la Asamblea Regional de Murcia aprobó otra moción relacionada con la red; esta vez sobre la culminación de la implantación del sistema RADIECARM para mayor coordinación y efectividad de las comunicaciones en la Red de Protección Civil de la Comunidad Autónoma [ASA2005].

Finalmente, los trabajos de implantación de la red concluyeron en 2008 con su puesta en funcionamiento. Desde entonces, se ha cumplido el objetivo final, de modo que la Red RADIECARM permite asegurar las comunicaciones de los servicios de emergencias integrados, tanto en la gestión ordinaria como en las situaciones de emergencias extraordinarias y catástrofes.

Como ejemplo del servicio que se presta en caso de catástrofes, podemos citar que la Red RADIECARM permitió asegurar las radiocomunicaciones a los servicios de seguridad y emergencias que intervinieron tras los terremotos registrados en Lorca el 11 de mayo de 2011, ya que esta red no resultó afectada por los seísmos y, gracias a ello, pudieron coordinarse de manera eficaz.

Al igual que ocurre con la mayor parte de las redes de emergencia existentes en Europa, la Red RADIECARM está diseñada específicamente para garantizar las comunicaciones frente a situaciones de misión crítica y está basada en la tecnología digital de banda estrecha TETRA, que proporciona una buena comunicación de voz y servicios de datos de baja velocidad. Sin embargo, teniendo en cuenta las crecientes necesidades de comunicación de los servicios de emergencias en los próximos años, una de las claves más importantes de las redes de emergencia es cómo pueden evolucionar para incorporar el servicio de banda ancha móvil, ya ampliamente extendido en las redes móviles públicas [HER2010, PEL2011]. Esta cuestión ha sido objeto de numerosos trabajos en los últimos años, algunos de los cuales se han consultado para la realización de esta tesis doctoral. De hecho, en determinados países ya se han dado los primeros pasos en este sentido. Sin embargo, el Estado español todavía no ha adoptado ningún modelo de implementación hasta la fecha.

En relación con la evolución de la Red RADIECARM para incorporar la banda ancha móvil, la presente tesis (iniciada en el curso académico 2011/12) se plantea con los siguientes objetivos:

- Realizar un estudio de necesidades a fin de conocer con exactitud tanto la situación de partida como los requisitos de los usuarios.
- Analizar las posibles soluciones de red capaces de satisfacer las citadas crecientes necesidades de comunicación.
- Seleccionar la solución de red que se considere más apropiada.
- Planificar el desarrollo de la solución de red seleccionada, dentro del alcance fijado, que incluye la arquitectura de red y un estudio de cobertura radioeléctrica optimizada.



## **1.2 Estructura de la Memoria**

Después de la introducción y objetivos ya indicados en este capítulo, en el capítulo 2 se lleva a cabo un estado del arte de las redes de emergencia.

En el capítulo 3 se analizan las posibles soluciones de red capaces de satisfacer las futuras necesidades de comunicación de los usuarios de la Red RADIECARM.

En el capítulo 4 se lleva a cabo la selección y planificación de la solución de red prevista, que incluye la arquitectura de red y un estudio de cobertura radioeléctrica.

En el capítulo 5 se establecen las conclusiones de esta tesis.

Finalmente, se añade un apartado de bibliografía con las fuentes consultadas para la realización de esta tesis doctoral.



## 2. Estado del arte

### 2.1 Definiciones

A efectos del presente documento, se aplicarán los términos y definiciones que se describen a continuación. Las referencias bibliográficas empleadas para establecer la mayor parte de estas definiciones son las siguientes:

- ETSI TR 102 628. Additional spectrum requirements for future Public Safety and Security (PSS) wireless communication systems in the UHF frequency range. [ETS2010b].
- Report ITU-R M.2377-1. Radiocommunication objectives and requirements for Public Protection and Disaster Relief. [ITU2017].

**Redes de emergencia:** redes de radiocomunicaciones móviles que soportan las comunicaciones de las organizaciones de seguridad pública, también denominadas redes PPDR (*Public Protection and Disaster Relief*) o PSS (*Public Safety and Security*) [HER2010, PEL2011].

**Servicio de emergencias o agencia de seguridad pública:** organización que proporciona asistencia y apoyo inmediatos en situaciones de emergencia [ETS2010b].

#### **Radiocomunicaciones PPDR**

- *Radiocomunicaciones de protección pública (PP, Public Protection):* radiocomunicaciones específicas utilizadas por las agencias y organizaciones de seguridad pública [ETS2010b] (a las que compete el mantenimiento de la ley y el orden, la protección de la vida y bienes, y las situaciones de emergencia [ITU2017]).
- *Radiocomunicaciones de las operaciones de socorro (DR, Disaster Relief):* aquellas utilizadas para facilitar las operaciones de socorro [ETS2010b] (por las organizaciones y agencias competentes cuando se produce una perturbación grave del funcionamiento de la sociedad que supone una amenaza importante y generalizada para la vida humana, la salud, los bienes o el medio ambiente, ya sea provocada por un accidente, por la naturaleza o por el hombre, tanto de aparición súbita como resultado de un proceso de generación complejo de largo plazo [ITU2017]).

**Operaciones de seguridad pública:** cualquier clase de operación llevada a cabo por una organización de seguridad pública. Se distinguen tres tipos de tales operaciones [ETS2010b]:

- *Operaciones cotidianas (PP1):* operaciones PPDR rutinarias.

Según [ITU2017], las operaciones cotidianas comprenden los trabajos rutinarios realizados por las agencias de PPDR dentro de su jurisdicción. Típicamente, estas operaciones se efectúan dentro de las fronteras nacionales. Normalmente, la mayor parte de los requisitos espectrales y de infraestructura de la PP se determinan por medio de este escenario con una capacidad suplementaria para cubrir los eventos de emergencias inespecíficas. La mayor parte de las operaciones cotidianas guardan poca relación con la DR. Las operaciones cotidianas se indican abreviadamente como PP1.

- *Grandes emergencias y/o eventos públicos (PP2)*: eventos fuera de las operaciones rutinarias (es decir, que no son operaciones PP1).

Según [ITU2017], las emergencias y/o eventos públicos de gran importancia son aquellos a los que responden las agencias PP, y potencialmente las DR, en una zona específica de su jurisdicción; no obstante, estas agencias siguen estando obligadas, en cualquier caso, a realizar sus operaciones rutinarias en los demás lugares de su jurisdicción. El tamaño y naturaleza del evento puede exigir recursos de PPDR adicionales de las jurisdicciones adyacentes, agencias transfronterizas y organizaciones internacionales. En la mayor parte de los casos o bien existen planes en marcha o hay cierto tiempo para planificar y coordinar estos requisitos. Un gran incendio que afecte a tres o cuatro manzanas de una gran ciudad (por ejemplo, Nueva York o Nueva Delhi), o un gran incendio forestal, constituyen ejemplos de grandes emergencias que se pueden encuadrar en este escenario. Análogamente, como eventos públicos de gran importancia (nacionales o internacionales), podrían incluirse la reunión de Jefes de Gobierno de la Commonwealth, la Cumbre G8, los Juegos Olímpicos, etc. Normalmente, se trasladan a la zona equipos de radiocomunicaciones suplementarios para grandes eventos en la medida en que son necesarios. Estos equipos pueden estar vinculados, o no, a la infraestructura de red de PP existente. Las grandes emergencias y eventos públicos se indican abreviadamente como PP2.

- *Gestión de catástrofes (DR)*: operaciones especiales destinadas a minimizar los efectos de una catástrofe.

Según [ITU2017], las catástrofes pueden estar causadas por fenómenos naturales o por el hombre. Entre las catástrofes naturales se incluyen, por ejemplo, los terremotos, las tormentas tropicales de gran importancia, las grandes tempestades de hielo, las inundaciones, etc. Entre los ejemplos de catástrofes de origen humano se pueden citar los atentados terroristas ó criminales a gran escala y las situaciones de conflicto armado. Generalmente, se utilizan los sistemas de comunicaciones PP existentes y los equipos de comunicaciones especiales en el lugar de los hechos aportados por las

organizaciones de DR. Los sistemas del servicio móvil por satélite desempeñarán un importante papel en las situaciones de catástrofe, incluso en las zonas en las que ya existen servicios terrenales adecuados. Los servicios terrenales existentes pueden haber sido dañados por la propia catástrofe, o resultar incapaces de manejar el incremento de demanda de tráfico provocado por la situación catastrófica. En estos casos, las soluciones basadas en satélites pueden ofrecer una solución fiable. Las bandas de frecuencias utilizadas por los sistemas del servicio móvil por satélite suelen estar armonizadas a nivel mundial. No obstante, la circulación transfronteriza de terminales en situaciones catastróficas constituye una cuestión crítica reconocida en el Convenio de Tampere [ITU2007]. Es indispensable que los países vecinos que puedan tener terminales del servicio móvil por satélite como parte de sus planes de contingencias puedan ofrecer las comunicaciones iniciales, que resultan imprescindibles, con la mayor prontitud. Algunas agencias/organizaciones de PPDR y grupos de radioaficionados utilizan sistemas de banda estrecha de ondas decamétricas en modos de operación de datos y voz. Hay otras tecnologías incipientes tales como la voz digital, los datos y el vídeo de alta velocidad que están empezando a implementarse en los servicios de redes terrenales o de satélite. De forma abreviada, la gestión de catástrofes se indica abreviadamente como DR.

**Tipos de situaciones** a las que se enfrentan las organizaciones PPDR:

- *Situaciones de misión crítica*: aquellas donde está en juego la vida humana, las operaciones de rescate y el mantenimiento de la ley [ETS2010b] (en las cuales las organizaciones de respuesta no pueden permitirse el riesgo de tener fallos en sus comunicaciones individuales ni de grupo [ITU2017]).
- *Situaciones que no son de misión crítica*: aquellas en las que la vida humana y las propiedades no están en juego [ETS2010b].

**Banda estrecha, banda amplia y banda ancha**

- *Banda estrecha (NB, narrowband)*: servicio de comunicación que proporciona velocidades de datos de hasta 100 kilobits por segundo [ETS2010b].

Según [ITU2017], para proporcionar aplicaciones PPDR de banda estrecha, un método establecido es implementar redes de área extensa, incluyendo redes de radio digital de concentración de enlaces que proporcionan aplicaciones digitales de voz y datos de baja velocidad (por ejemplo, mensajes de estado predefinidos, transmisión de datos de formularios y mensajes, acceso a bases de datos). El Informe ITU-R M.2014 [ITU2016b] enumera algunas tecnologías con anchuras de banda de canal típicas de hasta 25 kHz,

utilizadas en la actualidad para entregar aplicaciones PPDR de banda estrecha. Algunos países no imponen una tecnología específica, sino que se limitan a fomentar las tecnologías que permiten aprovechar el espectro con mayor eficacia.

- *Banda amplia (WB, wideband)*: servicio de comunicación que proporciona velocidades de datos mayores que la banda estrecha, (normalmente, cientos de kilobits por segundo) [ETS2010b].

Según [ITU2017], los sistemas de banda amplia permiten velocidades de transporte de datos de varios centenares de kilobits por segundo (por ejemplo, en el intervalo de 384-500 kbit/s). En el futuro se prevé que las redes deban soportar velocidades de datos superiores, para permitir la introducción de toda una nueva clase de aplicaciones, incluyendo la transmisión inalámbrica de grandes bloques de datos, vídeo y conexiones basadas en IP en sistemas móviles PPDR. La utilización de velocidades de datos relativamente altas en actividades comerciales ha estimulado el desarrollo de aplicaciones de datos móviles especializadas. Los mensajes cortos y el correo electrónico se consideran parte esencial de cualquier sistema de comunicaciones de mando y control, motivo por el cual forman parte integrante de cualquier capacidad PPDR. Los sistemas inalámbricos de banda amplia pueden reducir los tiempos de respuesta del acceso a Internet y a otras bases de datos de información directamente desde el lugar del suceso o emergencia. Esto ha iniciado al desarrollo de toda una gama de aplicaciones seguras para las organizaciones de PPDR. Los sistemas para las aplicaciones PPDR de banda amplia están siendo desarrollados en diversas organizaciones de normalización, como puede verse en [ITU2012, ITU2016b, ITU2018b, ITU2019].

- *Banda ancha (BB, broadband)*: servicio de comunicación que proporciona velocidades de datos mayores que la banda amplia (normalmente, superior a 1 Megabit por segundo) [ETS2010b].

Según [ITU2017], las aplicaciones de banda ancha permiten un nivel de funcionalidad totalmente nuevo con capacidad adicional para soportar mayores velocidades de datos e imágenes de mayor resolución. La demanda de capacidades multimedia (es decir de varias aplicaciones simultáneas de banda amplia y/o banda ancha ejecutándose en paralelo) plantea una gran exigencia de velocidades binarias muy altas en los sistemas inalámbricos. Las aplicaciones de banda ancha proporcionan voz, datos de alta velocidad y vídeo digital de alta calidad en tiempo real y multimedia (con velocidades de datos en el intervalo 1-100 Mbit/s). Entre estas posibles aplicaciones se pueden citar como ejemplo las siguientes:

- comunicaciones de vídeo de alta resolución generadas por cámaras inalámbricas adosadas a computadoras portátiles a bordo de vehículos, utilizadas en los atascos de tráfico o en respuestas a otros incidentes, o para videovigilancia de los puntos de acceso de seguridad como los que existen en los aeropuertos, con detección automática basada en imágenes de referencia, materiales peligrosos u otros parámetros relevantes;
- monitorización a distancia de pacientes e imágenes de vídeo remoto en tiempo real que requieren altas velocidades de transmisión. Es fácil de imaginar la demanda de capacidad correspondiente a una operación de rescate tras una catástrofe de gran importancia.

## **2.2 Estado de las redes de emergencia**

### 2.2.1 Posibles configuraciones

De acuerdo con [ITU2017], en el ámbito internacional es importante observar que las organizaciones PPDR utilizan en la actualidad diversas configuraciones de sistemas móviles o combinación de los mismos, descritas en la Tabla 1:

**Tabla 1** Ejemplos de sistemas móviles utilizados por la protección pública  
[ITU2017]

<b>Elemento</b>	<b>Propietario de la red</b>	<b>Operador</b>	<b>Usuarios</b>	<b>Asignación del espectro</b>
A	Organización de PP	Organización de PP	Reservado para PP	PP
B	Organización de PP	Comercial	Reservado para PP	PP
C	Comercial	Comercial	Reservado para PP	PP o Comercial
D	Comercial	Comercial	Compartido con prioridad para PP	PP o Comercial
E	Comercial y organización de PP	Comercial y organización de PP	Compartido con PP (ej. VPN) ó PPDR como abonado preferencial con prioridad	Comercial
F	Comercial	Comercial	Compartido con PP con la misma prioridad	Comercial

Pueden encontrarse ejemplos de sistemas móviles en [ITU2012, ITU2016b, ITU2018b, ITU2019].

En ciertos países, los elementos B, C, D, E y F de la Tabla 1 son utilizados actualmente por las organizaciones de PP para complementar sus propios sistemas e incluso, en algunos casos, para proporcionar todos los requisitos de comunicación.

En Europa, las redes de emergencia son generalmente implementadas mediante redes de radio móviles profesionales o privadas (denominadas PMR, *Professional / Private Mobile Radio*, también conocidas en otras regiones como LMR, *Land Mobile Radio*), que se corresponden con los elementos A y B de la tabla anterior. Estas redes, analógicas o digitales, tienen características propias que las diferencian de las redes móviles públicas y que las hacen por ello más adecuadas para los servicios y comunicaciones de emergencia. Sus características básicas son las siguientes [DUN1999, HER1997, HER1998, HER1999, HER2010]:

1. *Push to talk* (PTT: pulsar para hablar): asegura una comunicación directa e inmediata entre los miembros de un equipo de emergencia y su centro de control.
2. Llamadas de grupo: facilitan una comunicación directa e instantánea entre los miembros de un mismo grupo.
3. Canal abierto: permite supervisar y escuchar cualquier comunicación entre los miembros de un grupo o de un canal.
4. Claridad de recepción: la utilización de altavoces permite una mejor recepción en circunstancias adversas.
5. Terminales y dispositivos robustos, en comparación con los utilizados en las redes públicas celulares.
6. Fiabilidad de las comunicaciones, con infraestructuras que permiten a las estaciones base operar en modo directo con los terminales móviles o en modo repetidor (*fall back*).
7. Terminales de despacho, para la coordinación y gestión de las actividades de un equipo de emergencia.

De acuerdo con el Informe 102 del Comité de Comunicaciones Electrónicas: "Requisitos de espectro PPDR" [ECC2007], en Europa las organizaciones de seguridad pública suelen implementar sus redes de emergencia mediante redes PMR debido a que estas redes están diseñadas específicamente para garantizar las comunicaciones frente a situaciones de emergencia de misión crítica, donde están en juego la vida humana, las operaciones de rescate y el mantenimiento de la ley, en las cuales las citadas organizaciones no pueden



permitirse el riesgo de tener fallos de transmisión en sus comunicaciones de voz y datos. El diseño de las redes de emergencia PMR asegura el cumplimiento de los siguientes requisitos esenciales de los sistemas de radiocomunicación de misión crítica [DUN1999, ECC2007, ECC2019b]:

- Resistencia ante fallos: disponible todo el tiempo (nivel muy alto de fiabilidad).
- Cobertura: orientado a cubrir todo el territorio (no sólo las zonas más pobladas).
- Grado de servicio: acceso instantáneo a la red cuando se necesita (la red nunca está demasiado ocupada).
- Seguridad e interoperabilidad: comunicaciones seguras entre todas las partes que necesitan comunicarse.

De acuerdo con [PEL2011], las redes de emergencia PMR existentes han sido diseñadas para proporcionar una buena comunicación de voz, así como comunicación de datos a baja velocidad. Además de ser redes dedicadas, las redes de emergencia PMR tienen dos requisitos fundamentales: la excelente disponibilidad del sistema y la seguridad de las comunicaciones, todo ello a costes razonables:

- Se requiere casi el 100% de disponibilidad del servicio, que debe estar siempre en funcionamiento, disponible en cualquier lugar y bajo cualquier circunstancia para las personas autorizadas. La buena disponibilidad de acceso se ha implementado, en primer lugar, usando una banda baja del espectro en 400 MHz, de modo que el número de estaciones base sea razonablemente bajo y ofrezca buena cobertura. En segundo lugar, se ha definido la interfaz aire de modo que la llamada de grupo esté disponible para cualquier usuario que utilice el mismo canal de radio, de manera que con pocos canales se puedan cumplir los requisitos de comunicación de voz de grandes grupos o equipos de trabajo. La red también es económica de construir y permite cubrir también áreas rurales, donde el volumen de comunicaciones es pequeño. El número limitado de usuarios hace más fácil cumplir los requisitos de disponibilidad, ya que sólo los servicios de emergencias y las organizaciones esenciales para la sociedad tienen permiso de acceso para usar los servicios de red.
- La seguridad de las comunicaciones es un deber, no puede haber escuchas ilegales ni tampoco interferencias, y la integridad de la información debe garantizarse. La seguridad de las comunicaciones se implementa con la autenticación, de modo que sólo las personas autenticadas tienen permiso para conectarse a la red. La identidad de cada uno se comprueba cuando intentan conectarse. En segundo lugar, se usan encriptaciones del interfaz aire y extremo a extremo para prevenir escuchas ilegales.

También se considera la propiedad de la red y su efecto para garantizar una completa disponibilidad y seguridad bajo cualquier circunstancia. Actualmente, todas las redes de emergencia son propiedad de las autoridades o bien los acuerdos de propiedad son tales que el control de las autoridades es muy estricto.

En relación con el uso de las redes comerciales para fines PPDR en Europa, y siguiendo las conclusiones de [ECC2007], los servicios y facilidades de comunicaciones requeridos por las organizaciones de seguridad pública en Europa sólo pueden ser parcialmente proporcionados por las redes comerciales:

- En situaciones PP1, PP2 y DR que no son de misión crítica, podrían utilizarse redes comerciales y redes dedicadas (PMR).
- En situaciones PP1, PP2 y DR de misión crítica, las redes comerciales no cumplen los requisitos exigidos y, por tanto, se requieren redes dedicadas (PMR) con espectro dedicado.

### 2.2.2 Situación de las redes PMR digitales en Europa y España

En 1996, la Decisión ERC/DEC/(96)01 del Comité Europeo de Radiocomunicaciones [ERC1996] asignó las subbandas 380-385 / 390-395 MHz en todo el ámbito europeo para las comunicaciones digitales de los servicios públicos de emergencias. Esta Decisión permitió la introducción de las primeras redes de emergencia digitales de ámbito regional o nacional compartidas por los servicios de emergencia, fundamentalmente de tecnología de banda estrecha TETRA y, en menor medida, TETRAPOL.

- TETRA (*TErrestrial Trunked RAdio*) es el estándar de *trunking* digital elaborado por el ETSI para las redes PMR utilizadas en el sector Profesional y de Seguridad Pública [DUN1999, HER1997, HER1998, HER1999, HER2010]. Comprende una amplia variedad de servicios y utiliza la técnica de multiacceso TDMA de banda estrecha con acceso múltiple. Permite el modo directo entre terminales, DMO, y encripta las comunicaciones para mejorar su seguridad. En España se utiliza en redes de policías y servicios de emergencias regionales y locales (País Vasco, Cataluña, Navarra, Canarias, Región de Murcia, Madrid, Comunidad Valenciana, Islas Baleares, etc.), así como en múltiples aplicaciones profesionales (aeropuertos, puertos, carreteras, transportes) [HER2010].
- TETRAPOL es una tecnología *trunking* digital desarrollada a mediados de los años 80 para las comunicaciones de Seguridad Pública de la Policía nacional y la gendarmería francesa. También incluye una amplia variedad de servicios y utiliza la técnica FDMA

con acceso múltiple. También permite el modo directo entre terminales, DMO, y encripta las comunicaciones para mejorar su seguridad. En España, se utiliza en la red SIRDEE de la Policía Nacional, la Guardia Civil, la Unidad Militar de Emergencia, etc. [HER2010].

- Además, el ETSI diseñó el estándar PMR digital denominado DMR (*Digital Mobile Radio*), basado en tecnología isofrecuencial (*simulcast*), que permite migrar de forma gradual de analógico a digital sin necesidad de nuevas licencias y sin cambiar la infraestructura de red [ONA2011].

La Decisión ECC/DEC/(08)05 del Comité de Comunicaciones Electrónicas sobre la armonización de bandas de frecuencia para la implementación de aplicaciones de radio PPDR digital de banda estrecha y banda amplia [ECC2019b], aprobada inicialmente el 27 de junio 2008 y modificada el 8 de marzo 2019, sustituye a la Decisión ERC/DEC/(96)01 citada anteriormente y define la utilización de:

- Las bandas dúplex 380-385 MHz / 390-395 MHz para aplicaciones de radio PPDR digital de banda estrecha con canalización de hasta 25 kHz y/o
- Las partes disponibles del rango de frecuencia 380-470 MHz (preferiblemente en 380-430 MHz) para aplicaciones de radio PPDR digital de banda amplia con canalización de 25 kHz o superior.

Las tecnologías cubiertas por la Decisión ECC/DEC/(08)05 [ECC2019b] son las siguientes:

- a) Sistemas móviles digitales de banda estrecha (NB, que proporcionan aplicaciones digitales de voz y datos de baja velocidad, con anchuras de banda de canal típicas de hasta 25 kHz):
  - TETRA y otros sistemas móviles terrestres digitales de 25 kHz que cumplan con los estándares armonizados EN 300 113 ó EN 302 561.
  - DMR, TETRAPOL, P25 y otros sistemas móviles terrestres digitales de 12,5 kHz que cumplan con el estándar armonizado EN 300 113.
- b) Sistemas móviles digitales de banda amplia (WB, que proporcionan velocidades de datos de varios cientos de kilobits por segundo, por ejemplo, en el rango 384-500 kbps):
  - Sistemas de 200 kHz que cumplan con los estándares armonizados EN 301 502 y EN 301 511.
  - CDMA-PAMR y otros sistemas equivalentes de 1.25 MHz que cumplan con los estándares armonizados EN 302 426, EN 301 449 ó EN 301 526.

- TETRA TEDS y otros sistemas equivalentes que cumplan con el estándar armonizado EN 302 561.

Mientras que varios países europeos han conseguido unificar la tecnología y las redes de banda estrecha para todas las organizaciones de seguridad pública y emergencias, en España la situación es bien distinta, ya que existen múltiples sistemas PMR que emplean tecnologías diversas y diferentes modos de explotación, dando lugar a problemas de falta de interoperabilidad y limitando sus posibilidades de evolución [HER2010].

## **2.3 Evolución de las redes de emergencia**

### 2.3.1 Nuevos servicios y funcionalidades

Además de las comunicaciones de voz, las redes TETRA soportan servicios de datos de baja velocidad, como servicios de localización, distribución de fotografías, consultas a bases de datos y mensajes cortos. No obstante, algunos nuevos servicios PPDR requieren tasas de datos más altas, con capacidades de transmisión de datos de banda amplia o de banda ancha, esta última requerida especialmente para la transmisión de video. Los sistemas existentes de banda estrecha no dispondrán de suficiente capacidad en el futuro, ya que los nuevos servicios requieren de mayor capacidad de comunicación, y las expectativas de mayores velocidades de transmisión de datos están en constante aumento. La Tabla 2 refleja las principales funcionalidades de las redes de emergencia que sus usuarios esperan que éstas soporten, junto con las capacidades necesarias [PEL2011].

**Tabla 2** Funcionalidades de las redes de emergencia y capacidades necesarias [PEL2011]

Principales funcionalidades y sus necesidades de capacidad de comunicación en redes de emergencias	
Llamada de grupo	NB
Mensajes de información y alarma	NB
Mensajes de estado	NB
Servicios de localización	NB
Consulta a bases de datos	NB
E-mail	NB – WB
Transmisión de imágenes	NB – WB
Transmisión de video	WB – BB
Soporte de mando y control móvil	WB – BB
Navegación por internet	BB

NB: NarrowBand (banda estrecha)

WB: WideBand (banda amplia)

BB: BroadBand (banda ancha)

Determinadas funcionalidades, como el servicio de localización, funcionan bien para pocos abonados en las redes de banda estrecha. Sin embargo, a medida que el volumen de terminales que transmiten sus datos de localización crece, la red de banda estrecha puede llegar a alcanzar su máximo nivel de prestaciones. De modo que, aunque la capacidad de la red es suficiente para prestar el servicio, se necesitan mayores capacidades para poder absorber el tráfico generado por todos los terminales [PEL2011].

Por tanto, el problema que tienen las redes PPDR existentes es que no soportan datos de alta velocidad. Ello se debe a que las tecnologías PPDR están continuamente varios pasos por detrás del desarrollo de las redes celulares comerciales y este sector de negocio está sufriendo la carencia de economías de escala. Además, han aparecido nuevos requisitos. El conocimiento de la situación de las organizaciones de emergencia está basado en la información que el sistema de telecomunicaciones es capaz de procesar. Y las redes de emergencia NB existentes, con su baja capacidad de transmisión de datos, no cumplen los nuevos requisitos [PEL2011].

La transmisión de video y otros nuevos servicios que a los usuarios de las redes de emergencia les gustaría utilizar requieren de capacidad de datos de alta velocidad. Al mismo tiempo, los nuevos servicios comerciales que los operadores celulares están ofreciendo a los abonados públicos están creando expectativas a los usuarios de redes de emergencia. La gente joven ha aprendido a vivir en un mundo de comunicación totalmente distinto que las personas involucradas en el desarrollo de TETRA. La generación Facebook vive en un mundo donde tienen contacto en tiempo real con el mundo que les rodea. Ellos suelen conocer “en tiempo real” dónde están sus amigos, qué están haciendo ahora y cuál es la opinión de cada uno sobre el asunto de actualidad, y podrían no aceptar menos en su trabajo diario [PEL2011].

De acuerdo con el Informe ITU-R M.2033 [ITU2003], al depender cada vez más las operaciones PPDR de las bases de datos electrónicas y de la informática, el acceso a información precisa y detallada por parte del personal destacado en el lugar de las operaciones (tales como la policía, los bomberos y el personal de urgencias médicas) resulta crítico para mejorar la eficacia de este personal en la resolución de las situaciones de emergencia. Esta información suele residir en sistemas de bases de datos de oficina que contienen imágenes, mapas, planos arquitectónicos de los edificios y ubicación de los sistemas de materiales peligrosos.

En sentido contrario, el flujo de información procedente de las unidades destacadas en el lugar de los hechos con destino a los centros de control operacionales y a los centros de conocimiento especializado es igualmente importante. Cabe destacar como ejemplo la

supervisión de pacientes a distancia y la supervisión a distancia por vídeo en tiempo real de las situaciones de emergencia civil, incluida la utilización de dispositivos robot de control remoto. Además, en las situaciones de catástrofes y emergencias, las autoridades competentes deben adoptar decisiones críticas que suelen depender de la calidad y puntualidad de la información recibida del lugar de los hechos [ITU2003].

Aunque las comunicaciones de voz sigan siendo un componente crítico de las operaciones de PPDR, los nuevos servicios de datos y vídeo desempeñarán un papel esencial. Por ejemplo, las agencias de PPDR utilizan hoy en día aplicaciones tales como el vídeo para la vigilancia de delitos y de carreteras, para supervisar y evaluar los daños producidos por los incendios forestales desde plataformas aéreas y transmitir imágenes en tiempo real a los centros de mando de emergencia [ITU2003].

Asimismo, hay una necesidad creciente de vídeo de movimiento completo para otros usos, tales como los dispositivos robot en situaciones de emergencia. Este tipo de soluciones de futuro avanzadas permitirán implementar redes de voz, vídeo y datos para atender las necesidades del personal de emergencia en respuesta a un incidente [ITU2003].

Estas aplicaciones suelen exigir comunicaciones de datos de mayor velocidad binaria que la ofrecida por las aplicaciones PPDR actuales. Cabe esperar que la disponibilidad de soluciones de futuro avanzadas sea beneficiosa para las operaciones PPDR [ITU2003].

### 2.3.2 Posibles soluciones

[PEL2011] aborda la cuestión de cuál será la solución de red móvil para los servicios de emergencias en los próximos años, teniendo en cuenta cómo pueden satisfacerse las cada vez mayores necesidades de comunicación de datos. Tomando como punto de partida la situación existente en Europa, representada por la tecnología TETRA, en este estudio, se plantean y analizan las siguientes soluciones para resolver los futuros problemas de capacidad de las redes de emergencia:

1. Actualizar las redes TETRA con tecnología TEDS [NOU2006, NOU2007]. Para redes TETRA, se ha desarrollado una tecnología de banda amplia específica denominada TEDS (*TETRA Enhanced Data System*), que ofrece velocidades de 50 a 200 kbps. La tasa de datos ofrecida por la tecnología de banda amplia puede ser suficiente para la mayoría de aplicaciones, incluso para transmisión de vídeo, especialmente si el desarrollo de tecnologías de compresión y la mejora en capacidad de almacenamiento continúa la tendencia de los últimos años.

2. En vez de usar una solución específica PPDR como TETRA, una alternativa puede ser el uso de tecnología comercial que la sustituya. Como ejemplos, podemos citar la solución GSM-ASCI (*GSM – Advanced Speech Call Item*) y las soluciones UMTS y LTE basadas en PoC (*Push-to-talk over Cellular*). Esto puede implementarse usando tecnología comercial en la red específica o alquilando los servicios de comunicaciones de los operadores telefónicos.
3. La tercera opción es aumentar la capacidad de datos de la red PPDR específica con una red de datos adicional basado en la tecnología de las redes celulares comerciales. De nuevo, esto podría implementarse usando la tecnología como tal ó alquilando capacidad de un operador telefónico.
4. La cuarta opción es cualquier nueva tecnología, diseñada a medida de las necesidades de comunicación PPDR, como las soluciones basadas en tecnología WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) [VEL2005, VEL2006, MOL2007, NEV2007, FAN2009, ABI2010], tecnología de radio cognitiva o una evolución TETRA de banda ancha [NOU2009, CHA2010].

Las conclusiones de [PEL2011] se resumen en los siguientes puntos:

1. *Necesidad de comunicación de datos de alta velocidad* para implementar los nuevos servicios y funcionalidades (mando y control móvil, transmisión de vídeo, etc).
2. *Necesidad de redes dedicadas* para asegurar las comunicaciones de misión crítica.
3. *El espectro y la financiación tienen una importancia fundamental.* El espectro asignado actualmente para voz y datos de baja velocidad sólo puede satisfacer parcialmente las necesidades de comunicación de datos móviles de banda amplia (WB) y nada en absoluto los requisitos de datos móviles de banda ancha (BB). Las comunicaciones WB y BB en las redes de emergencia necesitan una asignación de espectro que debe realizarse en toda Europa, ya que en caso contrario los volúmenes de equipamiento serán demasiado bajos. El tamaño del espectro asignado y su ubicación en el rango de frecuencias tiene un gran impacto en la evolución de las futuras redes de emergencia. Para mantener el número de estaciones base bajo y las inversiones adicionales en un nivel aceptable, es crucial que las frecuencias WB (banda amplia) sean asignadas en el rango 380 MHz-470 MHz y que el espectro para BB (banda ancha) esté en el rango <1 GHz. Sin nuevas frecuencias, no pueden proporcionarse servicios de comunicaciones móviles BB seguros y fiables para los servicios de emergencias. Igualmente, la financiación tiene una gran influencia en el futuro de las redes de emergencia. Las tecnologías ya existen, de modo que cuando se asignen las

frecuencias, la financiación establecerá la extensión de las nuevas redes y qué tecnologías se utilizan.

4. *Las redes de emergencia serán heterogéneas.* Las futuras redes móviles PSS constarán de distintas tecnologías, cada una con la cobertura y capacidad apropiadas. La implementación de las futuras redes estará basada en las necesidades reales de las regiones geográficas a cubrir. La utilización de las redes comerciales para comunicaciones no críticas es posible y probable, pero la insuficiente disponibilidad de este tipo de redes evitará un mayor uso de los servicios de comunicaciones móviles públicos.
5. *La evolución prevista por [PEL2011] en los siguientes 10 años (2012-2021) es la siguiente solución híbrida:*
  - La tecnología TETRA (NB), en la que están basadas muchas redes de emergencia recientemente construidas, será usada en Europa hasta finales de la década de los años 2020 para comunicaciones de voz y datos de baja velocidad. Cuando la tecnología TETRA llegue al final de su ciclo de vida, la funcionalidad de voz se integrará en la solución de banda ancha (BB).
  - La tecnología TEDS (WB) podría desplegarse de forma económica únicamente actualizando el sistema TETRA existente.
  - La solución BB más probable para redes de emergencia es la tecnología LTE (<1GHz), que, con su corto tiempo de latencia, puede satisfacer los requisitos de tiempo de establecimiento de llamada de las comunicaciones PSS de voz.

Otros estudios realizados en esas fechas coinciden en proponer la integración y la interoperabilidad de diferentes tecnologías en la misma red PPDR [DUR2008, AIA2009].

### 2.3.3 Primeros pasos hacia la banda ancha BB-PPDR en Europa

A continuación, se resumen los primeros pasos dados en Europa hacia la banda ancha móvil de las redes de emergencia (BB-PPDR) [CEP2010, CEP2016, CEP2019, ETS2010b, HER2010, RSC2011].

En marzo de 2010, el Comité de Comunicaciones Electrónicas (ECC) de la CEPT organizó un Workshop sobre PPDR [CEP2010], destacándose las siguientes conclusiones:

- La armonización europea es esencial para determinar las frecuencias PPDR.
- Las redes públicas no pueden ser usadas para aplicaciones PPDR de misión crítica.



- La banda ancha está emergiendo en las redes PPDR.
- Se debe estudiar la posibilidad de compartir las bandas asignadas a usos militares.
- Se debe seleccionar la banda de frecuencias tan pronto como sea posible.

En mayo de 2010, el ETSI finalizó la elaboración del SRDoc TR 102 628 “Requisitos de espectro adicional para los futuros sistemas PSS en el rango de frecuencias UHF” [ETS2010b], que enfatiza la necesidad de espectro dentro de las posibilidades de la tecnología para su utilización en aplicaciones PPDR de banda amplia y banda ancha. Según este informe, es de importancia crítica que:

- Los servicios PSS de datos de alta velocidad asuman una prioridad muy alta en la designación del espectro europeo.
- La banda requerida sea considerada como un activo en toda Europa para comunicaciones PPDR y no esté sujeta a los criterios utilizados en la designación del espectro para las redes y servicios comerciales, tales como las subastas.
- Esta banda sea designada con carácter dedicado (y protegido).
- Esta banda tenga un uso armonizado (interoperable) a lo largo de Europa.

De acuerdo con [CEP2019], en el citado SRDoc quedaron descritos los requisitos de banda ancha facilitados por la industria y los usuarios PPDR, y el ETSI lo remitió al Grupo de Trabajo de Gestión de Frecuencias (WGFM) del ECC, que en mayo de 2011 constituyó un equipo de proyecto denominado FM49, con el objetivo de identificar el espectro necesario para el futuro de la banda ancha BB-PPDR.

En marzo de 2011, la Comisión Europea organizó un Workshop sobre el “Futuro de los servicios PPDR en Europa” [RSC2011], extrayéndose las siguientes conclusiones:

- Los requisitos de usuario son claros en cuanto a servicios de datos móviles de alta velocidad y redes PPDR dedicadas. Se insta a la armonización europea del espectro y a estándares europeos para asegurar la interoperabilidad de los sistemas PPDR.
- La cooperación a todos los niveles entre los diferentes servicios de seguridad pública y de defensa proporciona beneficios evidentes.

La Comisión, por su parte, aseguró su apoyo a las actuaciones de la comunidad PPDR en los siguientes términos:

- Hay un claro apoyo por parte de los reguladores nacionales y la industria a la armonización a nivel europeo: los estándares de equipos y el espectro son elementos

importantes en este asunto. A la vez que se reconoce la competencia nacional de los Estados miembros, es importante el papel de coordinación de la Comisión.

- Mientras que algunos requisitos PPDR de datos de alta velocidad puede ser satisfechos por las redes comerciales, existen evidencias de que los servicios de misión crítica requieren de redes dedicadas, no comerciales. Este requisito generará costes que sólo puede ser asumidos por el presupuesto de los gobiernos (y no por el mercado), creando por tanto una situación complicada en periodos de recortes presupuestarios. En consecuencia, será crucial compartir recursos entre defensa y los servicios de seguridad a fin de asegurar soluciones que sean viables económicamente y en los plazos previstos.
- En el seno del ETSI, se iniciaron las actividades de estandarización y se invitó a participar a todos los usuarios de defensa y de seguridad pública con el objeto de concebir un estándar que refleje la funcionalidad requerida a los servicios de misión crítica.

En agosto de 2012, se publica el ETSI TR 102 022-1 “Especificación de requisitos de usuario: requisitos de comunicación de banda ancha de misión crítica” [ETS2012], que describe las funcionalidades más demandadas por los usuarios PPDR y los requisitos que imponen a la tecnología.

## **3. Análisis de las posibles soluciones de red**

### **3.1 Introducción**

El objeto de este capítulo es analizar las posibles soluciones de red capaces de satisfacer las futuras necesidades de comunicación de los usuarios de la Red RADIECARM. Para ello, se ha considerado la disponibilidad de espectro, las limitaciones financieras, los estándares y tecnologías disponibles y su evolución, las posibilidades que ofrecen las redes móviles públicas y los proyectos BB-PPDR iniciados en varios países.

### **3.2 Consideraciones**

A continuación, se describen las consideraciones más relevantes que se han tenido en cuenta en la realización del estudio, una vez consultadas las referencias bibliográficas que se indican.

#### **3.2.1 Disponibilidad de espectro**

En relación con el espectro disponible actualmente para BB-PPDR, se debe tener en cuenta lo siguiente [TCC2016].

#### **Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones 2015**

De acuerdo con lo establecido en un artículo publicado en la revista BIT presentado en el Grupo del Espectro del COIT [ALO2015], la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2015 (CMR-15) planteó la revisión de la Resolución 646 sobre PPDR adoptada en la CMR-12, en la que se establecen unos rangos de frecuencia distintos para cada una de las tres regiones contempladas en las Regulaciones Radio de la ITU y se recomendó a las administraciones su uso para proporcionar servicios PPDR. En la Región 1, que incluye Europa, el rango armonizado previamente es 380-470 MHz. La propuesta europea para dicha revisión supone establecer una armonización global en un rango que cubra las bandas de 700 MHz y 800 MHz, manteniendo la banda 380-470 MHz.

De acuerdo con las Actas Finales CMR-15 [CMR2015], la Resolución 646 (Rev. CMR-15) resuelve lo siguiente:

1. *“alentar a las administraciones a utilizar gamas de frecuencias armonizadas para la PPDR, en la mayor medida posible, teniendo en cuenta las necesidades nacionales y regionales, y teniendo también presente la necesidad de consultas y cooperación con otros países afectados;*
2. *alentar a las administraciones a considerar partes de la gama de frecuencias 694-894 MHz, como se indica en la versión más reciente de la Recomendación ITU-R M.2015, al efectuar la planificación nacional de sus aplicaciones de PPDR, sobre todo de banda ancha, en aras de una armonización, habida cuenta de los destacando c) y e);*
3. *alentar además a las administraciones a considerar también partes de las siguientes gamas de frecuencias armonizadas a nivel regional para sus aplicaciones de PPDR:*
  - *en la Región 1: 380-470 MHz;*
  - *en la Región 3: 406,1-430 MHz, 440-470 MHz y 4 940-4 990 MHz;*
4. *que se incluya en la Recomendación ITU-R M.2015 la disposición de frecuencias para PPDR en las gamas de frecuencias especificadas en los resuelve 2 y 3 y las disposiciones de frecuencias para PPDR de los países;*
5. *que la utilización de las gamas de frecuencias para la PPDR en los resuelve 2 y 3 anteriores, así como la utilización de las disposiciones de frecuencias para PPDR de los países, descritas en la versión más reciente de la Recomendación ITU-R M.2015, no deben causar interferencia inaceptable, ni imponer restricciones a la utilización de estas gamas de frecuencias por aplicaciones de los servicios a los que estén atribuidas dichas gamas en el Reglamento de Radiocomunicaciones;*
6. *alentar a las administraciones a satisfacer las necesidades temporales de frecuencias, además de lo que pueda normalmente preverse en acuerdos con administraciones interesadas, para situaciones de emergencia y operaciones de socorro;*
7. *alentar a las administraciones a facilitar la circulación transfronteriza de los equipos de radiocomunicaciones destinados a su utilización en situaciones de emergencia y de ayuda en caso de catástrofe, a través de la cooperación y consultas mutuas, sin afectar a la legislación nacional;*
8. *que las administraciones alienten a las instituciones y organizaciones de PPDR a utilizar las Recomendaciones ITU-R pertinentes a la hora de planificar la utilización del espectro e introducir nuevas tecnologías y sistemas destinados a la PPDR;*

9. *alentar a las administraciones a que continúen trabajando estrechamente con su propia comunidad de PPDR a fin de seguir perfeccionando los requisitos operativos para dichas actividades de PPDR”.*

#### Actuaciones del Comité de Comunicaciones Electrónicas (ECC) de la CEPT

El Comité de Comunicaciones Electrónicas (ECC) de la CEPT lleva años investigando varias soluciones para satisfacer las crecientes necesidades de espectro de las organizaciones PPDR. Ello implica adecuados niveles de armonización que requieren un esfuerzo a largo plazo por parte del ECC y de las Administraciones CEPT relevantes a nivel nacional. Así se recoge en el plan estratégico del ECC para el periodo 2015-2020, al objeto de continuar buscando una respuesta apropiada al requisito de espectro y a las necesidades de armonización para PPDR.

En este sentido, conviene destacar que el ECC estableció en el año 2011 el equipo de proyecto FM49 [CEP2016], que se plantea, entre otros, con el objetivo de identificar y evaluar bandas de frecuencia adecuadas para la armonización del espectro a nivel europeo (por debajo y por encima de 1 GHz) necesario para satisfacer los requisitos BB-PPDR.

En su programa de trabajo [CEP2016], el FM49 se propone:

- Elaborar un ECC Report para consolidar los requisitos de usuario BB-PPDR.
- Elaborar un ECC Report para desarrollar un marco de trabajo regulatorio armonizado sobre BB-PPDR y conseguir el nivel necesario de interoperabilidad.
- Elaborar y publicar una nueva Decisión ECC sobre BB-PPDR.

#### **ECC Report 199 [ECC2013]**

En su primer informe, el FM49 establece los requisitos de usuario y las necesidades de espectro para los futuros sistemas europeos BB-PPDR (WAN), en cuya especificación coincide prácticamente con [ETS2012], de modo que ambos informes han sido aceptados por la comunidad PPDR como referencia. Por otro lado, [ECC2013] cuantifica en 2 x 10 MHz el espectro que necesitan tales sistemas. Asimismo, indica que, a nivel nacional, podrían plantearse requisitos de espectro adicionales para soportar Operaciones en Modo Directo (DMO), comunicaciones Aire-Tierra-Aire, redes ad-hoc y comunicaciones de voz sobre WAN. Al mismo tiempo, se reconoce que el sector PPDR, incluyendo las radiocomunicaciones asociadas, es un asunto de soberanía nacional, y que las necesidades PPDR de los países europeos pueden variar. Esto significa que las decisiones

sobre la cantidad de espectro requerido para BB-PPDR y sobre el modelo de implementación más apropiado serán adoptadas a nivel nacional. Por tanto, la armonización del sector PPDR en Europa necesita ser lo suficientemente flexible para considerar diferentes necesidades tales como la cantidad de espectro disponible y el posible uso de redes comerciales, asegurando al mismo tiempo la interoperabilidad entre los distintos países y maximizando las economías de escala.

### **ECC Report 218 [ECC2015b]**

En octubre de 2015 se aprobó el ECC Report 218 [ECC2015b], el segundo informe elaborado por el FM49, que desarrolla las condiciones necesarias para crear un marco armonizado europeo para la implementación de los futuros sistemas europeos BB-PPDR e investiga las bandas de frecuencias candidatas (400 MHz y 700 MHz).

Este informe, que es complementario al ECC Report 199 [ECC2013], propone el concepto de “armonización flexible” para posibilitar una implementación eficiente de los citados sistemas. Dicho concepto incluye tres elementos principales:

- Un estándar técnico común: LTE y sus evoluciones, tecnología seleccionada frente a otras opciones por los motivos que se detallan más adelante en esta tesis, en concreto en el apartado dedicado a los estándares y tecnologías disponibles y su evolución.
- Elección nacional del modelo de implementación más adecuado (dedicado, comercial ó híbrido).
- Flexibilidad nacional para decir cuánto espectro debería designarse para PPDR dentro del rango de frecuencias armonizado, de acuerdo con las necesidades nacionales.

Los rangos de frecuencias identificados en [ECC2015b] son los siguientes:

- 400 MHz (410-430 MHz y 450-470 MHz): No puede considerarse como una solución autónoma para los países que requieran 2x10 MHz, pero sí puede ofrecer flexibilidad nacional como espectro adicional al rango de 700 MHz. Además, presenta muy buenas características de propagación, reduciendo potencialmente el número de emplazamientos necesarios para proporcionar la cobertura requerida (zonas rurales).
- 700 MHz (694-790 MHz): Ofrece la posibilidad de acomodar BB-PPDR designando varios bloques de espectro para uso dedicado/comercial. Por tanto, puede

considerase como una solución autónoma para soportar de forma completa 2x10 MHz.

Es importante notar que existen otras opciones de uso del espectro para BB-PPDR, además de las bandas de 400 MHz y 700 MHz. Para aquellos países que optaran por una solución PPDR comercial o híbrida, cualquiera de las bandas LTE armonizadas en CEPT podría también ser utilizada para BB-PPDR. Como estas bandas ya están armonizadas por uso móvil de banda ancha, no hay necesidad de armonizar estas bandas IMT para BB-PPDR.

### **Decision ECC (16)02 [ECC2019a]**

El 17 de junio 2016, el Pleno del Comité de Comunicaciones Electrónicas aprobó la Decision ECC (16)02 sobre condiciones técnicas armonizadas y bandas de frecuencias para la implementación de los sistemas PPDR de banda ancha (BB-PPDR), que posteriormente fue modificada con fecha 8 de marzo de 2019 y en su versión final establece lo siguiente:

1. *“que el propósito de esta Decisión ECC es identificar los rangos de frecuencia para redes WAN PPDR y proporcionar a las administraciones CEPT las Condiciones Técnicas Menos Restrictivas (en inglés, LRTC) para asegurar la coexistencia de BB-PPDR con otros servicios.*
2. *que las administraciones CEPT que quieran introducir BB-PPDR en partes del rango de 700 MHz aplicarán las LRTC dentro de las siguientes disposiciones de frecuencias pareadas:*
  - a) *698-703 MHz (uplink) / 753-758 MHz (downlink) aquellas especificadas en Anexo 1;*
  - b) *703-733 MHz (uplink) / 758-788 MHz (downlink) aquellas especificadas en la ECC Decision (15)01;*
  - c) *733-736 MHz (uplink) / 788-791 MHz (downlink) aquellas especificadas en Anexo 1;*
3. *que las administraciones CEPT que quieran introducir BB-PPDR en partes del rango de 400 MHz aplicarán las LRTC con disposiciones de canalización de 1.4 MHz, 3 MHz ó 5 MHz dentro de los siguientes rangos de frecuencias pareadas:*
  - a) *450.5-456.0 MHz (uplink) / 460.5-466.0 MHz (downlink) aquellas especificadas en Anexo 2;*

- b) *452.0-457.5 MHz (uplink) / 462.0-467.5 MHz (downlink) aquellas especificadas en Anexo 2;*
  - c) *410.0-415.0 MHz (uplink) / 420.0-425.0 MHz (downlink) aquellas especificadas en Anexo 3;*
  - d) *411.0-416.0 MHz (uplink) / 421.0-426.0 MHz (downlink) aquellas especificadas en Anexo 3;*
  - e) *412.0-417.0 MHz (uplink) / 422.0-427.0 MHz (downlink) aquellas especificadas en Anexo 3;*
4. *que las administraciones CEPT permitirán la libre circulación y uso de equipamiento de usuario BB-PPDR compatible que opere bajo el control de una red;*
  5. *que esta Decisión entra en vigor el 8 de marzo de 2019;*
  6. *que las administraciones CEPT informarán a la Oficina sobre las disposiciones de frecuencia precisas que se usan para operaciones BB-PPDR en su territorio;*
  7. *que las administraciones CEPT comunicarán las medidas nacionales que implementen esta Decisión al Presidente del ECC y a la Oficina cuando la Decisión sea implementada a nivel nacional”.*

Resumiendo, esta Decisión contempla las siguientes opciones para la asignación de espectro PPDR armonizado:

- a) **Banda de 700 MHz.** Es el único rango de frecuencias que puede considerarse como una solución autónoma para soportar de forma completa los requisitos BB-PPDR calculados en el ECC Report 199 (2x10 MHz), por lo que se considera como el rango de frecuencias central que permite asegurar la interoperabilidad. Dentro de esta banda tenemos:
  - Las opciones en la Banda 28 de LTE (2 x 30 MHz) entre 703-733 MHz y 758-788 MHz ya están cubiertas por la ECC Decision (15)01 [ECC2015a]. Algunos países han decidido subastar esta parte del espectro para uso comercial, mientras que otros quieren asignarlo parcialmente a organizaciones y servicios PPDR.
  - Dos bloques de frecuencias dedicados para PPDR:
    - o uno de 2x5 MHz (698-703 MHz / 753-758 MHz)
    - o y otro de 2x3 MHz (733-736 MHz / 788-791 MHz).
- b) **Banda de 400 MHz.** Aunque no proporciona suficiente espectro disponible para considerarse como una solución autónoma en los países de la CEPT que requieren



2x10 MHz, puede ofrecer flexibilidad nacional, es decir, en el contexto de espectro adicional junto a la banda de 700 MHz. Por tanto, los países pueden asignar uno de los cinco subbandas establecidas:

- 450.5-456.0 MHz / 460.5-466.0 MHz
- 452.0-457.5 MHz / 462.0-467.5 MHz
- 410.0-415.0 MHz / 420.0-425.0 MHz
- 411.0-416.0 MHz / 421.0-426.0 MHz
- 412.0-417.0 MHz / 422.0-427.0 MHz.

En cualquier caso, las asignaciones estarán sujetas a la decisión nacional.

Como consecuencia de la adopción de la ECC Decision (16)02 para BB-PPDR [ECC2019a], se modificó la Decisión ECC (08)05 de 27 de junio de 2008 sobre la armonización de bandas de frecuencia para la implementación de aplicaciones de radio PPDR digital en la banda 380-470 MHz para restringir su alcance a los sistemas PPDR de banda estrecha y de banda amplia [ECC2019b].

#### *Espectro BB-PPDR disponible en España*

El Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) únicamente recoge en sus Notas de Utilización Nacional (UN) una reserva de 2x5 MHz en la Banda 450 a 470 MHz para los sistemas BB-PPDR. En concreto, en las Notas UN-31 del CNAF 2017 [SEA2017], se especifica que esta banda se destina a comunicaciones en la modalidad dúplex con una separación Tx/Rx de 10 MHz, salvo determinados canales de radiobúsqueda. La subbanda de frecuencias 452,125 a 457,125 MHz y 462,125 a 467,125 MHz se destinan a sistemas digitales de comunicaciones PMR/PAMR de banda ancha con canalizaciones desde 1,25 MHz hasta 5 MHz para posibles usos preferentemente de protección pública y operaciones de socorro en caso de catástrofe (PPDR), de conformidad con la Decisión ECC/DEC (16)02 [ECC2019a].

#### 3.2.2 Limitaciones financieras

En la mayor parte de las naciones, el sector PPDR está íntimamente ligado con el sector público, y las actividades del sector PPDR generalmente son financiadas por los presupuestos de las Administraciones Públicas, en sus distintos niveles (por ejemplo, en España tenemos los niveles estatal, regional y local).

Según el informe [ECC2015b], el mercado de equipamientos y servicios PPDR está condenado a estar muy fragmentado (lo que supone un alto coste, que representaría una carga pesada en los presupuestos), si no se acuerda y se implementa una política global común que satisfaga los requisitos nacionales. Por este motivo, Europa se plantea como objetivo político clave de alto nivel el establecer (en la medida de lo posible) un mercado único de equipamiento de comunicaciones de banda ancha PPDR y, particularmente, de terminales, asegurando al mismo tiempo que los servicios BB-PPDR puedan implantarse de acuerdo con las circunstancias nacionales y otras actividades de planificación de espectro a nivel nacional.

Conforme a lo establecido en un artículo publicado en la revista BIT que fue presentado en el Grupo del Espectro del COIT [AGU2013], el modelo actual de comunicaciones PPDR basado en tecnologías dedicadas, explotadas en redes dedicadas y haciendo uso de espectro radioeléctrico dedicado no es el más adecuado para la provisión de los futuros sistemas BB-PPDR, requiriéndose de nuevas aproximaciones sustentadas en los siguientes principios:

1. Explotación de tecnologías de banda ancha móvil utilizadas en el entorno comercial, lo que permitirá aprovechar las economías de escala asociadas a los equipos PPDR.
2. Nuevas estrategias de despliegue de infraestructuras de red. Considerando que el soporte de los futuros sistemas BB-PPDR precisa de un número de estaciones base mucho mayor que el desplegado para los actuales sistemas PPDR, se estima que las inversiones necesarias para el despliegue de redes dedicadas BB-PPDR serán tan elevadas que no podrán ser acometidas por las administraciones públicas competentes. Para ahorrar costes se plantean varias posibilidades, como la compartición de infraestructuras con los operadores comerciales, el uso de capacidad de las redes comerciales (lo que permitiría el acceso a los servicios BB-PPDR directamente a través de las mismas) y complementar el despliegue de infraestructura permanente mediante la utilización de equipos transportables y de comunicaciones móviles por satélite, con el fin de asegurar cobertura en el territorio no cubierto por las redes terrestres.
3. Incorporación de principios de compartición de espectro. La designación de cierta cantidad de espectro dedicado para BB-PPDR es un activo fundamental, pero presenta como inconveniente el uso ineficiente del espectro en bandas de frecuencia que tienen un gran valor económico para los operadores comerciales. En efecto, la cantidad de espectro requerido para comunicaciones PPDR exhibe

una gran fluctuación entre los grandes incidentes/eventos y las tareas rutinarias diarias. En este sentido, se plantea una asignación mínima de espectro dedicado BB-PPDR que sea suficiente para satisfacer sus necesidades de comunicaciones de misión crítica en la mayoría de escenarios operacionales, junto con la posibilidad de compartir parte de ese espectro PPDR para otros usos y de acceder a espectro adicional en situaciones de pico de demanda.

### 3.2.3 Estándares y tecnologías disponibles y su evolución

El proyecto europeo PPDR-TC (*Public Protection and Disaster Relief – Transformation Center*) [PPD2015] se planteó, entre otros, con el objetivo de identificar las tecnologías candidatas PPDR. En este proyecto se ha elaborado un extenso análisis de las tecnologías y soluciones de red PPDR disponibles, tanto actuales como futuras, con el fin de determinar en qué medida son capaces de satisfacer las futuras necesidades de los usuarios PPDR [OLI2014]. A continuación, se exponen los resultados más relevantes de este análisis:

- Se identifican y analizan un conjunto de 18 soluciones de red, que incluyen:
  - o Las tecnologías usadas actualmente por las organizaciones PPDR: TETRA, TEDS, TETRAPOL, PMR analógico y digital, DMR y comunicaciones por satélite.
  - o Las redes públicas: CDMA2000, GSM, GPRS/EDGE, UMTS y HSPA/HSPA+.
  - o Las tecnologías candidatas para las actividades PPDR en el futuro: LTE, Wi-Fi, WiMAX y MANETs.
  - o Conceptos que son transversales a estas tecnologías: SDR (*Software-Defined Radio*) y CR (*Cognitive Radio*).
- Posteriormente, se describen las limitaciones tecnológicas más relevantes de las soluciones de red identificadas durante el proyecto. Partiendo de esta descripción, se identifican las siguientes deficiencias aplicables a las diferentes tecnologías analizadas:
  - o Respecto a las redes PPDR actuales, destaca la incapacidad de estas tecnologías para satisfacer los requisitos PPDR de transmisión de datos de alta velocidad, ya que ofrecen velocidades inferiores a 384 kbps.
  - o Las redes públicas no disponen de las facilidades de comunicaciones de voz específicas de PPDR (DMO, PTT, llamadas de grupo, etc.) y presentan problemas potenciales de seguridad (no disponen de encriptación extremo a extremo).

- Las futuras soluciones tecnológicas analizadas no disponen actualmente de las citadas facilidades de comunicaciones de voz específicas de PPDR.
- Sobre la base del análisis anterior, se puede concluir que, actualmente, ninguna tecnología es capaz de cumplir, por sí sola, con todos los requisitos PPDR, pero la mayoría de estos requisitos pueden ser satisfechos si se combinan diferentes soluciones de red. En este sentido, conviene destacar que el objetivo a largo plazo de las redes de nueva generación (tales como LTE Release 12 y siguientes) es reemplazar las redes existentes, principalmente debido a que mantener estas redes en funcionamiento puede resultar bastante costoso. No obstante, las redes existentes continuarán operando para servicios de voz de misión crítica durante varios años más como mínimo, lo que significa que la interoperabilidad entre estos sistemas y las redes de nueva generación es un requisito fundamental de los usuarios PPDR.

De acuerdo con ECC Report 218 [ECC2015b], la comunidad de usuarios PPDR ha llegado a la conclusión de que, desde el punto de vista técnico, el ecosistema global LTE es la solución tecnológica más adecuada para los futuros sistemas BB-PPDR. Ello se explica considerando los siguientes factores:

- Las ventajas inherentes a LTE, como, por ejemplo, una variedad más amplia de terminales, menores costes de los filtros duplexores y chips, los beneficios derivados de las economías de escala logradas en las redes comerciales, la posibilidad de efectuar roaming sobre las redes móviles comerciales, el compromiso de desarrollar las funcionalidades de misión crítica en el estándar LTE y los desarrollos previstos de esta tecnología a largo plazo.
- Está previsto que el estándar LTE sea la tecnología dominante para comunicaciones móviles de banda ancha durante muchos años. Al objeto de que la comunidad PPDR pueda beneficiarse del desarrollo técnico y de las economías de escala del mercado de banda ancha móvil comercial, existe la visión común de que LTE será la tecnología que satisfaga en el futuro las necesidades BB-PPDR.
- LTE ya es la tecnología elegida para BB-PPDR en algunos países. Por ejemplo, en Estados Unidos, donde la FCC ordenó el uso de LTE para proporcionar servicios de banda ancha en la banda 14 de LTE a nivel nacional, empleando 2 x 10 MHz dentro la banda de 700 MHz. Otros países como Canadá (banda de 700 MHz) y Australia (banda de 800 MHz) disponen ya del espectro necesario para desplegar BB-PPDR en bandas compatibles con LTE.

- La Comisión Europea, a través del Radio Spectrum Policy Group en su informe “RSPG Report on Strategic Sectoral Spectrum Needs” - RSPG13-540 (rev2), reconoce que la decisión de desplegar redes BB-PPDR es un asunto nacional, pero espera que la tecnología LTE sea la tecnología que cumpla en el futuro con las necesidades BB-PPDR.
- Por su parte, el Consejo de la Unión Europea, a través del LEWP-RCEG (*Law Enforcement Working Party – Radio Communications Expert Group*), ha llegado a la conclusión de que la comunidad PPDR quiere formar parte del ecosistema LTE debido a diversos factores, incluyendo una mayor variedad de terminales, unos menores precios, la capacidad de *roaming* con las redes comerciales y los desarrollos previstos del estándar LTE a largo plazo.

LTE es una tecnología global de comunicaciones móviles especificada por el 3GPP [AGU2010]. El 3GPP es una colaboración de varias organizaciones de estándares de telecomunicación de distintas partes del mundo, apoyada por un amplio conjunto de entidades que incluyen suministradores de equipamiento, operadores de red y departamentos gubernamentales. En Europa, las especificaciones 3GPP se publican por el ETSI.

Las especificaciones 3GPP se desarrollan como versiones (*releases*), que normalmente están separadas 1-2 años. El ciclo de especificación de una versión 3GPP comprende varias etapas:

- Etapa 1: definición de los requisitos del servicio desde el punto de vista del usuario.
- Etapa 2: análisis lógico de estos requisitos y diseño de una arquitectura compuesta por entidades funcionales, en la que la información fluye a través de puntos de referencia entre entidades funcionales.
- Etapa 3: definición de una implementación concreta de la funcionalidad y de los protocolos en las interfaces entre los elementos físicos a los que se han asignado las entidades funcionales.

Además, algunas especificaciones de la etapa 3 requieren que se preparen especificaciones de prueba de conformidad (Etapa 4).

Este proceso produce especificaciones que la industria más tarde convierte en productos.

La versión 8 (Release 8 ó R8), la primera versión de especificaciones 3GPP que incluye LTE, fue concluida en marzo 2009 y constituyó la base de los primeros despliegues de LTE.

A partir de la versión R10 (cuya especificación finalizó en junio de 2011), esta tecnología se conoce formalmente como LTE-Advanced (no obstante, todas las versiones son referidas como LTE en este documento). La versión R10 cumple todos los requisitos establecidos por la ITU para IMT-Advanced (4G).

El trabajo de desarrollo para que la tecnología LTE pueda soportar las funcionalidades específicas PPDR comenzó hace años en el 3GPP, el ETSI y otras organizaciones internacionales con un amplio apoyo de la industria de los móviles y de las partes interesadas en el PPDR. En efecto, los usuarios y operadores PPDR se han involucrado en el 3GPP, el ETSI y otras organizaciones internacionales para apoyar la estandarización de las funcionalidades BB-PPDR, siguiendo la propuesta inicialmente desarrollada en el Proyecto MESA [MET2003].

El 3GPP ha identificado las mejoras que deben ser incorporadas en LTE para adaptar esta tecnología a los requisitos clave de la comunidad PPDR, destacando las siguientes funcionalidades [3GP2019, TCC2017, FER2014]:

- Comunicaciones de grupo (*Group Communication Service Enablers – GCSE -*).
- Comunicaciones directas entre terminales (*Proximity Services – ProSe -*).
- Funcionamiento de la red de acceso radio aislada (*Isolated E-UTRAN Operations for Public Safety – IOPS -*).
- PTT de misión crítica (*Mission Critical Push to Talk – MCPTT -*).
- Datos de misión crítica (*Mission Critical Data – MCData -*).
- Vídeo de misión crítica (*Mission Critical Video – MCVideo -*).
- Equipo de usuario de alta potencia (*High-Power User Equipment – HPUE -*).
- Mejoras en la compartición de la red de acceso radio (*Enhanced RAN sharing*).
- Características de control de la priorización y la calidad de servicio (QoS).
- Interfuncionamiento de las comunicaciones de misión crítica entre sistemas LTE y no LTE (*MC Communication Interworking between LTE and non-LTE Systems – MCCI -*).
- Interconexión y migración de sistemas de misión crítica (*MC system migration and interconnection – MCSMI -*).

La versión R11 (concluida en marzo de 2013) introdujo una mayor potencia de los terminales (HPUE) en la banda 14 de LTE dedicada a PPDR en Estados Unidos. Como la potencia de salida del terminal es controlada por la red, al aumentar la máxima potencia de

transmisión se proporciona una cobertura más amplia en redes donde los parámetros de red permiten el uso de estas mayores potencias.

La versión R12, cuya especificación finalizó en marzo de 2015, proporciona un soporte básico de llamadas de grupo (GCSE) y de llamadas directas de terminal a terminal (ProSe).

La versión R13 (finalizada en marzo de 2016) añadió las siguientes funcionalidades relevantes para los usuarios PPDR [WMA2016, 3GP2015]:

- MCPTT sobre LTE, que soporta un servicio PTT mejorado y adecuado para escenarios de misión crítica entre distintos usuarios.
- Mejoras de los servicios de proximidad (ProSe), que soportan la comunicación de voz en modo directo, la función de descubrimiento (esta última permite a un usuario saber si otras radios están dentro del rango de modo directo) y una funcionalidad de retransmisión que permite a un usuario fuera de cobertura conectarse a una red LTE fija mediante una conexión en modo directo con un dispositivo en red.
- Operación de red aislada, que permite a cualquier estación base actuar cuando se queda aislada del resto de la red.
- Mejoras de compartición de RAN.

La versión R14 (finalizada en junio de 2017) incluye mejoras de diversos aspectos de misión crítica, en particular del servicio MCPTT, introduce los servicios de vídeo de misión crítica (MCVideo) y de datos de misión crítica (MCData) sobre LTE, así como algunas otras mejoras de interés para la comunidad PPDR [ETS2018].

La versión R15 (finalizada en junio de 2019), primera fase del estándar 5G 3GPP, añade mejoras en los servicios MCPTT, MCData y MCVideo, así como otras mejoras relacionadas con la seguridad y con el uso de MBMS (*Multimedia Broadcast/Multicast Service*) para servicios de comunicaciones de misión crítica. También añade equipos de usuario de alta potencia (HPUE) en la Banda 28 de LTE. Asimismo incluye la 2ª etapa de la especificación de dos funcionalidades cuya finalización está prevista en la versión R16: el interfuncionamiento entre sistemas LTE y no LTE (MCCI), y la interconexión y migración de sistemas de misión crítica (MCSMI) [BHA2018, GUT2018].

En [3GP2017] se pueden consultar en detalle los servicios y funcionalidades de misión crítica que han sido incorporados como especificaciones en las sucesivas versiones 3GPP.

Las capacidades de las tecnologías IMT (incluyendo el uso de LTE) para soportar las aplicaciones BB-PPDR son objeto del Informe ITU-R M.2291-1 [ITU2016c].

Resumiendo, está previsto que pasen varios años antes de que las funcionalidades que la comunidad PPDR ha identificado como básicas hayan sido especificadas, implementadas, comprobadas e integradas en soluciones LTE por la mayoría de fabricantes de infraestructura y terminales. Concretamente, de acuerdo con [TCC2019a] está previsto que a partir del año 2020 estén disponibles para su uso operacional los primeros equipamientos LTE que implementen la versión R14 3GPP de misión crítica, y a partir del año 2022 los primeros equipamientos que implementen la versión R15 3GPP de misión crítica.

En base a lo anterior, se puede concluir que las redes PPDR actuales deberán mantenerse en funcionamiento el tiempo necesario para llevar a cabo tanto el despliegue de los futuros sistemas LTE que cumplan las funcionalidades básicas BB-PPDR, como la migración de los sistemas PPDR actuales a los futuros LTE BB-PPDR (al menos hasta el año 2025).

### 3.2.4 Posibilidades que ofrecen las redes móviles públicas

Considerando las posibilidades que ofrecen las redes móviles públicas, se contemplan tres opciones para el despliegue de redes que proporcionen servicios BB-PPDR [ECC2015b]:

- Infraestructura de red dedicada.
- Infraestructura de red comercial.
- Soluciones híbridas (con infraestructura de red parcialmente dedicada y parcialmente comercial).

A continuación, se describen las alternativas planteadas, indicando para cada una sus ventajas y limitaciones [ECC2015b].

#### ***I. Infraestructura de red dedicada***

Se trata de una red móvil de banda ancha (propiedad del gobierno o contratada a un operador) especialmente diseñada por cumplir los requisitos PPDR especificados (cobertura, soporte de aplicaciones especiales de banda ancha, resiliencia, seguridad, etc.), que no se comparte para otros usos. Requiere espectro específico para PPDR a nivel nacional. Existen dos variantes:

##### *I.1. Red planificada, construida y operada por la autoridad, que es la propietaria de la red.*



En esta variante la autoridad establece los requisitos técnicos de la infraestructura de red con respecto a la oferta de servicios, capacidad, seguridad, fiabilidad, redundancia y robustez de la red y la infraestructura que la soporta.

La autoridad financia el equipamiento y la infraestructura soporte, los sistemas que soportan la operación y mantenimiento y paga el coste de funcionamiento (alquiler, coste de operación y mantenimiento/repuestos). Algunos servicios como la distribución de energía o los enlaces de transmisión de la red troncal pueden ser compartidos con otros usuarios, dependiendo de las normas nacionales y de las condiciones locales.

Un proyecto de este tipo también podría incluir los terminales radio de usuario y el equipamiento de las salas de control de las agencias de seguridad pública.

### *1.2. Servicio móvil de banda ancha prestado mediante oferta de servicios.*

En esta variante la autoridad contrata los servicios móviles de banda ancha de un operador comercial de acuerdo con los requisitos técnicos establecidos respecto a la oferta de servicios, capacidad, seguridad, fiabilidad, redundancia y robustez de la red y la infraestructura que la soporta. En este modelo el servicio ofertado se presta mediante una red móvil de banda ancha dedicada.

El operador comercial financia el equipamiento y la infraestructura soporte, los sistemas que soportan la operación y mantenimiento, realiza la planificación, construcción y operación y mantenimiento de la red y la infraestructura de servicio, y el soporte técnico a los usuarios finales. Algunos servicios como la distribución de energía o los enlaces de transmisión de la red troncal pueden ser compartidos con otros usuarios, dependiendo de las normas nacionales y de las condiciones locales.

La autoridad paga la cantidad mensual acordada para el suministro del servicio de banda ancha móvil a los usuarios de seguridad pública. Normalmente, esto se regula mediante un contrato detallado a largo plazo entre las partes.

### *1.3. Ventajas e inconvenientes*

Las ventajas de un diseño de infraestructura de red dedicada PPDR son las siguientes:

- La dependencia de la infraestructura de red móvil comercial está muy limitada, lo cual ha demostrado ser de importancia crítica en operaciones PPDR desarrolladas ante crisis o grandes eventos (que suelen afectar al funcionamiento de las redes comerciales).

- Las redes dedicadas son la solución más fiable para comunicaciones de misión crítica, ya que aseguran una mejor integridad y disponibilidad de la red.
- Las bandas de frecuencia dedicadas ofrecen la posibilidad de desplegar redes dedicadas que responden a requisitos de seguridad nacional y facilitan la prestación de servicios específicos y la fiabilidad requeridos por PPDR, al tiempo que se benefician de las sinergias con los estándares desarrollados por la banda ancha móvil comercial.

Los inconvenientes de la infraestructura de red dedicada son los elevados costes de inversión y de operación, y el hecho de que esta opción necesita espectro dedicado.

## ***II. Infraestructura de red comercial***

Este modelo supone que la autoridad gubernamental contrata los servicios móviles de banda ancha a uno o varios operadores comerciales de red móvil. No se requiere espectro específico para BB-PPDR.

Los servicios son proporcionados a través de la red pública del operador comercial y no se requiere infraestructura de red dedicada para la prestación del servicio a los usuarios PPDR. En algunos países, es posible implantar un acuerdo de *roaming* nacional, permitiendo a los terminales PPDR obtener los servicios de otras redes si falla la actualmente utilizada o si el usuario se mueve fuera de la zona de cobertura de la red actual.

Existen dos variantes:

### *II. 1. Se proporcionan los mismos servicios a los usuarios PPDR y a los usuarios públicos.*

En este caso, no existen requisitos especiales PPDR en la oferta de servicios o en la prioridad del servicio, con la excepción del posible *roaming* comercial a nivel nacional.

### *II. 2. Se proporcionan servicios PPDR con requisitos especiales.*

En esta variante, la autoridad contrata los servicios móviles de banda ancha para los usuarios PPDR a uno o varios operadores comerciales de red móvil. Los servicios contratados son proporcionados por la misma infraestructura de red móvil que el operador comercial utiliza para proporcionar los servicios al público; sin embargo, la autoridad tiene requisitos especiales referidos a los servicios y la QoS (calidad del servicio).

El operador comercial tiene que soportar servicios especiales para los usuarios PPDR; por ejemplo, llamadas de grupo y acceso prioritario, y potencialmente también facilidad de seguridad y mayores niveles de disponibilidad mediante un aumento en la robustez en el diseño de la red.

### *II.3. Ventajas e inconvenientes*

Las ventajas de una solución basada en la infraestructura de red comercial son las siguientes:

- Ofrece un menor coste de despliegue y operación, ya que los costes son compartidos por todos los usuarios de la red, de los cuales los usuarios PPDR son una minoría.
- Requieren de un menor tiempo de puesta en servicio.
- Satisface las necesidades de transmisión de datos que no sean de misión crítica para los usuarios PPDR dentro del área de cobertura de las redes comerciales, incluso sin ninguna funcionalidad específica PPDR (resiliencia, prioridad, ...).
- No requiere de espectro específico para BB-PPDR.

Los inconvenientes son:

- En la mayor parte de los casos, la red comercial habrá sido diseñada para satisfacer las necesidades del mercado de consumidores, sin tener en cuenta las necesidades específicas de los usuarios PPDR.
- Los gobiernos tienen menor capacidad para influir en la construcción de la red comercial o en los planes de futuro, ya que el operador público tendrá otros intereses además de las necesidades PPDR.

### ***III. Soluciones híbridas (infraestructura de red parcialmente dedicada y parcialmente comercial)***

En este modelo, el objetivo es encontrar un equilibrio entre el servicio ofrecido por una red móvil comercial de banda ancha y las necesidades que los usuarios PPDR tienen en cuanto a disponibilidad y capacidad en la operativa diaria, así como en periodos de desastres y/o eventos.

Una solución de infraestructura compartida puede ser una opción viable para proporcionar servicios BB-PPDR en el futuro, especialmente en países que tienen grandes áreas rurales con una baja densidad de habitantes. El coste de construir soluciones BB-PPDR dedicadas

en estas áreas poco habitadas puede considerarse demasiado caro por la sociedad y una forma de solucionar esto para los usuarios PPDR es utilizar los servicios móviles comerciales en esas zonas. Existen distintas variantes:

- División geográfica entre la infraestructura de red dedicada y la comercial.
- Modelo de Operador Móvil Virtual (MVNO).
- Modelo MVNO combinado con la división geográfica.
- Modelo MVNO extendido.

Un operador de red móvil virtual (MVNO – *Mobile Virtual Network Operator*) es un proveedor de servicios de comunicaciones que no tiene su propia red de acceso radio (RAN – *Radio Access Network*) para proporcionar servicios a sus clientes. En su lugar, suscribe un acuerdo de negocio con uno o más operadores de redes móviles.

En los casos en que se recurre a un MVNO (privado o público) para proporcionar servicios a los usuarios PPDR, aquel MVNO puede usar la red troncal del operador comercial, controlar algunos elementos de la red troncal o incluso puede ser el propietario de la red troncal.

El modelo MVNO PPDR permite a una parte negociar y hacer el seguimiento de los requisitos y compromisos de servicio con los operadores comerciales, en lugar de que lo hagan las organizaciones PPDR cada una por separado. Como es una parte negociadora mayor que cualquiera de los servicios, el MVNO puede conseguir mejores condiciones económicas. Para los usuarios, un MVNO puede proporcionar un único servicio para todos los tipos de comunicaciones móviles (voz y datos).

### *III.1. División geográfica entre la infraestructura de red dedicada y la comercial.*

En esta variante, se despliega en algunas partes de un país una red móvil de banda ancha dedicada para PPDR; por ejemplo, en las zonas más pobladas y en las carreteras más importantes, mientras que el resto del país se cubre mediante uno o más operadores móviles comerciales. Esto podría hacerse de distintas formas, por ejemplo:

- Separación completa entre la parte de red dedicada y la parte de la red comercial.
- Red troncal e infraestructura de nodo de servicio con algunos elementos dedicados, y RAN dedicada en algunas partes del país.

La división geográfica requerirá espectro dedicado en la parte de la red destinada únicamente a cubrir los usuarios PPDR. También requerirá un acuerdo de *roaming* entre la red PPDR y las redes comerciales.

### *III.2. Modelo de Operador Móvil Virtual (MVNO).*

Las características de esta variante son las siguientes:

- Una parte de la red troncal y nodo de servicios de la red móvil de banda ancha se construye en modo dedicado para los usuarios PPDR. Esto permitirá al operador PPDR tener un control total de los usuarios PPDR en relación con sus suscripciones, perfiles y oferta de servicio.
- Los usuarios PPDR comparten la RAN con los usuarios públicos en todo el país.
- No se requiere espectro adicional para dar servicio a los usuarios PPDR.

### *III.3. Modelo MVNO combinado con la división geográfica.*

Este modelo es una combinación de las dos variantes descritas anteriormente, que combina la funcionalidad MVNO con la solución de división geográfica. Sus características son:

- Una parte de la red troncal y nodo de servicios de la red móvil de banda ancha se construye en modo dedicado para los usuarios PPDR. Además, en algunas partes del país, por ejemplo, en las zonas más pobladas y en las carreteras más importantes, los usuarios PPDR tendrán su propia infraestructura RAN. En las restantes zonas, el servicio se proporciona a través de la RAN de uno o varios operadores comerciales.
- Esta variante requiere espectro PPDR en aquellas zonas donde exista RAN dedicada.

### *III.4. Modelo MVNO extendido.*

De nuevo, en esta variante, una parte de la red troncal y nodo de servicios de la red móvil de banda ancha se construye en modo dedicado para los usuarios PPDR.

La principal diferencia con la variante anterior es que los usuarios PPDR tendrán portadoras dedicadas (transmisores / receptores radio) en las estaciones base móvil comerciales de todo el país. Para ello, se supone que en las estaciones base estará disponible la funcionalidad de tener portadoras de radio controladas (de dos redes troncales distintas). Esto proporcionará a los usuarios PPDR una capacidad de

comunicación dedicada a través del país, pero dependerán de la robustez y cobertura de las RAN de los operadores comerciales.

Esta variante requiere de espectro PPDR a nivel nacional.

### *III.5. Ventajas e inconvenientes*

Las ventajas de una solución híbrida son las siguientes:

- Cuesta menos que una solución totalmente dedicada, ya que los elementos de coste principales son compartidos con una base de usuarios mucho más grande.
- Antes del despliegue de nuevas funcionalidades o de retirar *hardware*, los operadores móviles realizan sus propias pruebas de red y terminales, lo que reduce la probabilidad de que se desplieguen soluciones con errores serios antes de que salten los problemas.
- Es razonable suponer que la solución comercial satisface las necesidades de transmisión de datos que no sean de misión crítica para los usuarios PPDR dentro del área de cobertura de las redes comerciales, incluso sin ninguna funcionalidad específica PPDR (resiliencia, prioridad, ...).

Los inconvenientes de las soluciones híbridas incluyen:

- Una gestión más compleja de la solución de comunicaciones móviles total.
- Tres de las cuatro variantes de soluciones híbridas requieren de espectro dedicado.
- El coste total es mayor que la opción totalmente comercial.

### 3.2.5 Proyectos BB-PPDR

Para completar el presente estudio, se ha considerado conveniente analizar los proyectos BB-PPDR que se han iniciado en determinados países y en Europa, como ejemplos prácticos representativos de las alternativas para el despliegue de los futuros sistemas BB-PPDR [ALO2015, PEL2018, SCF2014].

#### **Estados Unidos – FirstNet**

Estados Unidos ha basado su solución BB-PPDR en el despliegue de una red dedicada LTE. FirstNet es el nombre informal de la *Nationwide Public Safety Broadband Network*, la red de banda ancha PPDR de cobertura nacional concebida para que los distintos servicios

de emergencias de Estados Unidos (federales, estatales y locales) dispongan de una infraestructura compartida e interoperable entre todos ellos.

El origen de la nueva red se remonta a los ataques terroristas del 11 de septiembre de 2001 en Estados Unidos, que pusieron de manifiesto graves problemas en la infraestructura de las comunicaciones de emergencia, ya que los distintos servicios de seguridad y emergencias intervinientes no fueron capaces de comunicarse entre sí debido a que empleaban distintos equipos de radiocomunicaciones, y el servicio de telefonía móvil se congestionó rápidamente. Estas carencias se reflejaron en el Informe de la Comisión del 11-S (2004), que recomendó que el Congreso debería apoyar la legislación que proporcionase la asignación rápida y aumentada del espectro de radio para seguridad pública. [FIR2019].

En el año 2012 se creó la *First Responder Network Authority* (en adelante, Autoridad FirstNet), un organismo independiente dentro de la Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información (NTIA) del Departamento de Comercio de EE.UU., con la misión de establecer una red nacional interoperable de banda ancha de seguridad pública. Para ello cuenta con un espectro asignado de 10 + 10 MHz en la banda de 700 MHz y una asignación inicial del Congreso de 7 billones de dólares.

Desde su creación en 2012 la Autoridad FirstNet lleva a cabo un proceso de consultoría con las entidades de seguridad pública federales, estatales, tribales y locales, al objeto de garantizar que la red FirstNet sea diseñada, construida y personalizada para satisfacer sus necesidades en todo el país [FIR2019].

En 2016 la Autoridad FirstNet lanzó una Solicitud de Propuestas (RFP) al objeto de crear una asociación público-privada para la construcción y despliegue de la red FirstNet, tras un proceso previo de consulta y diálogo con las entidades de seguridad pública y la industria sobre los objetivos y el alcance de la RFP [FIR2019].

En 2017 se anunció la selección de la propuesta realizada por la operadora AT&T. Los términos generales del contrato son los siguientes [FIR2019]:

- La Autoridad FirstNet proporciona 10 + 10 MHz de propiedad federal y 6.5 billones de dólares en los primeros años para apoyar la construcción de la red.
- AT&T desplegará y operará una red de banda ancha de alta velocidad a nivel nacional para la seguridad pública durante 25 años.
- AT&T invertirá alrededor de 40 billones de dólares durante la vigencia del contrato para construir, implementar, operar y mantener la red.

- AT&T conectará a los usuarios de FirstNet con los activos de la red de telecomunicaciones de la compañía, valorados en más de 180 billones de dólares.
- AT&T puede usar el espectro de FirstNet para otros fines comerciales cuando las agencias de seguridad pública no lo están utilizando. La compañía dará prioridad a los usuarios de estas agencias sobre cualquier otro usuario comercial.
- AT&T ayudará, junto con la Autoridad FirstNet, a garantizar que la red evolucione con las necesidades de seguridad pública.
- Se estimulará la innovación y creará más de diez mil nuevos empleos en este sector.
- La Autoridad FirstNet supervisará el contrato para garantizar que AT&T cumpla con sus compromisos.

Tras formalizar su contrato de asociación público-privada con AT&T, la Autoridad FirstNet emitió un Plan Estatal digital personalizado para cada estado y territorio que describe cómo se desplegaría la red de acceso radio (RAN) de FirstNet. Los citados planes personalizados, desarrollados a partir del trabajo de consultoría descrito anteriormente, describen la cobertura, las características y las capacidades de misión crítica que la red FirstNet ofrece a las agencias de seguridad pública. Finalmente, cada estado y territorio de Estados Unidos, 56 en total, adoptó esos planes (2017-2018). El éxito de este proceso ha permitido que FirstNet se implemente más rápido y sea verdaderamente interoperable [FIR2019].

### **Reino Unido – ESN**

El Reino Unido ha decidido sustituir su red PPDR dedicada actual, basada en tecnología TETRA y operada por Airwave, por un servicio basado en el uso de las redes comerciales que no requiere de espectro dedicado. La decisión se tomó en época de austeridad, en la que el gobierno central planteó reducir su presupuesto un 30% en cinco años. En este contexto, se estimó que la red operada por Airwave era demasiado cara y demasiado limitada en funcionalidad. Además, el contrato con Airwave sólo permitía incrementos en las anualidades, sin posibilidad de revisiones a la baja. Por estos motivos, el gobierno se planteó cuatro opciones:

1. No hacer nada.
2. Usar las redes nacionales LTE de los operadores comerciales con mejoras específicas en cuanto a cobertura y resiliencia.
3. Adoptar un modelo híbrido TETRA / LTE dedicado.
4. Construir una red LTE dedicada, diseñada a medida.



Basándose en un análisis coste-beneficio, el Home Office eligió la opción 2 (uso de redes LTE comerciales). El proyecto para sustituir Airwave se denomina *Emergency Services Mobile Communications Programme* (ESMCP) y está basado en la migración a una nueva solución denominada *Emergency Services Network* (ESN), que proporcionará comunicaciones de misión crítica y otras no críticas para 107 servicios de emergencias (policías, bomberos y servicios sanitarios) de Inglaterra, Escocia y Gales, y otras 363 organizaciones relacionadas. En relación con los usuarios PPDR, la solución ESN debe ofrecer una funcionalidad equivalente a la que ofrece actualmente Airwave, con una resiliencia igual o mayor, pero a un coste mucho menor. Además, debe ser compatible con los equipos terminales comerciales.

En 2015 el Home Office adjudicó los contratos principales del proyecto, destacando el contrato de servicios móviles firmado con el operador EE, que proporcionará acceso prioritario a su red móvil actual e incrementará su cobertura, y el contrato de servicios de usuario firmado con Motorola Solutions, que proporcionará los sistemas necesarios para asegurar que ESN satisface las necesidades de los servicios de emergencias.

Inicialmente el proyecto ESMCP preveía que los servicios de emergencias empezarían a usar ESN en septiembre de 2017, contemplando un periodo de transición hasta diciembre 2019 durante el cual la red TETRA de Airwave debía seguir funcionando. Sin embargo, en 2017 el Home Office comprendió que no podía suministrar ESN conforme al proyecto inicial y en 2018 acordó la revisión integral del proyecto y el reinicio de la estrategia, al objeto de reducir sus principales riesgos. La situación actual es la siguiente [NAO2019]:

- Se ha ampliado el contrato con Airwave durante tres años más hasta diciembre 2022, con opción de ampliar más el plazo si fuera necesario.
- Se ha cambiado el enfoque del proyecto, que ahora está basado en una introducción gradual de los servicios ESN, de modo que los usuarios pueden elegir entre un servicio limitado desde finales de 2019 o el sistema ESN completo desde 2021.
- Se ha decidido reforzar la gestión del proyecto, así como renegociar los contratos.
- La última estimación de costes de implementación de ESN asciende a 9,3 billones de libras en el periodo 2015-2037, lo que supone un aumento de 3,1 billones de libras (49%) respecto a la previsión inicial de 2015. No obstante, se espera que ESN sea más económico que Airwave a largo plazo: la opción de continuar usando Airwave supone un coste de 12 billones de libras en el citado período.
- Principales riesgos tecnológicos:

- La tecnología clave para ESN todavía no se ha probado en condiciones reales y existe el riesgo de que algunas partes del sistema no estarán disponibles a tiempo, por ejemplo, la comunicación tierra-aire ó la comunicación directa entre terminales.
  - La decisión del Home Office de cambiar el producto MCPTT inicialmente ofertado por Motorola no garantiza que esta funcionalidad crítica estará disponible en la fecha prevista, ya que el nuevo sistema requiere de su desarrollo y pruebas y no cumplirá con los requisitos de los usuarios hasta principios de 2020, como muy pronto.
  - Se deben asegurar la integración técnica y las pruebas de los diferentes elementos tecnológicos que componen ESN, de modo que funcionen como un único sistema.
- Los servicios de emergencias han manifestado su incertidumbre sobre los nuevos plazos y los costes que deberán asumir para usar ESN. Por ello se plantea conseguir el compromiso y la satisfacción de los usuarios como factor clave para lograr el éxito en la implementación de ESN, que no sustituirá a Airwave hasta que sea tan buena como ésta en todos los aspectos (cobertura, resiliencia, capacidad para cumplir sus necesidades operacionales, etc.).
  - Todavía no se ha decidido quién será el responsable de gestionar ESN una vez que se haya completado su entrega y sea un servicio totalmente operativo.

### ***Bélgica – ASTRID***

ASTRID, el operador belga de la red nacional de emergencia basada en tecnología TETRA que recibe el mismo nombre, se ha constituido en MVNO para ofrecer servicios 3G/4G a sus usuarios PPDR usando las redes comerciales.

La red TETRA se implantó entre los años 2000 y 2003, en los que se desplegaron 500 estaciones base y 11 salas de control CAD para soportar la actividad de 40.000 usuarios.

Cuando la tecnología TEDS estuvo disponible en el mercado en 2008-9, los gestores de ASTRID estuvieron considerando la actualización de la red, pero la descartaron ya que resultaba muy cara (en torno al 40-45% del coste de la red TETRA original) para proporcionar un pequeño aumento en la velocidad de los datos. De modo que empezaron a pensar en otras formas de desplegar banda ancha. Desde el principio estuvieron interesados en trabajar con los operadores móviles de Bélgica debido a que el coste de construir una nueva red PPDR dedicada habría resultado prohibitivo. Y, lo más importante,

las redes comerciales tienen una mejor cobertura geográfica y una mayor penetración en interiores. Además, el uso real de la banda ancha en Bélgica por los servicios de emergencia era muy pequeño, a pesar de su interés en tener esa capacidad. De modo que ASTRID tuvo que encontrar una solución que requiriera una mínima inversión en equipamiento.

La solución que plantearon está basada en la suscripción de un acuerdo de *roaming* con todas las redes comerciales existentes, a las cuales pueden acceder los usuarios de ASTRID mediante tarjetas SIM 3G/4G especiales, y con mayor prioridad que los abonados públicos. Las tarjetas SIM son válidas para todos los operadores y también proporcionan *roaming* internacional, ya que los derechos de *roaming* se extienden a los países vecinos. Es decir, ASTRID ofrece servicios 3G/4G a sus usuarios PPDR como MVNO utilizando la capacidad de acceso de las tres redes comerciales de Bélgica y de once redes de los cuatro países vecinos (Holanda, Alemania, Luxemburgo y Francia).

Mediante este proyecto, denominado *Blue Light Mobile*, el MVNO actúa como un interfaz de gestión único entre los abonados a ASTRID y los operadores comerciales. Por tanto, se ha creado una red virtual de banda ancha de misión crítica usando la gestión de identidad y encriptación de ASTRID sobre redes comerciales.

Lecciones aprendidas del proyecto *Blue Light Mobile*:

- ASTRID demostró que es posible confiar en los operadores comerciales para prestar un servicio fiable y resiliente.
- Es posible encontrar soluciones que requieren una inversión mínima usando la capacidad de los operadores comerciales.
- La suposición de que las redes PPDR tienen mejor cobertura que las redes comerciales no siempre es cierta, especialmente si se tiene acceso a todas las redes comerciales, ya que esto proporciona mejor cobertura que cualquier red aislada. Los terminales *Blue Light* cambian automáticamente a otra red si la intensidad de la señal local cae a nivel inaceptables.
- La unificación del acceso y el soporte *help-desk* son útiles para los servicios de emergencias, al igual que para los servicios comerciales, y puede retener a ciertos usuarios que podrían haber intentado contratar sus propios servicios con operadores individuales.
- Este proyecto es una solución temporal (5-10 años) al problema de proporcionar soluciones BB-PPDR a los servicios de emergencias.

En 2018 el operador ASTRID hizo públicos sus planes respecto a este último punto, que se resumen a continuación [AST2019, TCC2019b]:

- El futuro PPDR es LTE, que sustituirá a la tecnología TETRA para proporcionar servicios de banda ancha.
- La opción de construir una red nacional LTE dedicada para PPDR es demasiado costosa para Bélgica. En su lugar, se hace necesario colaborar con MNOs que ya han desplegado LTE a nivel nacional.
- Será necesario firmar acuerdos de nivel de servicio (SLAs) estrictos con los distintos MNOs para asegurar las mismas prestaciones que ofrece la red TETRA actual, en cuanto a cobertura, seguridad, priorización y disponibilidad de red.
- Será necesario tener cobertura en zonas que no son atractivas para los MNOs pero sí son necesarias por razones de seguridad pública, por lo que deberán desplegarse emplazamientos adicionales.
- En cuanto a la priorización y disponibilidad de red, han sido objeto de un real decreto publicado en agosto 2018.

### **Finlandia – VIRVE 2.0**

El operador State Security Networks Group Finland (Erillisverkot), que opera la red TETRA nacional de emergencias VIRVE [ERI2018], fue nombrado en 2018 como operador del futuro servicio de banda ancha móvil de misión crítica para la comunidad PPDR finlandesa denominado VIRVE 2.0 [ERI2019], basado en estándares 3GPP y en servicios móviles comerciales que serán seleccionados mediante un proceso de licitación.

Finlandia anunció por primera vez sus planes BB-PPDR en 2014 mediante la publicación de un artículo [VIN2014] en el que se establece un método de 5 pasos para adoptar la banda ancha, a través de una red híbrida parcialmente dedicada y parcialmente comercial LTE que estaría disponible en 2030. Seguidamente se resume el citado método.

- El primer paso es proporcionar acceso de banda ancha sólo para datos mediante un modelo MVNO, contratándose la capacidad de acceso a través de las redes comerciales del país. Se consigue extendiendo el sistema de gestión de servicios y abonados para que soporte la provisión de abonados en las redes de banda ancha.
- El segundo paso consiste en disponer de un sistema propio de control de abonados en la red troncal LTE. La voz y los mensajes críticos siguen cursándose por la red TETRA,

y los datos no críticos (pero seguros) de alta velocidad se cursan por la red comercial de banda ancha.

- El tercer paso es expandir la red troncal LTE propia e instalar RAN LTE dedicada en determinadas ubicaciones, proporcionando servicios de datos críticos BB-PPDR. Este despliegue requiere el uso de espectro dedicado (banda de 700 MHz) y tiene lugar sólo en aquellas zonas donde resulte viable (principales áreas urbanas y vías de comunicación). Además, se lleva a cabo de modo flexible, ya que su alcance depende de la financiación disponible.
- El cuarto paso consiste en conectar las redes TETRA y LTE, para lo que se requiere disponer tanto de equipamiento LTE con funcionalidad de voz crítica (a partir del 2020) como de equipamiento TETRA con soporte de llamada de grupo sobre LTE. Entonces se dispone de los mismos servicios de voz crítica en banda estrecha y en banda ancha.
- El quinto y último paso es desmantelar la RAN TETRA una vez que el servicio LTE cumpla los requisitos de fiabilidad y la disponibilidad exigidos por los usuarios PPDR, previsiblemente a partir de 2030. En algunas zonas, la mayoría de ellas rurales, esto podría producirse cuando los repuestos TETRA queden fuera de servicio.

Este método representa un modelo sólido de transición hacia los futuros sistema BB-PPDR, que otros operadores pueden desarrollar adaptándolo a sus propias necesidades y plazos.

En 2016 el Ministerio de Transporte y Comunicaciones finlandés subastó todas las frecuencias móviles de 700MHz para su uso por los operadores móviles, sin que se asignara ninguna banda de frecuencia dedicada PPDR, a pesar de las peticiones de la comunidad PPDR en este sentido [ERI2019, NAL2019].

En 2018 el Ministerio de Finanzas finlandés, responsable de la dirección gubernamental de VIRVE, estableció que la migración al nuevo servicio BB-PPDR debería completarse a finales de 2025. Para alcanzar este objetivo, Erillisverkot creó el Departamento de Estrategia y Desarrollo de Tecnología Móvil encargado de administrar el programa de desarrollo y transición de TETRA a banda ancha móvil (LTE y tecnologías posteriores). Al igual que el futuro servicio, el programa también se denomina VIRVE 2.0 [ERI2019, NAL2019].

En 2018 Erillisverkot lanzó una fase preliminar del proyecto VIRVE 2.0 emitiendo una solicitud de información (RFI) a la industria para conocer de primera mano las posibles soluciones y evaluar los desafíos a los que se enfrenta el proyecto, que debe cumplir los siguientes objetivos nacionales de alto nivel establecidos previamente por el gobierno [ERI2019, NAL2019]:

- Debe proporcionar una banda ancha móvil segura, basada en 3GPP y de misión crítica, con una amplia cobertura geográfica, alta disponibilidad, funciones QPP (*Quality, Priority, Pre-emption*) [TCC2019b] y *roaming* nacional.
- El servicio debe tener un precio competitivo para que se convierta en la red elegida por los usuarios de PPDR.
- Erillisverkot es el operador del servicio, manejando los servicios de suscriptores y el desarrollo de aplicaciones utilizando estándares abiertos.
- Debe admitir servicios críticos y no críticos basados en diferentes necesidades de los usuarios, y eventualmente proporcionar servicios 3GPP MCPTT, MCVideo y MCData.
- La disponibilidad debe garantizarse mediante fuentes de alimentación mejoradas, enlaces de transmisión y elementos de red redundantes.
- La seguridad debe ser lo más importante durante y después del desarrollo para garantizar que los servicios y los datos estén protegidos y se evite el uso no autorizado.
- La interoperabilidad es el objetivo de todos los usuarios finlandeses PPDR, además el sistema debería permitirles trabajar con otros usuarios europeos de banda ancha móvil PPDR.
- El acceso debe estar disponible para cualquier terminal basado en 3GPP, mientras que Erillisverkot será responsable de implementar un ecosistema de terminales de alta seguridad.
- Se implementará una solución para facilitar la migración desde TETRA y se integrarán otros sistemas, como el sistema nacional de respuesta a emergencias ERICA.
- Se basará en estándares abiertos de 3GPP, y el requisito mínimo será la versión R15.
- El sistema se fortalecerá en términos de seguridad de suministro y preparación.

A principios de 2019 han entrado en vigor nuevas leyes finlandesas que permitirán llevar a cabo el proyecto VIRVE 2.0 [ERI2019, NAL2019]:

- Un proyecto de ley que exige que los proveedores de acceso por radio permitan el acceso prioritario sobre todas sus licencias de frecuencia y en todas sus tecnologías, incluida la 5G.
- Asimismo será obligatorio por ley para los operadores móviles que admitan la itinerancia nacional para los suscriptores de VIRVE 2.0. En la práctica, esto será válido para situaciones en las que el servicio de acceso de radio principal no esté disponible debido a un mal funcionamiento o falta de cobertura del servicio.

Estos cambios legislativos han permitido que comiencen los procesos de contratación de un servicio RAN para usuarios críticos y de la adquisición de una red troncal 4G / 5G. El objetivo es emitir una solicitud de propuestas (RFT) final después de las negociaciones, a principios del tercer trimestre de 2019, lo que llevará a una decisión al final de este año [NAL2019].

### **Europa – BroadNet**

Europa está a medio camino de un ambicioso proyecto para desplegar un sistema de comunicaciones de banda ancha móvil transfronterizo de seguridad pública, que sea interoperable en toda la Unión Europea y esté operativo en 2025.

El escenario actual en Europa es que existe una interoperabilidad mínima entre países (un factor limitante para la colaboración de respuesta paneuropea), tecnología antigua (solo voz y datos cortos, equivalente a 2G) y los sistemas están bloqueados por el proveedor.

El objetivo final del proyecto es mejorar la colaboración entre los agentes de diferentes organizaciones de seguridad pública en diferentes países, y facilitar la movilidad operativa de los agentes entre diferentes países, es decir, la capacidad para llevar a cabo sus operaciones donde sea que se encuentren en Europa, cuando lo necesiten y en colaboración con los agentes ubicados en y desde cualquier lugar de Europa.

El proyecto tiene tres etapas [BRO2019, LUN2019]:

1. **BroadMap** (2016–2017): ya finalizada, se planteó con el objetivo de recopilar y validar los requisitos existentes de las organizaciones PPDR europeas al objeto de establecer un conjunto básico de especificaciones técnicas y una hoja de ruta de la transición necesaria para lograr la evolución futura de las aplicaciones de banda ancha de la UE y las soluciones de comunicación por radio interoperables. Los documentos clave generados en esta etapa son:
  - Base de conocimiento de requisitos de usuarios finales PPDR, que fueron validados por 276 organizaciones de seguridad pública de 18 países europeos.
  - Especificaciones de alto nivel basadas en los citados requisitos y soluciones candidatas para la próxima generación de sistemas BB-PPDR, junto con los esquemas organizacionales asociados.
  - La solución para la interoperabilidad paneuropea está basada en la arquitectura de referencia SpiceNet, que contiene tres capas: la armonización, la interoperabilidad y gobernanza, y las redes y usuarios PPDR.

Esta información ayudó a la Comisión Europea a preparar la segunda etapa.

2. **BroadWay** (2019–2022): actualmente en marcha, incluye actividades de investigación y desarrollo (R&D) y compra pre-comercial (PCP), y se plantea con el objetivo desarrollar un piloto paneuropeo a través de los siguientes pasos:
  - Selección de proveedores y diseño de soluciones. En primer lugar, se consulta con los proveedores para comprender el estado de la capacidad de innovación disponible. A continuación, mediante un proceso de licitación pública se seleccionarán al menos 4 equipos de proveedores que ofrezcan las mejores soluciones. Por último, se invitará a cada proveedor seleccionado a desarrollar el diseño de la solución propuesta.
  - Desarrollo de prototipos: los tres equipos ganadores que desarrollen los mejores diseños serán invitados a implementar prototipos.
  - Sistema piloto: los proveedores de los dos mejores prototipos serán seleccionados e invitados a expandir sus prototipos para desarrollar el piloto paneuropeo, que será evaluado según los criterios definidos por el grupo de compradores.

El Foro de Public Safety Communication Europe (PSCE) actúa como coordinador de BroadWay, que tiene un presupuesto aproximado de 9 millones de euros y está financiado en un 90% por la Comisión Europea. En la actualidad, BroadWay abarca 11 compradores de 11 estados miembros europeos (incluyendo al Ministerio del Interior español) e involucra a 49 agencias PPDR.

3. **BroadNet**: la etapa final, incluye actividades de compra pública de soluciones innovadoras (PPI), y tiene como objetivo la puesta en marcha y el funcionamiento de las soluciones seleccionadas en la etapa anterior.

### **3.3 Conclusiones**

Una vez realizadas las consideraciones descritas en el apartado anterior, podemos destacar lo siguiente:

1. La CMR-15 modificó la Resolución 646 sobre PPDR adoptada en la CMR-12 y establece una armonización global en un rango que cubre las bandas de 700 MHz y 800 MHz, manteniendo en Europa la banda actual de 380-470 MHz.



2. En Europa se están dando los pasos encaminados a crear un marco armonizado europeo que permita un despliegue eficiente de los futuros sistemas europeos BB-PPDR bajo el concepto de “armonización flexible”, que incluye tres elementos principales: un estándar técnico común, elección nacional del modelo de implementación más adecuado y flexibilidad nacional para decir cuánto espectro debería destinarse para PPDR dentro del rango de frecuencias armonizado, de acuerdo con las necesidades nacionales.
3. España ya ha introducido una reserva en el CNAF, en la UN-31, de 2x5 MHz en la Banda 450 a 470 MHz para los futuros sistemas BB-PPDR.
4. El modelo actual de comunicaciones PPDR, basado en tecnologías dedicadas, explotadas en redes dedicadas y haciendo uso de espectro radioeléctrico dedicado, no es el más adecuado para la provisión de los futuros sistemas BB-PPDR, requiriéndose de nuevas aproximaciones sustentadas en los siguientes principios:
  - a. Explotación de tecnologías de banda ancha móvil comercial.
  - b. Nuevas estrategias de despliegue de infraestructuras de red.
  - c. Incorporación de principios de compartición de espectro.
5. La comunidad de usuarios PPDR ha llegado a la conclusión de que, desde el punto de vista técnico, el ecosistema global LTE es la solución tecnológica más adecuada para los futuros sistemas BB-PPDR. Para que la tecnología LTE pueda soportar las funcionalidades específicas PPDR es fundamental el trabajo que se viene desarrollando en los últimos años en el 3GPP, el ETSI y otras organizaciones internacionales, con un amplio apoyo del sector PPDR. Está previsto que pasen varios años antes de que las funcionalidades que la comunidad PPDR ha identificado como básicas hayan sido especificadas, implementadas, comprobadas e integradas en soluciones LTE por la mayoría de fabricantes de infraestructura y terminales (a partir del año 2020).
6. Considerando las posibilidades que ofrecen las redes móviles públicas, se contemplan tres opciones para el despliegue de redes que proporcionen servicios BB-PPDR:
  - a. Infraestructura de red dedicada.
  - b. Infraestructura de red comercial.
  - c. Soluciones híbridas.

En base a las consideraciones anteriores, se concluye lo siguiente:

1. LTE (y su evolución) es la solución tecnológica más adecuada para satisfacer las futuras necesidades de comunicación de banda ancha de los usuarios de la Red RADIECARM.
2. La red TETRA actual deberá mantenerse en funcionamiento el tiempo necesario para llevar a cabo tanto el despliegue del futuro sistema BB-PPDR, como la migración TETRA – BB-PPDR (al menos hasta el año 2025).
3. El modelo a seguir para el despliegue del sistema BB-PPDR que cubra las futuras necesidades de comunicación de los usuarios de la Red RADIECARM depende de varios factores, como son:
  - a. El marco regulatorio europeo y español en la materia.
  - b. El espectro asignado: ya se dispone de 2x5 MHz en la Banda de 380-400 MHz para TETRA y de 2x5 MHz en la Banda 450-470 MHz para BB-PPDR.
  - c. La elección, por parte del Estado español, del modelo de implementación más adecuado (por ahora, no se ha pronunciado al respecto).
  - d. El presupuesto disponible para el proyecto.
  - e. Los resultados de las primeras iniciativas de despliegue que ya están marcha en algunos países y en Europa.
4. En cualquier caso, antes de acometer un proyecto de estas características, hay varios prerequisites que deberían cumplirse, como son [VIN2014]:
  - a. La efectiva disposición en el mercado de soluciones LTE que cumplan las funcionalidades BB-PPDR exigidas (previsiblemente a partir del año 2020).
  - b. Si se elige un modelo que exija espectro dedicado: la efectiva disposición del espectro necesario.
  - c. Si se elige un modelo que exija el uso de redes comerciales: se debería asegurar que estas redes van a ofrecer las prestaciones requeridas por las autoridades en cuanto a cobertura, disponibilidad, seguridad, interoperabilidad, acceso prioritario, calidad de servicio, soporte de funcionalidades BB-PPDR, etc. En este sentido, la forma más sencilla y efectiva sería la inclusión de estos requisitos BB-PPDR en la licencia de uso de frecuencias del operador comercial.

## **4. Selección y planificación de la solución de red prevista para la evolución de la red RADIECARM**

### **4.1 Introducción**

El objeto de este capítulo es seleccionar y planificar la solución de red más apropiada para satisfacer las futuras necesidades de comunicación de los usuarios de la Red RADIECARM. La planificación incluye la arquitectura de red y un estudio de cobertura radioeléctrica.

Parte de los trabajos realizados presentados en este capítulo han dado lugar a la publicación [REY2019].

### **4.2 Selección de la solución de red**

Para el despliegue de la futura Red RADIECARM se ha seleccionado una solución híbrida basada en la tecnología LTE, en base a las siguientes consideraciones:

- a) Las conclusiones obtenidas en el capítulo 3 de la presente tesis.
- b) Las hipótesis de trabajo sobre la evolución prevista de las redes PPDR en Europa y en España en los próximos años, que se describen a continuación.

Como hipótesis de trabajo sobre la evolución prevista de las redes PPDR en Europa se ha adoptado la hoja de ruta de transición hacia las comunicaciones BB-PPDR desarrollada en el ECC Report 218 [ECC2015b], cuya visión actual de los hitos previstos en la evolución futura de las redes PPDR (hasta el año 2025) se describe en la Tabla 3.

**Tabla 3** Hitos en la evolución futura de las redes PPDR en Europa  
[ECC2015b]

Año	Hitos previstos
2017	<p>3GPP prevé crear una nueva clase de banda para LTE en 400 MHz.</p> <p>PTT disponible en las bandas de 400 MHz y 700 MHz.</p> <p>Algunos países pueden optar por la solución dedicada o compartida.</p>
2018- 2020	<p>3GPP Release 14 aprobada.</p> <p>Despliegue de las primeras redes comerciales LTE en la banda de 700 MHz.</p> <p>Equipamientos de terminales combinados LTE/TETRA disponibles comercialmente.</p> <p>Primeras implementaciones de soluciones híbridas basadas en redes LTE comerciales en la banda de 700 MHz.</p> <p>Posibles primeras implementaciones de redes dedicadas LTE PPDR en la banda de 400 MHz.</p> <p>Los procedimientos de operaciones PPDR son ajustados gradualmente para incluir las comunicaciones de banda ancha.</p> <p>Primera prueba de interoperabilidad y roaming entre redes BB-PPDR LTE, conforme al concepto de armonización en la banda de 700 MHz.</p>
2020- 2025	<p>Equipamiento LTE - Release 14 con total funcionalidad PPDR disponible comercialmente.</p> <p>Se introducen las primeras comunicaciones de banda ancha de misión crítica.</p> <p>Integración de voz (no misión crítica) y datos en redes LTE.</p>
A partir de 2025	<p>Voz y datos de misión crítica son proporcionados vía redes LTE basadas en soluciones comerciales, híbridas ó dedicadas, sujeto a decisiones nacionales.</p> <p>Se realizan ensayos de DMO.</p> <p>Las redes TETRA/Tetrapol son eliminadas gradualmente.</p>

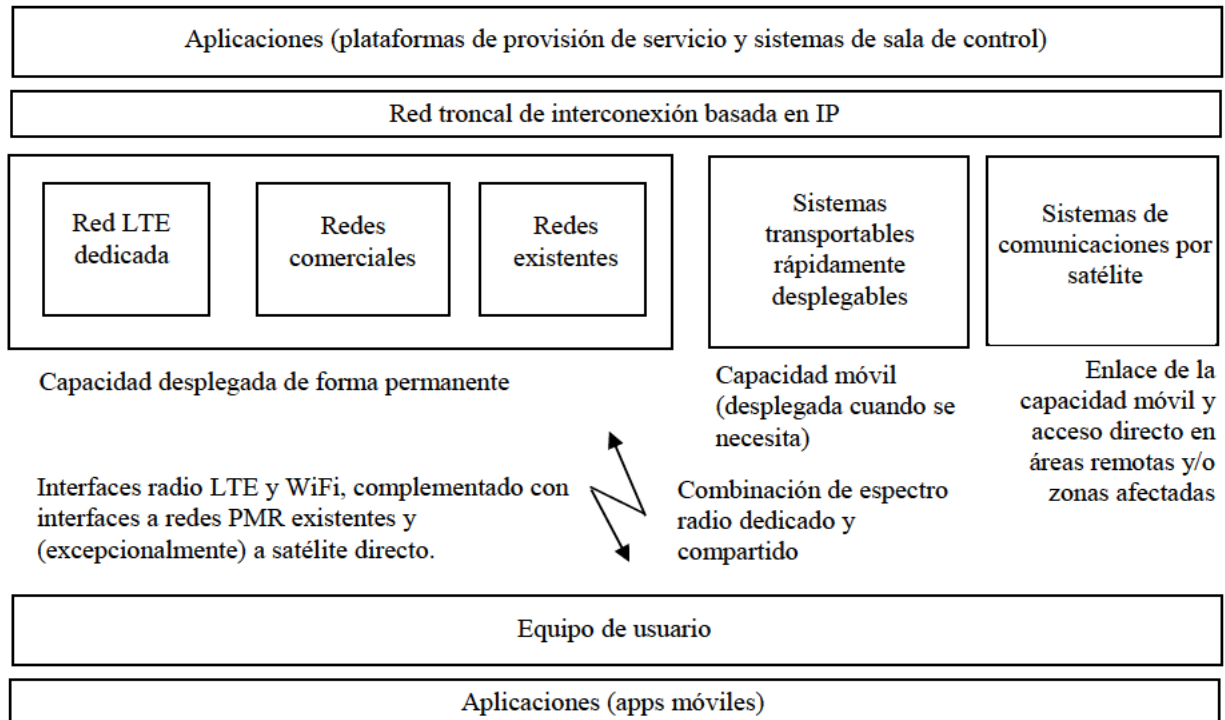
En España, la evolución de las redes PPDR todavía está por definir, ya que, por ahora, el Estado no se ha pronunciado sobre el modelo de implementación (dedicado, comercial ó híbrido) para nuestro país. Respecto a la cantidad de espectro y las bandas de frecuencias que van a asignarse para PPDR dentro del rango de frecuencias armonizado, únicamente cabe reseñar que se introdujo una reserva en el CNAF [SEA2017] de 2x5 MHz en la Banda 450 a 470 MHz para los futuros sistemas BB-PPDR (UN-31).

De acuerdo con un artículo publicado en una revista especializada [BER2016], en el mes de diciembre de 2015 el Ministerio del Interior, por medio de la Secretaría de Estado de Seguridad, firmó la renovación, por otros cuatro años, del contrato de suministro y servicios de la red de SIRDEE con la empresa *Airbus Defence and Space* (antes EADS). Según se indica en el citado artículo, el contrato firmado recoge la renovación total de la planta de conmutación y radio, pasando de un sistema TETRAPOL sobre TDM a una tecnología TETRAPOL sobre IP. Esto supone el cambio de más de 1.500 estaciones base, 52 centros de conmutación y 119 centros de mando y control. Los terminales actuales van a ser sustituidos por equipos de última generación con nuevas funcionalidades y se contempla, en este nuevo contrato, la evolución de la red SIRDEE a banda ancha. Para ello se incorporarán servicios de datos en movilidad sobre redes comerciales y se desplegarán redes privadas LTE en dos ciudades.

Teniendo en cuenta lo anterior y la situación actual de las redes de emergencias en España [ARR2014], así como los proyectos e iniciativas BB-PPDR que se están acometiendo actualmente [SCF2014, FER2015], a efectos de la realización del presente trabajo se prevee que el Estado español adoptará en el futuro un modelo de implementación híbrido, concretamente la solución basada en un operador móvil virtual (MVNO), tal y como se describe en [FER2015].

### **4.3 Arquitectura de red**

De acuerdo con [FER2015], el modelo de implementación BB-PPDR híbrido está compuesto por los bloques de alto nivel que están representados en la Figura 1.



**Figura 1** Bloques de alto nivel de la solución BB-PPDR híbrida [FER2015] © 2015 John Wiley & Sons, Ltd.

Como muestra la Figura 1, el modelo de implementación híbrido incluye:

- Una WAN permanentemente desplegada, formada por una combinación de redes comerciales y privadas/dedicadas basadas en LTE, que complementa las redes PPDR de banda estrecha actuales.
- Infraestructura transportable rápidamente desplegable para proporcionar capacidad y/o cobertura extra en forma de LANs ad hoc o como una extensión de la infraestructura permanente.
- Acceso a satélite para soportar el despliegue de capacidad móvil así como acceso directo desde equipos de usuario PPDR en áreas remotas en las cuales no existe infraestructura disponible o no puede desplegarse de manera asequible.

En este modelo de implementación híbrido, se destacan los siguientes elementos esenciales:

- La interoperabilidad entre las distintas capas, de modo que los usuarios PPDR puedan acceder a sus servicios e interactuar con otros usuarios con independencia de la red a la que estén conectados.

- Las plataformas de provisión de servicios y las aplicaciones estandarizadas, que aprovecharán la división funcional establecida en las redes de próxima generación (NGNs) entre las capas de transporte y de servicio. Es decir, la red subyacente proporciona principalmente conectividad basada en IP, mientras que los servicios y aplicaciones se implementan por encima de esta conectividad IP. Esta separación funcional permite que las capas de servicios y de red sean suministradas y ofrecidas de forma separada y, de manera importante, que evolucionen de forma independiente.
- Las redes troncales de interconexión basadas en IP seguras y fiables para permitir la interconexión de las diferentes redes de acceso y los centros de control y datos.
- Las interfaces radio basadas en LTE y Wi-Fi, complementado con las tecnologías PMR existentes. Para equipos de usuario especiales, se prevén interfaces de satélite directas.
- Se requiere de ambos tipos de espectro: dedicado (es decir, asignado para uso exclusivo a PPDR) y compartido.

A continuación, se describe cada uno de los bloques de alto nivel que componen el modelo de implementación híbrido [FER2015].

#### Red LTE dedicada

El despliegue de infraestructura de red PPDR LTE dedicada permite cumplir los exigentes estándares requeridos por la comunidad PPDR en cuanto a calidad de cobertura, disponibilidad y resiliencia (mediante el uso generadores de *back-up*, duplicación de componentes y de equipamientos y enlaces de comunicaciones clave e instalación más robusta, de modo que la red dedicada sea capaz de resistir altos niveles de perturbación física), control de la red por parte de los usuarios y seguridad. Por razones de sostenibilidad económica, las redes LTE dedicadas serán probablemente compartidas por las distintas agencias PPDR (policía, bomberos, sanitarios) y estarán abiertas a otras organizaciones de usuarios de comunicaciones críticas (empresas de servicio público, transporte, etc.).

#### Redes LTE comerciales

El uso de redes comerciales para la provisión de BB-PPDR se considera que es un enfoque complementario (más que excluyente) al despliegue de infraestructuras dedicadas, como mínimo en el corto y medio plazo. De hecho, las redes móviles públicas están siendo usadas hoy en día por algunos usuarios profesionales, incluyendo agencias PPDR, para

aplicaciones de datos que no son de misión crítica. Las redes públicas pueden gestionar la mayor parte del tráfico PPDR rutinario, siempre que funcionen bajo condiciones normales.

Además, aún cuando se puedan desplegar redes LTE dedicadas, la naturaleza impredecible del tiempo, lugar y escala de un incidente hace virtualmente imposible asegurar que los servicios de emergencias tendrán el soporte adecuado sólo de las infraestructuras dedicadas durante la emergencia (p. ej. debido a la falta de cobertura o capacidad o a una infraestructura dañada). En este contexto, la consideración de redes móviles públicas como un componente integral para la provisión de servicios PPDR producirá varias ventajas, incluyendo la capacidad agregada, la mejora de la resiliencia y de la cobertura radio. No obstante, es un hecho que en las emergencias las redes públicas celulares son propensas a sufrir de congestión y pueden fallar más fácilmente que las redes PMR usadas hoy en día para voz de misión crítica.

En cualquier caso, como las redes de banda ancha comerciales se están convirtiendo en parte importante de la infraestructura de la sociedad, existe también un consenso creciente en que estas infraestructuras tienen indudablemente un papel que jugar en muchas soluciones de comunicaciones críticas y pueden posibilitar que los usuarios experimenten los beneficios de las herramientas multimedia en las operaciones PPDR a corto plazo. Por tanto, el uso de las redes móviles públicas de banda ancha se prevé que será un pilar básico para la provisión de servicios emergentes PPDR multimedia / intensivo en datos, pero el nivel de dependencia sobre las redes dedicadas y/o redes comerciales y su uso pueden ser muy diversos según países y regiones.

Desde la perspectiva del operador de red, este enfoque permite diferentes oportunidades de negocio para proporcionar diferentes grados de servicio para el segmento de seguridad pública.

#### *Red PMR existente*

La introducción de LTE para PPDR debe complementar, no sustituir, a las redes existentes (p. ej. PMR TETRA/TETRAPOL), que continuarán siendo la mejor elección para el servicio de voz de misión crítica a corto plazo. Esto se debe a que las funcionalidades clave para la voz de misión crítica tales como las comunicaciones de grupo y el modo directo todavía están siendo introducidas en el estándar LTE y pasarán varios años antes de que estas características estén totalmente desarrolladas y probadas para cumplir los exigentes requisitos PPDR.

Además, los usuarios PPDR no pueden abandonar sus sistemas PMR actuales hasta que una nueva red de banda ancha móvil se construya y sea capaz de proporcionar una



cobertura igual o mejor que la cobertura actualmente proporcionada por los sistemas PMR. Por tanto, antes de que cualquier solución de banda ancha pueda sustituir a los sistemas PMR actuales, la red LTE y sus aplicaciones asociadas deben ser capaces de cumplir todos los requisitos actualmente satisfechos por los sistemas existentes (funcionalidades y cobertura).

En este contexto, la provisión de voz de misión crítica sobre banda ancha puede establecerse como un objetivo a largo plazo, sin obstaculizar ni retrasar las ventajas a corto plazo asociadas al despliegue de una solución móvil de banda ancha inicialmente concebida para la provisión de aplicaciones basadas en datos.

Por tanto, la comunidad de seguridad pública debería crear caminos paralelos para conseguir ambos objetivos a largo plazo y a corto plazo, tal y como sostienen organizaciones relevantes como APCO y TCCA. En este contexto, los servicios de interfuncionamiento con los sistemas existentes y la adopción de equipamiento de usuario multimodo PMR/LTE son fundamentales para los usuarios PPDR.

### Sistemas transportables

Los sistemas transportables permiten a los servicios PPDR llevar la red con ellos en aquellos eventos que ocurran en áreas donde no tiene sentido tener un emplazamiento (p. ej. zonas remotas inhabitadas). De modo que, en lugar de una infraestructura permanente, se despliega una burbuja de cobertura donde y cuando se necesita. El uso de los sistemas transportables se prevé que será fundamental para la restauración de red, la extensión de red y la respuesta a incidentes remotos. Su uso no está limitado a los operadores de red PPDR. Los operadores móviles públicos también pueden contribuir a las operaciones de gestión de desastres mediante estaciones base transportables.

Existen diferentes tipos de sistemas transportables, que son normalmente clasificados bajo las categorías de celda sobre ruedas (COWs) y sistema sobre ruedas (SOWs). Por un lado, las COWs normalmente incluyen una estación base (p. ej. eNodeB LTE) junto con uno o más sistemas de enlaces (tales como microondas ó satélite). Las COWs requieren conectividad a una red troncal (p. ej. red troncal LTE) para soportar la funcionalidad de aplicación. Por otro lado, los SOWs son sistemas totalmente funcionales que pueden actuar sin conectividad de enlaces, aunque éstos son sistemas probablemente más caros que las COWs. Como un método general, el uso de COWs podría tener sentido en entornos urbanos y densos donde la conectividad a la red está garantizada, mientras que los SOWs son más apropiados en entornos rurales y en zonas de desastre, donde la conectividad de los enlaces de banda ancha es un problema. Los sistemas desplegados pueden

también aprovechar la capacidad de ambas tecnologías Wi-Fi y LTE para soportar enfoques híbridos (p.ej. sistema transportable que usa la interfaz Wi-Fi para crear un *hot spot* para acceso local por los equipos de usuario PPDR y que emplea LTE para proporcionar la conectividad remota).

### Sistemas de comunicaciones por satélite

Junto con los sistemas desplegados, las comunicaciones por satélite proporcionan un método único e importante para planificar los riesgos de las infraestructuras terrestres que pueden ser susceptibles a todo tipo de catástrofes naturales y antrópicas. Esto convierte a las plataformas de comunicaciones por satélite en componentes importantes dentro del conjunto de herramientas de comunicaciones PPDR. El servicio por satélite puede ofrecerse en zonas donde no hay infraestructura terrestre y los costes de despliegue de una red de fibra o microondas son prohibitivos. También puede soportar servicios en zonas donde la infraestructura existente está desfasada, es insuficiente o está dañada. En particular:

- Las soluciones VSAT (*very small aperture terminal*) pueden utilizarse para proporcionar la conectividad de enlaces para las soluciones desplegadas (p. ej. conectividad de enlaces para COWs). Un terminal VSAT normal puede tener conectividad bidireccional competa hasta varios Mbps para cualquier combinación deseada de funcionalidad de voz, datos, video y servicio de Internet.
- Las soluciones COTM (*communications on-the-move*) también son importantes para PPDR, haciendo posible aplicaciones tales como mando y control móvil, donde un vehículo puede servir como un puesto de mando móvil mientras que está en ruta y como un punto de acceso de mando fijo para el personal una vez que llega a la ubicación designada cuando las infraestructuras locales terrestres y móviles no están disponibles.
- Las soluciones MSS (*mobile satellite service*) pueden ponerse en funcionamiento para PPDR, permitiendo el uso de teléfonos y terminales portátiles por satélite. Los terminales MSS puede ser montados en un barco, una aeronave, un camión o un automóvil. Los terminales MSS pueden incluso ser llevados por una persona. Las aplicaciones más prometedoras son los teléfonos y terminales de banda ancha portátiles por satélite que permiten un servicio global. Además, las soluciones que integran tecnologías de satélite y celulares son atractivas para uso PPDR.

### Redes troncales de interconexión basadas en IP

La interconexión de los múltiples y diversos componentes (p. ej. emplazamientos radio, centros de datos que alojan redes troncales móviles y plataforma de provisión de servicio, desplegables PPDR, centros de control de emergencias y PSAPs, interconexión de redes PPDR regionales / nacionales, etc.) aboga por el uso de soluciones de interconexión basadas en IP. Las redes troncales IP formadas por fibra, cobre, microondas, satélite y otros enlaces desplegados en una topología redundante son componentes centrales. La infraestructura de interconexión puede ser totalmente o parcialmente propiedad de las agencias de gobierno, así como apoyarse en el uso de servicios de interconexión proporcionados por operadores privados. Los entornos de trabajo de interconexión tales como IPX (*IP Packet Exchange*) promovido por GSMA están obteniendo un fuerte consenso en la industria comercial y son ciertamente una posible solución a ser considerada para la interconexión de redes PPDR regionales/nacionales al objeto de permitir el *roaming*/migración y servicios de comunicaciones y aplicaciones asociadas interoperables dentro de un marco de trabajo seguro.

### Aplicaciones y equipos de usuario

La introducción de los teléfonos inteligentes y otro tipo de dispositivos con altas capacidades computacionales y la adopción de estándares comunes está preparando el terreno hacia un rico ecosistema de aplicaciones PPDR interoperables. Hasta hoy, la personalización de aplicaciones y servicios dentro del modelo de negocio de la industria PMR está basada principalmente en interfaces propietarias. Por tanto, muchas de las aplicaciones están limitadas, utilizan *hardware* caro y podrían crear al usuario dependencia de un único fabricante. Por el contrario, en el dominio comercial, la proliferación de dispositivos gestionados por *software* junto con periféricos intercambiables ha dado a los consumidores y a las empresas la capacidad de personalizar cómo reciben información de los medios y cómo se comunican con otros y de configurar sus hogares, oficinas y automóviles. La mayoría de dispositivos y aplicaciones son interoperables debido a tecnologías basadas en estándares abiertos tales como Bluetooth, USB, Wi-Fi y SDKs (*software development kits*) públicos. Estos estándares han expandido el mercado a miles de desarrolladores y han facilitado enormemente la proliferación de productos e información especializados.

Un esfuerzo fundamental hacia la estandarización de una arquitectura global de aplicación para la provisión de servicios de comunicaciones críticas encima de la conectividad IP está siendo llevado a cabo por ETSI, en estrecha cooperación con 3GPP. ETSI está especificando un modelo de referencia de un sistema de comunicaciones críticas (CCS,

*critical communications system*), definiendo los elementos funcionales junto con las interfaces y los puntos de referencia entre ellos. Un elemento central de la arquitectura CCS es la aplicación de comunicaciones críticas (CCA), que puede ser entendida como la plataforma de provisión de servicio que proporciona los servicios de comunicaciones (p. ej. servicios PTT de misión crítica) a los usuarios de comunicaciones críticas. La CCA incluye funcionalidades tanto en el terminal como en la infraestructura.

Haciendo factible el desarrollo de aplicaciones por tantos interesados como sea posible, de una forma segura y fiable, se fortalecerá el mercado de las comunicaciones de seguridad pública de la misma forma que el ecosistema de aplicaciones móviles de banda ancha ha fortalecido a los consumidores hoy en día. En esta materia, iniciativas tales como la *Application Community* (AppComm) promovida por APCO International puede ser fundamental para favorecer el desarrollo de un ecosistema de aplicaciones para la comunidad PPDR. AppComm proporciona una colección de aplicaciones relacionadas con la seguridad pública y la respuesta a emergencias para uso por el público en general y los servicios de emergencias. AppComm es también un foro donde los profesionales de seguridad pública, el público en general y los desarrolladores de apps pueden analizar y evaluar apps, identificar necesidades no cubiertas y aportar ideas sobre apps que les gustaría ver desarrolladas. Con esta iniciativa, APCO está decidida a jugar un papel de liderazgo en apoyo al desarrollo de un ecosistema de apps de seguridad pública diverso y dirigido por profesionales promovido mediante los esfuerzos colaborativos de los profesionales de seguridad pública y los desarrolladores de apps. Para fomentar aún más este tipo de ecosistemas de aplicaciones PPDR, también deben ser obligatorias las soluciones basadas en estándares abiertos para la descarga e instalación de aplicaciones clientes en los terminales (p. ej. similares a las populares tiendas online de aplicaciones en el dominio comercial), junto con otra configuración post-fabricación de los terminales mediante soluciones software de MDM (*mobile device management*), por ejemplo, los estándares OMA DM (*Open Mobile Alliance Device Management*), ampliamente adoptados en las redes comerciales. Otro elemento central del ecosistema de aplicaciones PPDR es el sistema operativo usado en los dispositivos de usuario. Un candidato convincente es la plataforma Android, que está siendo mejorada rápidamente (p. ej. soporte del módulo de seguridad kernel SELinux y del software de seguridad Knox de Samsung) y adoptado por usuarios estrictos en términos de seguridad tales como el FBI de Estados Unidos.

Otra área que merece ser considerada con más atención es la estandarización de los marcos de trabajo funcionales e interfaces para los sistemas de despacho de los centros de control en el contexto de las nuevas tecnologías móviles de banda ancha. En este contexto, los requisitos para las funcionalidades e interfaces de las consolas de mando y

control conectadas a una red LTE han sido desarrollados por el NPSTC. Estos sistemas de consola están principalmente ubicados en centros de control de emergencias (ECC) y puntos de respuesta de seguridad pública (PSAPs), aunque también pueden estar ubicados en otras instalaciones (p. ej. urgencias de los hospitales) así como ser usados en el área de una gran emergencia como un dispositivo de consola con o sin cableado. Los requisitos y mejores prácticas se desarrollan en el documento con el objetivo de describir las características y funcionalidades para operaciones de despacho basadas en consolas que involucran servicios de banda ancha. Están destinadas a capturar los requisitos operacionales de la funcionalidad del operador de despacho y consola con el objetivo de aprovechar totalmente las características y funcionalidad de la red LTE.

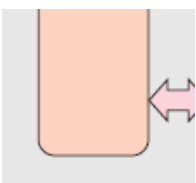
La disponibilidad comercial de dispositivos para uso de seguridad pública es de vital importancia. Deben estar disponibles dispositivos robustos fácilmente manejables, capaces de funcionar en ambientes adversos. También es importante tener los tipos de dispositivos apropiados para una misión particular. Se esperan diferentes niveles de robustez y seguridad, superando los niveles de los equipos de usuario de los abonados actuales, así como complementos específicos para PPDR (p. ej. prendas tecnológicas tales como gafas inteligentes y cascos inteligentes) y funcionalidades específicas PPDR (p. ej. manos libres con reconocimiento de voz, funcionalidad de botón de emergencia que proporciona servicios similares a los botones de emergencia en las radios PMR). A este respecto, un reto fundamental es la integración de muchos componentes diversos en el equipo adecuado de modo que puede servir mejor a las necesidades de los profesionales PPDR. Además, los dispositivos deben soportar las frecuencias requeridas, que pueden variar. Las aplicaciones de dispositivo deben ser fáciles de usar y soportar los requisitos típicos de una misión de seguridad pública, tales como el cambio dinámico de prioridad dependiendo de la situación y la capacidad para adaptarse fácilmente a un menor ancho de banda para asegurar que los servicios están disponibles en condiciones radio difíciles. Además de la interoperabilidad y la certificación, un reto importante para los fabricantes de dispositivos es proporcionar terminales de modo dual que soporten redes PPDR de BB-LTE y de NB-PMR.

Considerando que la Red RADIECARM seguirá el modelo de implementación híbrido, concretamente la solución basada en un operador móvil virtual (MVNO), se ha adoptado la arquitectura de red propuesta en el proyecto europeo HELP [BAL2012, FER2013, FER2015].

En la Figura 2, se representa la arquitectura de red correspondiente a la WAN permanentemente desplegada de la solución BB-PPDR híbrida (ver diagrama de bloques

de alto nivel descrito anteriormente), con los elementos de red e interfaces clave que se describen a continuación. La solución propuesta permite a los usuarios PPDR tener un estricto control sobre las siguientes capacidades:

- Permitir el acceso a los servicios PPDR a través de las redes móviles LTE públicas y privadas de forma segura e interoperable.
- Asegurar una asignación adecuada de la capacidad de la red a los usuarios PPDR de acuerdo con las políticas de priorización establecidas.



**Figura 2** Arquitectura de red PPDR

[FER2013] © 2013 IEEE

La arquitectura del sistema definida en el proyecto HELP considera una infraestructura troncal de operador PPDR que consta de funciones IMS (*IP Multimedia Subsystem*), servidores de aplicación y un conjunto dado de componentes de la red troncal 3GPP (HSS: *Home Subscriber Server*, PCRF: *Policy and Charging Rules Function* y P-GW: *PDN Gateway*), todos ellos interconectados por medio de una red IP privada.

Esta infraestructura troncal del operador PPDR se usa para proporcionar servicios PPDR a los usuarios desplegados en el terreno equipados con terminales PPDR compatibles con LTE, a través de varias redes LTE comerciales/dedicada, interconectadas con la infraestructura troncal del operador PPDR mediante interfaces estandarizadas 3GPP.

El acceso a una red LTE depende de la suscripción a un operador. Una suscripción proporciona al usuario, entre otros, una identidad de abonado (IMSI) y las credenciales de seguridad (claves secretas) requeridas a efectos de autenticación y autorización dentro de los procedimientos de control de acceso a la red. En el lado del terminal, esta información de suscripción se almacena en la tarjeta USIM (*Universal Subscriber Identity Module*). En el lado de la red, esta información junto con otros datos relacionados con la suscripción tales como los perfiles de servicio (p. ej. la configuración QoS por defecto), se gestiona de forma centralizada dentro de la base de datos HSS del operador. Mantener el control sobre tal información de suscripción es esencial para los gestores PPDR tácticos y operacionales, ya que permite a los usuarios PPDR gestionar completamente el proceso de aprovisionamiento de usuarios y establecer las capacidades de abonados requeridas. Por tanto, la solución propuesta considera que los usuarios PPDR desplegarán su propio HSS como parte de la infraestructura troncal y emitirán y controlarán sus propias tarjetas USIM. Esto último evita que los usuarios PPDR terminen con varias suscripciones distintas con diferentes operadores comerciales (es decir, manejando múltiples USIMs y usando terminales con soporte multi-SIM) y proporciona independencia de los operadores comerciales mediante la capacidad de conmutar entre ellos o soportar varios de ellos sin cambiar las tarjetas USIMs de los usuarios PPDR. La implementación de esta solución requiere alcanzar acuerdos de *roaming* entre el operador PPDR y los distintos operadores móviles comerciales (MNOs) y el despliegue de las interfaces de señalización asociadas para soportar el servicio de *roaming* entre la infraestructura troncal PPDR y las redes móviles públicas LTE. El control y administración de los datos de abonados PPDR será realizada a través de Aplicaciones de Gestión de Usuarios específicas integradas dentro de los CRS (*Control Room Systems*), que se describen posteriormente.

Dentro de la infraestructura troncal PPDR se incluye el P-GW, que proporciona un acceso seguro a esta infraestructura crítica y que permite al operador PPDR gestionar de forma totalmente autónoma el servicio de conectividad IP (p. ej. asignación de APN –*Access Point Name*– privada y dirección IP). Además, se facilita la movilidad entre las distintas redes (comerciales y dedicadas) sin interrupción del servicio ya que el P-GW sirve como un punto de anclaje de movilidad para todo el tráfico PPDR. Encima del servicio de conectividad IP, podrían utilizarse soluciones VPN (*Virtual Private Network*) móviles comerciales ó

personalizadas a PPDR, para añadir una capa de seguridad adicional entre los terminales y la infraestructura troncal PPDR.

Habilitada la conectividad IP mediante el P-GW, la entrega de servicios PPDR se basa en las funcionalidades de control de servicios IMS, aplicaciones servidor y las aplicaciones cliente relacionadas instaladas en los terminales PPDR. La gestión dinámica de las capacidades de servicio proporcionadas será posible a través de Aplicaciones de Gestión de Servicios dentro de los CRS, que se describen posteriormente.

La infraestructura troncal PPDR también contiene un GW para el interfuncionamiento de las comunicaciones con la infraestructura de red PMR existente (PSN). El GW convierte los protocolos TETRA a SIP (*Session Initiation Protocol*) y RTP (*Real-time Transport Protocol*) y viceversa, para mantener el mismo servicio de llamada de grupo en ambos lados.

El sistema de gestión de red (NMS) mostrado en la Figura 2 representa el conjunto de herramientas de gestión técnica y operacional utilizadas por el operador PPDR para controlar y monitorizar la infraestructura troncal, los terminales, las tarjetas USIMs, la red PMR existente y cualquier infraestructura de red de acceso LTE dedicada que pueda ser desplegada.

La posibilidad de asegurar que las conexiones/llamadas importantes se establecen siempre es esencial para comunicaciones PPDR de misión crítica. El tratamiento preferente para el acceso y la utilización de los recursos de red LTE pueden ser soportados como una realización del *Multimedia Priority Service* (MPS), especificado por el 3GPP. MPS permite a ciertos abonados obtener y mantener recursos radio y de red con prioridad en situaciones tales como congestión de red, creando la capacidad de entregar o completar sesiones de alta prioridad. MPS es aplicable a sesiones multimedia basadas en IMS así como a otros servicios de datos que podrían no usar funciones IMS. La implementación del tratamiento de prioridad para MPS en redes LTE se base principalmente en la adecuada asignación de un conjunto de niveles de prioridad MPS establecidos en los parámetros QoS del servicio de conectividad IP ofrecido por LTE. La toma de decisiones sobre el apropiado establecimiento de los parámetros QoS para comunicaciones PPDR es gestionada por la entidad PCRF ubicada dentro del infraestructura troncal PPDR.

La infraestructura troncal del operador PPDR se conecta mediante APIs (*Application Programming Interfaces*) a los CRS usados por los usuarios PPDR para la gestión táctica y operacional. Los CRS pueden incluir aplicaciones de despacho para acceder a servicios PPDR (p. ej. posiciones de despacho para comunicar con los usuarios en el terreno), así



como aplicaciones de control y monitorización para resolver los problemas administrativos y operacionales de los servicios PPDR proporcionados. En particular, los CRS incluyen:

- Aplicación de Gestión de Usuarios. Esta aplicación permite el control y administración de los datos de los abonados PPDR. Mantener el control sobre esta información de suscripción PPDR es esencial para los gestores tácticos y operacionales ya que permite a los usuarios PPDR gestionar el proceso de aprovisionamiento de usuarios (p. ej. activación/eliminación de usuarios) así como establecer las capacidades de abonados requeridas (p. ej. perfiles de servicio de abonados con las configuraciones de QoS).
- Aplicación de Gestión de Servicios. Esta aplicación permite la gestión dinámica de las capacidades de servicio proporcionadas de modo que los usuarios PPDR en las salas de control puedan ajustar la provisión del servicio PPDR a las necesidades operacionales específicas (p. ej. creación de grupos, activación de servicios suplementarios, etc.).
- Aplicación de Gestión de Acceso Prioritario. Esta aplicación permite que los gestores PPDR operacionales y tácticos en las salas de control tengan control directo sobre las políticas de prioridad aplicadas al tráfico PPDR. Las políticas pueden considerar no sólo la prioridad relativa de un usuario particular basada en su afiliación a una agencia, sino también el contexto situacional de las aplicaciones (p. ej. el papel de los usuarios PPDR dentro de la estructura de mando del incidente, el tipo de incidente, las aplicaciones que son de misión crítica y deben ser priorizadas, la ubicación de los usuarios, etc.). El soporte de la priorización se concibe como una realización del MPS, donde la funcionalidad PCRF se asigna dentro de la infraestructura troncal del operador PPDR. De esta forma, los gestores PPDR son capaces de configurar la información y las reglas usadas por el elemento PCRF para la toma de decisiones de control de la QoS (p. ej. selección de los valores ARP –*Allocation and Retention Priority*- y QCI –*QoS Class Identifier*-). Como puede observarse en la Figura 2, la arquitectura propuesta también implica el despliegue de otras entidades funcionales del subsistema PCC (*Policy and Charging Control*) como parte de la infraestructura de red troncal PPDR:
  - o Una AF (*Application Function*) ubicada en el IMS y los servidores de aplicación, que se requiere para la invocación dinámica de MPS y la transferencia de información de sesión dinámica a PCRF (p. ej., los tipos de medios requeridos y la prioridad de sesión/aplicación extraída de la señalización IMS)

- El SPR (*Service Profile Repository*), que contiene la información relacionada con el abonado (p. ej. el nivel de prioridad MPS de usuario y los servicios permitidos) y puede ser integrado dentro del HSS.
- La PCEF (*Policy and Charging Enforcement Function*), que está ubicada en el P-GW y se usa para hacer cumplir las decisiones de política en el plano de datos de usuario (p. ej. control de tasa).

El despliegue de esta solución a través redes móviles comerciales requiere que las políticas y parámetros QoS usados para la gestión de la priorización sean armonizados y acordados por los operadores comerciales y los usuarios PPDR. También deberán determinarse los límites de la capacidad máxima asignada para la compartición adecuada del tráfico PPDR y comercial. El establecimiento de un marco de trabajo de política bien definido y validado para la gestión de la priorización es esencial para evitar incertidumbres en situaciones de congestión de red y para incrementar la confianza en el funcionamiento de la priorización. Todos estos aspectos deben ser considerados en la formulación de los acuerdos de *roaming* y de nivel de servicio a establecer entre los usuarios PPDR y los operadores comerciales.

#### **4.4 Estudio de cobertura radioeléctrica**

La conversión de una red TETRA a una red LTE en sistemas PPDR es una solución posible para proporcionar servicios futuros que requieran una alta capacidad de transmisión de datos en la interfaz de radio y que permitan radiocomunicaciones PPDR de banda ancha (BB-PPDR) [GRU2013]. El Comité de Comunicaciones Electrónicas, en su informe ECC Report 218 [ECC2015b], propuso una hoja de ruta hasta 2025 para la transición a la comunicación de banda ancha en sistemas PPDR. Esta hoja de ruta prevé la coexistencia de redes TETRA y LTE durante varios años hasta que el sistema LTE tenga todas las funcionalidades de los sistemas PPDR. Por lo tanto, la introducción de LTE para PPDR debe complementar, no reemplazar, las redes TETRA existentes, que continuarán siendo la mejor opción para el servicio de voz de misión crítica a corto plazo.

Además, los usuarios de PPDR no pueden abandonar sus sistemas TETRA actuales hasta que se construya una nueva red de banda ancha móvil que sea capaz de proporcionar una cobertura radioeléctrica igual o mejor que la cobertura radioeléctrica que actualmente proporcionan los sistemas TETRA. Por lo tanto, antes de que cualquier solución de banda ancha pueda reemplazar los sistemas TETRA actuales, la red LTE debe cumplir con todos los requisitos de cobertura radioeléctrica actualmente satisfechos por la red existente.

Se espera que los escenarios futuros más plausibles para ofrecer las aplicaciones cada vez más intensivas de datos demandadas por las agencias PPDR se basen en el uso de redes LTE dedicadas y comerciales [FER2013]. Para las áreas rurales, las estaciones base de un sistema de comunicación por radio están ubicadas en las montañas, y la cobertura radioeléctrica tiene "zonas de sombra" (sin cobertura radioeléctrica), generalmente en bosques, montañas, ríos, etc. En estas zonas, los operadores no están interesados en desplegar nuevas estaciones base para ofrecer comunicaciones de banda ancha. Sin embargo, en entornos urbanos, los operadores ya han desplegado redes comerciales de banda ancha, que podrían ser utilizadas por las agencias PPDR para dichas comunicaciones. Por lo tanto, como ya ha sido mencionado anteriormente, la posibilidad de un modelo híbrido puede ser una solución interesante para las radiocomunicaciones BB-PPDR.

Más de 114 países en todo el mundo han desplegado redes TETRA (a nivel regional o nacional) en los últimos años según TCCA [TCC2009]. Ahora, los usuarios de estas redes están considerando cómo proceder para lograr una red BB-PPDR en los próximos años. Por lo tanto, las agencias de PPDR están interesadas en el estudio de los muchos problemas (análisis de costes de los recursos necesarios, cobertura radioeléctrica esperada, calidad de servicio, etc.) involucrados en la planificación de la transición de una red TETRA a una red LTE.

Rouil et al. han presentado un marco para el modelado y la planificación de una red de banda ancha de seguridad pública LTE en Estados Unidos [ROU2013]. El estudio se llevó a cabo a escala nacional, dividiendo el área total en  $20 \times 20$  km cuadrados y estableciendo un porcentaje mínimo de cobertura radioeléctrica en cada cuadro.

En el estudio realizado en este capítulo, se ofrecen varias consideraciones de planificación radio en la migración de TETRA a LTE para redes PPDR en la CARM. En este caso, a diferencia del trabajo de Rouil et al. [ROU2013], el área total se divide en áreas geográficas de interés que se definen como divisiones administrativas (región, áreas municipales, parques naturales, etc.). Para ilustrar esta propuesta, se realizó un análisis de cobertura radioeléctrica para entorno rural de una red TETRA existente que evoluciona hacia un sistema LTE en un escenario real, mediante simulaciones y mediciones. El análisis se realizó aprovechando el potencial de una herramienta de planificación radio [JUA2018] basada en un sistema de información geográfica (GIS) [KEN2009], y las mediciones se realizaron y se utilizaron para ajustar los modelos de propagación.

#### 4.4.1 Consideraciones de diseño

##### 4.4.1.1 Escenario

RADIECARM, como se ha comentado en capítulos anteriores, es la red TETRA desplegada por el Gobierno Regional de Murcia (España), que es utilizada por los servicios de emergencia y seguridad (bomberos, policía, servicio forestal, etc.). Todos estos servicios están coordinados por el Centro de Coordinación de Emergencias 112. RADIECARM es una red dedicada dimensionada inicialmente con 16 estaciones base ubicadas en montañas y más de 2000 terminales.

En la Figura 3 (a y b), podemos ver la infraestructura típica (torre, equipo, etc.) en un emplazamiento y en la Figura 4 (a y b), un terminal móvil montado en un vehículo con tracción en las cuatro ruedas. Por otra parte, la Figura 5 muestra las 16 estaciones base TETRA (círculos rojos) de la CARM.

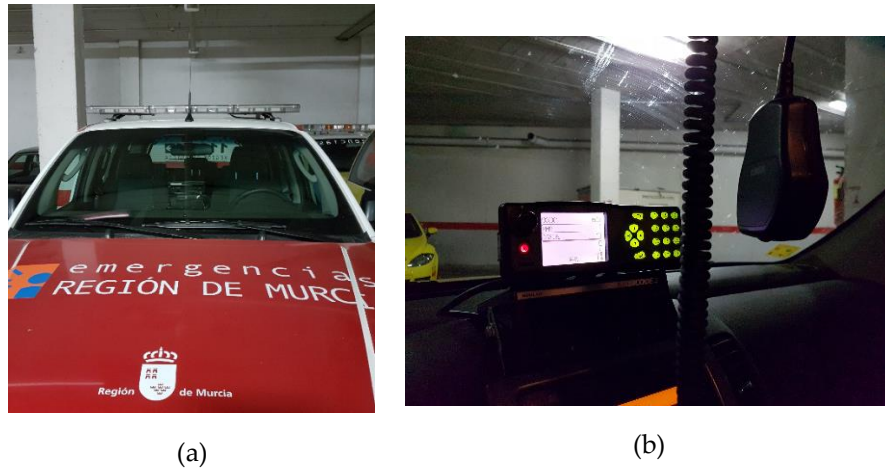


(a)

(b)

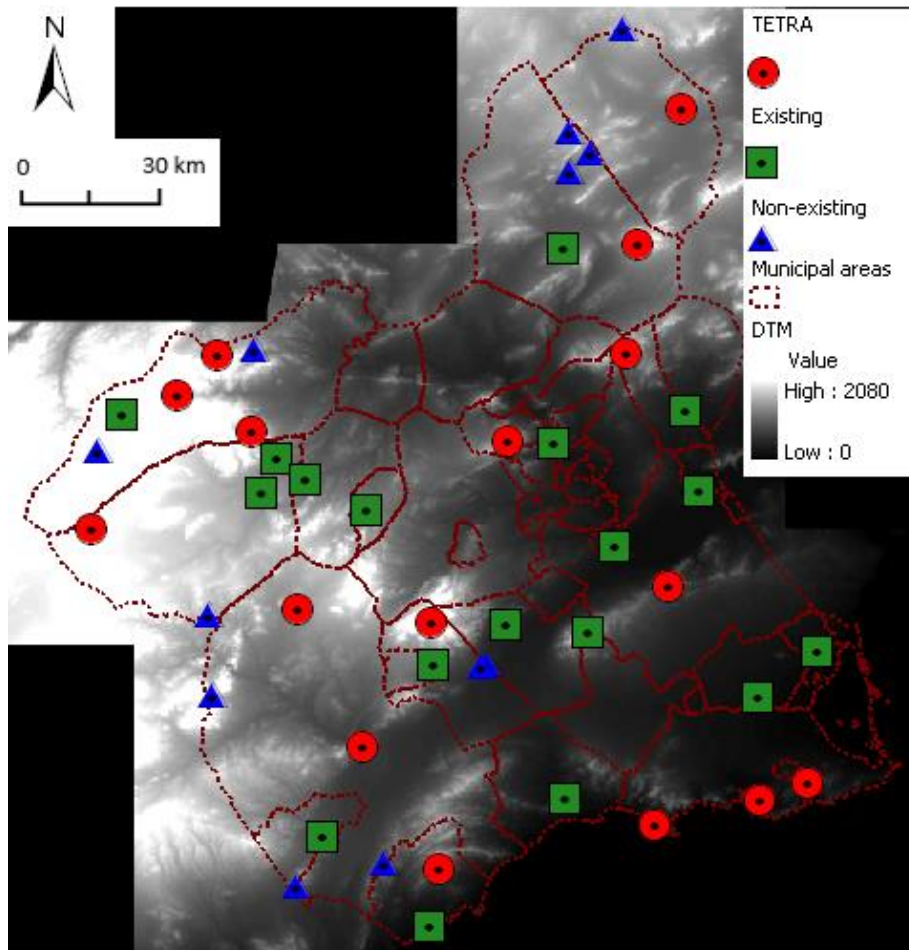
**Figura 3** (a) Torre de telecomunicaciones con antena y soporte (b) Equipo de estación base TETRA.

[REY2019]



**Figura 4** (a) Vehículo de tracción a las cuatro ruedas con la antena TETRA (b) Equipo de estación móvil TETRA.

[REY2019]



**Figura 5** Modelo de terreno digital (*raster*), emplazamientos (puntos vectoriales) y áreas municipales (polígonos vectoriales).

[REY2019]

#### **4.4.1.2 Herramienta de planificación**

Para llevar a cabo el análisis de cobertura radioeléctrica se utilizó la aplicación RADIOGIS [JUA2018], que es una herramienta desarrollada por el grupo de Sistemas de Comunicaciones Móviles (SiCoMo) de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) para la gestión y el cálculo de la cobertura radioeléctrica de sistemas de radiocomunicaciones como GSM, UMTS, LTE, TETRA, TDT, WiFi, etc. RADIOGIS funciona en PC con Windows y está integrado con el software GIS ArcGIS 9.1 de ESRI. RADIOGIS tiene, entre otras, las siguientes funcionalidades:

- a) Cálculos de cobertura radioeléctrica de potencia, campo eléctrico o densidad de potencia al mismo tiempo que se puede seleccionar el modelo de propagación que se aplicará: ITUR-526 [ITU2018a] e ITUR-1546 [ITU2013] para entornos rurales; Okumura-Hata [HAT1980], COST-231 [COS1999] y Walfisch-Bertoni [WAL1988] para áreas urbanas.
- b) Cálculos de umbral porcentual utilizando una capa vectorial que contiene áreas municipales, carreteras, etc.
- c) Gestión de bases de datos de emplazamientos, cobertura radioeléctrica de densidad de potencia, sistemas de potencia, campañas de medición, etc.

#### **4.4.1.3 Bandas de frecuencia**

Para la red TETRA existente, la banda de frecuencia para RADIECARM es 380–385 MHz (enlace ascendente, UL) y 390–395 (enlace descendente, DL), que es la banda reservada para los sistemas PPDR en Europa [ETS2010a].

Para la nueva red LTE, hay varias posibilidades disponibles para la banda de frecuencia. El informe ECC Report 218 [ECC2015b] desarrolla las condiciones necesarias para crear un marco europeo armonizado para la implementación de futuros sistemas BB-PPDR. Este informe propone el concepto de 'armonización flexible' para permitir una implementación eficiente de los sistemas BB-PPDR. Las bandas de frecuencia identificadas como candidatas para la armonización son:

- 400 MHz (410–430 MHz y 450–470 MHz)
- 700 MHz (694–790 MHz)

En nuestro análisis, se utilizaron bandas de frecuencia de 700 MHz. Se ha supuesto que estas bandas de frecuencia cumplirán con las regulaciones de espectro para usuarios de

seguridad pública y servicios de banda ancha en España. Además, son bandas operativas E-UTRA según el ETSI [ETS2015, ETS2017, ETS2019].

#### 4.4.1.4 Información geográfica

La Región de Murcia (suroeste de España) tiene una superficie de 11.296 km<sup>2</sup>. El territorio está organizado en 45 municipios, y cada municipio delimita un área (área municipal) (ver Figura 5). La información geográfica ha sido obtenida del Instituto Geográfico Nacional de España. Se utilizó un modelo de terreno digital (DTM), en formato *raster* [KEN2009], con un tamaño de celda de 100 × 100 m (ver Figura 5), para los cálculos de cobertura radioeléctrica en entornos rurales, lo que representa un compromiso entre la precisión y el tiempo de cálculo. También podemos observar las áreas municipales como una capa vectorial con una tabla de atributos asociada que contiene información (nombre, extensión, población, etc.) [KEN2009].

#### 4.4.1.5 Calidad de servicio

La señal recibida en la comunicación móvil presenta amplias variaciones aleatorias que se pueden modelar introduciendo una corrección estadística. Esta corrección estadística define un margen de desvanecimiento (FM). Si el FM es igual a cero, la cobertura radioeléctrica solo se garantiza en el 50% de las ubicaciones en la celda (definida en el DTM). La calidad microescalar se define por el porcentaje de ubicaciones en la celda en la que se garantiza la cobertura radioeléctrica. Esta calidad establece el margen de desvanecimiento (FM) que se considera en el balance de enlace.

Suponiendo una distribución log-normal, el FM se puede estimar por:

$$FM (dB) = K(L) \sigma_L \quad (1)$$

donde  $\sigma_L$  (dB) es la variabilidad de ubicaciones en la celda y  $K(L)$  es la distribución normalizada de abscisas para el porcentaje de ubicaciones (L). El parámetro K está relacionado con la función inversa de Gauss  $G^{-1}(L)$  por la expresión:

$$K(L) = G^{-1} (1 - L/100) \quad (2)$$

Para los cálculos, un valor típico para la banda UHF en entornos rurales es una desviación estándar de variabilidad con ubicaciones de 6 dB. Si fijamos una calidad microescalar del 90%, el margen de desvanecimiento es:

$$FM (dB) = 1.28 \cdot 6 = 7.7 \text{ dB} \quad (3)$$

La calidad macro escalar es el porcentaje de células con cobertura radioeléctrica dentro de un área. Esta área podría estar delimitada por un polígono, que representa un área municipal o regional en nuestro caso. En nuestros cálculos, asumimos una calidad macro escalar del 90% para el término regional y del 85% para el término municipal.

#### 4.4.1.6 Modelo de propagación

Muchos modelos de propagación, como los modelos Longley-Rice [LON1968], Bullington [BUL1977], Vogler [VOG1982], Luebbers [LUE1984] y Deygout [DEY1991], se han utilizado para la planificación de radio de banda UHF en entornos rurales, además de las recomendaciones del Sector de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R) [ITU2018a, ITU2013]. Todos estos modelos estiman el valor medio de la señal recibida en cada celda del DTM, teniendo en cuenta el perfil del terreno entre el transmisor y el receptor.

En la herramienta de planificación radio utilizada, las pérdidas de propagación se evalúan para cada perfil de terreno mediante:

$$L \text{ (dB)} = L_0 + L_{\text{Irregularidades del terreno}} + L_{\text{Entorno cercano}} \quad (4)$$

donde:

$L_0$  es la pérdida de espacio libre, que se puede calcular por:

$$L_0 \text{ (dB)} = 33.44 + 20 \log f \text{ (MHz)} + 20 \log d \text{ (km)} \quad (5)$$

$L_{\text{Irregularidades del terreno}}$  es la pérdida de difracción causada por la obstrucción del terreno. Para entornos rurales, esta pérdida de propagación puede estimarse utilizando la recomendación ITU-R P.526 [ITU2018a].

$L_{\text{Entorno cercano}}$  es la pérdida de propagación teniendo en cuenta el fenómeno de rutas múltiples. Esta pérdida está directamente relacionada con la morfografía en las proximidades del móvil. En el GIS, se creó un *raster*, con una resolución de 100 × 100 m, en el que cada celda tiene un valor (en dB) que representa la pérdida debida al tipo de entorno (bosques rurales de pino, entorno suburbano y entorno urbano). El modelo Hata [HAT1980] se utilizó para estimar el valor para entornos suburbanos y urbanos que se especifican más adelante en la Tabla 4.

Para estimar las pérdidas adicionales en entorno rural en el sistema TETRA (400MHz) se llevó a cabo una campaña de medidas en 5 rutas por la Región de Murcia en un prototipo con 3 estaciones base TETRA [PAR2002]. En la Tabla 4, se muestran los valores obtenidos para el sistema TETRA. Además, en esta tabla también se presentan los valores para el

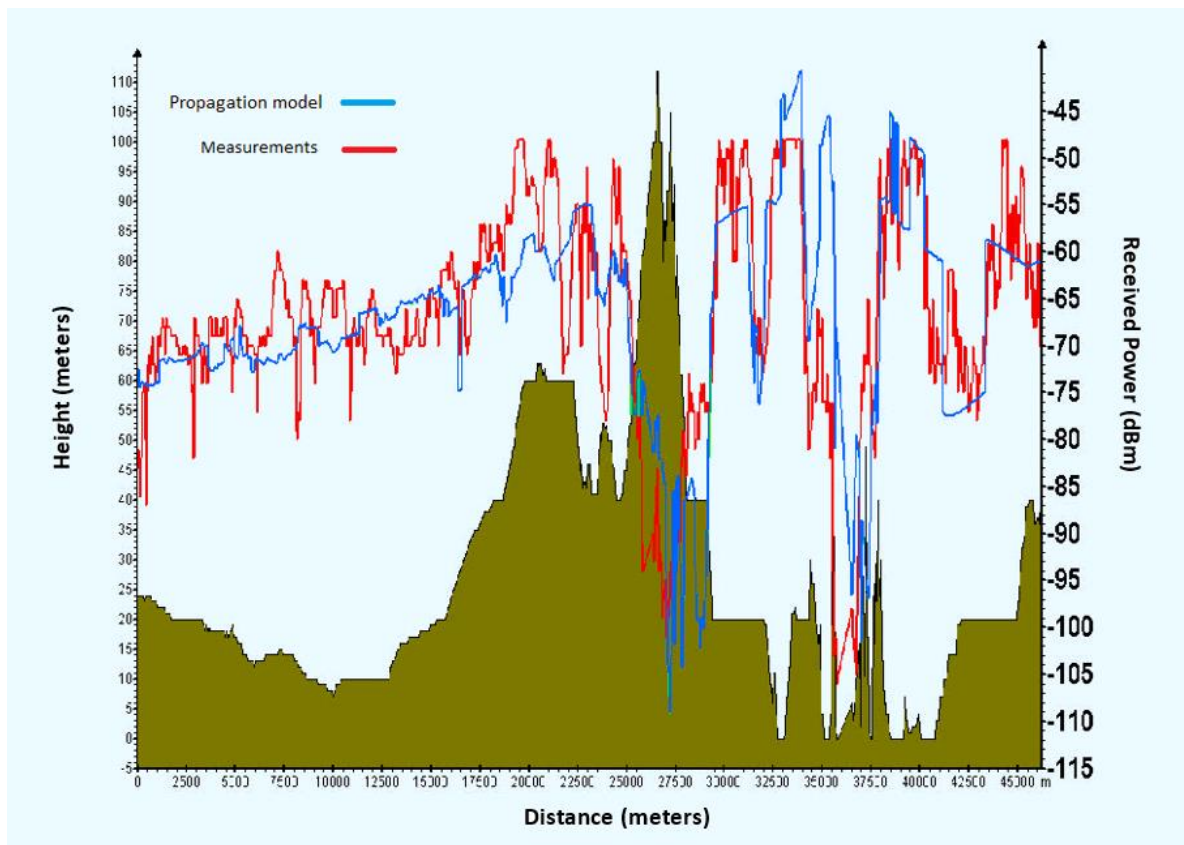


sistema LTE (700 MHz), en el que las pérdidas para el entorno rural se estimaron considerando la ITU-R P.833 [ITU2016a]. Estos valores fueron aplicados a las simulaciones realizadas en este estudio.

**Tabla 4** Pérdida adicional obtenida para los diferentes tipos de entornos considerados [REY2019]

<b>Entorno</b>	<b><math>L_{Entorno\ cercano}</math> (dB) (400MHz, TETRA)</b>	<b><math>L_{Entorno\ cercano}</math> (dB) (700MHz, LTE)</b>
Rural	10	14.5
Suburbano	13.75	13.76
Urbano	25.65	27.52

La Figura 6 muestra una comparación entre el modelo de propagación y las mediciones en una de las rutas.



**Figura 6** Comparación entre las medidas y el modelo de propagación [PAR2002]

La Tabla 5 proporciona el error medio y la desviación estándar de la diferencia entre el modelo de propagación y las mediciones para cada ruta.

**Tabla 5** Error medio y desviación estándar de la diferencia entre el modelo de propagación y las mediciones para cada ruta

[REY2019]

Ruta	Media del error(dB)	Desviación estandar(dB)
I	1.04	8.34
II	8.96	9.20
II	3.63	8.45
IV	-0.44	7.58
V	10.65	12.19

#### 4.4.1.7 Balance de enlace

La Tabla 6 muestra el balance de enlace para los sistemas TETRA y LTE y para el enlace descendente (DL) y el enlace ascendente (UL). El balance de enlace se calculó para un equipo móvil, en el que las antenas se montan en un vehículo, con una ganancia de 2 dBi para el sistema TETRA y de 3,5 dBi para el sistema LTE. Además, en la estación base, las antenas tienen un diagrama de radiación omnidireccional en el plano horizontal con una ganancia de 7 dBi para el sistema TETRA y direccional con una ganancia de 15 dBi para el sistema LTE.

**Tabla 6** Balance de enlaces para los sistemas TETRA y LTE

[REY2019]

Parámetro	Unidad		TETRA		LTE	
			DL	UL	DL	UL
Potencia Tx	dBm	$P_{tx}$	44	40	35	28
Ganancia Tx	dBi	$G_{tx}$	7	2	15	3.5
Pérdidas Tx	dB	$L_{tx}$	2	0.5	2	0.5
PIRE	dBm	$P_{tx} + G_{tx} - L_{tx}$	49	41.5	48	31
Margen de desvanecimiento	dB	$FM (90\%)$	7.7	7.7	7.7	7.7
Ganancia Rx	dBi	$G_{rx}$	2	7	3.5	15
Pérdidas Rx	dB	$L_{rx}$	0.5	2	0.5	2
Ancho de Banda		$BW$	25kHz		5MHz	
Sensibilidad	dBm	$S$	-103	-106	-95	-100
Lmax	dB	$PIRE-FM+G_{tx}-L_{tx}-S$	145.8	<b>144.8</b>	138.3	<b>136.3</b>

La cobertura radioeléctrica se calculó para un entorno rural, por lo que se asumió un escenario limitado por ruido.

Para el sistema LTE, la sensibilidad se calculó con la expresión:

$$S \text{ (dBm)} = -174 + F + 10 \log (Nrb \times RB) + SNIR \quad (6)$$

Donde:

- $F$  es la cifra de ruido (7 dB para el DL y 2 dB para el UL)
- $Nrb$  es el número de bloques de recursos (25 para un ancho de banda de 5 MHz para el canal de radio)
- $RB$  es el ancho de banda de cada bloque de recursos (180 kHz)
- $SNIR$  es la relación señal / interferencia y ruido (5 dB)

En el UL propuesto para LTE, se puede lograr una velocidad real de 4.5 Mbps con una sensibilidad de -100 dBm usando una modulación de 16 QAM, permitiendo la transmisión de video en alta definición completa (1920 × 1080). La máxima pérdida de propagación ( $L_{max}$ ) está acorde con Dunlop et al. [DUN1999] para el sistema TETRA y con Elnashar et al. [ELN2014] para el sistema LTE. Como se ve en la Tabla 6, para ambos sistemas, el peor de los casos es el UL, y las pérdidas máximas de propagación que pueden compensarse son 144.8 dB para el sistema TETRA y 136.3 dB para el sistema LTE. Estos valores son los que se utilizarán en los cálculos para ambos sistemas.

#### 4.4.1.8 Cálculo de cobertura radioeléctrica

Usando la herramienta de planificación radio RADIOGIS, se puede calcular la cobertura radioeléctrica individual para un emplazamiento considerando la pérdida máxima de propagación permitida por el balance de enlace. Además, se ha tenido en cuenta también que el radio máximo de cobertura individual viene limitado por la tecnología: 58 kms para TETRA [ETS2001] y 77 kms para LTE [ELN2014, FER2015, HER2015], asumiendo que se utiliza en el equipamiento un formato de preámbulo 1 para el PRACH (*Physical Random Access Channel*).

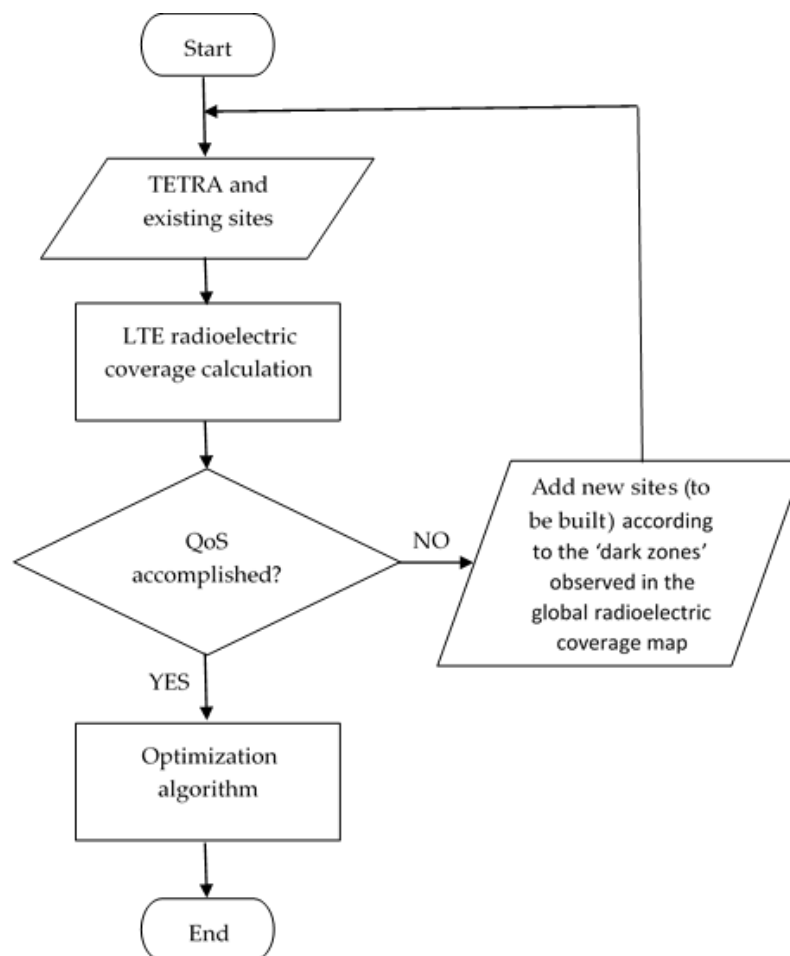
Una vez calculada cada cobertura individual, la cobertura radioeléctrica global se calcula teniendo en cuenta el principio de mejor servidor (el valor de cada celda cubierta por varios emplazamientos es el mejor valor). Cada cobertura radioeléctrica se almacena en el GIS mediante un *raster* y una capa de puntos vectoriales. El *raster* tenía la misma resolución que el DTM y el valor de cada celda era ahora la potencia recibida. La capa de punto vectorial también tiene una tabla de atributos asociada que contiene toda la información utilizada en los cálculos: potencia del transmisor, pérdida de transmisión, ganancias de

antena, frecuencia, modelo de propagación, etc. Esto nos permite utilizar todas las facilidades de GIS para administrar y hacer cálculos con datos espaciales.

El porcentaje de cobertura radioeléctrica se puede calcular fácilmente en GIS porque la cobertura radioeléctrica se ha almacenado como un *raster*. La funcionalidad de GIS [KEN2009] que permite la operación entre una capa *raster* y una capa vectorial se puede utilizar para evaluar la calidad de servicio macro escalar, utilizando una capa de la cobertura radioeléctrica global y la capa de polígono vectorial de las áreas municipales. El mapa de la calidad macroescalar también se almacenó como *raster* y se puede representar y administrar en el entorno GIS.

#### 4.4.1.9 Metodología para la planificación de la nueva red LTE

El diagrama de flujo propuesto para planificar la nueva red LTE se puede observar en la Figura 7.



**Figura 7** Diagrama de flujo propuesto para planificar la nueva red LTE.

[REY2019]

En primer lugar, la cobertura radioeléctrica LTE para cada área municipal se calcula utilizando los emplazamientos TETRA existentes y los emplazamientos existentes con otros sistemas de radiocomunicaciones (distintos de TETRA). En nuestro caso, esto lleva a 34 emplazamientos en total (16 estaciones base TETRA y los otros 18 emplazamientos existentes) (Figura 5).

- Si se cumple la QoS, se puede aplicar el siguiente algoritmo de optimización: Inicialmente, se calcularon coberturas radioeléctricas individuales para los emplazamientos disponibles y se ordenaron en una tabla desde la cobertura radioeléctrica más pequeña hasta la más grande. Luego, se realizó un proceso iterativo para cada emplazamiento, comenzando con el primer elemento (el que tiene la menor cobertura radioeléctrica) y el mismo orden secuencial (de arriba a abajo). En cada iteración, se llevaron a cabo los siguientes pasos:
  - 1 El elemento de la tabla correspondiente se descarta.
  - 2 La cobertura radioeléctrica global se calcula con los emplazamientos no descartados o eliminados.
  - 3 Si la calidad del macro escalar se logra para la región y las áreas municipales, el emplazamiento descartado en el paso 1 se elimina y, si no, el emplazamiento se mantiene en la tabla.
- Si no se cumple la QoS, este hecho significa que se necesitan más emplazamientos. Por lo tanto, los emplazamientos que aún no existen, pero se pueden construir con la infraestructura necesaria (torre de telecomunicaciones, línea eléctrica, soporte, etc.), cuya ubicación se estima de acuerdo con las zonas de sombra observadas en el mapa de cobertura radioeléctrica global, deben agregarse progresivamente hasta que se logre la QoS. Luego, se puede aplicar el algoritmo de optimización mencionado anteriormente.

#### 4.4.2 Resultados y discusión

##### 4.4.2.1 La red TETRA existente

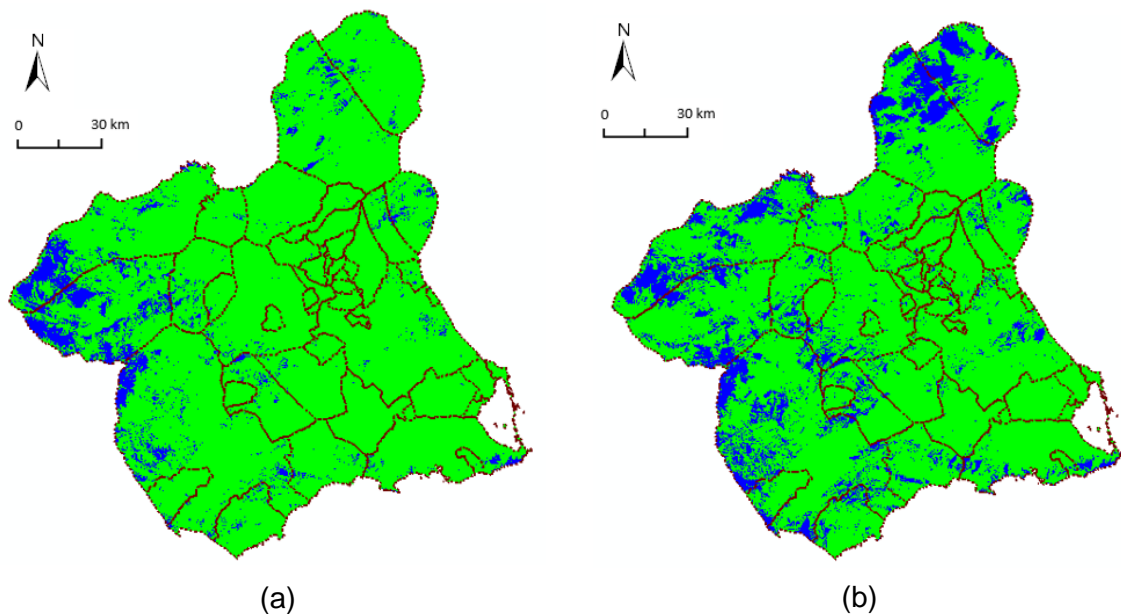
La cobertura radioeléctrica se calcula utilizando las 16 estaciones base TETRA (Figura 5). La Tabla 7 muestra el porcentaje de cobertura radioeléctrica para cada área municipal. Como se puede observar, la calidad de cobertura macro escalar es superior al 90% para la región y al 85% para las áreas municipales.

**Tabla 7** Porcentaje de cobertura radioeléctrica en áreas municipales  
[REY2019]

Municipio	% Cobertura TETRA (16 estaciones base)	% Cobertura LTE (34)	% Cobertura LTE (46)	% Cobertura LTE (39) (optimizada)
Abanilla	95	87	87	87
Abarán	97	97	97	96
Águilas	89	87	87	87
Albudeite	100	94	94	94
Alcantarilla	100	100	100	100
Aledo	100	96	98	95
Alguazas	100	96	96	96
Alhama	94	97	97	96
Archena	100	95	95	95
Beniel	100	100	100	96
Blanca	99	96	96	96
Bullas	96	96	96	96
Calasparra	96	91	91	91
Campos del Río	100	98	98	98
<b>Caravaca</b>	93	<b>79</b>	<b>85</b>	<b>85</b>
Cartagena	95	90	90	88
Cehegín	90	85	85	85
Ceutí	100	93	93	93
Cieza	98	92	92	92
Fortuna	99	93	93	93
Fuente Álamo	99	98	98	98
<b>Jumilla</b>	87	<b>75</b>	<b>92</b>	<b>92</b>
Librilla	94	99	99	99
<b>Lorca</b>	90	<b>78</b>	<b>85</b>	<b>85</b>
Lorquí	100	97	97	97
Mazarrón	94	89	89	88
Molina de Segura	100	98	98	98
<b>Moratalla</b>	86	<b>71</b>	<b>85</b>	<b>85</b>
Mula	96	91	91	91
Murcia	96	94	94	92
Ojós	98	95	95	94
Pliego	98	95	95	95
Puerto Lumbreras	91	85	94	94
Ricote	98	97	96	95
San Javier	100	99	100	98
San Pedro del Pinatar	100	100	100	90
Torre-Pacheco	98	100	100	99
Las Torres de Cotillas	100	97	97	97
<b>Totana</b>	92	<b>84</b>	<b>88</b>	<b>86</b>
Ulea	100	98	97	96
La Unión	99	92	92	92
Villanueva	100	98	98	98
<b>Yecla</b>	90	<b>73</b>	<b>91</b>	<b>91</b>
Santomera	99	94	94	91
Los Alcázares	100	100	100	99
<b>Region</b>	<b>93</b>	<b>85</b>	<b>91</b>	<b>90</b>

#### 4.4.2.2 La nueva red LTE

La metodología propuesta en el apartado 4.4.1.9 se ha aplicado en nuestro caso de estudio. Primero, se calculó la cobertura radioeléctrica para la nueva red LTE que tendrá en cuenta los 16 emplazamientos TETRA mencionados, así como los 18 emplazamientos existentes (34 en total, ver Figura 8b), y puede compararse con la cobertura para los 16 emplazamientos de TETRA (Figura 8a).



**Figura 8** Cobertura radioeléctrica (a) Sistema TETRA con 16 emplazamientos (b) Sistema LTE con 34 emplazamientos

[REY2019]

Cabe señalar que el número de 'zonas de sombra' (color azul en la Figura 8 frente al verde, que es donde hay cobertura) es mayor para la red LTE que para la red TETRA, debido a la menor cobertura de la red LTE. La Tabla 7 muestra el porcentaje de cobertura radioeléctrica para cada área municipal. La calidad macro escalar del 85% para el área municipal se excede en la mayoría de los casos, excepto en seis áreas municipales (Caravaca, Jumilla, Lorca; Moratalla, Totana y Yecla, que aparecen en negrita) de 45. Además, el porcentaje de cobertura radioeléctrica de LTE para la región es del 85% (por debajo de la calidad macro escalar real del 93% para la red TETRA).

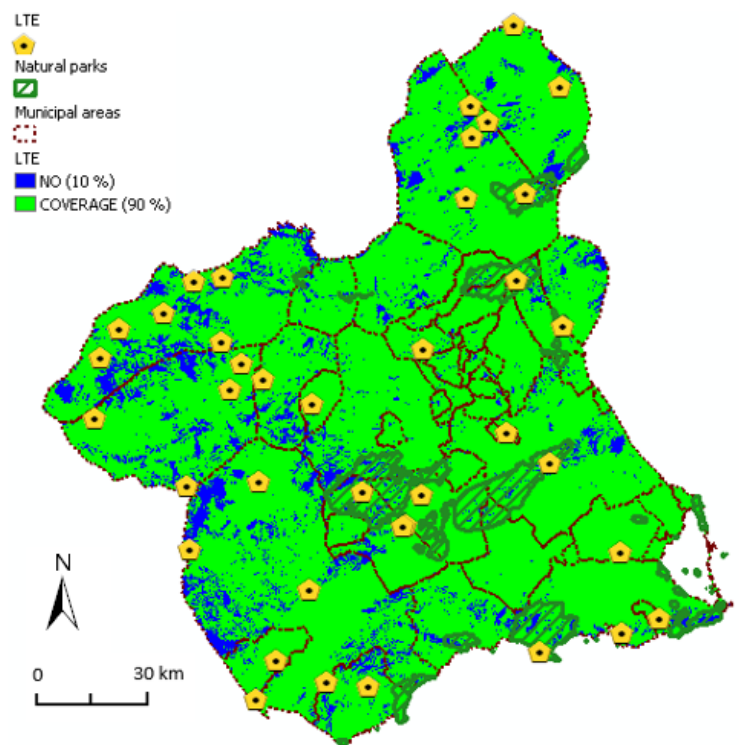
En este punto, según el diagrama de flujo de la Figura 7, se deben agregar nuevos emplazamientos para mejorar la cobertura radioeléctrica. Con la ayuda del GIS, se encontraron 12 emplazamientos más, representados como triángulos azules en la Figura 5, en las 'zonas de sombra' detectadas. Estos nuevos emplazamientos tendrían que

construirse con la infraestructura necesaria (torre de telecomunicaciones, línea eléctrica, stand, etc.). Fueron elegidos porque son accesibles a través de caminos, y es fácil para ellos recibir energía eléctrica. La nueva cobertura radioeléctrica se calculó con el total de 46 emplazamientos (Tabla 7). Ahora, la calidad de servicio macro escalar se cumple para las áreas municipales y para la región, 85% y 91%, respectivamente.

El siguiente paso fue aplicar un algoritmo de optimización para ver si la misma calidad de servicio podría mantenerse con menos emplazamientos.

Como se puede observar en la Tabla 7, 39 emplazamientos son suficientes para lograr la QoS. Estos resultados indican que el número de emplazamientos es un factor 2.4 más alto para la red LTE que para la red TETRA si queremos garantizar la misma calidad macro escalar para ambos sistemas. En comparación con otros estudios [HAL2010, KVA2018], que manejan factores de 4.9 para Estados Unidos y de 4.5 para Suecia, este factor es menor debido al empleo de equipos de usuario de alta potencia (HPUE con una potencia máxima de 1.2 W) y de celdas de radio extendido (alcance máximo de 77 kms).

La Figura 9 muestra la cobertura radioeléctrica de LTE con 39 emplazamientos, en los cuales las zonas de sombra se han reducido con respecto al caso con 34 emplazamientos (ver Figura 8b).



**Figura 9** Cobertura radioeléctrica optimizada LTE (39 emplazamientos)

[REY2019]



También podemos analizar otras situaciones de interés para las agencias de PPDR, como la cobertura radioeléctrica en parques naturales (representados como polígonos en la Figura 9).

La Tabla 8 muestra el porcentaje de cobertura radioeléctrica para cada parque natural. El porcentaje de cobertura radioeléctrica LTE es inferior al 85% para 6 de los 20 parques naturales (suponiendo que sea 46 o 39 emplazamientos), aunque el porcentaje de cobertura radioeléctrica para áreas municipales es igual o superior al 85% (ver Tabla 7). Por lo tanto, necesitamos, en este caso, agregar varios emplazamientos para mejorar la cobertura radioeléctrica en estos seis parques naturales.

**Tabla 8** Porcentaje de cobertura radioeléctrica en parques naturales  
[REY2019]

Parques naturales	% Cobertura LTE (46 estaciones base)	% Cobertura LTE (39) (optimizada)
Enclavado	85%	85%
Sierra Salinas	97%	96%
Sierra de El Carche	88%	88%
Sierra de La Pila	90%	88%
Ribera de Cañaverosa	<b>63%</b>	<b>63%</b>
Cañón de Almadenes	<b>53%</b>	<b>44%</b>
Ajauque y Rambla Salada	99%	99%
Carrascoy y El Valle	92%	92%
Barrancos de Gebas	95%	95%
Sierra Espuña	<b>81%</b>	<b>78%</b>
Salinas y Arenales de San Pedro	100%	90%
Saladares del Guadalentín	100%	100%
Cabezo Gordo	97%	90%
Islas del Mar Menor	92%	92%
La Muela y Cabo Tiñoso	<b>79%</b>	<b>79%</b>
Calblanque	<b>50%</b>	<b>40%</b>
Sierra de las Moreras	<b>73%</b>	<b>73%</b>
Islas mediterráneo	97%	93%
Calnegre y Cabo Cope	88%	88%
Cuatro Calas	99%	98%
<b>Total</b>	<b>86%</b>	<b>84%</b>

## 4.5 Conclusiones

La evolución prevista de la Red RADIECARM se basa en un modelo de implementación híbrido, compuesto por una combinación de redes (red TETRA actual, red LTE comercial y red LTE dedicada), sistemas transportables, sistemas de comunicaciones por satélite, redes troncales de interconexión IP, aplicaciones y equipos de usuario.

En relación con la red LTE dedicada, formada por macroceldas ubicadas en entorno rural, de acuerdo con el estudio de cobertura radioeléctrica realizado en la Región de Murcia, el número de emplazamientos LTE necesarios es un factor de 2.4 más que para la red TETRA, si se desea mantener la misma calidad de servicio (90% de cobertura para toda la región y 85% para terminos municipales).

## **5. Conclusiones generales y líneas futuras de investigación**

Las conclusiones a las que ha dado lugar esta tesis son las siguientes:

- LTE (y su evolución) es la solución tecnológica más adecuada para satisfacer las futuras necesidades de comunicación de banda ancha de los usuarios de la Red RADIECARM.
- La red TETRA actual deberá mantenerse en funcionamiento el tiempo necesario para llevar a cabo tanto el despliegue del futuro sistema BB-PPDR, como la migración completa TETRA – BB-PPDR (al menos hasta el año 2025).
- El modelo a seguir para el despliegue del sistema BB-PPDR que cubra las futuras necesidades de comunicación de los usuarios de la Red RADIECARM depende de varios factores, como son:
  - o El marco regulatorio europeo y español en la materia.
  - o El espectro asignado.
  - o La elección, por parte del Estado español, del modelo de implementación más adecuado (por ahora, no se ha pronunciado al respecto).
  - o El presupuesto disponible para el proyecto.
  - o Los resultados de las primeras iniciativas de despliegue que ya están marcha en algunos países.
- Si se elige un modelo que exija el uso de redes móviles comerciales, se debería asegurar que estas redes van a ofrecer las prestaciones requeridas por las autoridades en cuanto a cobertura, disponibilidad, seguridad, interoperabilidad, acceso prioritario, calidad de servicio, soporte de funcionalidades BB-PPDR, etc.
- La evolución prevista de la Red RADIECARM se basa en un modelo de implementación híbrido, compuesto por una combinación de redes (red TETRA actual, red LTE comercial y red LTE dedicada), sistemas transportables, sistemas de comunicaciones por satélite, redes troncales de interconexión IP, aplicaciones y equipos de usuario.
- En relación con la red LTE dedicada, formada por macroceldas ubicadas en entorno rural, de acuerdo con el estudio de cobertura radioeléctrica realizado en la Región de Murcia, el número de emplazamientos LTE necesarios es un factor de 2.4 más que

para la red TETRA, si se desea mantener la misma calidad de servicio (90% de cobertura para toda la región y 85% para terminos municipales).

Como futuras líneas de investigación se incluyen las siguientes:

- Realizar un estudio de cobertura radioeléctrica LTE en entorno urbano para los 45 municipios de la región que incluya modelos digitales del terreno con las alturas de los edificios utilizando modelos de propagación como COST231, Xia-Bertoni, etc.
- Llevar a cabo una campaña de medidas LTE en entorno urbano en la banda de frecuencia que se asigne finalmente a nivel nacional para sistemas BB-PPDR.
- Realizar un estudio de las necesidades específicas de los usuarios de la Red RADIECARM en relación con los requisitos genéricos exigidos a los futuros sistemas BB-PPDR y su implementación en las versiones sucesivas del estándar LTE.

## Bibliografía

- [3GP2015] 3GPP TSG CT Meeting #69: Release 13 analytical view version Sept. 9th 2015. URL: [http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK\\_PLAN/Description\\_Releases/](http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/) (consultada el 29 junio 2019).
- [3GP2017] 3GPP Web. Mission Critical Services in 3GPP. 2017. URL: [https://www.3gpp.org/news-events/1875-mc\\_services](https://www.3gpp.org/news-events/1875-mc_services) (consultada el 17 agosto 2019).
- [3GP2019] 3GPP TR 21.915 V1.1.0 (2019-03). Release 15 Description. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3389> (consultada el 17 agosto 2019).
- [ABI2010] Abichar, Zakhia; Kamal, Ahmed E.; Chang, J. Morris. Planning of Relay Station Locations in IEEE 802.16 (WiMAX) Networks. 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp.1-6, 18-21 April 2010. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5506112> (consultada el 29 junio 2019).
- [AGU2010] Agustí, R.; Bernardo, F.; Casadevall, F.; Ferrús, R.; Pérez-Romero, J.; Sallent, O. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. Fundación Vodafone España, 2010. URL: [http://catedraisdefe.etsit.upm.es/wp-content/uploads/2015/04/pre\\_ucm\\_mgmt\\_002620.pdf](http://catedraisdefe.etsit.upm.es/wp-content/uploads/2015/04/pre_ucm_mgmt_002620.pdf) (consultada el 30 junio 2019).
- [AGU2013] Agustí Comes, R.; Sallent Roig, O.; Ferrús Ferré, R. Provisión de Banda Ancha móvil para seguridad pública y emergencias. Revista BIT número 193, COIT y AEIT, Junio 2013. URL: <https://www.coit.es/archivo-bit/junio-2013/provision-de-banda-ancha-movil-para-seguridad-publica-y-emergencias> (consultada el 29 junio 2019).
- [AIA2009] Aiache, H.; Knopp, R.; Koufos, K.; Salovuori, H.; Simon, P. Increasing Public Safety Communications Interoperability: The CHORIST Broadband and Wideband Rapidly Deployable Systems. IEEE International Conference on Communications Workshops, 2009, ICC Workshops 2009, pp.1-6, 14-18 June 2009. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5208003&isnumber=5207960> (consultada el 29 junio 2019).
- [ALO2015] Alonso, J.; Ferrús, R.; Sallent, O. Alternativas de despliegue y asignación de espectro para las redes radio de emergencia de banda ancha. Revista BIT número 201, COIT y AEIT, Julio 2015. URL: <https://www.coit.es/archivo-bit/julio-2015-0/conferencia-mundial-de-radiocomunicaciones-cmr-2015-alternativas-de> (consultada el 29 junio 2019).

- [ARR2014] Arroyo, R. El enlace en las emergencias - Fuerte y claro. DGPCE, Secretaría General Técnica, Ministerio del Interior, 2014. URL: <http://www.proteccioncivil.es/documents/20486/156778/Enlace+en+las+emergencias/0b5ec378-7a76-40ef-9512-fc5a348d7d32> (consultada el 29 junio 2019).
- [ASA2001] Asamblea Regional de Murcia. Moción número 222 sobre “Inicio de los estudios e implantación progresiva de una plataforma única de radiocomunicaciones de emergencia de ámbito regional”, aprobada por el Pleno, en sesión celebrada el día 22 de febrero de 2001.
- [ASA2005] Asamblea Regional de Murcia. Moción número 137 sobre “Culminación de la implantación del sistema de Red Digital de Comunicaciones (RADIECARM), para mayor coordinación y efectividad de las comunicaciones en la Red de Protección Civil de la Comunidad Autónoma”, aprobada por el Pleno, en sesión celebrada el día 6 de abril de 2005.
- [AST2019] Astrid Web. URL: <https://www.astrid.be/en> (consultada el 8 agosto 2019)
- [BAL2012] Baldini, G.; Ferrus, R.; Hirst, P.; Delmas, S.; Pisz, R. The evolution of Public Safety Communications in Europe: the results from the FP7 HELP project. ETSI Reconfigurable Radio Systems Workshop, Sophia Antipolis, France, 12 December 2012. URL: [https://docbox.etsi.org/workshop/2012/201212\\_RRS/PAPERS/ABSTRACT\\_BALDINI\\_JRCEC.pdf](https://docbox.etsi.org/workshop/2012/201212_RRS/PAPERS/ABSTRACT_BALDINI_JRCEC.pdf) (consultada el 29 junio 2019).
- [BER2016] Bernat, P. La adjudicación de la red de comunicaciones críticas de las FCSE ofrece dudas razonables. Zona Movilidad, 21 mayo 2016. URL: <http://www.zonamovilidad.es/la-adjudicacion-a-tetrapol-airbus-de-la-red-srdee-de-comunicaciones-criticas-ofrece-dudas.html> (consultada el 29 junio 2019).
- [BHA2018] Bhatia, B. Status and Trends of Public Protection and Disaster Relief (PPDR) Communications. ITU, 2018. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/oth/0a/0E/R0A0E0000CB0001PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0a/0E/R0A0E0000CB0001PDFE.pdf) (consultada el 8 agosto 2019).
- [BRO2019] BroadWay project Web. URL: <https://www.broadway-info.eu/> (consultada el 17 agosto 2019).
- [BUL1977] Bullington, K. Radio propagation for vehicular communications. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-26, no. 4, pp. 295–308, November 1977. URL: <https://hams.soe.ucsc.edu/sites/default/files/Bullington%20VTS%201977.pdf> (consultada el 29 junio 2019).
- [CEP2010] CEPT/ECC WG FM Workshop Public Protection and Disaster Relief (PPDR) 11-12 March 2010, Mainz (Germany). URL: <http://www.archive.ero.dk/B9B4DC57-1315-4851-9A11-3B7E7FB8C8B7.W5Doc> (consultado el 29 junio 2019).

- [CEP2016] CEPT/ECC Web – Closed groups FM 49 - Radio Spectrum for Public Protection and Disaster Relief (PPDR). URL: <https://www.cept.org/ecc/groups/ecc/closed-groups/fm-49/client/introduction/> (consultado el 29 junio 2019).
- [CEP2019] CEPT/ECC Web - Topics: Public Protection and Disaster Relief. URL: <https://www.cept.org/ecc/topics/public-protection-and-disaster-relief-ppdr> (consultada el 29 junio 2019).
- [CHA2010] Chater-Lea. TETRA Evolution to meet the needs of next generation public safety requirements. Chairman ETSI TC TETRA Working Group 4. Cambridge Wireless Special Interest Groups (SIGs) – Security and Defence, Inaugural Security & Defence SIG: Public Safety Requirements – The Next Generation, 14/10/2010.
- [CMR2015] UIT-R. Actas finales provisionales Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR-15). Ginebra, 2-27 Noviembre 2015. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.11-2015-PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/act/R-ACT-WRC.11-2015-PDF-S.pdf) (consultada el 29 junio 2019).
- [CON2003] Consorcio de Extinción de Incendios y Salvamento de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Anuncio de contratación del “Suministro e implantación del sistema RADIECARM”. Número de expediente: 5/2003. BOE núm. 123 de 23 mayo 2003, URL: <http://www.boe.es/boe/dias/2003/05/23/pdfs/B04093-04093.pdf> (consultada el 29 junio 2019).
- [COS1999] Cost action 231. Digital mobile radio towards future generation systems (Final Report). Ed. European Commission, 1999. URL: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f2f42003-4028-4496-af95-beaa38fd475f/language-en> (consultada el 29 junio 2019).
- [DEY1991] Deygout, J. Correction factor for multiple-knife edge diffraction. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 39, no: 8, pp.1256–1258, August 1991. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/97368> (consultada el 29 junio 2019).
- [DUN1999] Dunlop, J.; Girma, D.; Irvine, J. Digital Mobile Communications and the TETRA System. Editorial John Wiley, 1999.
- [DUR2008] Durantini, A.; Petracca, M.; Vatalaro, F.; Civardi, A.; Ananasso, F. Integration of Broadband Wireless Technologies and PMR Systems for Professional Communications. Fourth International Conference on Networking and Services, (ICNS 2008), pp.84-89, 16-21 March 2008. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4476540&isnumber=4476518> (consultada el 29 junio 2019).
- [ECC2007] ECC Report 102: Public protection and disaster relief spectrum requirements. Helsinki, January 2007. URL:

- <http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ECCREP102.PDF> (consultada el 29 junio 2019).
- [ECC2013] ECC Report 199: User requirements and spectrum needs for future European broadband PPDR systems (Wide Area Networks). May 2013. URL: <https://www.ecodocdb.dk/download/35f6a2e2-1724/ECCREP199.PDF> (consultada el 29 junio 2019).
- [ECC2015a] ECC Decision (15)01: Harmonised technical conditions for mobile/fixed communications networks (MFCN) in the band 694-790 MHz including a paired frequency arrangement (Frequency Division Duplex 2x30 MHz) and an optional unpaired frequency arrangement (Supplemental Downlink) Approved 06 March 2015. URL: <http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ECCDEC1501.PDF> (consultada el 29 junio 2019).
- [ECC2015b] ECC Report 218. Harmonised conditions and spectrum bands for the implementation of future European broadband PPDR systems. Approved October 2015. URL: <http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ECCREP218.PDF> (consultada el 29 junio 2019).
- [ECC2019a] ECC Decision (16)02: Harmonised technical conditions and frequency bands for the implementation of Broadband Public Protection and Disaster Relief (BB-PPDR) systems. Approved 17 June 2016. Amended 8 March 2019. URL: <http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ECCDEC1602.PDF> (consultada el 29 junio 2019).
- [ECC2019b] ECC Decision (08)05: The harmonisation of frequency bands for the implementation of digital Public Protection and Disaster Relief (PPDR) narrow band and wide band radio applications in bands within the 380-470 MHz range. Approved 27 June 2008. Amended 8 March 2019. URL: <https://www.erodocdb.dk/download/5e4038fd-41f1/ECCDEC0805.PDF> (consultada el 29 junio 2019).
- [ELN2014] Elnashar, A.; El-saidny, M.A.; Sherig, M. Design, Deployment and Performance of 4G LTE Networks. A Practical Approach, John Wiley and Sons, 2014.
- [ERC1996] ERC/DEC/(96)01: European Radiocommunications Committee Decision of 7 March 1996 on the harmonised frequency band to be designated for the introduction of the Digital Land Mobile System for the Emergency Services. URL: <https://www.ecodocdb.dk/download/2fec6ae5-b305/DEC9601E.PDF> (consultada el 21 julio 2019).
- [ERI2018] Erillisverkot Web. Whast is Virve? URL: [https://www.erillisverkot.fi/files/254/Fact\\_sheet\\_eng\\_2018.pdf](https://www.erillisverkot.fi/files/254/Fact_sheet_eng_2018.pdf) (consultada el 17 agosto 2019)



- [ERI2019] Erillisverket Web. White paper Virve 2.0 RFI Summary of responses. URL: [https://www.erillisverket.fi/files/280/WP\\_Virve\\_2\\_0\\_RFI\\_2018\\_responses\\_-\\_Copy.pdf](https://www.erillisverket.fi/files/280/WP_Virve_2_0_RFI_2018_responses_-_Copy.pdf) (consultada el 17 agosto 2019)
- [ETS2001] ETSI TR 101 987, V1.1.1 (2001-08): Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Proposed Air Interface Enhancements for TETRA Release 2; Analysis and Feasibility Assessment. Clause 5.5.3.1. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/101900\\_101999/101987/01.01.01\\_60/tr\\_101987v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101900_101999/101987/01.01.01_60/tr_101987v010101p.pdf) (consultada el 25 julio 2019).
- [ETS2010a] ETSI TR 100 392-15, V1.4.1 (2010-03): Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 15: TETRA frequency bands, duplex spacings and channel numbering. URL: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/100300\\_100399/10039215/01.04.01\\_60/ts\\_10039215v010401p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100300_100399/10039215/01.04.01_60/ts_10039215v010401p.pdf) (consultada el 29 junio 2019)
- [ETS2010b] ETSI TR 102 628, V1.1.1 (2010-08): Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System reference document; Land Mobile Service; Additional spectrum requirements for future Public Safety and Security (PSS) wireless communication systems in the UHF frequency range. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102600\\_102699/102628/01.01.01\\_60/tr\\_102628v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102628/01.01.01_60/tr_102628v010101p.pdf) (consultada el 29 junio 2019).
- [ETS2012] ETSI TR 102 022-1, V1.1.1 (2012-08): User Requirement Specification; Mission Critical Broadband Communication Requirements. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102000\\_102099/10202201/01.01.01\\_60/tr\\_10202201v010101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102000_102099/10202201/01.01.01_60/tr_10202201v010101p.pdf) (consultada el 29 junio 2019).
- [ETS2015] ETSI TS 136 104 V12.6.0 (2015-02): LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 12.6.0 Release 12). URL: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136100\\_136199/136104/12.06.00\\_60/ts\\_136104v120600p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/12.06.00_60/ts_136104v120600p.pdf) (consultada el 29 junio 2019)
- [ETS2017] ETSI TS 136 101 V14.3.0 (2017-04): LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 14.3.0 Release 14). URL: [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136100\\_136199/136101/14.03.00\\_60/ts\\_136101v140300p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/14.03.00_60/ts_136101v140300p.pdf) (consultada el 29 junio 2019).
- [ETS2018] ETSI TR 121 914 V14.0.0 (2018-06): GSM; UMTS; LTE; 5G; Release description; Release 14 (3GPP TR 21.914 version 14.0.0 Release 14). URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/121900\\_121999/121914/14.00.00\\_60/tr\\_121914v140000p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/121900_121999/121914/14.00.00_60/tr_121914v140000p.pdf) (consultada el 21 julio 2019).

- [ETS2019] ETSI TS 136 101 V15.7.0 (2019-07): LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 15.7.0 Release 15). URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136100\\_136199/136101/15.07.00\\_60/ts\\_136101\\_v150700p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/15.07.00_60/ts_136101_v150700p.pdf) (consultada el 17 agosto 2019).
- [FAN2009] Fan, P. Research of Wireless Network Planning Based on WIMAX. Wireless Networks and Information Systems, 2009 (WNIS '09). International Conference on Wireless Networks and Information Systems, pp.362-365, 28-29 Dec. 2009. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5381974&isnumber=5381547> (consultada el 29 junio 2019).
- [FER2013] Ferrús, R.; Sallent, O.; Baldini, G.; Goratti, L. LTE: The Technology Driver for Future Public Safety Communications. IEEE Communications Magazine. Vol. 51, no 10, October 2013, pp. 154-161, 08 October 2013. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6619579/> (consultada el 29 junio 2019).
- [FER2014] Ferrús, R.; Sallent, O. Extending the LTE/LTE-A Business Case. Mission- and Business-Critical Mobile Broadband Communications. IEEE Vehicular Technology Magazine, September 2014. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6894275> (consultada el 29 junio 2019).
- [FER2015] Ferrús, R.; Sallent, O. Mobile Broadband Communications for Public Safety: The Road Ahead Through LTE Technology. John Wiley & Sons, 2015.
- [FIR2019] FirstNet Web. URL: <https://www.firstnet.gov/> (consultada el 8 agosto 2019)
- [GRU2013] Gruet, C.; Pons-Masbernat, X.; Force, P. The LTE evolution. IEEE Veh. Tech. Mag. 2013, June, pp. 65–70.
- [GUT2018] Guttman, E. 3GPP Advances in Critical Communications. CCW 2018. URL: [https://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations\\_2018/CCW-2018-3GPP-03.pdf](https://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations_2018/CCW-2018-3GPP-03.pdf) (consultada el 8 agosto 2019)
- [HAL2010] Hallahan R.; Peha, J.M. Quantifying the Costs of a Nationwide Public Safety Wireless Network. Telecommunications Policy, Elsevier, vol. 34, no. 4, pp. 200-220, 2010.
- [HAT1980] Hata, M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. IEEE Trans. Veh. Technol, 1980, vol. 29, no. 3, pp. 317-325.
- [HER1997] Hernando Rábanos, J. M. Comunicaciones móviles. Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S.A., 1997.
- [HER1998] Hernando Rábanos, J. M. Transmisión por radio. 3ª edición. Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S.A., 1998.

- [HER1999] Hernando Rábanos, J. M.; Montero del Pino, M.; Pérez Fontán, F. Ingeniería de sistemas trunking. Editorial Síntesis, S.A., 1999.
- [HER2010] Hernando Rábanos, J. M. Cuadernos Red de Cátedras Telefónica. Redes móviles de emergencia. Cátedra de sostenibilidad en telecomunicaciones móviles, Universidad Politécnica de Madrid, 2010. URL: <http://telefonicamoviles.gio.etsit.upm.es/catedra/wp-content/uploads/2010/04/Cuaderno-n%C2%BA-6.pdf> (consultada el 29 junio 2019).
- [HER2015] Hernando, J. M.; Mendo, L.; Riera, J.M. Comunicaciones móviles. 3ª Edición. Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S.A., 2015.
- [ITU2003] Report ITU-R M.2033 Radiocommunication objectives and requirements for public protection and disaster relief. 2003.
- [ITU2007] Convenio de Tampere. ITU Web 2007. URL: <https://www.itu.int/itu-news/manager/display.asp?lang=es&year=2007&issue=10&ipage=tempereConvention&ext=html> (consultado el 16 julio 2019).
- [ITU2012] Recommendation ITU-R M.1073-3. Digital cellular land mobile telecommunication systems. 2012. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1073-3-201203-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1073-3-201203-1!!PDF-E.pdf) (consultada el 30 junio 2019).
- [ITU2013] Recommendation ITU-R P. 1546-5. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz. 2013. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546/en> (consultada el 29 junio 2019).
- [ITU2016a] Recommendation ITU-R P.833-9. Attenuation in vegetation. 2016. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.833/en> (consultada el 29 junio 2019).
- [ITU2016b] Report ITU-R M.2014-3. Digital land mobile systems for dispatch traffic. 2016. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2014-3-2016-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2014-3-2016-PDF-E.pdf) (consultada el 30 junio 2019).
- [ITU2016c] Report ITU-R M.2291-1. The use of International Mobile Telecommunications (IMT) for broadband Public Protection and Disaster Relief (PPDR) applications. 2016. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2291-1-2016-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2291-1-2016-PDF-E.pdf) (consultada el 21 julio 2019).
- [ITU2017] Report ITU-R M.2377-1. Radiocommunication objectives and requirements for Public Protection and Disaster Relief. 2017. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2377-1-2017-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2377-1-2017-PDF-E.pdf) (consultada el 16 julio 2019).
- [ITU2018a] Recommendation ITU-R P.526-14. Propagation by diffraction. 2018. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526/en> (consultada el 29 junio 2019).

- [ITU2018b] Recommendation ITU-R M.2012-3. Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced). 2018. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2012-3-201801-!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2012-3-201801-!!PDF-E.pdf) (consultada el 16 julio 2019).
- [ITU2019] Recommendation ITU-R M.1457-14. Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000). 2019. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1457-14-201901-!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1457-14-201901-!!PDF-E.pdf) (consultada el 30 junio 2019).
- [JUA2018] Juan-Llacer, L.; Rodriguez, J.V.; Molina-Garcia-Pardo, J.M.; Pascual-García, J.; Martínez-Inglés, M. RADIOGIS: Educational software for learning the calculation of radio electric radioelectric coverage in wireless communication systems. *Comput. Appl. Eng. Educ.* 2018, 1–16. URL: <https://doi.org/10.1002/cae.22052> (consultada el 29 junio 2019).
- [KEN2009] Kennedy, M. *Introducing geographic information systems with ArcGIS: a workbook approach to learning GIS*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2009.
- [KVA2018] Kvalbien, A.; Wium, H. Critical communications for PPDR. Cost and time estimates for a new Swedish PPDR network. *Analysis Mason*, 2018. URL: <https://blogg.telia.se/app/uploads/sites/4/2018/03/Kostnadsanalys-BI%C3%A5ljusnC3%A4t.pdf> (consultada el 13 agosto 2019).
- [LON1968] Longley, A.G.; Rice, P.L. *Prediction of tropospheric radio transmission over irregular terrain-A computer method-1968*, U.S. Gov. Printing Office, Washington, DC, ESSA Tech. Rep. ERL 79-ITS 67, Jul. 1968.
- [LUE1984] Luebbers, R.J. Propagation prediction for hilly terrain using GTD wedge diffraction. *IEEE Trans. Antenn. Propag.*, 1984, vol. AP-32, no. 9, pp. 951–955.
- [LUN2019] Lund, D. Green light for BroadWay's next stage. *Critical Comms*. April 2019. URL: <https://www.criticalcomms.com.au/content/public-safety/article/green-light-for-broadway-s-next-stage-1365131074#axzz5IFLdLHIL> (consultada el 17 de agosto 2019).
- [MET2003] Metcalf, M. Project MESA: advanced mobile broadband communications for public safety applications. *14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003 (PIMRC 2003)*, vol.2, vol.2, pp. 1159- 1161, 7- 10 Sept. 2003. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1260293&isnumber=28148> (consultada el 29 junio 2019).

- [MOL2007] Molina-Garcia, M.; Alonso, J.I. Planning and Sizing Tool for WiMAX Networks. 2007 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp.403-406, 9-11 Jan. 2007 URL: (consultada el 29 junio 2019).
- [NAL2019] Nally, J. Finland's plans for PPDR mobile broadband. Critical Comms. April 2019. URL: <https://www.criticalcomms.com.au/content/public-safety/article/finland-s-plans-for-ppdr-mobile-broadband-1366062755#axzz5wsYCqLkP> (consultada el 17 de agosto 2019).
- [NAO2019] National Audit Office Report. Progress delivering the Emergency Services Network. Summary. 10 May 2019. URL: <https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2019/05/Progress-delivering-the-Emergency-Services-Network-Summary.pdf> (consultada el 11 agosto 2019)
- [NEV2007] Neves, P.; Simoes, P.; Gomes, A.; Mario, L.; Sargento, S.; Fontes, F.; Monteiro, E.; Bohnert, T. WiMAX for Emergency Services: An Empirical Evaluation. The 2007 International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (NGMAST 2007), pp.340-345, 12-14 Sept. 2007. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4343443&isnumber=4343385> (consultada el 29 junio 2019).
- [NOU2006] Nouri, M.; Lottici, V.; Reggiannini, R.; Ball, D.; Rayne, M. TEDS: A high speed digital mobile communication air interface for professional users. IEEE Vehicular Technology Magazine, vol.1, no.4, pp.32-42, Dec. 2006. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4149624&isnumber=4148614> (consultada el 29 junio 2019).
- [NOU2007] Nouri, M.; Ball, D.; Rayne, M.; Lottici, V.; Reggiannini, R.; Carta, M. TEDS: a High Speed Digital Mobile Communication Air Interface for Professional Users Part I: Overview of Physical Layer. 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC2007- Spring), pp.959-963, 22-25 April 2007. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4212634> (consultada el 29 junio 2019).
- [NOU2009] Nouri, M. Selection of a Broadband technology for TETRA. Chairman of ETSI TC TETRA Working Group 4 (High-Speed Data). 2009.
- [OLI2014] Oliveira, A.; Simplício, P.; Belfo, J. PPDR's Technological Gaps. PPDR-TC Project, FP7-SEC-2012.5.2-1, Versión 2, Abril 2014.
- [ONA2011] Onali, T.; Sole, M.; Giusto, D.D. DMR networks for health emergency management: A case study. 2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), pp.2151-2156, 4-8 July 2011. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5982867&isnumber=5982406> (consultada el 29 junio 2019).

- [PAR2002] Pardo, D., del Rey, D., Juan-Llácer, L., Análisis de métodos deterministas para el cálculo de pérdidas por propagación a 390 MHz con corrección morfográfica, XVII Simposium Nacional de la Unión Internacional de Radio URSI, 2002, Alcalá de Henares.
- [PAR2004] Pardo, D., del Rey, D., Juan-Llácer, L., Optimización del número de estaciones base de una red PMR trunking digital, XIX Simposium Nacional de la Unión Internacional de Radio URSI, 2004, Madrid.
- [PEL2011] Peltola, M. Evolution of Public Safety and Security Mobile Networks. Licentiate's Thesis, Department of Communications and Networking, School of Electrical Engineering, Aalto University, 22 April 2011. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3656/urn100448.pdf?sequence=1> (consultada el 29 junio 2019).
- [PEL2018] Peltola, M. Socioeconomic benefits as criteria in the valuation of broadband mobile services for public safety and security. Doctoral Dissertations 146/2018, Department of Communications and Networking, School of Electrical Engineering, Aalto University, 2018. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/33833/isbn9789526081182.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (consultada el 29 junio 2019).
- [PPD2015] Public Protection and Disaster Relief – Transformation Center Project. Web CORDIS. URL: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/108076/factsheet/en> (consultada el 21 de julio de 2019)
- [REY2000] del Rey, D. Planificación de sistemas trunking digital (TETRA) en entornos abiertos. Trabajo de investigación del Programa de doctorado “Comunicaciones”, Curso académico 1999/2000, Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, 2000.
- [REY2004] del Rey, D. Una red digital TETRA de cobertura regional permitirá interoperar a todos los servicios de emergencias. Revista BIT número 147, COIT, 2004. URL: <https://www.coit.es/sites/default/files/archivobit/pdf/murcia.pdf#pdfjs.action=download> (consultada el 29 junio 2019).
- [REY2019] del Rey, D., Juan-Llácer, L. and Rodríguez, J.-V., Radio Planning Considerations in TETRA to LTE Migration for PPDR Systems: A Radioelectric Coverage Case Study, Applied Sciences, 2019, 9, 250; doi:10.3390/app9020250. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/2/250> (consultada el 25 julio 2019).
- [ROU2013] Rouil, R.; Izquierdo, A.; Souryal, M.; Gentile, C.; Griffith, D.; Golmie, N. Nationwide safety. Nationwide modeling for broadband networks services. IEEE Veh. Tech. Mag., 2013, June, pp.83–91. URL:

- [https://ws680.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=912716](https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=912716) (consultada el 29 junio 2019).
- [RSC2011] RSCOM11-19: Radio Spectrum Committee Working Document – Summary report from the EU workshop on “The future of PPDR services in Europe”. European Commission, 8 April 2011.
- [SCF2014] SCF Associates Ltd. Use of commercial mobile networks and equipment for mission-critical high-speed broadband communications in specific sectors (SMART 2013/0016). European Commission, 2014. URL: <https://ec.europa.eu/digital-agenda/en/news/use-commercial-mobile-networks-and-equipment-mission-critical-high-speed-broadband> (consultada el 29 junio 2019).
- [SEA2017] Secretaría de Estado para el Avance Digital. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF): Notas de utilización nacional (UN) actualizadas conforme a la Orden ETU/1033/2017, de 25 de octubre, por la que se aprueba el CNAF (BOE 27/10/2017). URL: <https://avancedigital.gob.es/espectro/CNAF/notas-UN-2017.pdf> (consultada el 29 junio 2019).
- [TCC2009] TCCA. TETRA networks around the world. URL: <https://tcca.info/broadband/tetra-networks-around-the-world/> (consultada el 29 junio 2019).
- [TCC2016] TCCA. A review of the Spectrum Status for Broadband PPDR in Europe. July 2016. URL: [https://tcca.info/documents/2016-july\\_ccbg\\_review\\_spectrum\\_status\\_for\\_broadband\\_ppdr\\_europe.pdf/](https://tcca.info/documents/2016-july_ccbg_review_spectrum_status_for_broadband_ppdr_europe.pdf/) (consultada el 17 agosto 2019).
- [TCC2017] TCCA. 4G and 5G for Public Safety. Technology Options. March 2017. URL: [https://tcca.info/documents/2017-march\\_tcca\\_4g\\_and\\_5g\\_for\\_public\\_safety.pdf/](https://tcca.info/documents/2017-march_tcca_4g_and_5g_for_public_safety.pdf/) (consultada el 17 agosto 2019).
- [TCC2019a] TCCA White Paper. PPDR Roadmap for evolution from LMR/PMR to 4G/5G. January 2019. URL: <https://tcca.info/documents/january-2019-ppdr-broadband-roadmap.pdf/> (consultada el 17 agosto 2019).
- [TCC2019b] TCCA White Paper. Public Safety prioritisation on commercial networks. June 2019. URL: [https://tcca.info/documents/2019-June\\_TCCA\\_Public\\_Safety\\_Prioritisation.pdf/](https://tcca.info/documents/2019-June_TCCA_Public_Safety_Prioritisation.pdf/) (consultada el 17 agosto 2019).
- [VEL2005] Velez, F.J.; Carvalho, V.; Santos, D.; Marcos, R.P.; Costa, R.; Sebastiao, P.; Rodrigues, A. Planning of an IEEE 802.16e Network for Emergency and Safety Services. 3G and Beyond, 2005 6th IEEE International Conference on 3G and Beyond, pp.1-5, 7-9 Nov. 2005. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4222834> (consultada el 29 junio 2019).

- [VEL2006] Velez, F.J.; Carvalho, V.; Santos, D.; Marcos, R.P.; Costa, R.; Sebastiao, P.; Rodrigues, A. Aspects of cellular planning for emergency and safety services in mobile WiMax networks. *Wireless Pervasive Computing*, 2006 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing, pp. 6 pp., 16-18 Jan. 2006. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1613643&isnumber=33870> (consultada el 29 junio 2019).
- [VIN2014] Vinkvist, J.; Pesonen, T.; Peltola, M. Finland's 5 steps to critical broadband. *RadioResource International*, Quarter 4 - 2014.
- [VOG1982] Vogler, L.E. An attenuation function for multiple knife-edge diffraction. *Radio Sci.*, 1982, vol. 17, Dec, pp. 1541–1546.
- [WAL1988] Walfisch, J.; Bertoni, H.L. A theoretical model of UHF propagation in urban environments. *IEEE Trans. Antenn. Propag.*, 1988, vol. 36, pp. 1788–1796.
- [WMA2016] *Wireless Magazine*: Mission critical PTT over LTE standard completed in time for Release 13. 1 April 2016.