



---

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN

ESCUELA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

MEDICIÓN DE LAS  
RADIACIONES NO IONIZANTES  
DE LA TELEFONÍA MÓVIL

Proyecto Final Integrador  
de INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

Trabajo presentado por:

Luis Abanto

Tutor: Carlos Canal

2018



---

# Resumen

El presente trabajo es un estudio sobre radiaciones no ionizantes (RNI) en el ámbito de las comunicaciones celulares móviles y su aplicación práctica en la medición de las mismas, con un caso específico en el campus de nuestra Universidad en la localidad de San Martín.

Para ello desarrollaremos en primer término el marco teórico de las RNI, desde el espectro radioeléctrico, radiación electromagnética, teoría de antenas, hasta las radiaciones no ionizantes en sí mismas.

En segundo lugar abordaremos los sistemas de telefonía celular móvil dado que nuestro trabajo abarcará el espectro y las radiaciones en ese campo. En particular estudiaremos los fundamentos de la telefonía móvil, arquitecturas, tecnologías, antenas, cerrando con la asignación de frecuencias para los sistemas actualmente implementados en nuestro país.

Luego recorreremos la normativa vigente de las RNI a nivel mundial, y las establecidas por la regulación nacional. Más adelante, en base al instrumental y equipo de medición con el que cuenta el Laboratorio de Medición y Análisis Radioeléctrico (MARE), de la Escuela de Ciencia y Tecnología de la Universidad, implementaremos los procesos y procedimientos de medición en campo.

El caso específico será luego la medición en el Campus Miguelete, donde nos centraremos en dos radiobases. La primera un conjunto de nueve antenas sobre el techo del Instituto de Investigaciones Biotecnológicas (IIB), ubicada en centro del campus, que corresponde a una radiobase con 3 sectores de 120° con tecnologías: 2G-GSM, 3G-UMTS y 4G-LTE. La segunda un monoposte (wicap) sobre la calle Rodríguez Peña 2975, en el límite Este del Campus, de tecnología 3G-UMTS y 4G-LTE.

Finalmente contrastaremos los resultados de las mediciones en campo con la normativa y arribaremos a conclusiones sobre el estado de situación de las radiaciones no ionizantes en nuestro Campus.



---

# Abstract

The present work is a research on non-ionizing radiation (RNI) in the field of mobile cellular communications and its practical application in the measurement of them, with a specific case on the campus of our University in the San Martín locality.

To do this, we will first develop the theoretical framework of the NIR, from the radio spectrum, electromagnetic radiation, antenna theory, to non-ionizing radiation itself. Secondly, we will address mobile cellular telephony systems since our work will cover the spectrum and radiation in that field. In particular we will study the fundamentals of mobile telephony, architectures, technologies, mobile phone antennas, closing with the allocation of frequencies for the systems currently implemented in our country.

Then we will review the current regulations of the RNI worldwide, and those established by the national regulation. Later on, based on the instruments and measurement equipment that we have in the Radioelectric Measurement and Analysis Laboratory (MARE), of the School of Science and Technology of the University, we will implement the processes and measurement procedures in the field.

The specific case will then be the measurement in the Campus Miguelete, where we will focus on two radiobases. The first a set of nine antennas on the roof of the Institute of Biotechnological Research (IIB), in the center of the campus, which corresponds to a radiobase with 3 sectors of  $120^\circ$  with technologies: 2G-GSM, 3G-UMTS and 4G-LTE. The second is a monopost (wicap) on Rodriguez Peña Street, height 2975, on the eastern edge of the Campus, with 3G-UMTS and 4G-LTE technology.

Finally, we will contrast the results of the measurements in the field with the regulations and we will arrive at conclusions about the status of the non-ionizing radiation in our Campus.



---

# Agradecimientos

Este trabajo quiero dedicárselo a mi madre, Felicitas, ella que siempre desde muy chico me enseñó los valores y el respeto por los demás. Me motivó y apoyó siempre para que pueda terminar mis estudios. También quiero dedicarlo a mi familiares y amigos, que siempre estuvieron ahí bancándome en todo. A mi universidad, que siempre fue como mi segunda casa. Por ultimo, a mí mismo, que desde chico siempre sentí la pasión por la tecnología, la electrónica y las telecomunicaciones, formando parte de mi vida. Y el final de esta etapa solo representa el primer escalón de mi vida profesional.

Quiero agradecer a mi tutor Carlos Canal, por ayudarme a elegir el tema del proyecto, el cual fue desarrollado bajo su dirección y supervisión. A todo el equipo MARE, y formar parte de un grato ambiente laboral, con excelentes profesionales. Adquirir nuevos conocimientos y experiencias en torno a la formación de mi carrera, y agradecer a la Universidad por permitirme esa oportunidad.

Agradecer a todo el equipo de docentes y compañeros de estudio de mi carrera, que durante todos estos años compartieron conmigo largas horas de estudio, con mucho esfuerzo y dedicación pasando por lindas anécdotas y que guardare en mi memoria.



---

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>19</b>
<b>1. Radiaciones no Ionizantes</b>	<b>23</b>
1.1. El espectro radioeléctrico . . . . .	23
1.1.1. Bandas de frecuencia . . . . .	24
1.2. Radiación electromagnética . . . . .	26
1.2.1. Densidad de potencia e intensidad de campo . . . . .	26
1.2.2. Impedancia característica del espacio libre . . . . .	27
1.2.3. Perdidas de la señal en el espacio libre . . . . .	27
1.3. Antenas . . . . .	29
1.3.1. Parámetros de las antenas . . . . .	30
1.3.2. Tipos de Antena . . . . .	36
1.4. Radiación no ionizante . . . . .	38
1.4.1. Fuentes de radiación no ionizante . . . . .	39
1.4.2. Efectos de las RNI . . . . .	40
1.4.3. Recomendaciones para limitar exposición al CEM . . . . .	42
1.4.3.1. Exposición ocupacional y poblacional . . . . .	43
1.4.3.2. Restricciones básicas para la exposición a CEM: . .	43
1.4.3.3. Niveles de referencia para exposición a CEM: . .	45
1.4.4. Límites regulados para la Argentina . . . . .	46
<b>2. Telefonía Celular Móvil</b>	<b>49</b>
2.1. Redes y Sistemas de Comunicación Móvil . . . . .	49
2.2. Técnicas usadas en la comunicación móvil . . . . .	50
2.2.1. Técnicas de duplexación . . . . .	50
2.2.2. Técnicas de multiacceso . . . . .	53
2.2.3. Técnicas de modulación . . . . .	58

2.3.	Fundamentos de la telefonía celular móvil . . . . .	60
2.3.1.	Principios de los Sistemas Celulares . . . . .	61
2.3.2.	Geometría de los Sistemas Celulares . . . . .	63
2.3.3.	Arquitectura de los Sistemas Celulares . . . . .	66
2.3.3.1.	Arquitectura general de los sistemas 3GPP . . . . .	68
2.4.	Tecnologías para la telefonía celular móvil . . . . .	70
2.4.1.	1 <sup>ra</sup> Generación de Telefonía Móvil . . . . .	70
2.4.2.	2 <sup>da</sup> Generación de Telefonía Móvil (2G) . . . . .	71
2.4.3.	3 <sup>ra</sup> Generación de Telefonía Móvil (3G) . . . . .	74
2.4.4.	4 <sup>ta</sup> Generación de Telefonía Móvil (4G) . . . . .	76
2.5.	Antenas de telefonía celular móvil . . . . .	79
2.5.1.	Tipos de antenas . . . . .	79
2.5.2.	Diversidad de espacio y polarización . . . . .	80
2.5.3.	Polarización de las antenas . . . . .	81
2.5.4.	Haz de Antena . . . . .	82
2.6.	La telefonía móvil Argentina . . . . .	84
2.6.1.	Asignación de servicios . . . . .	87
2.6.2.	Bandas de frecuencia . . . . .	88
2.6.2.1.	Banda 850 . . . . .	88
2.6.2.2.	Banda 1900 . . . . .	89
2.6.2.3.	Banda 4 (AWS ó 1700) . . . . .	91
2.6.2.4.	Banda 28 (APT o 700) . . . . .	92
2.6.2.5.	Banda 7 (2600) . . . . .	93
<b>3.</b>	<b>Normativa y Regulación para las RNI</b>	<b>95</b>
3.1.	Organización Mundial de la Salud . . . . .	95
3.2.	Unión Internacional de Telecomunicaciones . . . . .	96
3.3.	Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes . . . . .	98
3.4.	Comité Electrotécnico Internacional . . . . .	99
3.5.	Comisión Federal de Comunicaciones . . . . .	99
3.6.	Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas . . . . .	101
3.7.	Regulación Nacional . . . . .	102
3.7.1.	Resolución 202/95 MSyAS . . . . .	102
3.7.2.	Resolución 530/00 SECOM . . . . .	103
3.7.3.	Resolución 3690/04 ex CNC . . . . .	104

---

3.7.4.	Resolución 87/13 OPDS . . . . .	105
3.7.5.	Resolución 1994/15 MS . . . . .	106
<b>4.</b>	<b>Metodología e Instrumental de Medición</b>	<b>107</b>
4.1.	Definiciones previas . . . . .	107
4.2.	Método de predicción . . . . .	109
4.3.	Método de medición . . . . .	110
4.3.1.	Alcance y evaluación del entorno . . . . .	110
4.3.2.	Selección de puntos . . . . .	110
4.3.3.	Precauciones de seguridad . . . . .	111
4.3.4.	Instrumental de Medición . . . . .	111
4.3.4.1.	Instrumental de banda ancha: . . . . .	111
4.3.4.2.	Instrumental de banda angosta: . . . . .	112
4.3.4.3.	Instrumental sintonizable de banda ancha: . . . . .	113
4.3.4.4.	Calibración de los instrumentos . . . . .	113
4.3.4.5.	Incertidumbre de los instrumentos . . . . .	114
4.3.5.	Protocolo de evaluación de las RNI . . . . .	114
4.3.5.1.	Medición de inmisión . . . . .	114
4.3.5.2.	Medición de emisión . . . . .	115
4.3.6.	Informe de medición . . . . .	116
<b>5.</b>	<b>Procedimientos para la Medición</b>	<b>119</b>
5.1.	Planificación y evaluación del entorno . . . . .	119
5.2.	Método utilizado y selección de puntos . . . . .	120
5.3.	Instrumental utilizado . . . . .	120
5.3.1.	Características del equipo . . . . .	121
5.3.2.	Forma de medición TSEMF . . . . .	122
5.3.3.	Opciones de Medición RFEX . . . . .	122
5.4.	Configuración del instrumental . . . . .	123
5.4.1.	Configuración del Packet . . . . .	124
5.4.1.1.	Analizador de espectro . . . . .	125
5.4.1.2.	Frecuencias de Medida . . . . .	126
5.4.1.3.	Adquisición de datos . . . . .	127
5.5.	Parámetros de medición establecidos . . . . .	129

---

<b>6. Medición en Campo</b>	<b>133</b>
6.1. Normativa de Regulación . . . . .	133
6.2. Lugar de medición . . . . .	134
6.3. Montaje del instrumental . . . . .	135
6.4. Medición en campo . . . . .	136
6.4.1. Sitio 1 . . . . .	136
6.4.1.1. Sector A: . . . . .	138
6.4.1.2. Sector B: . . . . .	139
6.4.1.3. Sector C: . . . . .	139
6.4.2. Sitio 2 . . . . .	140
6.5. Medición de radiobase instalada en el IIB . . . . .	142
6.5.1. Equipos instalados . . . . .	142
6.5.2. Fotos de la instalación . . . . .	143
6.5.3. Características de los sistemas irradiantes: . . . . .	147
6.5.4. Medición de las RNI: . . . . .	149
<b>7. Análisis y Presentación de Resultados</b>	<b>153</b>
7.1. Resultados de la medición de inmisión . . . . .	153
7.1.1. Resultados del Sitio 1 . . . . .	155
7.1.2. Resultados del Sitio 2 . . . . .	157
7.2. Caso particular: Análisis por tecnologías . . . . .	158
7.2.1. Aporte RNI por tecnología . . . . .	158
7.2.2. Análisis del espectro . . . . .	162
<b>Conclusiones</b>	<b>167</b>
<b>APÉNDICE:</b>	
<b>Informe de Radiaciones no Ionizantes de la Telefonía Móvil</b>	<b>173</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>186</b>

---

# Índice de figuras

1.1. Nomenclatura de las bandas de frecuencia . . . . .	25
1.2. Atribución de bandas de frecuencia por Regiones . . . . .	26
1.3. Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas . . . . .	28
1.4. Funcionalidad básica de una antena . . . . .	29
1.5. Modelo de Henrich Hertz . . . . .	29
1.6. Radiación isotrópica en un espacio homogéneo . . . . .	30
1.7. Radiación tridimensional de una antena dipolo . . . . .	31
1.8. Explicación de las coordenadas esféricas . . . . .	31
1.9. Patrón de Radiación Horizontal(izq) y Vertical(der) para un dipolo	32
1.10. Patrón de radiación en coordenadas cartesianas . . . . .	32
1.11. Otros parámetros del patrón de radiación . . . . .	33
1.12. Antena Dipolo y su patrón de radiación . . . . .	36
1.13. Antena Yagi y su patrón de radiación . . . . .	37
1.14. Tipos de radiaciones en el espectro . . . . .	38
1.15. Fuentes RNI producidas artificialmente . . . . .	40
1.16. Factores de seguridad para la exposición a las RNI . . . . .	44
1.17. Tipos de restricciones establecidas . . . . .	44
1.18. Niveles de referencia para exposición a los CEM . . . . .	45
2.1. Sistemas de Comunicaciones Móviles . . . . .	50
2.2. Sistemas símplex y dúplex . . . . .	51
2.3. Sistema TDD . . . . .	51
2.4. Distribución del tráfico en TDD . . . . .	52
2.5. Sistema FDD . . . . .	52
2.6. Distribución de sub-bandas FDD . . . . .	53
2.7. Técnica de FDMA . . . . .	55
2.8. Técnica de TDMA . . . . .	55

2.9. Sistema MIMO utilizando técnicas de SDMA . . . . .	56
2.10. Técnica de CDMA . . . . .	58
2.11. Modulación en GMSK . . . . .	60
2.12. División y reutilización en sistemas celulares . . . . .	62
2.13. Retícula de planificación con célula omnidireccional . . . . .	64
2.14. Cobertura sectorizada con antenas directivas . . . . .	65
2.15. Disposición 7/21 . . . . .	66
2.16. Arquitectura genérica de un sistema celular . . . . .	67
2.17. Arquitectura en los sistemas 3GPP . . . . .	68
2.18. Primer teléfono móvil de la historia . . . . .	72
2.19. Nokia 1011. Primer teléfono GSM producido en masa . . . . .	73
2.20. Representación de Carrier Agregacion con dos bandas de 10Mhz . . . . .	78
2.21. Panorama general de la instalación de una estación base . . . . .	79
2.22. Antena omnidireccional y patrón de radiación . . . . .	79
2.23. Antena sectorizada y patrón de radiación . . . . .	80
2.24. Diversidad espacial en la recepción . . . . .	80
2.25. Diversidad de polarización en la recepción . . . . .	81
2.26. Diversidad por polarización + duplexor: (a)doble y (b)X-Pol . . . . .	82
2.27. Forma del haz en una antena típica de estación base . . . . .	83
2.28. Inclinación de haz debido al downtilt . . . . .	84
2.29. Banda 850 Downlink . . . . .	89
2.30. Banda 1900 Downlink . . . . .	90
2.31. Banda 4 Downlink . . . . .	92
2.32. Banda 28 Downlink . . . . .	93
2.33. Banda 7 Downlink . . . . .	94
3.1. Gráfica de los niveles de exposición del MSyAS . . . . .	103
4.1. Distancia para campo cercano (reactivo y radiante) y campo lejano	108
4.2. Instrumento de medición en banda ancha . . . . .	112
4.3. Instrumento de medición en banda ancha . . . . .	112
4.4. Comparación de instrumentos de banda ancha . . . . .	113
4.5. Instrumentos sintozables en banda ancha . . . . .	113
5.1. Instrumental para medir RNI en campo . . . . .	121
5.2. Medición del packet: A)Único o B)Conjunto . . . . .	124
5.3. Modos de espaciado para el ancho del canal . . . . .	127

---

5.4. Canales por sub-packet: A)Span=5MHz, B)Span=2MHz . . . . .	128
5.5. Configuración de canales para GSM 850/1900 . . . . .	130
5.6. Configuración del packet GSM 850 . . . . .	130
5.7. Configuración de canales para UMTS Banda II/V . . . . .	131
5.8. Configuración del packet UMTS Banda II . . . . .	131
5.9. Configuración de canales para LTE Banda 4/28 . . . . .	132
5.10. Configuración del packet LTE Banda 4 . . . . .	132
6.1. Fotos de la Sede de la UNSAM . . . . .	134
6.2. Croquis del Campus con la ubicación de los emplazamientos . . .	134
6.3. Montaje del instrumental utilizado para la medición . . . . .	135
6.4. Fotos del sitio de medición mostrando los sistemas irradiantes . .	136
6.5. Ubicación gmaps del emplazamiento del sitio 1 . . . . .	136
6.6. Entorno 1 del sitio de medición . . . . .	137
6.7. Entorno 2 del sitio de medición . . . . .	137
6.8. Croquis del sector 1A con la ubicación de puntos . . . . .	138
6.9. Croquis del sector 1B con la ubicación de puntos . . . . .	139
6.10. Croquis del sector 1C con la ubicación de puntos . . . . .	139
6.11. Entorno de medición en el sitio 2 . . . . .	140
6.12. Ubicación gmaps del emplazamiento del sitio 2 . . . . .	141
6.13. Fotos del emplazamiento en el sitio 2 . . . . .	141
6.14. Croquis del sitio con los puntos de medición . . . . .	142
6.15. Diagrama general del la instalación de una radiobase . . . . .	143
6.16. Conexiónados entre equipos RRU y antenas . . . . .	143
6.17. Cabina de transmisión alimentación y baterías . . . . .	144
6.18. Equipos RRU y Antenas utilizados en la instalación . . . . .	144
6.19. Fotos de la Instalación del emplazamiento sector A . . . . .	145
6.20. Fotos de la Instalación del emplazamiento sector B . . . . .	146
6.21. Fotos de la Instalación del emplazamiento sector C . . . . .	146
6.22. Dimensiones, conectores y diagrama de radiación . . . . .	147
6.23. Dimensiones, conectores y diagrama de radiación . . . . .	148
6.24. Dimensiones, conectores y diagrama de radiación . . . . .	149
6.25. Medición RNI en el emplazamiento sector A . . . . .	149
6.26. Medición RNI en el emplazamiento sector B . . . . .	150
6.27. Medición RNI en el emplazamiento sector C . . . . .	150
6.28. Croquis de la terraza del IIB con la ubicación de puntos . . . . .	151

---

7.1. Niveles MEP establecidos para la telefonía móvil . . . . .	154
7.2. Espectro en la banda downlink GSM/UMTS 850MHz . . . . .	163
7.3. Espectro en la banda downlink GSM/UMTS 1900MHz . . . . .	163
7.4. Espectro en la banda downlink LTE 700MHz . . . . .	164
7.5. Espectro en la banda downlink LTE 2100MHz . . . . .	165
7.6. Croquis del sector A con los puntos de medición . . . . .	178
7.7. Croquis del sector B con los puntos de medición . . . . .	178
7.8. Croquis del sector C con los puntos de medición . . . . .	178
7.9. Límites de exposición para frecuencias de telefonía móvil . . . . .	180
7.10. Entorno de medición del emplazamiento . . . . .	181
7.11. Entorno de medición del emplazamiento . . . . .	181
7.12. Fotos del sitio de medición mostrando los sistemas irradiantes . . . . .	182
7.13. Fotos de la Instalación del emplazamiento sector C . . . . .	182
7.14. Instrumental de medición . . . . .	183
7.15. Certificado de calibración del analizador de espectro ETH . . . . .	184
7.16. Certificado de calibración de la antena isotrópica TSEMF-B1 . . . . .	185

---

# Índice de cuadros

1.1. Restricciones básicas para exposición a los CEM . . . . .	45
1.2. Nivel de referencia ocupacional . . . . .	46
1.3. Nivel de referencia poblacional . . . . .	46
1.4. Límites establecidos para la máxima exposición poblacional . . . .	47
2.1. Sistemas móviles de primera generación . . . . .	71
2.2. Sistemas móviles de segunda generación . . . . .	72
2.3. Sistemas móviles de tercera generación . . . . .	76
2.4. Evolución de HSPA . . . . .	76
2.5. Sistemas móviles de cuarta generación . . . . .	77
2.6. Asignación de servicios para el territorio nacional . . . . .	87
2.7. Banda 850 para 2G/3G . . . . .	88
2.8. Servicios Móviles de 2G/3G . . . . .	88
2.9. Banda 1900 2G/3G . . . . .	89
2.10. Servicios Móviles 2G/3G . . . . .	90
2.11. Banda 4 para 4G . . . . .	91
2.12. Servicios Móviles LTE en banda 4 . . . . .	91
2.13. Banda 28 para 4G . . . . .	92
2.14. Servicios Móviles LTE en banda 28 . . . . .	92
2.15. Banda 7 para 4G . . . . .	94
2.16. Servicios Móviles LTE en banda 7 FDD . . . . .	94
3.1. Niveles de exposición establecidos por el MSyAS . . . . .	103
6.1. Especificaciones de la antena ADU4517R3 . . . . .	147
6.2. Especificaciones de la antena ATR4518R13 . . . . .	148
6.3. Especificaciones de la antena AMB4520R0 . . . . .	148
6.4. Valores medidos en el emplazamiento IIB . . . . .	151

---

7.1. Evaluación de puntos del Sitio 1, sector A . . . . .	155
7.2. Evaluación de puntos del Sitio 1, sector B . . . . .	156
7.3. Evaluación de puntos del Sitio 1, sector C . . . . .	156
7.4. Evaluación de puntos del Sitio 2 . . . . .	157
7.5. Niveles de campo E por banda . . . . .	158
7.6. Aporte de las RNI al nivel total . . . . .	160
7.7. Campo E Promedio vs Pico . . . . .	161
7.8. Relación de campo E con la distancia . . . . .	162
7.9. Evaluación de puntos en el sector A del emplazamiento . . . . .	176
7.10. Evaluación de puntos en el sector B del emplazamiento . . . . .	176
7.11. Evaluación de puntos en el sector C del emplazamiento . . . . .	177
7.12. Tabla de límites de máxima exposición poblacional . . . . .	180

---

# Introducción

Los sistemas de comunicaciones inalámbricos se han desarrollado vertiginosamente en la última década. Desde los sistemas de radiodifusión tradicionales, los sistemas de transmisión de datos inalámbricos (WiFi, WiMAX, NB-IOT, entre otros) y los sistemas de comunicaciones móviles de voz y datos, han experimentado en Argentina como en todo el mundo una expansión extraordinaria.

La telefonía móvil terrestre actualmente es el principal acceso a las comunicaciones móviles, en Argentina ha evolucionado vertiginosamente en las últimas dos décadas, y este creciente avance en comunicaciones móviles requiere de instalaciones de nuevos equipos y antenas de telefonía móvil, para garantizar una mejor calidad de servicio y una mayor cobertura en el tráfico de los datos para todos los usuarios.

Este aumento masivo de las comunicaciones móviles exige acciones responsables por parte de los gobiernos para prevenir los posibles riesgos en la salud, a causa de exposiciones a las radiaciones que emiten estas mismas. Por eso, es importante medir y realizar el monitoreo continuo de sus sistemas, para verificar los niveles de exposición y contrastar con los límites establecidos por la regulación de las radiaciones no ionizantes.

El presente trabajo es una investigación sobre radiaciones no ionizantes en el ámbito de las comunicaciones celulares móviles y su aplicación práctica en la medición de las mismas, con un caso específico en el campus de nuestra Universidad en la localidad de San Martín. Para ello desarrollaremos una serie de capítulos, con el fin de brindar los conocimientos necesarios para ir avanzando gradualmente hacia el tema central del proyecto, de medición en campo de radiaciones no ionizantes, aplicados al ámbito de la telefonía móvil.

El capítulo 1, Radiaciones no Ionizantes, reúne los conceptos de espectro radioeléctrico y radiación electromagnética, estudiando la asignación de las bandas de frecuencia para un uso eficiente del espectro, luego se presentarán conceptos

de campos electromagnéticos y los cambios que estos sufren al propagarse en el medio. Daremos una breve introducción a la teoría de antenas, nombrando sus principales parámetros y los tipos existentes. Finalmente cerraremos el capítulo con el tema de las radiaciones no ionizantes, estudiando las fuentes de radiación, los efectos que estas producen, conceptos de dosimetría y de restricciones básicas, presentando los límites de exposición en la República Argentina.

El capítulo 2, Telefonía Celular Móvil, reúne los conceptos de sistemas de comunicaciones móviles, estudiando técnicas de canalización, multiacceso y modulaciones existentes. Luego continuamos con la teoría de los sistemas de telefonía móvil, los fundamentos y características, arquitectura, tecnologías para la comunicación entre la red y servicios móviles. Siguiendo, abordaremos el estudio de las antenas y su propagación en su entorno. Finalmente cerraremos el capítulo estudiando el caso de Argentina, realizaremos un resumen de las licencias otorgadas y los servicios, divididos por áreas de explotación. Cerrando con la asignación de bandas y frecuencias para nuestro país.

El capítulo 3, Normativa y Regulación de las RNI, cita los principales organismos involucrados con la Regulación de las Radiaciones no Ionizantes a nivel mundial y sus principales aportes. Seguido estudiaremos la Regulación Nacional, para supervisar y garantizar el cumplimiento de la Normativa y establecer los procedimientos para la Evaluación de las RNI.

El capítulo 4, Metodología e Instrumental de Medición, presenta los métodos aplicados para el cálculo de las RNI, el primero predictivo que es un cálculo teórico para estimar distancia y niveles a partir de los datos de ingeniería, y el segundo que se utiliza para la medición en campo. Ahondaremos en este último, explicando el método e instrumental que se utiliza según sea el caso. También explicaremos el Protocolo de Evaluación de las RNI utilizado para la medición en campo.

El capítulo 5, Procedimiento para la Medición, explica los procedimientos previos a la medición en campo. Se elegirá un método de medición, y se presentará el instrumental utilizado, explicando sus características, modos y opciones de configuración, aplicado a la medición de la telefonía celular móvil.

El capítulo 6, Medición en Campo, contiene la implementación de la parte práctica del proyecto, se mostrará la información de los dos sitios visitados, dos emplazamientos distintos, el primero sectorizado, e interno al campus; y el segundo un emplazamiento omnidireccional, a 50 metros, sobre la vereda de acceso a

la universidad. Se mostrarán los parámetros configurados, el montaje del equipo de medición, la selección de puntos y los valores medidos para ambos casos.

El capítulo 7, Análisis y Presentación de Resultados, contiene el procesamiento de las mediciones realizadas. Se presentarán los niveles de espectro y tecnologías en las bandas medidas. Analizaremos los valores y los contrastaremos con los límites máximos establecidos por la Regulación en el país. Con el fin de garantizar la seguridad y bienestar de la población. Además se presentará un informe tipo acorde a las pautas del Protocolo Nacional de Evaluación de las RNI.

Finalmente arribaremos a conclusiones sobre el estado de situación de las radiaciones no ionizantes en nuestro Campus, de nuestra situación respecto a los estándares regulatorios.



---

# Capítulo 1

## Radiaciones no Ionizantes

En este capítulo desarrollaremos el marco teórico de las RNI comenzando por el espectro radioeléctrico donde estudiaremos las bandas de frecuencias, luego continuaremos con la radiación electromagnética donde trataremos los temas de densidad de potencia e intensidad de campo y las pérdidas que estas señales sufren en el espacio libre [6, 12]. Haremos una breve introducción a la teoría de las antenas, caracterizándolas mediante la definición de sus parámetros y los tipos existentes [2, 9]. Por último abordaremos el tema de las radiaciones no ionizantes, describiendo las fuentes de radiación y sus posibles efectos a la exposición tanto los térmicos como no térmicos. Estudiaremos la dosimetría y los límites expuestos aplicado al campo de las RNI, pasando por las restricciones básicas y los niveles de referencia utilizados. Luego terminamos comparando contra los límites máximos de exposición.

### 1.1. El espectro radioeléctrico

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro.

La radiación electromagnética puede manifestarse de diversas maneras como calor radiado, luz visible, rayos X o rayos gamma. A diferencia de otros tipos de onda, como el sonido, que necesitan un medio material para propagarse, la radiación electromagnética se puede propagar en el vacío.

Existen multitud de fenómenos físicos asociados con la radiación electromagnética que pueden ser estudiados de manera unificada, como la interacción de ondas

electromagnéticas y partículas cargadas presentes en la materia.

Entre estos fenómenos están, por ejemplo, la luz visible, el calor radiado, las ondas de radio y televisión o ciertos tipos de radiactividad por citar algunos de los fenómenos más destacados. Todos estos fenómenos consisten en la emisión de radiación electromagnética en diferentes rangos de frecuencias, siendo el rango de frecuencia o longitud de onda el más usado para clasificar los diferentes tipos de radiación electromagnética. La ordenación de los diversos tipos de radiación electromagnética por frecuencia recibe el nombre de espectro electromagnético. Los sistemas de radiocomunicación utilizan el espectro radioeléctrico, que comprende las bandas de frecuencias útiles para los servicios de radiocomunicación y que se designan por números enteros, en orden creciente. Dado que la unidad de frecuencia es el Hertz (Hz), abarca desde frecuencias inferiores a 1 kHz, hasta alrededor de 300 GHz.

### 1.1.1. Bandas de frecuencia

Una banda de radiofrecuencia es una pequeña sección de frecuencias del espectro radioeléctrico, en la que los canales de comunicación se utilizan para un mismo propósito.

Para evitar interferencias y permitir un uso eficiente del espectro, se colocan servicios similares en la misma banda. Por ejemplo, radiodifusión, telefonía móvil o radionavegación, se colocan en rangos de frecuencias no solapados.

Cada una de estas bandas tiene un plan de banda que determina cómo se utiliza y se comparte para evitar interferencias entre canales y especificar el protocolo de comunicación que permita la comunicación entre el emisor y el receptor.

El espectro de **radiofrecuencias (RF)** que comprende de los 3 Hz hasta los 300 GHz es utilizado para los servicios de radiodifusión, televisión, comunicaciones móviles y fijas de distancias cortas, medianas y largas, radio-enlaces punto a punto o punto multipunto.

El rango de las **microondas (MO)** está incluido en las bandas de radiofrecuencia, y se consideran a partir de 1 GHz en adelante. Por encima de los 300 GHz, la absorción de la radiación electromagnética por la atmósfera es tan grande que es, de hecho, opaca hasta que se convierte en transparente, de nuevo cerca del infrarrojo y en los rangos de frecuencias visuales.

El espectro de las **audiofrecuencias (AF)**, se encuentra entre 20 Hz y 20 kHz aproximadamente, se tratan de ondas de presión, como el sonido, por lo que se

desplazan a la velocidad del sonido sobre un medio material. Mientras que las ondas de radiofrecuencia, al ser ondas electromagnéticas, se desplazan a la velocidad de la luz y sin necesidad de un medio material.

Los sistemas de comunicaciones ópticas funcionan a frecuencias superiores, correspondientes al espectro visible y en el infrarrojo. Las principales bandas del espectro radioeléctrico suelen definirse en términos de las longitudes de onda, según la designación de la UIT (Union Internacional de Telecomunicaciones), de la forma que se indica en la Figura 1.1.

Número de la banda	Símbolos (en inglés)	Gama de frecuencias (excluido el límite inferior, pero incluido el superior)	Subdivisión métrica correspondiente
-1		0,03-0,3 Hz	Ondas gigamétricas
0	ELF	0,3-3 Hz	Ondas hectomegamétricas
1		3-30 Hz	Ondas décamegamétricas
2		30-300 Hz	Ondas megamétricas
3	ULF	300-3 000 Hz	Ondas hectokilométricas
4	VLF	3-30 kHz	Ondas miriamétricas
5	LF	30-300 kHz	Ondas kilométricas
6	MF	300-3 000 kHz	Ondas hectométricas
7	HF	3-30 MHz	Ondas decamétricas
8	VHF	30-300 MHz	Ondas métricas
9	UHF	300-3 000 MHz	Ondas decimétricas
10	SHF	3-30 GHz	Ondas centimétricas
11	EHF	30-300 GHz	Ondas milimétricas
12		300-3 000 GHz	Ondas decimilimétricas
13		3-30 THz	Ondas centimilimétricas
14		30-300 THz	Ondas micrométricas
15		300-3 000 THz	Ondas decimicrométricas

Figura 1.1: Nomenclatura de las bandas de frecuencia

A su vez, la UIT dividió el planeta en tres regiones, en las cuales la distribución de las frecuencias para los distintos usos y servicios son similares para los países que integran una región determinada (Figura 1.2). La Región 1, está compuesta por Europa, África, Medio Oriente, Mongolia y las Repúblicas de la ex-Unión Soviética. La Región 2, en la que nos hallamos, son los países de América. La Región 3 es el resto del mundo, principalmente Asia y Oceanía. Además, también existen diversas legislaciones sobre la potencia máxima en la que se puede emitir para cada una de las bandas.

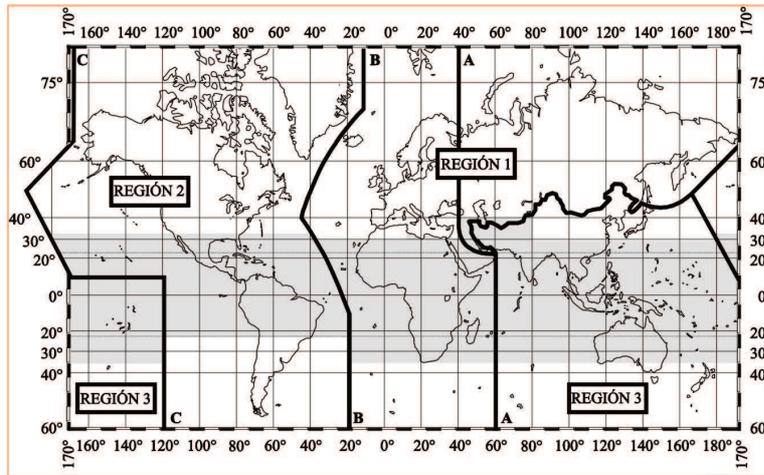


Figura 1.2: Atribución de bandas de frecuencia por Regiones

## 1.2. Radiación electromagnética

### 1.2.1. Densidad de potencia e intensidad de campo

Las ondas electromagnéticas representan el flujo de energía en la dirección de propagación. La rapidez con que la energía pasa a través de una superficie dada en el espacio libre se llama *densidad de potencia*. Por consiguiente, la densidad de potencia es la energía por unidad de tiempo y por unidad de área, y se suele expresar en watts por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). La intensidad de campo es la intensidad de los campos eléctrico y magnético de una onda electromagnética que se propaga por el espacio libre. La intensidad del campo eléctrico se suele expresar en volts por metro (V/m), y la del campo magnético en amperes por metro (A/m). La densidad de potencia es:

$$S = E \cdot H \quad [W/m^2] \quad (1.1)$$

siendo:

- $S$  = densidad de potencia [ $W/m^2$ ]
- $E$  = intensidad rms del campo eléctrico [ $V/m$ ]
- $H$  = intensidad rms del campo magnético [ $A/m$ ]

### 1.2.2. Impedancia característica del espacio libre

Las intensidades del campo eléctrico y magnético de una onda electromagnética en el espacio libre se relacionan a través de la impedancia característica (resistencia) del espacio vacío. La impedancia característica de un medio de transmisión sin pérdidas es igual a la raíz cuadrada de la relación de su permeabilidad magnética con su permitividad eléctrica. La ecuación de la impedancia característica del espacio libre,  $Z_0$ , es:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (1.2)$$

en la que:

- $Z_0$  = impedancia característica del espacio libre (ohms)
- $\mu_0$  = permeabilidad magnética del espacio libre,  $1,26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$
- $\epsilon_0$  = permitividad eléctrica del espacio libre,  $8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

Al sustituir valores en la Ecuación, se tiene:  $Z_0 = 377\Omega$ . Por consiguiente al aplicar la ley de Ohm se obtienen:

$$S = \frac{E^2}{377} \quad [W/m^2] \quad (1.3)$$

$$H = \frac{E}{377} \quad [A/m] \quad (1.4)$$

### 1.2.3. Pérdidas de la señal en el espacio libre

El espacio libre puede ser considerado como vacío y no se consideran pérdidas. Cuando las ondas electromagnéticas se encuentran en el vacío, se llegan a dispersar y se reduce la densidad de potencia, que es llamada “atenuación”. La atenuación se presenta tanto en el espacio libre como en la atmósfera terrestre. La atmósfera terrestre no se le considera vacío debido a que contiene partículas que pueden absorber la energía electromagnética y a este tipo de reducción de potencia se le llama “pérdidas por absorción” la cual no se presenta cuando las ondas viajan afuera de la atmósfera terrestre.

**Atenuación:** La atenuación es descrita matemáticamente por la **ley del cuadrado inverso** que describe cómo es que se reduce la densidad de potencia

con la distancia a la fuente. El campo electromagnético continuo se dispersa a medida que el frente de onda se aleja de la fuente, lo que hace que las ondas electromagnéticas se alejen cada vez más entre sí. En consecuencia, la cantidad de ondas por unidad de área es menor.

Cabe destacar que no se pierde ni se disipa nada de la potencia irradiada por la fuente a medida que el frente de onda se aleja, sino que el frente se extiende cada vez mas sobre un área mayor lo que hace una pérdida de potencia que se suele llamar atenuación de la onda. La atenuación de la onda se debe a la dispersión esférica de la onda, a veces se le llama atenuación espacial de la onda.

**Absorción:** La causa de la absorción de las ondas electromagnéticas al viajar por el aire, se debe a que no es vacío, sino que está formado por átomos y moléculas de distintas sustancias gaseosas, liquidas y sólidas. Estos materiales pueden absorber a las ondas electromagnéticas causando pérdidas por absorción. Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricas.

En caso de contar con lluvias intensas y neblina densa, las ondas electromagnéticas tienden a ser absorbidas en mayor proporción que cuando se encuentran en una atmósfera normal. En la Figura 1.3 se tiene la absorción como una atenuación en decibeles por kilómetro de una onda electromagnética en frecuencias de los 10 a 200  $GHz$  cuando se propaga en oxígeno y vapor de agua.

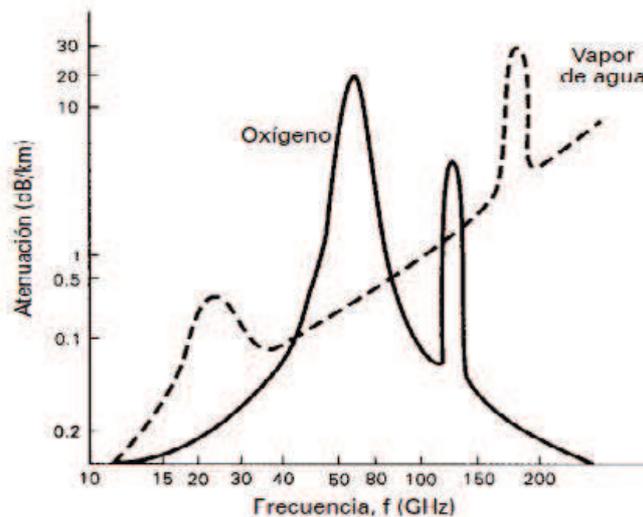


Figura 1.3: Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas

## 1.3. Antenas

Las antenas actúan como convertidores entre las ondas conducidas y las ondas electromagnéticas que se propagan libremente en el espacio (Figura 1.4). Su nombre proviene de la zoología, en la cual la palabra latina antenas se usa para describir las largas y finas antenas que poseen muchos insectos.

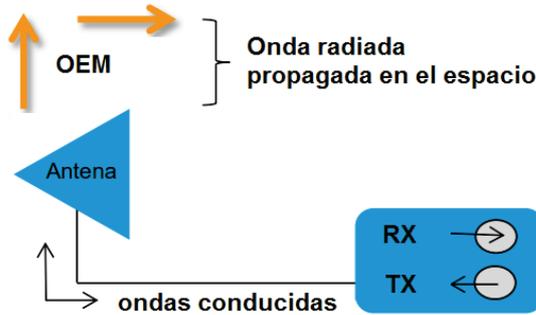


Figura 1.4: Funcionalidad básica de una antena

Las antenas más antiguas, como las utilizadas por Heinrich Hertz en 1888 durante sus primeros experimentos para demostrar la existencia de ondas electromagnéticas, en teoría y en la práctica no eran muy diferentes de un generador de RF. Puede derivarse de un circuito en paralelo que consta de un inductor y un capacitor. Si las placas del capacitor se doblaran, y el inductor se redujera a la inductancia del cable en sí, se termina con una antena dipolo como se muestra en la Figura 1.5.

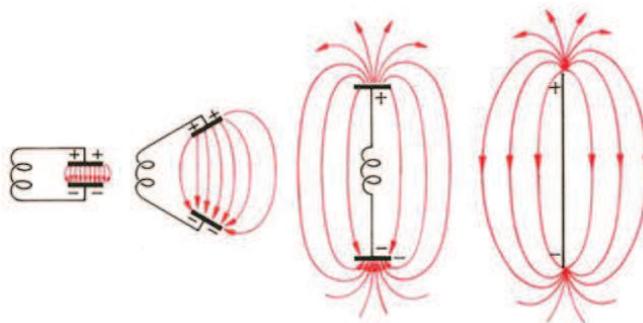


Figura 1.5: Modelo de Heinrich Hertz

La frecuencia en la que trabaja la antena fijará su tipo, como también sus características más significativas, teniendo en cuenta la proporción entre su longitud ( $l$ ) y la longitud de onda ( $\lambda = c/f$ ), donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $f$  la frecuencia.

### 1.3.1. Parámetros de las antenas

**Densidad de potencia [S]:** La antena imaginable más simple es el radiador isotrópico, que no existe en practica, pero hace un excelente modelo teórico. Un radiador isotrópico, es un punto adimensional en el espacio, genera ondas con frentes de ondas esféricos que se irradian uniformemente en todas las direcciones. Cuando el transmisor aplica una potencia (adaptada idealmente)  $P_S$  a la distancia  $r$ , este da lugar a la densidad de potencia de radiación (Figura 1.6)

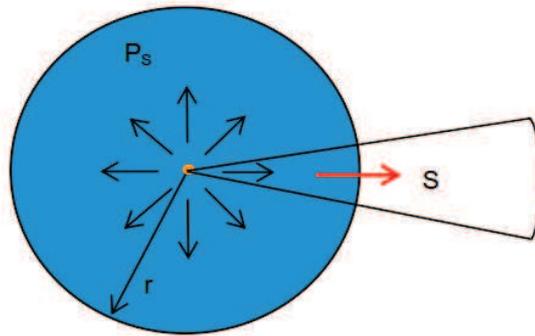


Figura 1.6: Radiación isotrópica en un espacio homogéneo

$$S = \frac{P_S}{4\pi r^2} \quad [W/m^2] \quad (1.5)$$

La densidad de potencia de radiación también se puede determinar en el campo lejano como el producto de la intensidad de campo eléctrico y magnético de acuerdo con la Ecuación 1.1 o sus equivalentes Ecuaciones 1.3 y 1.4.

**Diagramas de Radiación:** El comportamiento de radiación tridimensional de las antenas se describe por su diagrama de radiación (normalmente en el campo lejano). Como se explicó anteriormente, solo un radiador isotrópico exhibiría la misma radiación en cada dirección espacial, pero este radiador no puede implementarse para ninguna polarización especificada y, por lo tanto, es principalmente adecuado como modelo y estándar de comparación. Los dipolos y monopolos poseen directividad. Un dipolo eléctricamente corto en el espacio libre tiene un patrón de radiación tridimensional que se muestra en la Figura 1.7 con nulos en la dirección del eje de la antena.

Si bien el patrón de radiación es en realidad tridimensional, es común describir su comportamiento con dos patrones bidimensionales, también llamados diagramas de radiación. Se pueden obtener a partir de las características de radiación

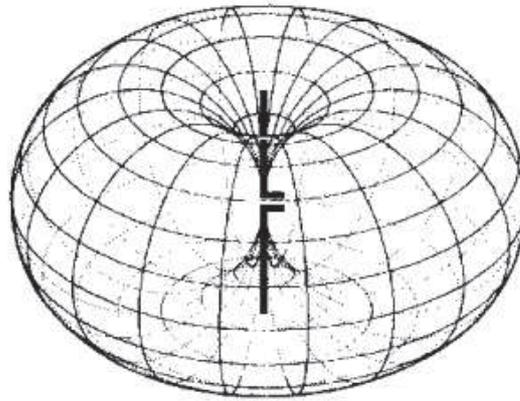


Figura 1.7: Radiación tridimensional de una antena dipolo

espacial observando un plano de corte, generalmente a través del origen y el máximo de radiación. Las coordenadas esféricas, como se muestra en la Figura 1.8, se usan comúnmente para describir una ubicación en el espacio tridimensional.

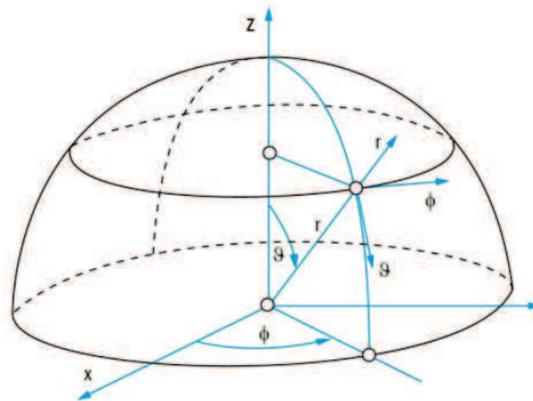


Figura 1.8: Explicación de las coordenadas esféricas

- El plano horizontal (Figura 1.9 izquierda), muestra la intensidad del campo como función del ángulo de azimut  $\phi$  con un  $\vartheta$  fijo (generalmente  $\vartheta = 90^\circ$ ).
- El plano vertical (Figura 1.9 derecha), muestra la intensidad del campo como función de  $\vartheta$  para un  $\phi$  fijo (generalmente  $\phi = \pm 90^\circ$  ó  $0^\circ/180^\circ$ ).

En la literatura o en las hojas de datos, los términos patrón de azimut o patrón de elevación también se encuentran con frecuencia. El término **azimut** describe la referencia a el “plano horizontal” mientras que el término **elevación** describe la referencia a el “plano vertical”.

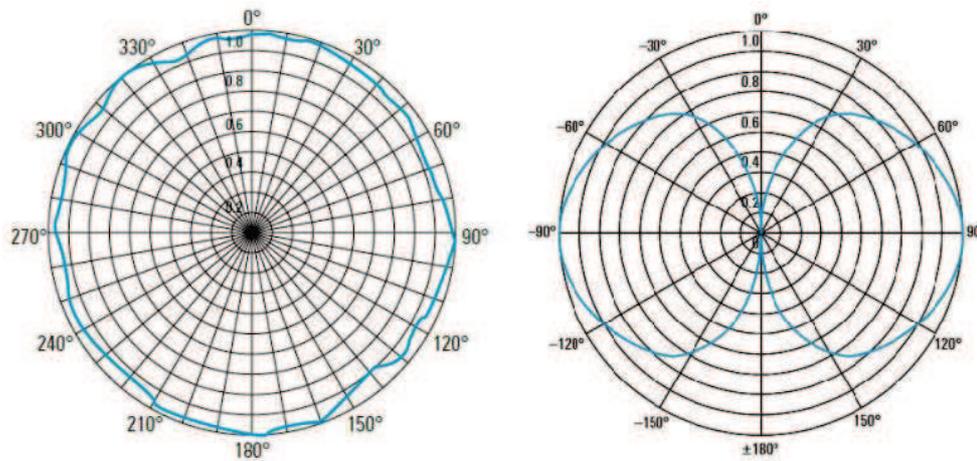


Figura 1.9: Patrón de Radiación Horizontal(izq) y Vertical(der) para un dipolo

Otra designación común es el patrón del Plano-E y el patrón del Plano-H. Dependen directamente de la orientación de la radiación de la antena. En consecuencia, no dependen de la orientación del montaje de la antena. Como observación, el Plano-H no debe confundirse con el plano horizontal.

Por lo general, los diagramas de antena se muestran como diagramas en coordenadas polares. Esto tiene la ventaja de que la radiación en todas las direcciones posibles se puede visualizar rápidamente. También puede ser beneficioso trazar el patrón de radiación en coordenadas cartesianas, porque esto revela más detalles del haz principal y los lóbulos laterales adyacentes (Figura 1.10).

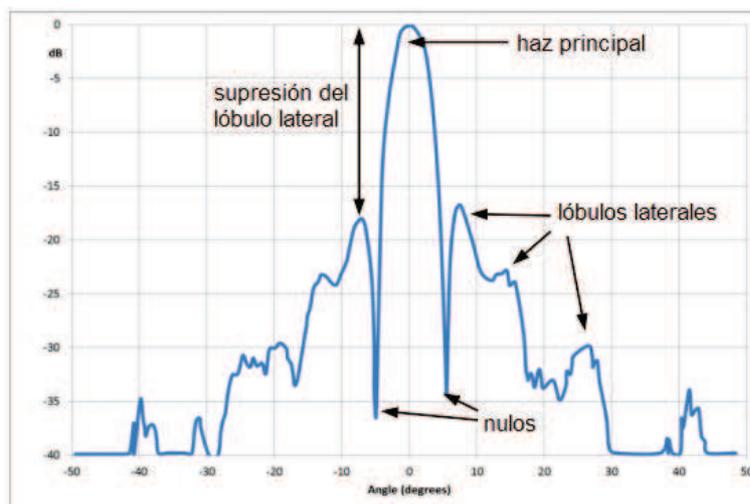


Figura 1.10: Patrón de radiación en coordenadas cartesianas

Del patrón de radiación se pueden derivar otros parámetros adicionales (Figura 1.11):

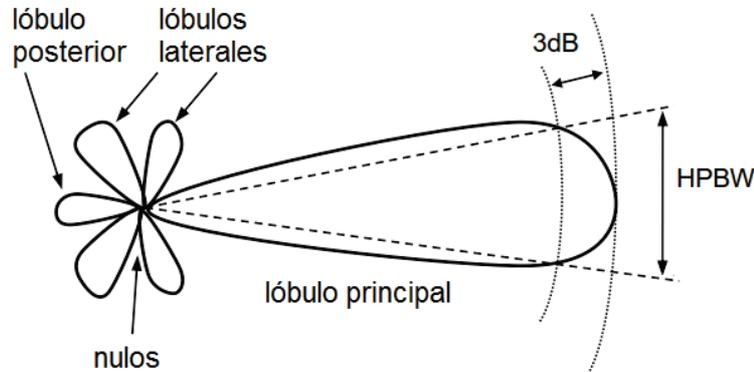


Figura 1.11: Otros parámetros del patrón de radiación

- Supresión del lóbulo lateral (o nivel del lóbulo lateral), es una medida de la relación entre el lóbulo principal y el lóbulo lateral más alto.
- Ancho de haz de potencia media (HPBW), es el ángulo entre los dos puntos en el lóbulo principal de un patrón de antena que está abajo del máximo en 3 dB. Por lo general, se define para ambos patrones de plano principal.
- Relación de delante hacia atrás, especifica el nivel de radiación desde la parte posterior de una antena direccional. Es la relación de la ganancia máxima en la dirección de avance a la ganancia en la dirección inversa (180°). Por lo general se expresa en dB.

**Directividad:** La directividad  $D$  se define como la relación entre la intensidad de radiación  $F_{max}$  obtenida en la dirección principal de radiación y la intensidad de radiación  $F_i$  que se generaría mediante un radiador isotrópico sin pérdidas con la misma potencia radiada  $P_t$ . La intensidad de radiación puede ser reemplazada por la densidad de potencia de la Ecuación 1.1. La densidad de potencia se mide a la misma distancia  $r$  de las antenas. Por lo tanto, se aplica lo siguiente:

$$D = \frac{F_{max}}{F_i} \quad \text{donde : } F_i = \frac{P_t}{4\pi} \quad (1.6)$$

**Ganancia:** Correspondiente con la directividad, la ganancia  $G$  es la relación entre la intensidad de radiación  $F_{max}$  obtenida en la dirección principal de radiación

y la intensidad de radiación  $F_{i0}$ , que sería generada por un radiador isotrópico libre de pérdidas con la misma potencia de entrada  $P_{t0}$ .

$$G = \frac{F_{max}}{F_{i0}} \quad \text{donde : } F_{i0} = \frac{P_{t0}}{4\pi} \quad (1.7)$$

A diferencia del factor de directividad, la eficacia de la antena  $\eta$  se tiene en cuenta en la ecuación anterior, ya que se aplica lo siguiente:

$$G = \eta \cdot D \quad (1.8)$$

Una antena con eficiencia  $\eta=100\%$ , significa que la ganancia y directividad son iguales. En la practica este no es el caso, por lo que la ganancia, que se puede determinar fácilmente durante las mediciones, es el parámetro que se utiliza con mayor frecuencia. La ganancia y la directividad a menudo se expresan en forma logarítmica:

$$g[dB] = 10 \log G \quad \vee \quad d[dB] = 10 \log D \quad (1.9)$$

Al contrario de las normas y estándares comunes, es una práctica bien establecida indicar la referencia con una letra adicional después de dB:

- dBi se refiere al radiador isotrópico
- dBd se refiere al dipolo de media onda

Por ejemplo, se aplica la siguiente conversión: 0 dBd  $\approx$  2.15 dBi.

**Potencia Isotrópica Radiada Equivalente:** La potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE ó también EIRP) es la cantidad de potencia que emitiría una antena isotrópica teórica para producir la densidad de potencia observada en la dirección de máxima ganancia de una antena. Conociendo la PIRE y la ganancia de la antena real es posible calcular la potencia real y los valores del campo electromagnético. Matemáticamente se determina por la ecuación:

$$PIRE = P_r A_t \quad (1.10)$$

Y expresada en decibeles [dBW]:

$$PIRE = P_r[dBW] + A_t[dB] \quad (1.11)$$

En donde:

- $P_r$  = potencia total radiada en una antena [W]
- $A_t$  = ganancia de la antena transmisora

Cálculo para expresar la potencia en decibeles:

$$dBm = 10 \log \left( \frac{\text{potencia}}{1mW} \right) \quad (1.12)$$

$$dBW = 10 \log \left( \frac{\text{potencia}}{1W} \right) \quad (1.13)$$

Una transmisión de 50W es lo mismo que 17 dBW o 47 dBm.

Teniendo en cuenta que las ondas electromagnéticas se propagan de manera que su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia. A partir de la formula de densidad de potencia de radiación, Ecuación 1.5, se tiene:

$$S[W/m^2] = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (1.14)$$

Donde  $P$  es la potencia isotrópica equivalente (PIRE) y  $d$  la distancia a la antena. Para cualquier caso, la formula indica claramente que la densidad de potencia decae rápidamente con la distancia.

### 1.3.2. Tipos de Antena

Una de las maneras más comunes de clasificar las antenas es por la forma de su radiación y las direcciones que ésta toma. De esta clasificación se obtienen 3 tipos de antenas:

**Antenas Isotrópicas:** Aquellas cuya potencia de radiación se transmite uniformemente en todas las direcciones. En este caso el diagrama de radiación se ve como una esfera perfecta. Es importante tener en cuenta que no es posible obtener este tipo de antena en la práctica, ya que para conseguir la radiación en todas las direcciones por igual es necesario tener una corriente eléctrica concentrada en un punto adimensional, lo que es físicamente imposible.

**Antenas Omnidireccionales:** Son las constituidas de un dipolo simple y se han utilizado desde los comienzos de las comunicaciones móviles para transmitir y recibir hacia y desde todas las direcciones respectivamente (Figura 1.12). Sin embargo, en los sistemas de telecomunicación actuales estos tipos de antenas, con su emisión “sin control” de la energía, han quedado obsoletas y aunque cumple su propósito se han vuelto ineficaces. Esto tiene como consecuencia que los usuarios se conecten al sistema con un pequeño porcentaje de la energía emitida, limitando al mismo tiempo la reutilización de frecuencias y la capacidad de los usuarios. Como ejemplos de este tipo de antena tenemos las antenas transmisoras de radiodifusión, las antenas de router inalámbricos WiFi, etc.

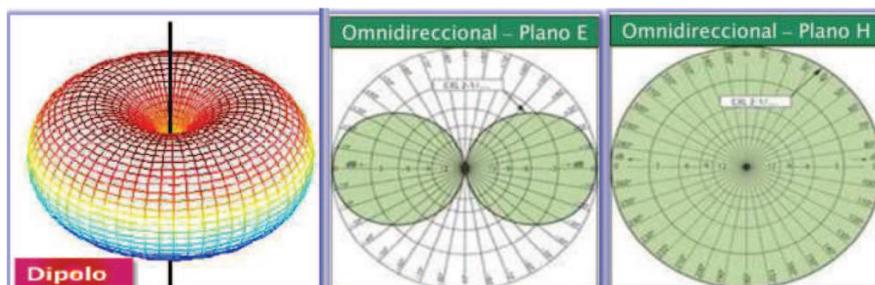


Figura 1.12: Antena Dipolo y su patrón de radiación

**Antenas direccionales:** Su función de este tipo de antena es irradiar o recibir radiación en una dirección específica, inhibiendo la cantidad de radiación en las otras direcciones lo mayor posible. Estas antenas son necesarias cuando se quiere transmitir una gran cantidad de información, de modo que la mayor cantidad de potencia se concentra en un área pequeña.

También se utilizan cuando se desea que la señal transmitida no sea captada por otros receptores, ya sea inconscientemente o de manera intencional. Ejemplos de antenas direccionales son la Yagi-Uda, la parabólica y las de telefonía celular. (Figura 1.13)

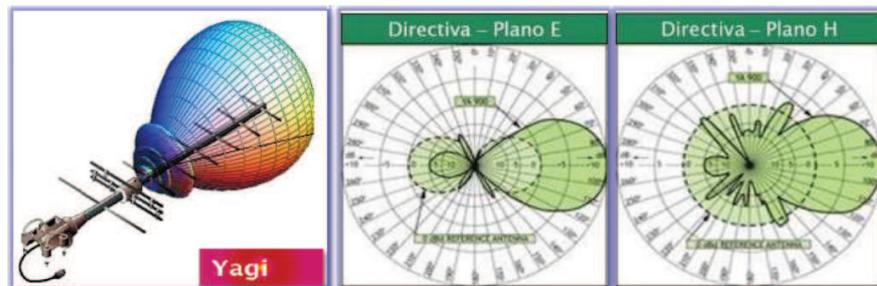


Figura 1.13: Antena Yagi y su patrón de radiación

Las antenas direccionales pretenden controlar la propagación de la energía por sectores de aproximadamente  $120^\circ$  y se las conoce también como antenas sectoriales. Este tipo de antenas tienen una amplia cobertura, es decir tendrá una mayor capacidad de usuarios y sobre todo un mayor alcance con la misma potencia de emisión que una omnidireccional. Una desventaja es que la potencia emitida en otras direcciones se transforma en interferencia para otros usuarios.

## 1.4. Radiación no ionizante

Las radiaciones no ionizantes constituyen, en general, la parte del espectro electromagnético cuya energía fotónica es demasiado débil para romper enlaces atómicos (**Energía RNI**  $< 10eV$ ). Entre ellas cabe citar la radiación ultravioleta, la luz visible, la radiación infrarroja, las radiofrecuencias, las microondas y los campos de frecuencias extremadamente bajas (Figura 1.14).

$$Energia = h \cdot f \quad \wedge \quad c = f \cdot \lambda \quad (1.15)$$

donde:

- $f$  es la frecuencia [ $Hz$ ] y  $\lambda$  es la longitud de onda [ $m$ ]
- $h = 4,14 \times 10^{-15} eV \cdot s$ , es la constante de Plank
- $c = 3 \times 10^8 m/s$

Resolviendo la Ecuación 1.15, el espectro de las RNI comprende toda radiación electromagnética con:  $f < 2,4 \times 10^{15} Hz$  (ó su equivalente  $\lambda > 124 nm$ ). Es importante destacar que las ondas radioeléctricas, emiten radiaciones no ionizantes, aún cuando sean de alta intensidad de potencia, no pueden causar ionización en un sistema biológico, es decir que no pueden alterar su estructura molecular ni celular.

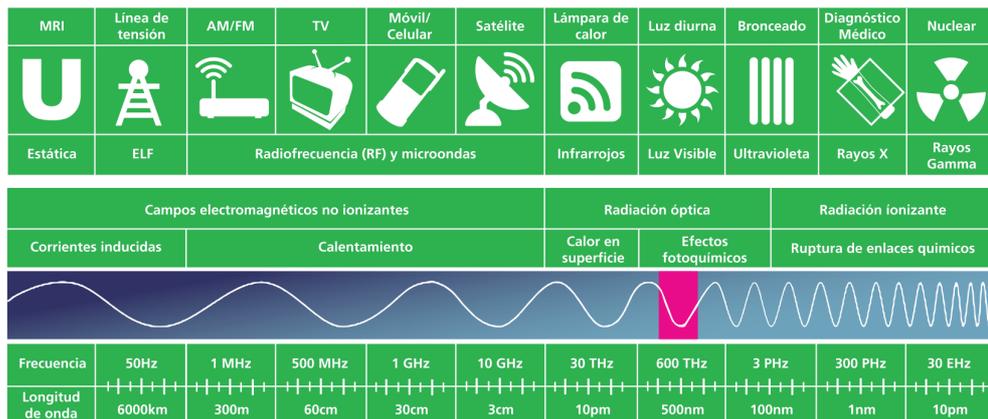


Figura 1.14: Tipos de radiaciones en el espectro

Las radiaciones ionizantes son ondas electromagnéticas de frecuencia extremadamente elevada (rayos  $X$  y  $gamma$ ), que contienen energía fotónica suficiente para producir ionización (conversión de átomos de moléculas en iones con carga eléctrica positiva o negativa) mediante la ruptura de los enlaces atómicos, y afectan así el estado natural de los tejidos vivos. Esto se debe a que la energía es proporcional a la frecuencia, por lo tanto al aumentar la frecuencia la energía irradiada se incrementa notablemente.

Las radiaciones que estudiaremos en adelante, pertenecientes a las RNI, serán las que influyen por causa de las telecomunicaciones, estas son los campos electromagnéticos de radiofrecuencia (RF) y microondas (MO).

### 1.4.1. Fuentes de radiación no ionizante

La mayor potencia de radiación que se encuentra en el ambiente, es producida por la radiación artificial. Son las producidas mediante métodos desarrollados por el hombre, como por ejemplo, los aparatos de redes de comunicaciones, equipamiento electrónico e instalaciones, etc. Esta la podemos controlar, en cuanto a su potencia, longitud de onda, dirección y polarización. También podemos controlar su presencia mediante diversos sistemas de apantallamiento, que reduzcan o minimicen en mayor o menor grado, sus efectos. Entre las fuentes de de RNI más comunes a nuestro alrededor podemos encontrar (Figura 1.15):

- Telecomunicaciones: Antenas de radiobases celulares, enlaces de microondas, antenas de estaciones de radiodifusión (FM, AM, TV).
- Uso industrial: Soldaduras por RF, calentamiento por inducción, estaciones transformadoras, líneas de distribución de energía.
- Radiaciones ópticas: Lámparas germicidas, equipos de secado, fotolitografía, fototerapia, iluminación.
- Vida cotidiana: Hornos a microondas, alarmas perimetrales, alarmas en comercios, detección automática en peajes y equipos de uso hogareño.



más daño, con una misma cantidad de radiación, que los órganos más vascularizados. Así, por ejemplo, serán más sensibles a las radiaciones los ojos o los testículos, que la piel, altamente vascularizada debido a su principal función en mantener constante la temperatura corporal. En caso de que el calor que cede la RNI al organismo supere unos niveles que éste no pueda contrarrestar con sus mecanismos reguladores, los tejidos resultarán dañados. Dichos daños pueden ir desde quemaduras de distinta consideración, hasta la muerte del tejido.

En otro orden de cosas, parece ser que para que haya posibilidad de cesión de energía a un ser vivo, el tamaño de éste debe estar en cierta relación con la longitud de onda de la fuente de radiación. Así, las estimaciones indican que el tamaño debe ser, como mínimo, diez veces menor que la longitud de onda de la radiación en cuestión. Este hecho impone unas limitaciones a las radiaciones que pueden producir efectos térmicos en los seres humanos, ya que su longitud de onda debe tener, como máximo, 20 m. Es decir, únicamente las ondas electromagnéticas con frecuencias superiores a los 15 MHz son capaces de ocasionar daños de origen térmico en el hombre. Como ya hemos indicado, estas ondas son las de frecuencias superiores a las de las radiofrecuencias altas, especialmente las microondas.

**Efectos no térmicos:** Los efectos de tipo no térmico de las RNI con la materia son de mucho más difícil estudio y caracterización que los de origen térmico. Su etiología y patogenia no están bien descritas, cabiendo la posibilidad de que se confundan los efectos electromagnéticos sobre los seres vivos con los causados por otros agentes patógenos. No obstante, las numerosas investigaciones realizadas parecen apuntar a la existencia de determinados efectos relacionados con este tipo de radiaciones, como son:

- Interacciones a nivel molecular, celular y tisular.
- Interacción con órganos que presentan actividad electromagnética, como el cerebro, alterando los encefalogramas.
- Posibles alteraciones genéticas.
- Alteración de la conducta.

Resulta necesario, sin embargo, insistir en la dificultad que entraña la tarea de separar los efectos térmicos de los que no tienen ese origen. Por ejemplo, por calentamiento local en una glándula, la misión de ésta puede alterarse y sus

efectos hacerse patentes en otra zona del organismo alejada y no alterada en su temperatura.

### 1.4.3. Recomendaciones para limitar exposición al CEM

Para establecer los límites de exposición, la Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIPR), reconoce la necesidad de reconsiderar diferentes opiniones de científicos. La validez de los reportes científicos tiene que ser considerada y las extrapolaciones de experimentos en animales a efectos en los seres humanos tienen que ser realizadas. Las restricciones en estas recomendaciones fueron basadas solamente en datos científicos, el conocimiento disponible a la fecha, sin embargo se debe indicar que dichas restricciones proveen un adecuado nivel de protección de la exposición a CEM variables en el tiempo. Estas recomendaciones son las Restricciones básicas y los Niveles de referencia, que serán presentadas en las próximas secciones.

**Unidades empleadas:** Las cantidades físicas por las que los límites de exposición a radiación de RF son expresadas, pueden referirse a situaciones en que el objeto físico determinado se halle presente en el espacio considerado, esta condición suele denominarse CEM perturbado.

Una segunda situación sucederá cuando no se encuentre presente el objeto físico determinado, esta condición se denomina como CEM no perturbado.

Desde ese punto de vista los límites de exposición se pueden expresar con dos tipos de unidades:

- Cuando interesa describir la potencia de la radiación en el aire, sin atender a su interacción con un cuerpo expuesto a la señal, se emplea la **densidad de potencia (S)**, y viene dada en watts por metro cuadrado [ $W/m^2$ ], o en miliwatts por centímetro cuadrado [ $mW/cm^2$ ].
- Si, por el contrario, el interés de la medida radica en valorar la forma en que la energía de una radiación es absorbida por un cuerpo dado, se calcula la **tasa o coeficiente de absorción específica (SAR)**, y se expresa en watts por kilogramo de masa [ $W/kg$ ].

El SAR es la unidad que se utiliza como base de todas las guías de seguridad ante la exposición a las RF. Esta medida se define como la derivada con respecto

al tiempo de la variación de energía ( $dW$ ), absorbida o disipada, por una masa incremental ( $dm$ ), con una densidad dada por  $\rho$ , contenida en un volumen ( $dV$ ).

$$SAR = \frac{\partial(\frac{\partial W}{\partial m})}{\partial t} = \frac{\partial(\frac{\partial W}{\partial \rho \partial V})}{\partial t} \quad (1.16)$$

#### 1.4.3.1. Exposición ocupacional y poblacional

Para establecer los límites de exposición, diferenciamos dos tipos de población llamadas ocupacional y poblacional. La primera está expuesta bajo condiciones conocidas, entrenadas para estar conscientes del riesgo potencial y para tomar las protecciones adecuadas. Mientras que en la poblacional comprenden individuos de todas las edades y de estados de salud variables, pueden incluir grupos o personas particularmente susceptibles; en muchos casos los miembros del público no están conscientes de su exposición a los CEM.

Los efectos biológicos y a la salud establecidos en el rango de frecuencias de 10 MHz a unos pocos GHz son consistentes con las respuestas al incremento de temperatura del cuerpo en más de 1 °C. Este nivel de incremento de temperatura resulta de la exposición de individuos bajo condiciones ambientales moderadas a un SAR de cuerpo entero de 4 W/kg por cerca de 30 minutos.

Bajo estas condiciones, se deben introducir factores de seguridad para proporcionar una protección adecuada a los individuos expuestos.

- Los límites recomendados para trabajadores expuestos a la radiación son de un factor de seguridad de **10** con el cual se considera que se proporciona una protección adecuada de 0.4 W/kg.
- Un factor adicional de seguridad de **50** se suma para la exposición del público en general, obteniendo un SAR límite promediada sobre la masa del cuerpo completo de 0.08 W/kg.

Los factores mencionados se han tomado, teniendo en cuenta que una exposición poblacional puede ser de 24 horas al día, 7 días a la semana en ambientes no controlados, comparada con la de un trabajador para el cual la exposición es de 8 horas al día, 5 días a la semana en un ambiente controlado (Figura 1.16).

#### 1.4.3.2. Restricciones básicas para la exposición a CEM:

Las restricciones a la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo están basados directamente en los efectos en la



Tipo de exposición	Rango de Frecuencias	Densidad de Corriente para cabeza y tronco (mA/m <sup>2</sup> )	SAR promedio en todo el cuerpo (W/kg)	SAR local cabeza y tronco (W/kg)	SAR local extremidades (W/kg)
Exposición ocupacional	Hasta 1 Hz	40	--	--	--
	1 - 4 Hz	40/f	--	--	--
	4 Hz - 1 kHz	10	--	--	--
	1 - 100 kHz	f/100	--	--	--
	100 kHz - 10 MHz	f/100	0.4	10	20
	10 MHz - 10 GHz	--	0.4	10	20
Exposición poblacional	Hasta 1 Hz	8	--	--	--
	1 - 4 Hz	8/f	--	--	--
	4 Hz - 1 kHz	2	--	--	--
	1 - 100 kHz	f/500	--	--	--
	100 kHz - 10 MHz	f/500	0.08	2	4
	10 MHz - 10 GHz	--	0.08	2	4

Cuadro 1.1: Restricciones básicas para exposición a los CEM

#### 1.4.3.3. Niveles de referencia para exposición a CEM:

Estos niveles son proporcionados para evaluar en forma práctica la exposición y determinar si es probable que las restricciones se excedan. Algunos niveles de referencia son calculados de restricciones básicas relevantes, usando técnicas de medición y/o computacionales, y algunas están basadas en percepciones y efectos indirectos adversos por la exposición a los CEM. Respetar los niveles de referencia asegura que se respeten las restricciones básicas relevantes. Si los valores medidos o calculados exceden los niveles de referencia, no necesariamente son excedidas las restricciones básicas. En la Figura 1.18 se muestra la gráfica de niveles de referencia ocupacional/poblacional. Y en las siguientes Tablas 1.2 y 1.3 mostramos los niveles en función de la frecuencia evaluada.

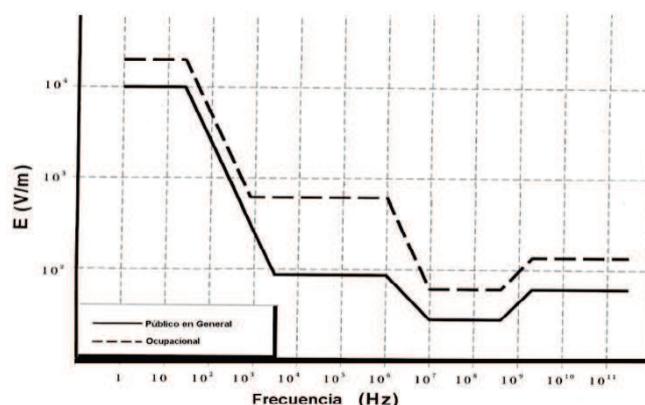


Figura 1.18: Niveles de referencia para exposición a los CEM

Rango de Frecuencias (MHz)	Intensidad de Campo Eléctrico (V/m)	Intensidad de Campo Magnético (A/m)	Densidad de Flujo Magnético ( $\mu$ T)	Densidad de Potencia (mW/cm <sup>2</sup> )
Hasta 1 Hz	–	$1.63 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	–
1 – 8 Hz	20 000	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	–
8 – 25 Hz	20 000	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^4 / f$	–
0.025 – 0.82 kHz	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$	–
0.82 – 65 kHz	610	24.4	30.7	–
0.065 – 1 MHz	610	$1.6 / f$	$2 / f$	–
1 – 10 MHz	$610 / f$	$1.6 / f$	$2 / f$	–
10 – 400 MHz	61	0.16	0.2	1
400 – 2000 MHz	$3 f^{0.5}$	$0.008 f^{0.5}$	$0.01 f^{0.5}$	$f / 400$
2 – 300 GHz	137	0.36	0.45	5

Cuadro 1.2: Nivel de referencia ocupacional

Rango de Frecuencias (MHz)	Intensidad de Campo Eléctrico (V/m)	Intensidad de Campo Magnético (A/m)	Densidad de Flujo Magnético ( $\mu$ T)	Densidad de Potencia (mW/cm <sup>2</sup> )
Hasta 1 Hz	–	$3.2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	–
1 – 8 Hz	10 000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	–
8 – 25 Hz	10 000	$4000 / f$	$5000 / f$	–
0.025 – 0.8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	–
0.8 – 3 kHz	$250 / f$	5	6.25	–
3 – 150 kHz	87	5	6.25	–
0.15 – 1 MHz	87	$0.73 / f$	$0.92 / f$	–
1 – 10 MHz	$87 / f^{0.5}$	$0.73 / f$	$0.92 / f$	–
10 – 400 MHz	28	0.073	0.092	0.2
400 – 2000 MHz	$1.375 f^{0.5}$	$0.0037 f^{0.5}$	$0.0046 f^{0.5}$	$f / 2000$
2 – 300 GHz	61	0.16	0.20	1

Cuadro 1.3: Nivel de referencia poblacional

#### 1.4.4. Límites regulados para la Argentina

El Ministerio de Salud y Acción Social de la Nación (MSyAS) estableció mediante la Resolución N° 202/1995 los niveles de exposición para las RNI (Tabla 3.1 y Figura 3.1), los cuales están por debajo de lo que recomendará más tarde la OMS (Organismo Mundial de la Salud).

Con posterioridad la entonces Secretaría de Comunicaciones emitió la Resolución N° 530/2000 donde se dispuso que los límites establecidos por el Ministerio de Salud son de aplicación obligatoria para todo sistema y/o servicio de Comunicación Radioeléctrica que opere dentro de la República Argentina.

La regulación nacional mediante la Resolución N° 3690/2004 (ex CNC), adoptó estos niveles (Tabla 1.4) como los límites para máxima exposición poblacional (MEP), establecidos en el Protocolo para la Evaluación de las RNI, mostrados en la Tabla 1.4.

Rango de Frec. $f$ [MHz]	Dens. Potencia $S$ [mW/cm <sup>2</sup> ]	Campo Eléctrico $E$ [V/m]	Campo Magnético $H$ [A/m <sup>2</sup> ]
0.3 - 1	20	275	0.73
1 - 10	$20/f^2$	$275/f$	$0.73/f$
10 - 400	0.2	27.5	0.073
400 - 2000	$f/2000$	$1.375/f^{0,5}$	-
2000 - 100000	1	61.4	-

Cuadro 1.4: Límites establecidos para la máxima exposición poblacional

En este capítulo tratamos el marco teórico de las RNI. Comenzando por el espectro radioeléctrico, donde vimos la división de la banda de frecuencias, luego estudiamos los conceptos de radiación electromagnética, y los principios de las antenas. Finalizando con los conceptos de las radiaciones no ionizantes y los límites de exposición que la regulación establece en el país.

En el próximo capítulo nos referiremos a los sistemas de telefonía móvil celular, ya que será más adelante, el ámbito de aplicación de nuestro trabajo.



---

## Capítulo 2

# Telefonía Celular Móvil

En este capítulo desarrollaremos el marco teórico de la telefonía celular, comenzando por una introducción a los sistemas de comunicación móvil, describiendo técnicas que utiliza para comunicarse, los fundamentos previos a la telefonía móvil, sus principales características, arquitecturas del sistema y tecnologías que utiliza para brindar sus servicios [1, 4, 8]. Realizaremos un breve estudio a las antenas para comprender el modo de operación de las mismas [7]. Finalizamos el marco teórico con la telefonía móvil Argentina, describiendo los sistemas y servicios que ofrece [3], y la asignación de frecuencias que utiliza para el despliegue de la cobertura nacional.

### 2.1. Redes y Sistemas de Comunicación Móvil

Durante el siglo XX, la tecnología clave ha sido la recolección, procesamiento y distribución de información (voz, datos, vídeo). Entre otros desarrollos, se destacan la instalación de redes de telecomunicaciones en todo el mundo, la invención de la radio y la televisión, el nacimiento y crecimiento de la industria de las computadoras, así como la puesta en órbita de los satélites de comunicación. A medida que avanzamos, se ha dado una rápida convergencia de estas áreas. Las redes de comunicación no son más que la posibilidad de compartir con carácter universal la información entre grupos de computadoras y sus usuarios; un componente vital de la era de la sociedad de la información. El acceso de los ciudadanos a los contenidos y servicios de la sociedad de la información se realiza a través de las redes de transporte, que llegan a los inmuebles particulares, residenciales y empresas.

El término de comunicaciones móviles describe cualquier enlace de comunicación *inalámbrica* entre dos terminales, de los cuales al menos uno está en movimiento, o se encuentra en algún lugar, pero con localizaciones indeterminadas, pudiendo el otro ser un terminal fijo, tal como una estación base. De hecho, el enlace móvil a móvil consiste muchas veces en un enlace móvil a fijo a móvil. El término móvil puede referirse a vehículos de todo tipo, o sencillamente, a personas caminando por las calles.

En los sistemas de comunicación móvil, se aprovecha plenamente el carácter inalámbrico de las comunicaciones radioeléctricas y la movilidad inherente, tornándose enlaces de gran ubicuidad, versatilidad y flexibilidad.

Los servicios de comunicaciones móviles más extendidos son el sistema de telefonía móvil celular (también conocida como la red móvil terrestre pública, PLMN), los sistemas de radiotelefonía móvil privada (PMR/PAMR), la comunicación móvil por satélite, la radio-mensajería, la radio-localización GPS, las comunicaciones inalámbricas y el acceso a Internet móvil. Figura 2.1.

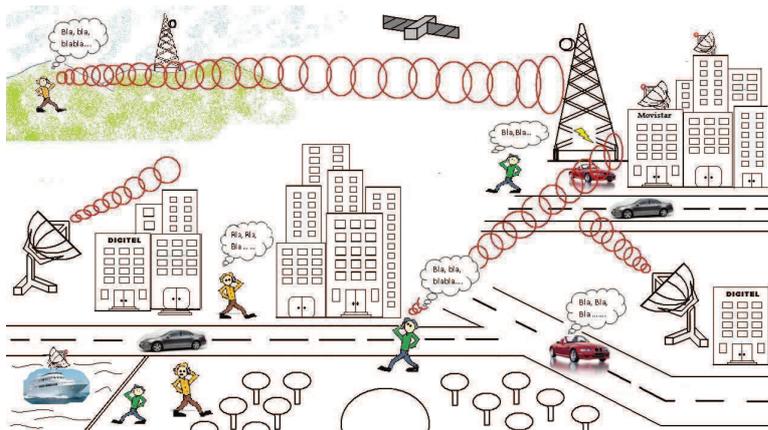


Figura 2.1: Sistemas de Comunicaciones Móviles

## 2.2. Técnicas usadas en la comunicación móvil

### 2.2.1. Técnicas de duplexación

La mayoría de los sistemas y redes de comunicaciones modernos funcionan en modo dúplex (comunicación bidireccional) permitiendo canales de envío y recepción simultáneos. Podemos conseguir esa simultaneidad de varias formas:

- Empleo de frecuencias separadas

- Cables separados

También podemos hablar de sistemas símplex, donde únicamente se permite la transmisión en un sentido, y semidúplex, donde la transmisión fluye en una u otra dirección, pero no al mismo tiempo (Figura 2.2).

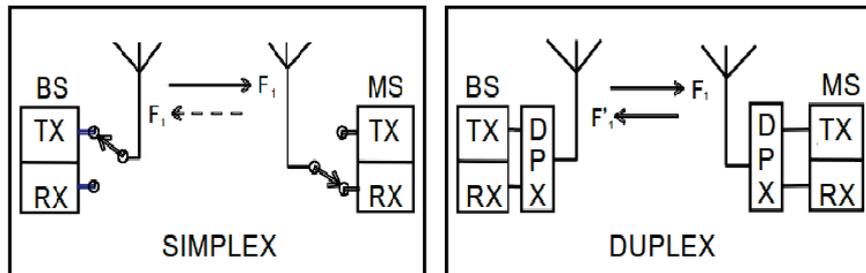


Figura 2.2: Sistemas símplex y dúplex

Los sistemas símplex pueden emular sistemas dúplex cuando se usa multiplexación de tiempo o de frecuencia para separar el canal de emisión del canal de recepción, como veremos a continuación:

**Duplexación por división de tiempo (TDD)** Es una técnica para convertir un canal símplex en un canal dúplex separando las señales enviadas y recibidas en intervalos de tiempos diferentes sobre el mismo canal usando acceso múltiple por división de tiempo como se observa en la Figura 2.3.

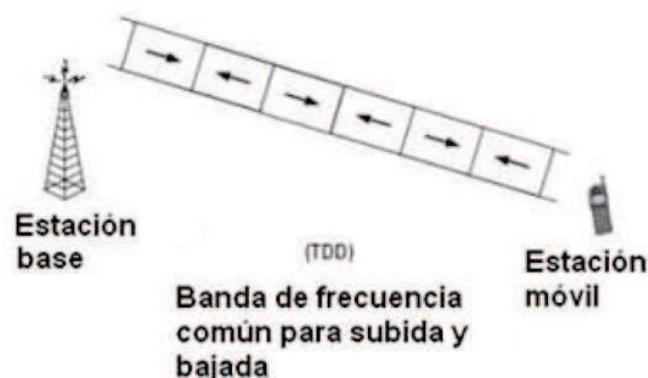


Figura 2.3: Sistema TDD

La duplexación por división de tiempo tiene una gran ventaja en los casos en los que hay asimetría entre la velocidad del uplink y el downlink. Según aumenta la cantidad de data en el uplink, más capacidad de comunicación puede ser destinada

a este, y si por el contrario el tráfico se vuelve más ligero, se puede reducir su capacidad. Lo mismo puede hacerse con el downlink (Figura 2.4).

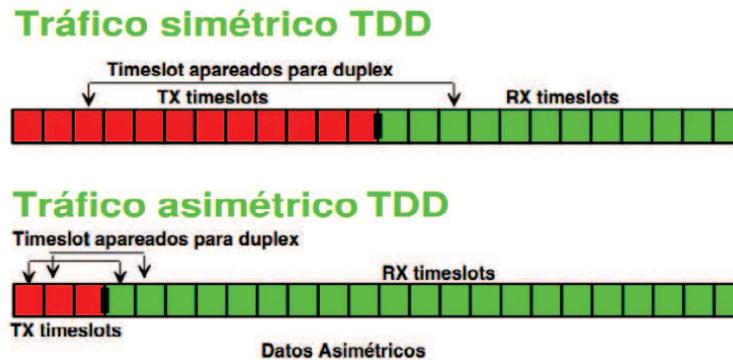


Figura 2.4: Distribución del tráfico en TDD

Ejemplos de duplexación por división de tiempo son:

- Las interfaces suplementarias de UMTS 3G, TD-CDMA para telecomunicaciones en interiores.
- El LTE-TDD 4G chino.
- La telefonía inalámbrica DECT.

**Duplexación por división de frecuencia (FDD)** En este sistema el transmisor y el receptor operan a diferentes frecuencias portadoras. La estación debe ser capaz de enviar y recibir al mismo tiempo, y hace esto alterando ligeramente la frecuencia a la que envía y recibe. Este modo de operación es referido como modo dúplex o modo complemento (Figura 2.5).

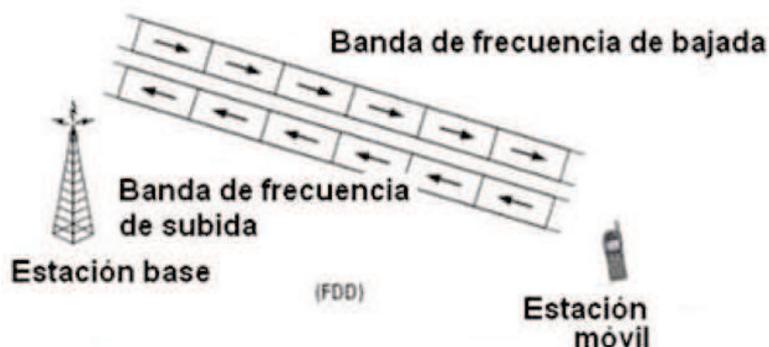


Figura 2.5: Sistema FDD

Se dice que las sub-bandas de uplink y downlink están separadas por el complemento de frecuencia (Figura 2.6). La duplexación por división de frecuencia puede ser eficiente en el caso de tráfico simétrico.

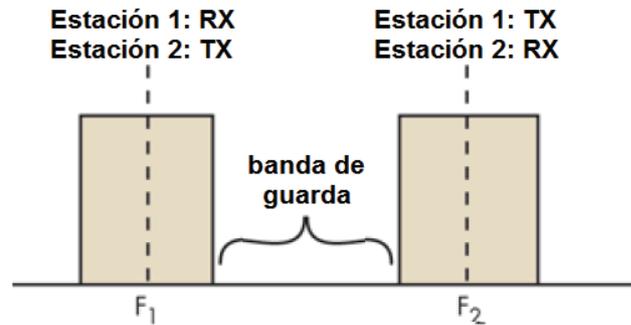


Figura 2.6: Distribución de sub-bandas FDD

En este caso la duplexación por división de tiempo tiende a desperdiciar ancho de banda durante el cambio de transmisión a recepción, tiene una mayor latencia inherente, y puede requerir circuitería más compleja.

Otra ventaja de la duplexación por división de frecuencia es que hace el planeamiento de radio mucho más fácil y más eficiente, porque las estaciones bases no se *escuchan* entre ellas (transmiten y reciben en diferentes sub-bandas) y por lo tanto normalmente no se interfieren entre ellas.

Ejemplos de sistemas de duplexación por división de frecuencia son:

- Sistemas celulares en modo FDD para UMTS/WCDMA y el sistema CDMA2000.
- IEEE 802.16 WiMAX.
- ADSL y VDSL

### 2.2.2. Técnicas de multiacceso

En comunicaciones móviles son necesarias las técnicas de multiacceso para la compartición de los onerosos y escasos recursos radioeléctricos de la interfaz radio por parte de un conjunto de usuarios. Se denomina canal físico a la facilidad concedida a un usuario mediante la cual este puede acceder al sistema. Las técnicas de multiacceso son procedimientos de asignación de canales físicos a las estaciones. En general, están asociadas con los métodos de modulación utilizados

y con la naturaleza (analógica o digital) de la información a transmitir. Hay 4 métodos básicos de multiacceso:

- FDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia)
- TDMA (Acceso múltiple por división de tiempo)
- SDMA (Acceso múltiple por división del espacio)
- CDMA (Acceso múltiple por división de código)

**Técnica FDMA:** Se basa en la separación en frecuencias del volumen espectral (Figura 2.7). La anchura de banda disponible se divide en radiocanales, de conformidad con un paso de canalización  $\Delta f$ . Cada radiocanal se asigna a un usuario en la interfaz radio.

Las asignaciones son de banda estrecha del tipo un solo canal por portadora. Los usuarios, cada uno en su radiocanal, pueden efectuar transmisiones simultáneas e ininterrumpidas en las diferentes frecuencias.

Cada receptor o grupo de receptores selecciona, mediante un filtro sintonizable, el canal deseado. Estas son algunas de sus características:

- Compatibilidad con modulaciones y señales analógicas y digitales.
- Tecnología madura y experimentada.
- Sencillez de realización de equipos y de explotación.
- Adecuado para sistemas de baja/mediana capacidad de tráfico.
- Complejidad de las estaciones base multicanales, en la que es necesario un equipo transceptor por cada radiocanal, más elementos adicionales: combinadores, multiacopladores de antena, etc.

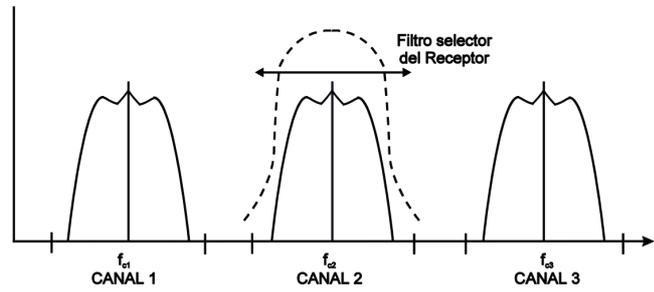


Figura 2.7: Técnica de FDMA

**Técnica TDMA:** Permite que varias redes o terminales móviles compartan la misma frecuencia utilizándola en ráfagas temporales y no de forma permanente. Las transmisiones de los usuarios son en consecuencia, discontinuas, intercalándose en el tiempo las ráfagas de cada uno, de forma que no colisionen ni se interfieran entre sí. El sistema dispone de mecanismos de direccionamiento y sincronización, de forma que cada receptor extrae del flujo de señal únicamente las ráfagas destinadas al mismo e ignora las demás.

En TDMA la transmisión se organiza en tramas de duración  $T_t$ . Una trama es una sucesión de  $N$  intervalos, cada uno de los cuales se asigna a un terminal. La duración de intervalo es  $T = T_t/N$ , tiempo en el cual el terminal efectúa su acceso y en el que dispone de todo el recurso del ancho de banda del sistema radioeléctrico. Por su propia naturaleza, TDMA únicamente es posible con señales digitales de origen o analógicas digitalizadas.

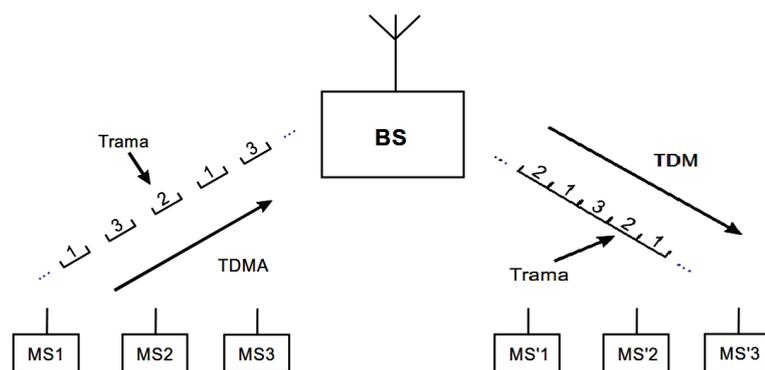


Figura 2.8: Técnica de TDMA

En la Figura 2.8 se ilustran los conceptos asociados a este tipo de acceso múltiple. En el enlace ascendente llegan a la estación base BS las ráfagas 1, 2, 3... procedentes de los terminales, en tramas sucesivas.

Las ráfagas no suelen ser estrictamente contiguas aunque se hayan emitido con sincronización, pues proceden de terminales situados a diferentes distancias de la BS. Puede haber entre ellas pequeños intervalos o ligeros solapes. Este tipo de llegadas individuales constituye el TDMA básico, característico del enlace ascendente. En el enlace descendente, la información que transmite la BS se organizan también en una trama pero con intervalos consecutivos en forma de multiplex por división temporal TDM, con sus ráfagas en bits. Esta señal TDM modula la portadora del enlace descendente y se radia en difusión a todos los terminales. Cada terminal extraerá la información del intervalo que tenga asignado, una vez por ráfaga.

Los sistemas celulares GSM utilizan varias portadoras TDMA distintas, constituyéndose de ese modo un sistema de multiacceso mixto TDMA/FDMA, en el que cada radiocanal proporciona  $N$  canales. Si se dispone de  $R$  radiocanales, la capacidad potencial será  $R \cdot N$  canales. En este caso, cada canal físico asignado a un terminal consiste en un radiocanal y un intervalo de tiempo.

**Técnica SDMA:** consiste en la reutilización de las frecuencias portadoras y sus anchuras de banda en zonas suficientemente separadas para que las interferencias producidas por esa reutilización sean tolerables.

Para la aplicación del SDMA, se divide el área de cobertura de servicio en territorios más pequeños, llamados celdas y se establece un plan de distribución de las frecuencias disponibles entre ellas, volviendo a usar unos mismos juegos de frecuencias en celdas distintas separadas entre sí una distancia mínima llamada distancia de reutilización. La teoría celular desarrolla el concepto SDMA.

Otra aplicación del SDMA, es para la transmisión de dos o más flujos de información mediante múltiples antenas, este tipo de sistema se denomina MIMO (Multiple Input Multiple Output), como se ve en la Figura 2.9. Debido a las múltiples antenas, la dimensión espacial puede ser explotada para mejorar el desempeño del enlace inalámbrico, haciendo la señal más fuerte, mas confiable y transmisiones más rápidas.

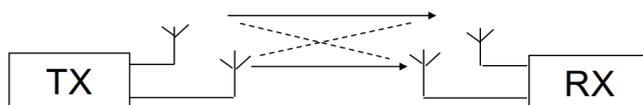


Figura 2.9: Sistema MIMO utilizando técnicas de SDMA

**Técnica CDMA:** Las técnicas de multiacceso FDMA y TDMA asignan recursos disjuntos (de frecuencia o de tiempo) a cada canal. El método CDMA, al contrario, otorga a cada canal la totalidad del volumen espectral disponible: toda la anchura de banda, durante todo el tiempo y en toda la zona de cobertura, de forma que permite la transmisión simultánea de varias comunicaciones que emplean todas los mismos recursos a la vez. Esto es, los usuarios realizan sus transmisiones desde la misma zona utilizando la misma frecuencia portadora y con la misma ocupación del ancho de banda.

En consecuencia, se genera una intensa interferencia mutua, por lo que debe establecerse mecanismos para poder extraer cada comunicación individual del conjunto de señales mutuamente interferentes. Ello se realiza mediante la asignación a cada comunicación de un código único denominado código de dirección o signatura, que se combina con la información transmitida. Evidentemente, el código de cada usuario debe poderse distinguir de los códigos de otros usuarios, así como de versiones retardadas de sí mismo, que se originan a causa de la propagación multitrayecto.

En CDMA deben afrontarse y resolverse dos problemas fundamentales y mutuamente relacionados:

- Capacidad para separar las recepciones mediante las signaturas de los usuarios.
- Detección de las señales en un entorno de elevada interferencia.

La primera cuestión ha suscitado numerosos trabajos de investigación para el hallazgo de familias de códigos idóneos para su uso en CDMA. Se han construido dos grandes familias de códigos, los ortogonales y los pseudoaleatorios, que se emplean conjuntamente.

La resolución del segundo problema se ha hecho aplicando conclusiones de la Teoría de la Transmisión Digital que, en virtud al Teorema de Shannon, prevén la posibilidad de transmitir información con una cierta tasa  $R$  [bps] y reducida probabilidad de error  $P_e$  en presencia de perturbaciones intensas, utilizando una gran ancho de banda y reducida densidad espectral de potencia, mediante la técnica de espectro ensanchado, SS (Spread Spectrum). De este modo las señales CDMA vienen a ser un subconjunto del conjunto de señales de espectro ensanchado.

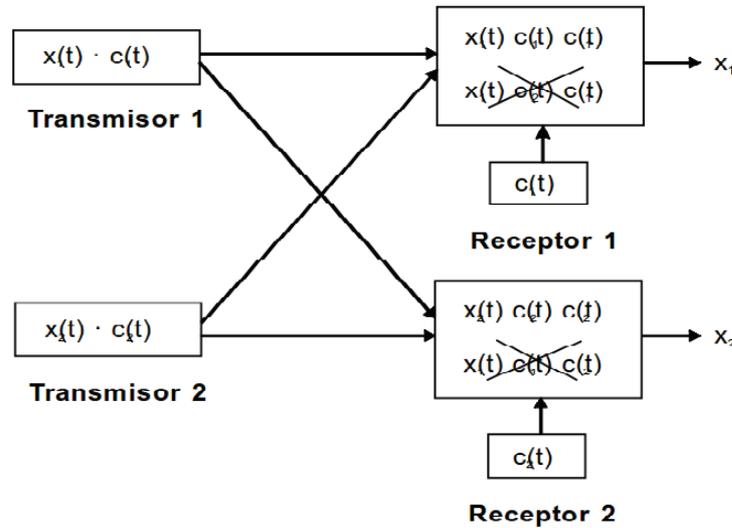


Figura 2.10: Técnica de CDMA

En la Figura 2.10 se ilustra el principio CDMA para el caso de dos estaciones móviles que acceden a la base en la misma frecuencia:

- La estación MS1 transmite la señal  $x_1(t)$  ensanchada con el código  $c_1(t)$  y lo mismo sucede con la transmisión de la señal MS2, cuya señal  $x_2(t)$  irá acompañada de su signature  $c_2(t)$ .
- Ambas señales llegan a la BS en la misma portadora.
- Se recupera  $x_1(t)$  multiplicando  $x_1(t) \cdot c_1(t)$  por el código  $c_1(t)$  disponible en la BS y procesando el producto. La otra señal recibida  $x_2(t) \cdot c_2(t)$  al ser multiplicada por  $c_1(t) \neq c_2(t)$  permanece expandida y aparece al receptor como un ruido blanco.
- De forma similar se recupera  $x_2(t)$  usando su signature  $c_2(t)$ .

La tecnología de multiacceso CDMA es utilizada en los sistemas móviles de Tercera Generación, como en los sistemas UMTS y *cdma 2000*.

### 2.2.3. Técnicas de modulación

Los sistemas de modulación empleados en comunicaciones móviles dependen de la técnica de multiacceso utilizada. TDMA y CDMA requieren señales digitales por lo que las modulaciones también han de ser de tipo digital y además de banda ancha. Por otro lado en comunicaciones móviles, debido a la intensa

utilización de las escasas frecuencias disponibles, es posible que puedan estar relativamente próximos a transmisores que funcionen en canales adyacentes, por lo que la radiación en esos canales debe mantenerse en niveles muy reducidos para minimizar interferencias.

En los sistemas analógicos de PMR/PAMR se logra un espectro de modulación angosto reduciendo la desviación de frecuencia de la modulación FM, a costa de una pequeña degradación de la calidad de voz. Sin embargo en redes de PLMN no es admisible esa degradación, por lo que se utiliza una desviación de frecuencia alta, pero entonces se deben separar espacialmente los canales adyacentes.

En los sistemas digitales la limitación de espectro implica la necesidad de trabajar con velocidades de bits reducidas, lo cual obliga la utilización de codificadores/decodificadores (codecs) de voz perfeccionados de baja velocidad binaria y se restringe la velocidad de transmisión de datos. Como las señales digitales puras tienden a producir espectros de modulación con colas de cierta intensidad, para atenuarlas sin producir excesiva radiación en canales adyacentes se somete la señal digital a un filtrado previo a la modulación. Ello implica una cierta interferencia intersimbólica que debe compensar el ecualizador del receptor.

De los sistemas de modulación que se han propuesto para comunicaciones móviles digitales, pueden destacarse los siguientes:

- Modulación por desplazamiento mínimo (MSK) y su variante modulación MSK con pre-filtrado gaussiano, GMSK.
- Modulación de frecuencia moderada (TFM) y su variante gaussiana GTMF.
- Modulación de amplitud y frecuencia PAM/FM.
- Modulación de fase cuaternaria diferencial  $\pi/4$ -DPSK.

**Modulación GMSK:** Las modernas redes PLMN son digitales y con el fin de atenuar los lóbulos espectrales se efectúa un procesamiento en banda de base de la señal digital previo a la modulación, que consiste en hacer pasar la señal por un **filtro gaussiano**. La señal filtrada se aplica al modulador MSK, la cual es una modulación digital de FM con índice  $m = 0,5$ .

La MSK tiene como ventajas el poseer envolvente constante, la sencillez de generación con un modulador en cuadratura, la posibilidad de múltiples tipos de detección (coherente, diferencial y no-coherente) y una anchura de banda espectral razonablemente pequeña. En la Figura 2.11, se representa el espectro de

GMSK normalizado por el periodo de bit  $T$  para la anchura de banda  $B$  del filtro de premodulación, con  $BT = 0,5$ . Se presenta junto a la curva representativa de la MSK que puede considerarse como una GMSK con  $B = \infty$ .

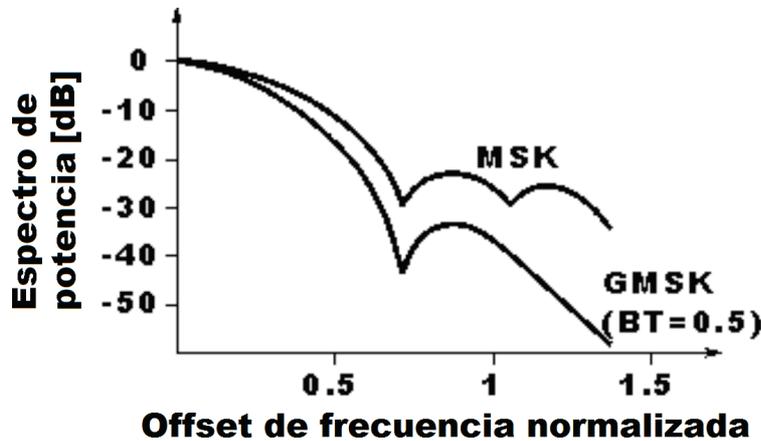


Figura 2.11: Modulación en GMSK

El parámetro  $B$  permite controlar el espectro de GMSK. Cuando más reducida es la anchura de banda del filtro gaussiano, más compacta resulta el espectro. Sin embargo, si se limita excesivamente la banda, puede producirse una degradación en la característica de probabilidad de error de bit (BER) debido a la interferencia entre símbolos.

La canalización utilizada suele ser un múltiplo del valor estándar 25 KHz. Por ejemplo, en el sistema GSM se emplea una canalización igual a 200 KHz ( $8 \times 25$  KHz).

Por último, los sistemas móviles digitales con multiacceso CDMA emplean modulación de fase coherente PSK (Phase Shift Keying) y requieren canalización de banda ancha, del orden de 1.5 MHz (CDMA de banda estrecha N-CDMA) y de 5 MHz (CDMA de banda ancha W-CDMA).

### 2.3. Fundamentos de la telefonía celular móvil

El gran desarrollo que experimentaron los sistemas PMR/PAMR a lo largo de la década de los 60 suscitó un gran interés por la aplicación de las técnicas de comunicaciones móviles a la telefonía básica.

Las primeras redes de PLMN utilizaban técnicas y procedimientos de PAMR, y su zona de cobertura era exclusivamente urbana. Estaban constituidas por una

estación base multicanal, con potencia y altura de antena suficientes para asegurar la cobertura en el enlace descendente y una serie de receptores satélite multicanales para conseguir la comunicación en el enlace ascendente, debido a las menores potencias y altura de antena de los móviles.

Esta concepción de red PLMN con transmisor único tenía importantes limitaciones debido a los requisitos impuestos por demanda de tráfico, por tratarse de sistemas que se ofrecen al público en general.

Se ve que este planteamiento no ofrecía posibilidad de crecimiento alguna y, de hecho, los sistemas instalados en los años 60 en Estados Unidos se saturaron muy pronto, y en otros países se contuvo la demanda mediante la imposición de unas tarifas muy elevadas.

### 2.3.1. Principios de los Sistemas Celulares

En 1947, D. H. Ring, ideó un concepto teórico para aquella época, que permitía resolver el problema de exigencia de capacidad de tráfico propia de las redes PLMN y se denominó *concepto celular*. Esta idea, radicalmente distinta de la propuesta anteriormente que emplea un transmisor único, se basa en:

- La división de la zona de cobertura en regiones pequeñas, llamadas celdas, de tamaño variable en función de la demanda de tráfico.
- La reutilización de las frecuencias en celdas separadas por una distancia suficiente para que la interferencia cocanal sea tolerable.

El *tráfico* ofrecido en una zona es proporcional a la superficie de la zona. Al ser las celdas de tamaño reducido, también el tráfico será pequeño y podrá atenderse con un volumen de recursos moderado, manteniendo una probabilidad de pérdida adecuada.

Además gracias a la reutilización, se multiplica la capacidad de las frecuencias para cursar tráfico, pudiendo efectuarse en todo momento más llamadas que frecuencias halla disponibles, ya que cualquier radiocanal puede cursar varias comunicaciones simultáneamente por celdas distintas, a diferencia del caso del sistema de transmisor único solamente podía darse servicio a un abonado por cada radiocanal.

En la Figura 2.12 se ilustran los conceptos celulares mediante un ejemplo sencillo. La zona de cobertura se recubre mediante 16 celdas organizadas en 4

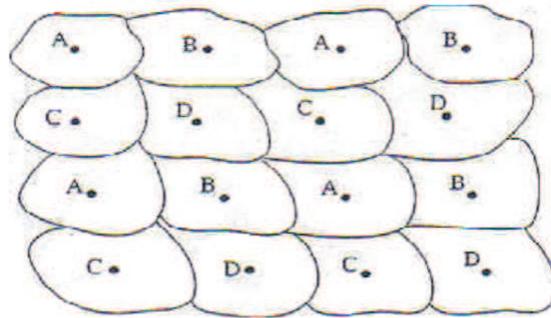


Figura 2.12: División y reutilización en sistemas celulares

agrupaciones de 4 celdas: A, B, C y D, cada una de las cuales se repite cuatro veces, de forma que una estación móvil, cualquiera que sea su ubicación dentro de la zona de cobertura, podrá comunicarse con alguna célula. La cobertura radioeléctrica de las celdas se realiza desde estaciones bases situadas, en principio, en el centro de la célula aproximadamente (caso de celdas es omnidireccionales). Se define operativamente la célula como la superficie en la que una estación base atiende mejor las llamadas que otras estaciones base de alrededor.

Como los radios de cobertura de las celdas suelen ser inferiores a unos 15 km, puede conseguirse la cobertura radioeléctrica de una estación base con transeptores de potencia moderada, incluso para el enlace móvil-base, siendo innecesarios los receptores satélites.

Cada estación tiene una dotación de “ $k$ ” canales, por lo que habrá cuatro grupos: A, B, C y D de “ $k$ ” canales cada uno y en total se utilizarán “ $4k$ ” canales distintos, reutilizándose cuatro veces más el canal. Las estaciones base de cada célula sólo van equipadas con los  $k$  canales de su grupo. Sin embargo, la estación móvil debe tener la capacidad de sintonizarse con cualquiera de los “ $4k$  canales” ya que ha de poder conectarse con cualquier célula.

Como es obvio, la estructura celular únicamente asegura la función de acceso con movilidad a una red telefónica. Por lo tanto todas las estaciones base han de estar conectadas a esa red por enlaces punto a punto, cuyo conjunto se denomina núcleo de red (*core network*) asociada al sistema celular.

Para el funcionamiento del sistema celular se requieren también ejecutar funciones de localización de los móviles, esto es, el sistema debe saber en qué célula se encuentran para pasarles las llamadas destinadas a ellos. Asimismo, si en el curso de una comunicación un móvil sale de la zona de cobertura de una célula y accede a otra, el sistema debe efectuar la conmutación de la llamada a algún

canal de la célula en la que ingresa el móvil ya que, de no ser así, se cortará la comunicación. A esta función se le llama traspaso o *handover*. La localización y el traspaso se denominan funciones de movilidad y son competencia de la red móvil y de la interfaz radio, respectivamente.

**Características de los Sistemas Celulares** Las características fundamentales que se exigen a los sistemas de telefonía móvil son:

- Gran capacidad, de varios miles de abonados.
- Uso eficiente del espectro radioeléctrico.
- Cobertura nacional.
- Adaptación a la densidad de tráfico.
- Prestación del servicio con teléfonos portátiles.
- Amplia gama de servicios suplementarios al de telefonía básica.
- Calidad de explotación (fidelidad, disponibilidad) similar al de la telefonía fija.

Los sistemas celulares permiten la consecución de esos objetivos gracias a sus flexibilidad y a los pequeños radios de cobertura. Además, combinados con las prestaciones que proporciona hoy día la red telefónica inteligente, brindan numerosos servicios suplementarios muy atractivos para el cliente e interesantes para el operador, porque implica que el usuario haga más llamadas.

Quizá, de entre todas las características, la más importante sea la calidad del servicio que se proporciona, tanto a nivel objetivo, como en forma subjetiva tal como la perciben los usuarios. Dados que los sistemas celulares se explotan en régimen de competencia entre operadores, no cabe duda de que la calidad constituye un importante factor de mercado para la captación y el mantenimiento de los abonados.

### 2.3.2. Geometría de los Sistemas Celulares

Si en cada célula se utilizan antenas omnidireccionales, la zona de cobertura, sería aproximadamente circular, como en la Figura 2.12. Sin embargo, las coberturas circulares o no recubren el plano o producen solapes, y esto último implica una reducción del rendimiento espectral, porque para la cobertura de un mismo

punto se emplean dos frecuencias.

En consecuencia, para la planificación, se estudian coberturas de tipo poligonal, que recubran el plano sin solape. En consecuencia, para un radio celular de cobertura fijo  $R$ , que es un parámetro del sistema, el hexágono es el polígono regular que proporciona la mayor superficie de célula por lo que, utilizando hexágonos, será mínimo el número de celdas necesario para la cobertura de un área determinada.

La geometría celular proporciona las ubicaciones de estaciones base y los datos necesarios para los cálculos de interferencia, tamaño de la agrupación y distancia de re utilización. Según el modelo geométrico derivado de la selección del hexágono como superficie celular teórica, para la situación de las estaciones base se emplea un sistema de coordenadas oblicuas cuyos ejes, denominados  $u$  y  $v$  forman un ángulo de  $60^\circ$  entre sí. Las estaciones base se sitúan en puntos llamados nodos, cuyas coordenadas son números enteros. La estructura resultante se denomina retícula de planificación.

En la Figura 2.13, se presenta una retícula de planificación con una célula omnidireccional genérica situada en el origen de coordenadas, con un radio de cobertura  $R$ .

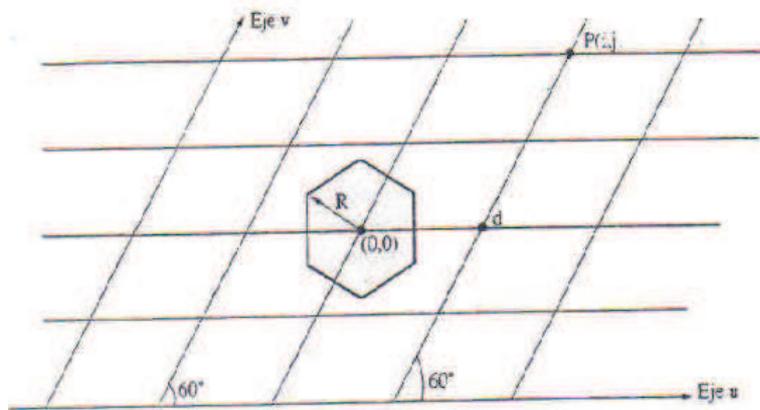


Figura 2.13: Retícula de planificación con célula omnidireccional

Ampliaremos ahora el modelo geométrico para cobertura sectorizada. La transformación de una célula de cobertura omnidireccional en sectorizada se realiza disponiendo en su centro tantos conjuntos de transeptores como sectores se desee generar y asignando a cada conjunto una antena con la directividad adecuada para la configuración del sector. Llamaremos vector de directividad al vector situado en el eje del lóbulo principal de radiación y convendremos en situar una de las

antenas directivas con su vector de directividad orientado al Norte.

En general en los sistemas celulares sectorizados se utilizan 3 transceptores que con sus antenas definen 3 sectores o celdas hexagonales. Los vectores de directividad suelen estar orientados en las direcciones **N**, **SE**, **SO** con una separación angular de **120°** entre sí, como se muestra en la Figura 2.14, en la que se ha ensombrecido el sector N. Con referencia a este sector, tomado como ejemplo, la ganancia de la antena debe ser máxima hacia el vértice opuesto al de la ubicación del transceptor (punto A), debiendo reducirse hacia las direcciones OB y OC ya que estos vértices están a menor distancia.

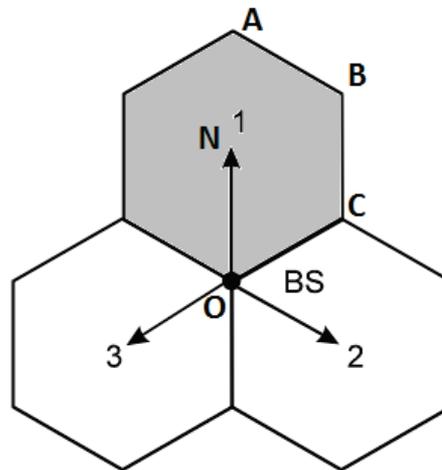


Figura 2.14: Cobertura sectorizada con antenas directivas

Esta disposición aprovecha un mismo emplazamiento, posición de la estación base (punto O), para constituir tres sectores de cobertura hexagonal, por lo que es muy interesante por la economía que supone frente a la alternativa de tres celdas omnidireccionales que requerirían tres ubicaciones. Además, como se verá mas adelante, es también ventajosa desde el punto de vista de la interferencia. Las estructuras celulares sectorizadas suelen designarse con la notación **N/M**, donde **N** indica el numero de emplazamientos y **M** el numero total de celdas por agrupación.

Para la designación de emplazamientos y sectores suele utilizarse la siguiente notación: los emplazamientos se representan por letras A, B, C, ... y los sectores por números 1, 2, 3, ... que describen la orientación normalizada, en sentido horario desde el Norte.

Como ejemplo presentamos en la Figura 2.15, la disposición 7/21. Está constituida

por 21 celdas y 7 emplazamientos de 3 celdas cada uno. La célula B-3, es la célula SO del emplazamiento B. Las líneas con trazo discontinuo mostrarían el equivalente con 7 celdas con cobertura omnidireccional.

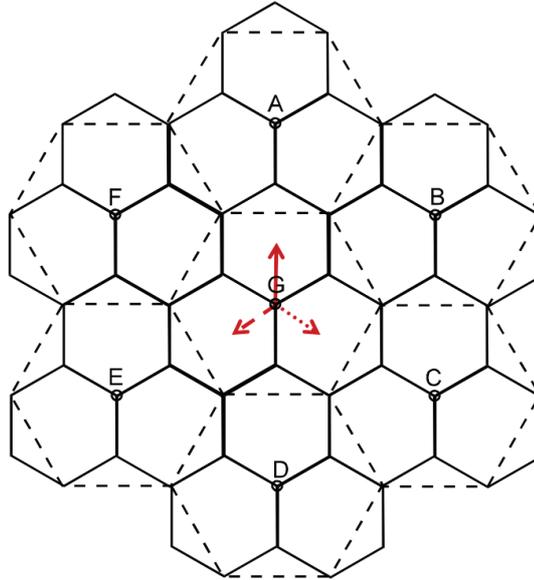


Figura 2.15: Disposición 7/21

### 2.3.3. Arquitectura de los Sistemas Celulares

Los sistemas de telefonía móvil pública son redes telefónicas completas que, como tales, disponen de sus elementos de transmisión y conmutación. A continuación mostraremos la arquitectura de los sistemas celulares vista como estructura general. En la Figura 2.16 se ilustra una arquitectura simplificada de un sistema de comunicaciones móviles celular. Esta arquitectura representa un modelo de la red a muy alto nivel donde se identifican tres componentes básicos:

**Equipo de usuario,** dispositivo que permite al usuario acceder a los servicios de la red. El equipo de usuario puede incluir una tarjeta inteligente (Universal Integrated Circuit Card, UICC) que contenga la información necesaria para permitir la conexión a la red y la utilización de sus servicios (p. ej. identificador único del usuario en el sistema de comunicaciones). El equipo de usuario se conecta a la red de acceso a través de una interfaz radio.

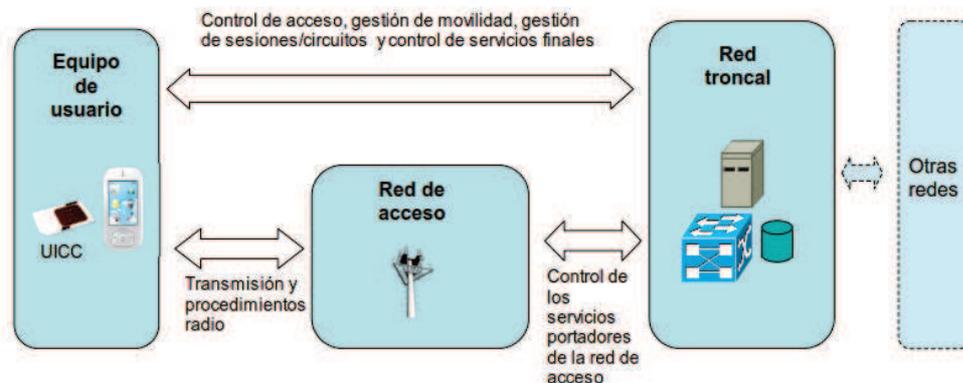


Figura 2.16: Arquitectura genérica de un sistema celular

**Red de acceso,** parte del sistema responsable de sustentar la transmisión radio con los equipos de usuario de cara a proporcionar la conectividad necesaria entre éstos y los equipos de la red troncal. Los servicios de transmisión ofrecidos por la red de acceso para transportar la información de los equipos de usuario (tanto información de datos como señalización) hacia/desde la red troncal son servicios portadores, es decir, servicios cuya finalidad última es la provisión de una cierta capacidad de transmisión. La red de acceso es la responsable de gestionar el uso de los recursos de radio disponibles para la provisión de servicios portadores de forma eficiente. La activación de los recursos de transmisión en la red de acceso se controla generalmente desde la red troncal. La red de acceso está formada por las *estaciones base*, que detallaremos mas adelante, y por equipos controladores de las estaciones base.

**Red troncal,** parte del sistema encargado de aspectos tales como control de acceso a la red celular (p. ej. autenticación de los usuarios del sistema), gestión de la movilidad de los usuarios, gestión de las sesiones de datos o circuitos que transportan la información de los usuarios, mecanismos de interconexión con otras redes, etc. También pueden formar parte de la red troncal las funciones asociadas con el control de los servicios finales ofrecidos a los usuarios (p. ej. control y señalización asociada al servicio de telefonía). La red troncal está formada por equipos que albergan funciones de conmutación de circuitos, encaminamiento de paquetes (routing), bases de datos, etc. Esta arquitectura genérica ha sido adoptada en las diferentes familias de sistemas celulares 2G y 3G, y también se mantiene en el sistema LTE. La separación entre la red de acceso y red troncal

confiere un importante grado de flexibilidad al sistema de cara a soportar un proceso evolutivo en el que se puedan ir mejorando, agregando o sustituyendo las diferentes partes de la red con la mínima afectación posible al resto de la misma.

### 2.3.3.1. Arquitectura general de los sistemas 3GPP

Las arquitecturas de red contempladas en la familia de sistemas especificados por Proyecto Asociación de Tercera Generación (3GPP) se adaptan a la arquitectura genérica descrita en el apartado anterior. Así pues, tal como se representa en la Figura 2.17, los sistemas 3GPP contemplan la especificación del equipo de usuario UE (User Equipment) y de una infraestructura de red que se divide de forma lógica en una infraestructura de red troncal CN(Core Network) y una de red de acceso AN (Access Network).

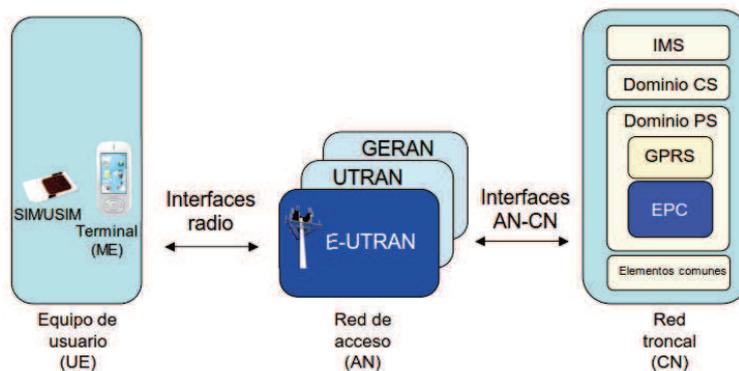


Figura 2.17: Arquitectura en los sistemas 3GPP

El equipo de usuario en 3GPP se compone de dos elementos básicos: el propio dispositivo móvil o terminal ME (Mobile Equipment) y una tarjeta denominada SIM (Subscriber Identity Module) en sistemas GSM y USIM (Universal SIM) en UMTS y LTE, que es la encargada de almacenar la información y sustentar los procedimientos que tienen que ver con la suscripción del usuario a los servicios proporcionados por la red. Mediante esta separación entre terminal y tarjeta se permite que un usuario (identificado a través de la SIM/USIM) pueda utilizar diferentes terminales para acceder a la red.

Respecto a la red de acceso, 3GPP ha especificado tres tipos de redes de acceso diferentes: GERAN (GSM/EDGE Radio Access Network), UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) y E-UTRAN (Evolved UTRAN). Las redes de acceso GERAN y UTRAN forman parte del sistema 3G UMTS mientras que

E-UTRAN es la nueva red de acceso del sistema LTE. Cada red de acceso define su propia interfaz radio para la comunicación con los equipos de usuario: GERAN, también denominada de forma habitual simplemente como GSM, utiliza un acceso basado en TDMA, la tecnología utilizada en UTRAN es WCDMA y, E-UTRAN ha optado por la tecnología OFDMA. Asimismo, la interconexión de las redes de acceso a la red troncal se realiza mediante interfaces AN-CN específicas a cada una de ellas.

Respecto a la red troncal, ésta se divide de forma lógica en un dominio de circuitos CS (Circuit Switched Domain), un dominio de paquetes PS (Packet Switched Domain) y el subsistema IP-Multimedia (IMS).

El dominio CS alberga a todas las entidades de la red troncal que participan en la provisión de servicios de telecomunicación basados en conmutación de circuitos, es decir, servicios a los que se les asignan recursos de forma dedicada (circuitos) en el momento de establecimiento de la conexión, manteniéndose éstos hasta la finalización del servicio (p. ej. servicios de voz y videoconferencia en redes UMTS). El dominio CS es accesible a través de las redes de acceso UTRAN y GERAN. En cambio, el diseño de E-UTRAN no contempla el acceso al dominio CS ya que todos los servicios se proporcionan a través del dominio PS.

El dominio PS incluye a las entidades de la red troncal que proporcionan servicios de telecomunicación basados en conmutación de paquetes. La información de usuario se estructura en paquetes de datos que se encaminan y transmiten por los diferentes elementos y enlaces de la red. En particular, el dominio PS proporciona un servicio de conectividad a redes de paquetes (p. ej. las redes IP y X.25).

Existen dos implementaciones diferentes del dominio PS: GPRS y EPC. GPRS es la implementación del dominio PS que se desarrolló inicialmente en el contexto de redes GSM y que actualmente también forma parte del sistema UMTS. Los servicios de conectividad por paquetes de GPRS son accesibles tanto a través de UTRAN como de GERAN.

Por otro lado, EPC es la nueva especificación del dominio PS desarrollada en el contexto del sistema LTE. EPC es una implementación evolucionada de GPRS que ha sido optimizada para proporcionar un servicio de conectividad IP a los equipos de usuario a través de E-UTRAN. El dominio EPC también ha sido concebido para soportar el acceso al servicio de conectividad IP desde las otras redes de acceso 3GPP (UTRAN y GERAN) así como desde redes no 3GPP (p. ej. las redes CDMA2000, WiMAX, etc.).

En la red troncal existen también elementos que soportan funciones asociadas a los diferentes dominios. Un ejemplo claro es la base de datos que contiene la información de los usuarios del sistema (HSS, Home Subscriber Server) y sobre la que se sustenta la operación de los dominios CS y PS, así como del subsistema IMS comentado a continuación.

También como parte de la red troncal, el subsistema IMS comprende los elementos de ésta relacionados con la provisión de servicios IP multimedia basados en el protocolo SIP (Session Initiation Protocol) de IETF (Internet Engineering Task Force). El subsistema IMS es responsable de la señalización asociada a los servicios multimedia y utiliza como mecanismo de transporte los servicios de transferencia de datos proporcionados por el dominio PS. En este sentido, el subsistema IMS constituye el plano de control de dichos servicios quedando claramente separadas las funciones asociadas al transporte de la información (funciones asociadas al dominio PS) y las funciones propias de la capa de control de los servicios (señalización a nivel de aplicación). Esta separación entre las funciones de transporte y las de control de los servicios adoptados en LTE está en consonancia con los trabajos desarrollados en otros organismos de estandarización como ETSI (TISPAN) y ITU-T (NGN-GSI) respecto a la especificación de las arquitecturas de los futuros sistemas de telecomunicación basados íntegramente en redes de conmutación de paquetes y que responden a la denominación de Next Generation Networks (NGN).

## 2.4. Tecnologías para la telefonía celular móvil

### 2.4.1. 1<sup>ra</sup> Generación de Telefonía Móvil

La primera generación apareció en 1979 y fue creciendo durante los años 80. Se introdujeron los teléfonos celulares basados en redes celulares con múltiples estaciones de base relativamente cercanas unas de otras, lo que permitía el handover, con tiempos de conmutación menores de 500 ms. Eran interrupciones tan pequeñas en la transmisión de voz que no afectaban a la conversación.

Todos los sistemas eran totalmente **analógicos** y su uso era estrictamente para transmitir voz. Los enlaces de voz eran de muy baja calidad, ya que cualquier alteración de la señal en el aire se percibía como “ruido”, el cual el aparato receptor no podía eliminar. Otra desventaja es que no existía seguridad. Cualquier

persona podía escuchar las conversaciones ajenas con un simple sintonizador, o incluso hacer uso de las frecuencias cargando el importe de las llamadas a otras personas.

Utilizaba la técnica FDMA para el acceso a las celdas, lo que limitaba la cantidad de usuarios que el servicio podía ofrecer de forma simultánea. Quizás el principal problema de estos sistemas radicaba en que al ser su implementación propietaria (la estructura y comunicaciones entre los distintos elementos de red quedaban al criterio del fabricante) no era posible interconectar sistemas de distintos suministradores. Existían tres sistemas analógicos principalmente:

- AMPS (Sistema Telefónico Móvil Avanzado)
- TACS (Sistema de Comunicación de Acceso Total)
- TACS (Sistema de Comunicación de Acceso Total)
- NMT (Sistema de Telefonía Móvil Nórdico)

En la Tabla 2.1 resumimos los principales aspectos tecnológicos de estos sistemas:

	<b>AMPS</b>	<b>ETACS</b>	<b>NTACS</b>	<b>MNT-900</b>
<b>Year</b>	1983	1985	1988	1981
<b>Frequency band</b>	850MHz	900MHz	900MHz	900MHz
<b>Carrier spacing</b>	30KHz	25KHz	12.5KHz	12.5KHz
<b>Channel/Carrier</b>	1	1	1	1
<b>Access method</b>	FDMA	FDMA	FDMA	FDMA
<b>Duplex method</b>	FDD	FDD	FDD	FDD
<b>Modulation method</b>	FM	FM	FM	FM

Cuadro 2.1: Sistemas móviles de primera generación

Motorola fue la primera compañía en introducir un teléfono totalmente portátil, el DynaTAC 8000x, desarrollado en 1973, Figura 2.18, bajo la tecnología AMPS. El logro fue extraordinario, pero a pesar de ello fue necesaria una década adicional para que se pusiera a la venta. Costaba 4000 dólares y su batería duraba un máximo de 30 minutos de conversación y la recarga duraba 10 horas. No se comercializó hasta el 6 de marzo de 1983.

### 2.4.2. 2<sup>da</sup> Generación de Telefonía Móvil (2G)

El éxito de la primera generación fue indiscutible, los precios de los teléfonos se abarataron y por tanto se propició un incremento en su consumo masivo,



Figura 2.18: Primer teléfono móvil de la historia

lo que trajo como consecuencia que se mostrara de forma clara las deficiencias que poseían los primeros sistemas utilizados. Los sistemas de segunda generación (también llamados digitales) aparecen, por tanto, con el fin de mejorar los problemas de los sistemas analógicos, en cuanto a soportar una mayor capacidad de usuarios y mejorar la calidad de las comunicaciones así como ofrecer una mayor gama de servicios. Al igual que con la primera generación, inicialmente se desarrollaron varios estándares:

- D-AMPS (IS-54 e IS-136).
- GSM, estándar 3GPP.
- CdmaOne (IS-95), estándar 3GPP2.

	<b>D-AMPS</b>	<b>GSM</b>	<b>CdmaOne</b>
<b>Year</b>	1992	1990	1995
<b>Frequency Bands</b>	850/1900 MHz	850/900/1800 MHz	850/1900 MHz
<b>Carrier Spacing</b>	30KHz	200KHz	1.25MHz
<b>Channel/Carrier</b>	3	8	1
<b>Access method</b>	FDMA/TDMA	FDMA/TDMA	CDMA
<b>Duplex Method</b>	FDD	FDD	FDD
<b>Modul. Method</b>	$\pi/4$ DQPSK	GMSK	DS-SS: QPSK

Cuadro 2.2: Sistemas móviles de segunda generación

La Tabla 2.2, resume los principales aspectos de la tecnología de estos sistemas. El rango de frecuencia coincidió con algunas de las bandas utilizadas por los sistemas 1G (como la 900 MHz en Europa), desplazándolos rápidamente. Sin

embargo, ha sido GSM el que pronto se estandarizó a nivel mundial.

Se trata de un sistema de telefonía totalmente digital que soporta voz, mensajes de texto, datos (9.6 Kbps) y roaming. GSM es el estándar en telecomunicaciones móviles más extendido en el mundo, con un 82 % de los terminales mundiales en uso. GSM cuenta con más de 3000 millones de usuarios en 159 países distintos, siendo el estándar predominante en Europa, América del Sur, Asia y Oceanía y con gran extensión en América del Norte.

En 1992 las primeras redes europeas de GSM-900 iniciaron su actividad, y el mismo año fueron introducidos al mercado los primeros teléfonos móviles GSM, siendo el primero el Nokia 1011 (Figura 2.19) en noviembre de ese año.



Figura 2.19: Nokia 1011. Primer teléfono GSM producido en masa

Esta nueva generación se basa en tecnologías de acceso digital. La relación entre el cliente y el operador se realiza a través de una tarjeta inteligente para la identificación móvil del suscriptor (SIM), que permite realizar o recibir llamadas desde cualquier terminal en el que se inserte la misma, algo que no era posible con los de la generación anterior. Mediante las tecnologías digitales se ofrecieron una amplia variedad de servicios como transmisión de fax y datos a baja velocidad, agenda electrónica, control de consumo, servicio de mensajes cortos de texto (SMS) y de correo electrónico, ocultación del número llamante, restricción de llamadas, etc. Por tanto la introducción de esta generación trajo varias ventajas respecto a los sistemas analógicos de primera generación:

- Optimización en el uso del espectro.
- Utilización de terminales de menor tamaño y personalizables.
- Mejoras en la duración de las baterías y en consumo energético.

- Mayor seguridad en las comunicaciones.
- Itinerancia o roaming.
- Navegar por Internet mediante WAP (Wireless Access Protocol).

**Generación de Telefonía Móvil 2.5G** Una vez que la segunda generación se estableció, las limitaciones de algunos sistemas en lo referente al envío de información se hicieron evidentes. Si bien la tercera generación estaba en el horizonte, algunos servicios se hicieron necesarios para evolucionar hacia su llegada.

GSM se la puede considerar como una tecnología orientada a servicios de voz lo cual no quiere decir que no pueda ser optimizado para realizar transmisiones de datos, lo cual se consigue con tecnologías como GPRS (General Packet Radio System). GPRS aprovecha la estructura de acceso a la red que GSM utiliza, con la misma técnica de modulación GMSK, lo cual lo hace viable en cuanto a su implementación, sólo añade nuevas entidades en la arquitectura para manejar la conmutación y transferencia de datos.

La ventaja de esta tecnología es el uso de la red solo en el envío y recepción de paquetes de información, con una descarga de datos promedio entre 40-115 Kbps.

Aun así se consiguió realizar una mayor cantidad de mejoras, en relación a la transferencia de información, al introducirse el sistema conocido como EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution). Se trata básicamente del sistema GPRS pero con un nuevo esquema de modulación de adaptativa (GMSK o 8-PSK), con esta incorporación se supera hasta 3 veces la capacidad GPRS, con tasas de 384 Kbps.

A día de hoy las redes de telefonía móvil ofrecen tanto el servicio GPRS como el E-GPRS donde la tecnología 4G o 3G no está disponible. Dependiendo de la cobertura móvil del usuario, éste podrá observar en su dispositivo las siglas que identifican a este par de tecnologías pre-3G.

### 2.4.3. 3<sup>ra</sup> Generación de Telefonía Móvil (3G)

La tercera generación de comunicaciones nace con el objetivo de implantar unas redes completamente nuevas que soportaran mayor capacidad para la transmisión de datos en movilidad frente a sistemas anteriores.

Por ello inicialmente la instalación de redes 3G fue lenta, ya que los operadores

requerían adquirir una licencia adicional para un espectro de frecuencias diferente al que era utilizado por las anteriores tecnologías 2G.

A diferencia de las anteriores, esta tecnología presenta una mejor calidad y fiabilidad, una mayor velocidad de transmisión de datos, un ancho de banda superior y una mayor seguridad.

Aunque inicialmente se especificó una velocidad de 384 Kbps (la cual es casi siete veces más rápida que una conexión telefónica estándar), la evolución de la tecnología permite ofrecer al suscriptor velocidades de descarga superiores a 3 Mbps. Los sistemas 3G son capaces de dar soporte en aplicaciones como:

- Voz en servicios multimedia en tiempo real y banda ancha.
- Alta velocidad para navegar por Internet, pudiéndose además realizar múltiples conexiones simultáneamente desde un mismo terminal móvil.
- Servicios unificados de mensajes como correo electrónico multimedia.
- Aplicaciones de comercio electrónico móvil (que incluye operaciones bancarias y compras móviles).
- Aplicaciones audio/video en tiempo real como video teléfono, videoconferencia interactiva, audio y música, aplicaciones multimedia especializadas como telemedicina y supervisión remota de seguridad.

Y es que la 3G evoluciona para integrar todos los servicios ofrecidos por las distintas tecnologías y redes actuales, utilizando cualquier tipo de terminal, sea un teléfono fijo, inalámbrico o celular, tanto en un ámbito profesional como doméstico, ofreciendo una mayor calidad de los servicios y soportando la personalización por el cliente y los servicios multimedia móviles.

Existen varios sistemas y estándares 3G que han surgido en diferentes áreas geográficas, todos ellos con características técnicas propias (rango de frecuencias del espectro y tecnologías de multiplexación). Los dos protocolos principales son:

- UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) que se está implantando, básicamente en Europa y Japón.
- CDMA2000 con predominio en Estados Unidos.

La Tabla 2.3 resume los principales aspectos de la tecnología de estos sistemas:

	<b>UMTS</b>	<b>CDMA2000 1X</b>
<b>Standard</b>	3GPP Release 99	3GPP2
<b>Frequency Bands</b>	850/900 MHz 1.8/1.9/2.1 GHz	450/850 MHz 1.7/1.9/2.1 GHz
<b>Channel Bandwidth</b>	5 MHz	1.25 MHz
<b>Peak Data Rate</b>	384–2048 Kbps	307 Kbps
<b>Plane Latency</b>	100–200 ms	500–600 ms
<b>Access Method</b>	CDMA	CDMA
<b>Duplex Method</b>	FDD	FDD
<b>Modulation Method</b>	DS-SS: QPSK	DS-SS: BPSK, QPSK

Cuadro 2.3: Sistemas móviles de tercera generación

**Sistemas 3.5G** No fue hasta mediados de la primera década del milenio con los sistemas 3.5G cuando se alcanzaron tasas de descarga y subida considerablemente altas. Las evoluciones 3.5G de UMTS y Cdma2000 son HSPA (High Speed Packet Access) y HRPD (High Rate Packet Data) o EV-DO (Evolution Data Optimized), respectivamente. La eficiencia espectral alcanzada en HSDPA (High Speed Download Packet Access) es 14 Mbps en 5 MHz, destacando la incorporación de 16-QAM a las posibles modulaciones, como se muestra en la Tabla 2.4. Una última versión, llamada HSPA+ está en uso en la actualidad, proporcionando tasas máximas de hasta 42 Mbps.

<b>Nombre</b>	<b>Release</b>	<b>Vel. descarga</b>	<b>Vel. subida</b>
<b>HSDPA</b>	Release 5	14.4 Mbps	384 Kbps
<b>HSUPA</b>	Release 6	14.4 Mbps	5.76 Mbps
<b>HSPA+</b>	Release 7	28 Mbps	11.5 Mbps
<b>HSPA+MIMO</b>	Release 8	42 Mbps	11.5 Mbps

Cuadro 2.4: Evolución de HSPA

#### 2.4.4. 4<sup>ta</sup> Generación de Telefonía Móvil (4G)

El sistema móvil de cuarta generación está basado totalmente en IP. No se trata de una tecnología o estándar definido, sino una colección de tecnologías y protocolos que permitan el máximo rendimiento y por lo tanto se considera un sistema de sistemas y una red de redes. Esta convergencia de tecnologías surge de la necesidad de agrupar los diferentes estándares en uso con el fin de delimitar el ámbito de funcionamiento de cada uno de ellos y para integrar todas las posibilidades de comunicación en un único dispositivo de forma transparente al usuario.

NTT DoCoMo en Japón fue el primero en experimentar con este tipo de tecnologías. Alcanzó 100 Mbps a 200 km/h y fue pionero en lanzar comercialmente los primeros servicios 4G. Dentro de los estándares encontramos dos:

- LTE estándar de la norma 3GPP
- IEEE 802.16 de la norma WiMAX

La Tabla 2.5 resume los principales aspectos de la tecnología de estos sistemas:

	<b>LTE</b>	<b>Mobile WiMAX</b>
<b>Standard</b>	3GPP Release 8	IEEE 802.16e/2005
<b>Frequency Bands</b>	700 MHz, 1.5 GHz 1.7-2.1/2.6 GHz	2.3 GHz, 2.6/3.5 GHz
<b>Channel Bandwidth</b>	1.4/3/5/10/15/20 MHz	5/7/8.75/10 MHz
<b>Peak Downlink Data Rate</b>	150Mbps (2x2 MIMO, 20Mhz)	46Mbps (2x2 MIMO, 10Mhz,3:1 TDD)
<b>Peak Uplink Data Rate</b>	75Mbps (10Mhz)	7Mbps (10Mhz,3:1 TDD)
<b>User-Plane Latency</b>	5-15ms	15-40ms
<b>Frame Size</b>	1ms sub-frames	5ms frames
<b>DL Multiple Access</b>	OFDMA	OFDMA
<b>UL Multiple Access</b>	SC-FDMA	OFDMA
<b>Duplexing</b>	FDD + TDD	TDD, option FDD
<b>Data Modulation</b>	OFDM: QPSK, 16QAM,64QAM	OFDM: QPSK, 16QAM,64QAM

Cuadro 2.5: Sistemas móviles de cuarta generación

El reciente aumento del uso de datos móviles y la aparición de nuevas aplicaciones han sido las motivaciones por las que 3GPP desarrollase el proyecto LTE (Long Term Evolution). De esta manera, se diseña un sistema capaz de mejorar significativamente la experiencia del usuario con total movilidad, que utilice el protocolo de Internet (IP) para realizar cualquier tipo de tráfico de datos de extremo a extremo con una buena calidad de servicio (QoS) y, de igual forma el tráfico de voz, apoyado en Voz sobre IP (VoIP) que permite una mejor integración con otros servicios multimedia.

El estándar LTE, no es puramente 4G porque no cumple los requisitos definidos por la IMT-Advanced en características de velocidades pico de transmisión y eficiencia espectral. Aun así la UIT declaró en 2010 que los candidatos a 4G, como era éste, podían publicitarse como 4G sin ningún problema.

LTE se destaca por su interfaz radioeléctrica basada en OFDMA, para el enlace descendente y SC-FDMA (Single Carrier FDMA) para el enlace ascendente. La modulación elegida por la norma 3GPP hace que las diferentes tecnologías de antenas (MIMO) tengan una mayor facilidad de implementación.

**LTE Advanced** LTE Advanced se corresponde con las mejoras realizadas en la tecnología LTE para poder alcanzar velocidades superiores a los 150 Mbps. También se denomina 4.5G ó 4G+ y se caracteriza por permitir un sistema escalable de ancho de banda excediendo los 20 MHz del LTE (potencialmente hasta los 100 MHz). Esta técnica se conoce como **Carrier Agregación**.

Consiste en que, cuando un terminal se da cuenta de que tiene cobertura de dos antenas 4G a la vez, cada una de una banda de frecuencias diferente, en lugar de tener que elegir entre una de las dos, se plantea usar las dos antenas. Si el dispositivo es capaz de trabajar con dos bandas de frecuencia 4G a la vez, y siempre que la red también sea capaz de gestionarlo, se usan las dos antenas simultáneamente para las descargas de Internet, y la velocidad máxima teórica de bajada será la de la suma de las velocidades de cada antena individual(Figura 2.20).

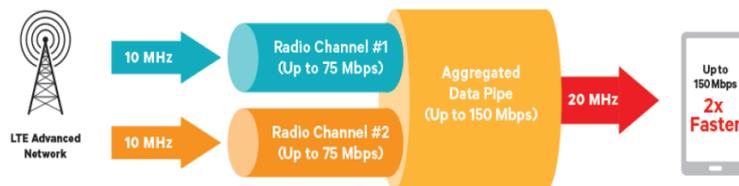


Figura 2.20: Representación de Carrier Agregación con dos bandas de 10MHz

Por ejemplo, si se tiene cobertura 4G en la banda 4 con ancho de banda 10 MHz y a su vez, en la banda 28 con ancho de banda 10 MHz, actualmente el terminal elegiría la antena de banda 4 y, por lo tanto, podría descargar a 16.6 Mbps. Pero, si contamos con Carrier Agregación, pasaríamos a usar las dos antenas a la vez (banda 4 y banda 28) y la velocidad máxima de descarga se duplicaría teóricamente.

Por el momento los dispositivos actuales pueden llegar a permitir Carrier Agregación de hasta 2 bandas. En el futuro se podrá ampliar a más para alcanzar mayores velocidades.

## 2.5. Antenas de telefonía celular móvil

### 2.5.1. Tipos de antenas

Las antenas de telefonía se caracterizan por ser bi-direccionales (emisión o recepción) de baja potencia. Además por producir radiación RF, son montadas sobre postes, torres de transmisión, o en los techos de altos edificios, ya que necesitan estar a cierta altura para poder tener una cobertura más amplia. Para el sistema de transporte de la información, entre radiobases y la red troncal se emplean enlaces por fibra óptica y como otra alternativa radioenlaces con antenas parabólicas (Figura 2.21).

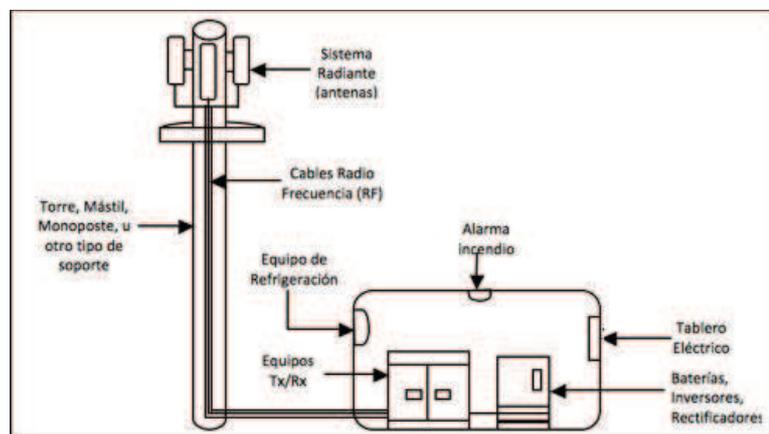


Figura 2.21: Panorama general de la instalación de una estación base

Las antenas omnidireccionales sirven para cubrir un ángulo de azimut de  $360^\circ$  y normalmente se utilizan en la etapa inicial de la expansión de la estación base o en zonas rurales (Figura 2.22).

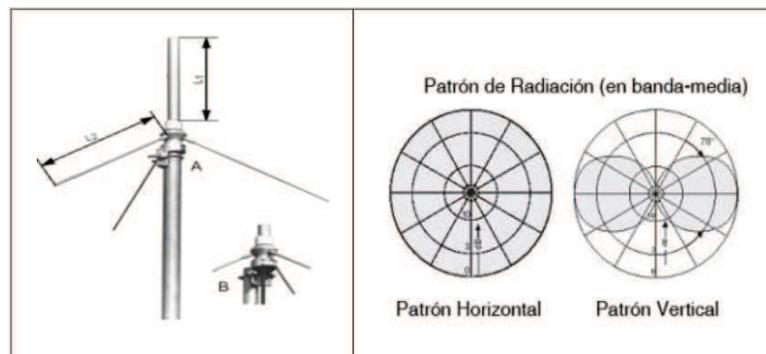


Figura 2.22: Antena omnidireccional y patrón de radiación

Las antenas sectoriales cubren ángulos de  $60^\circ$  y  $120^\circ$  y sirven para expandir la cobertura de abonados de la estación base (Figura 2.23).

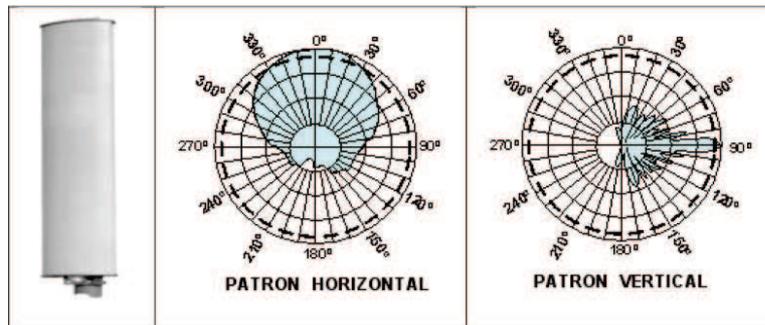


Figura 2.23: Antena sectorizada y patrón de radiación

## 2.5.2. Diversidad de espacio y polarización

**Diversidad de espacio:** Se tienen tres antenas por sector, dos para la recepción con diversidad y una para transmisión. Las antenas de recepción con diversidad se encuentran separadas de 5 a 10 longitudes de onda tal como se muestran en la Figura 2.24.

La diversidad en el espacio utiliza dos antenas polarizadas verticalmente en la recepción, entonces se recibe la misma señal a través de dos vías diferentes y así se logra mitigar los efectos de desvanecimiento.

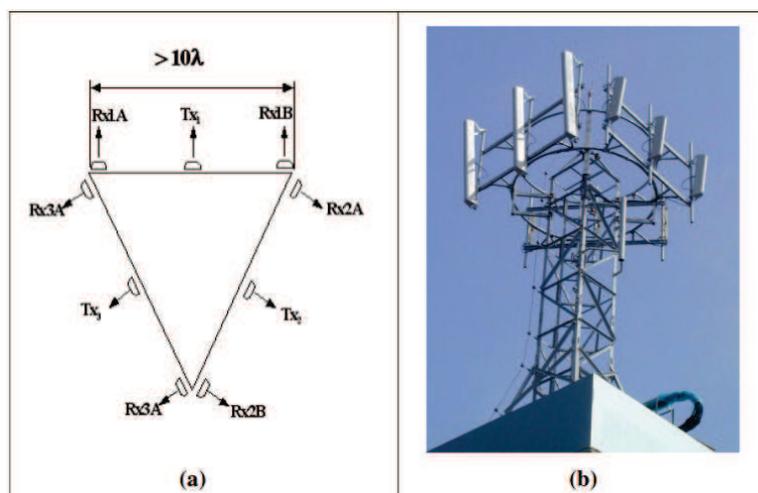


Figura 2.24: Diversidad espacial en la recepción

**Diversidad de polarización:** Por un lado las reflexiones que ocurren en áreas urbanas no siempre tienen la misma polarización y por lo tanto también puede haber componentes horizontales.

Por otro lado, un teléfono móvil nunca está posicionado verticalmente, lo que significa que todas las polarizaciones entre vertical y horizontal son posibles. Por lo que las señales en polarizaciones distintas a la vertical y horizontal pueden ser utilizadas para establecer la comunicación. La diversidad por polarización utiliza dos antenas ortogonalmente polarizadas y compara las señales resultantes (Figura 2.25).

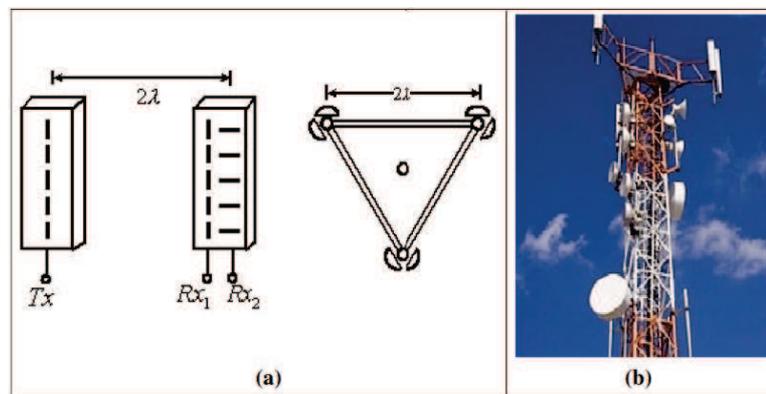


Figura 2.25: Diversidad de polarización en la recepción

### 2.5.3. Polarización de las antenas

Los dipolos de ambos sistemas de diversidad de antenas son polarizados en forma horizontal y vertical, según como operen.

Las antenas de polarización doble (horizontal y vertical), no requiere una separación espacial, lo que quiere decir, que dipolos con polarizaciones diferentes pueden ser instalados en una estructura común. Un aislamiento suficiente puede ser alcanzado, aún cuando estos dipolos estén intercalados en una única unidad doblemente polarizada con dimension no mayor al de una antena con polarización única.

Las antenas de polarización doble, permiten el aislamiento suficiente (en el orden de 30 dB) entre el sistema polarizado horizontalmente y el sistema polarizado verticalmente y solo necesitan dos antenas por sector distanciadas 2 longitudes de onda, una para transmisión y otra para recepción con polarización doble (Figura 2.25), pudiendo reducirse a una sola unidad mediante la utilización de un

duplexor para transmitir y recibir simultáneamente con la antena de polarización vertical y obtener recepción por diversidad con la antena de polarización horizontal (Figura 2.26a).

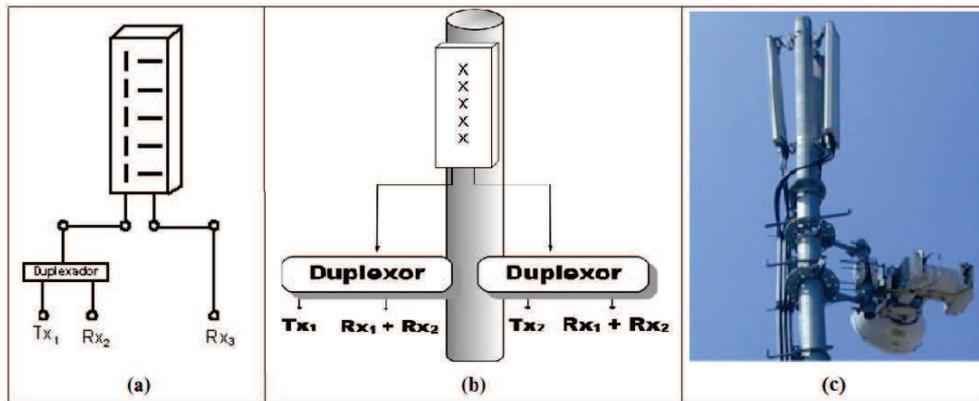


Figura 2.26: Diversidad por polarización + duplexor: (a)doble y (b)X-Pol

**Polarización cruzada:** Las antenas de polarización cruzada que son llamadas antenas X-Pol, tienen dos modos de polarización a  $\pm 45^\circ$ . Estas polarizaciones pueden ser separadas en componentes verticales y horizontales de igual amplitud y dependiendo de la orientación de los obstáculos, estas componentes son afectadas diferentemente.

Por tanto, las reflexiones no sólo destruyen los diagramas de radiación de antenas X-Pol, como también alteran la dirección de polarización, lo que puede llegar a una reducción en el rendimiento de la diversidad.

Se concluye que ambos sistemas son equivalentes con respecto a su eficiencia en la propagación, por lo tanto, pueden ser usados con buenos resultados tanto en transmisión como en recepción. La característica de la X-Pol es que permite hacer transmisiones simultáneas de dos transmisores sin el uso de un combinador de transmisión (Figura 2.26b).

#### 2.5.4. Haz de Antena

El perfil de radiación es cuidadosamente escogido por los planificadores de las redes a fin de producir una cobertura optima de la celda, la forma general del haz se ilustra en la Figura 2.27.

- Las antenas usadas en estaciones base macrocelulares tienen haces estrechos

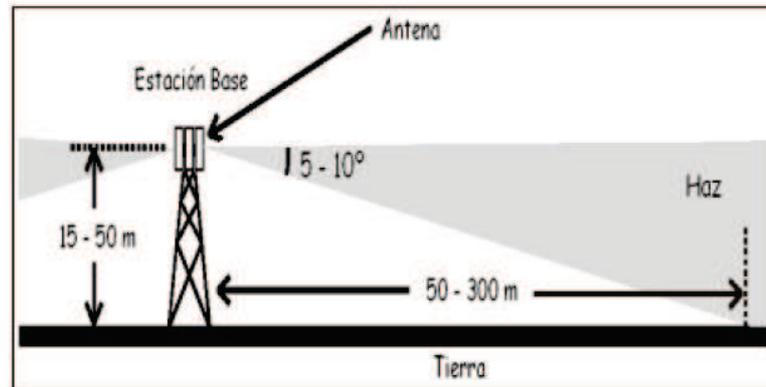


Figura 2.27: Forma del haz en una antena típica de estación base

en el plano de elevación con anchura típica entre  $5^\circ$  y  $10^\circ$ . El haz está también ligeramente inclinado hacia abajo, entonces el borde superior del haz principal es aproximadamente horizontal donde el borde inferior es dirigido  $10^\circ$  bajo la horizontal.

- Las antenas usadas en estaciones base microcelulares tienen haces mucho más anchos en el plano de elevación porque tratan de comunicarse sobre distancias mucho más cortas.

Cuando se calculan las alturas a las cuales las antenas son montadas, se ha de considerar que el haz principal desde la antena llegue a tierra típicamente entre 50 y 300 m. desde el pie y el mástil.

Un factor determinante en el diseño, la ubicación e instalación de las antenas es su altura, pues debe mantener la línea de vista con el área a servir. Las edificaciones, árboles y otros obstáculos que bloqueen la línea de vista pueden atenuar o reflejar las señales.

**Inclinación del Haz:** La propagación ideal entre celdas de una red de telefonía móvil implica la estricta limitación del área de cobertura de cada celda para evitar interferencias entre ellas, por un lado es necesario darle al haz de la antena una inclinación vertical hacia abajo (conocido como downtilt) que puede lograrse mecánicamente inclinando la antena hacia abajo o también eléctricamente mediante el ajuste adecuado de las fases de la señal en las antenas, por otro lado es necesario atenuar el lóbulo lateral vertical superior de las antenas para minimizar la formación de zonas de interferencia.

La antena ya es ajustada en la fábrica con el haz inclinado con un ángulo estándar,

que puede ser de  $3^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $9^\circ$  y  $12^\circ$ .

En la Figura 2.28, donde se ha tomado una celda de 3 km de radio y dos usuarios situados en el borde de la celda y a una distancia de 100 m de la estación base. De acuerdo con las distancias indicadas, se obtienen unos ángulos de elevación para las antenas de los usuarios 1 y 2 de  $16,7^\circ$  y  $0,6^\circ$  respectivamente.

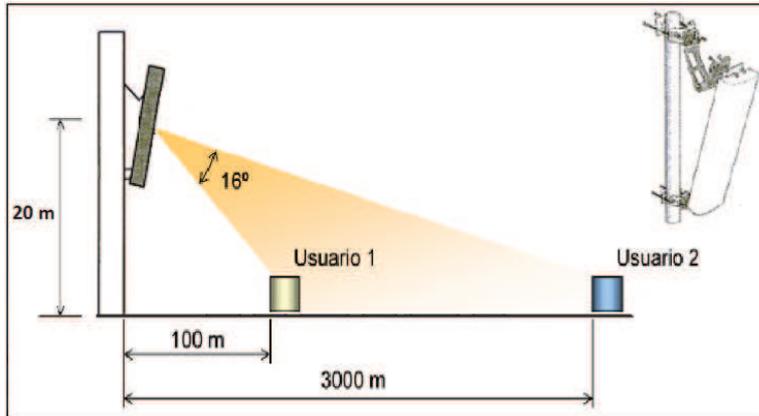


Figura 2.28: Inclinación de haz debido al downtilt

## 2.6. La telefonía móvil Argentina

En Argentina la prestación de servicios de comunicaciones móviles comenzó en 1989, con el denominado Servicio de Radiocomunicación Móvil Celular (SRMC), objeto del Concurso Público N° 1/88. En donde obtuvo licencia la Compañía de Radiocomunicaciones Móviles S.A. (Movicom), para explotar el SRMC en banda “B” dentro del Área Múltiple de Buenos Aires (AMBA), La Plata y Corredor Buenos Aires - La Plata. Toda esta región también conocida como el **Área de Explotación II**.

Posteriormente, mediante las Resoluciones SC N° 179/90 y CNT N° 317/91, se extendió el Área II hasta el Río de la Plata y a las áreas próximas al AMBA. Asimismo mediante la Resolución CNT N° 442/91 se amplía el SRMC a la banda B’.

El proceso iniciado con la sanción de la Ley N° 23.696 desembocó en la privatización de la prestación de los servicios de la empresa estatal ENTEL, mediante Concurso Internacional sujeto al Pliego de Bases y Condiciones aprobado por Decreto N° 62/90 y sus modificatorios. El citado Pliego reconoce la situación preexistente y establece las condiciones para la adjudicación de nuevas licencias. En

efecto, sobre la base de las disposiciones del Pliego y del Decreto N° 506/92, se estableció que las Licenciatarias del Servicio Básico Telefónico (LSB), explotarían la segunda banda del SRMC en la banda "A", formándose la empresa Miniphone (perteneciente a Telefónica Comunicaciones Personales S.A. y a Telecom Personal), propiedad de las LSB, donde operarían en toda región del Área II donde estas posean licencia.

El Servicio de Telefonía Móvil (STM) definido en el pliego de bases y condiciones aprobado por Decreto N° 1461/93, estableció las condiciones para el llamado a concurso para la operación de la primera banda STM. A los efectos del presente reglamento, y de los pliegos de bases y condiciones que en consecuencia se dicten, se considerará prestadores de STM a quienes prestan el mismo en las áreas de explotación I y III:

- **Área de Explotación I** (Norte), compuesta por las provincias de Entre Ríos, Corrientes, Misiones, Córdoba, Santiago del Estero, Chaco, Formosa, Catamarca, La Rioja, Tucumán, Salta y Jujuy y la Provincia de Santa Fe con la exclusión del límite terrestre de los departamentos Constitución, San Lorenzo y Rosario.
- **Área de Explotación III** (Sur), integrada por las provincias de San Juan, San Luis, Mendoza, La Pampa, Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur.

Los departamentos Constitución, San Lorenzo y Rosario de la Provincia de Santa Fe y la Provincia de Buenos Aires con exclusión del Área de explotación II.

Resultando licenciada de la primera banda del STM en 1995, tanto en el Área I como en el Área III, la empresa CTI (Compañía de Teléfonos del Interior), comenzando a brindar servicios móviles en el interior del país.

En 1996, se otorgaron licencias para Telefónica Comunicaciones Personales S.A. y para Telecom Personal S.A., para la operación en la segunda banda del STM. Obteniendo así servicio de telefonía móvil en las zonas geográficas donde brindaban el LSB, compitiendo con CTI.

Con posterioridad, el Gobierno Nacional por Decreto N° 92/97 aprobó el Reglamento General del Servicio de Comunicaciones Personales (PCS), y mediante la Resolución S.C. N° 60/97 se aprobaron los Pliegos de Bases y Condiciones Generales y Particulares para el otorgamiento de licencias para prestar PCS en

el Área de Explotación II (Pliego AMBA), y posteriormente las Áreas de Explotación I y III (Pliego Interior), aprobada por Decreto N° 301/99.

Asimismo, mediante el Decreto N° 266/98 (Artículo 4°, apartado 4.2.1 del Anexo del Artículo 1), con el fin de evitar la concentración de espectro radioeléctrico de las empresas en un mismo sitio geográfico, se limitó el ancho de banda a 50 MHz por prestador y para una misma área de servicio.

A partir de 1999 los operadores del interior del país tuvieron acceso al AMBA, Miniphone se escindió entre sus propietarias, mientras que Movicom, único prestador del AMBA, tuvo acceso a operar en el interior del país. Se configuró un mercado en el que CTI, Personal (de Telecom), Unifón (de Telefónica) y Movicom comenzaron a operar en todo el país, y en el que los usuarios pudieron elegir libremente entre los diferentes prestadores autorizados a brindar el servicio en cada área.

Entre 2001 y 2002, se produjo una baja en la cantidad de terminales móviles, sin embargo la tendencia se revirtió muy rápidamente a partir del año 2003.

En 2003 la compañía América Móvil adquirió CTI Móvil pero siguió operando el servicio con la marca CTI.

El 12 de marzo de 2004, Telefónica Móviles S.A. (actualmente quien explota la marca Movistar), sociedad del Grupo Telefónica, adquirió los activos de la Compañía de Radiocomunicaciones Móviles S.A. (Movicom). La operación referida implicaba la acumulación de espectro radioeléctrico por parte de la empresa adquirente en aproximadamente 85 MHz, bastante más de los 50 MHz establecidos por la regulación. Luego, la Resolución SC N° 343/2005 estableció el cronograma de devolución de espectro), condicionó la operación conjunta de las empresas involucradas a cumplir con la normativa vigente.

En marzo de 2008 América Móvil (CTI) decidió modificar el nombre comercial bajo el cual operaba, reemplazándolo por Claro, para unificarlo con la marca que ya utilizaba en otros países de América Latina.

En el año 2011 se llama a licitación para otorgar el espectro devuelto, pero finalmente la licitación se suspende (2012) y el espectro se le otorga a una empresa pública (ARSAT), que al momento de la emisión del Decreto 2426/2012, no poseía la infraestructura requerida, ni lo tenía al momento de la emisión del Decreto 671/14.

En el contexto referido, llegamos a la Resolución N° 37/2014 de la Secretaría de Comunicaciones, que aprueba el reglamento del nuevo Servicio de Comunicaciones

Móviles Avanzadas (SCMA), fija como límite regulatorio para dicho servicio 60 MHz por prestador. Por otro lado, se subastan 95 MHz de espectro para servicios PCS y 7.5 MHz de SRMC, distribuidos en las tres áreas, pero además se agregan 180 MHz de SCMA de explotación nacional.

Asimismo, el pliego crea la figura del nuevo entrante para el cual reserva 20 MHz de espectro para servicios PCS por área de explotación y 40 MHz de espectro para SCMA.

**Configuración actual** El servicio de telefonía móvil es brindado por tres principales empresas:

- 1. Personal (Telecom),
- 2. Movistar (de Telefónica, ex Unifón y Movicom)
- 3. Claro (AMX Argentina, ex América Móviles y CTI).

El cuarto operador es Nextel, que se concentra en el mercado corporativo.

### 2.6.1. Asignación de servicios

Los servicios de comunicación correspondientes para la explotación de la red de acceso de la telefonía móvil celular en las áreas geográficas de la República Argentina, son el Servicios de Telefonía Móvil (STM), Servicio de Radiocomunicaciones Móvil Celular (SRMC), Servicio de Comunicaciones Personales (PCS) y Servicio de Comunicaciones Móviles Avanzadas (SCMA). Estos servicios además se corresponden con las bandas de frecuencias y tecnologías en que opera la telefonía móvil, como se observa en el Cuadro 2.6.

Servicio	Área de Explotación	Rango de frecuencia (MHz)	Tecnología
SRMC	II	824-849/869-894	GSM/UMTS
STM	I y III	824-849/869-894	GSM/UMTS
PCS	II	1850-1910/1930-1990	GSM/UMTS
PCS	I y III	1850-1910/1930-1990	GSM/UMTS
SCMA	Nacional	698-806	LTE
SCMA	Nacional	1710-1770/2110-2170	LTE
SCMA	Nacional	2500-2570/2620-2690	LTE

Cuadro 2.6: Asignación de servicios para el territorio nacional

## 2.6.2. Bandas de frecuencia

Las bandas de telefonía asignadas para la República Argentina y las tecnologías en que operan estas son las siguientes:

- 2G (EDGE, GSM/GPRS): 850 y 1900 MHz.
- 3G (HSPA+, UMTS/WCDMA): 850 y 1900 MHz.
- 4G (LTE/LTE-A): 700 MHz (banda 28), 1700 y 2100 MHz (banda 4), 2500-2600 MHz (banda 7).

### 2.6.2.1. Banda 850

La banda de 850 MHz conocida también como GSM-850 para el sistema GSM y banda V en sistemas UMTS, es una de las bandas más utilizada en América.

**Banda de operación** A continuación en el Cuadro 2.7 se detallan las bandas de frecuencias atribuidas a los Servicios de Comunicaciones Móviles en la República Argentina:

Frecuencia	Ancho	Duplex	Uso
824-849 MHz	25 MHz	45 MHz	Subida
869-894 MHz	25 MHz	45 MHz	Bajada

Cuadro 2.7: Banda 850 para 2G/3G

**Operadores móviles** A continuación en el Cuadro 2.8 se muestra la división de servicios atribuidos por los operadores de las telco. Esta distribución entre operadores es conforme al Área de Explotación II, que corresponde AMBA, La Plata y el Corredor Buenos Aires - La Plata; asignada para el Servicio de Radio-comunicación Móvil Celular.

Bloque	Subida	Bajada	Operador	Tecnología
2x10 MHz	824-834 MHz	869-879 MHz	Personal	GSM/UMTS
2x15 MHz	834-849 MHz	879-894 MHz	Movistar	GSM/UMTS

Cuadro 2.8: Servicios Móviles de 2G/3G

**Espectro en banda 850** En la Figura 2.29 se observa un ejemplo de uso del espectro en la localidad de San Martín, en la banda de 850 (enlace descendente). Utilizado para los servicios móviles 2G/3G.

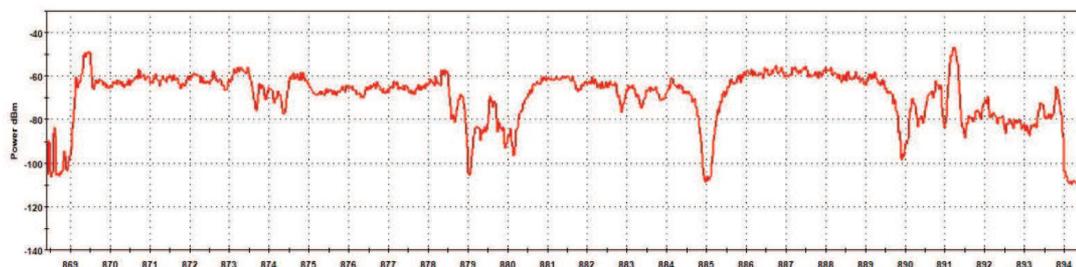


Figura 2.29: Banda 850 Downlink

- El sistema GSM 850 utiliza una anchura de banda de 200 KHz por canal, esta anchura esta distribuida parcialmente en toda la banda de 850 con una modulación GMSK, con potencia de transmisión entre 38 *dBm* para coberturas de rango medio y 24 *dBm* para áreas locales.
- El sistema UMTS 850 utiliza una anchura de banda que debe ser menor a 5 MHz por portadora, esta anchura esta distribuida en la banda de 850 con una modulación WCDMA (espectro ensanchado), con potencia de transmisión entre 38 *dBm* para coberturas de rango medio y 24 *dBm* para áreas locales.

### 2.6.2.2. Banda 1900

La banda de 1900 MHz, también llamada PCS-1900 en sistemas GSM y banda II en sistemas UMTS, es otra banda muy utilizada en los países de América.

**Banda de operación** A continuación en el Cuadro 2.9 se detallan las bandas de frecuencias atribuidas a los Servicios de Comunicaciones Móviles en la República Argentina:

Frecuencia	Ancho	Duplex	Uso
1850-1910 MHz	60 MHz	80 MHz	Subida
1930-1990 MHz	60 MHz	80 MHz	Bajada

Cuadro 2.9: Banda 1900 2G/3G

**Operadores móviles** A continuación en el Cuadro 2.10 se muestra la división de servicios atribuidos por los operadores de las telco. Esta distribución entre operadores es conforme al Área de Explotación II, que corresponde AMBA, La Plata y el Corredor Buenos Aires - La Plata; asignado para el Servicio de Comunicaciones Personales (PCS).

Bloque	Subida	Bajada	Operador	Tecnología
2x25 MHz	1850-1875 MHz	1930-1955 MHz	Claro	GSM/UMTS
2x10 MHz	1875-1890 MHz	1955-1970 MHz	Personal	GSM/UMTS
2x25 MHz	1900-1910 MHz	1980-1990 MHz	Movistar	GSM/UMTS

Cuadro 2.10: Servicios Móviles 2G/3G

**Espectro en banda** En la Figura 2.30 se observa un ejemplo de uso del espectro en la localidad de San Martín, en la banda de 1900 (enlace descendente). Utilizado para los servicios móviles 2G/3G.

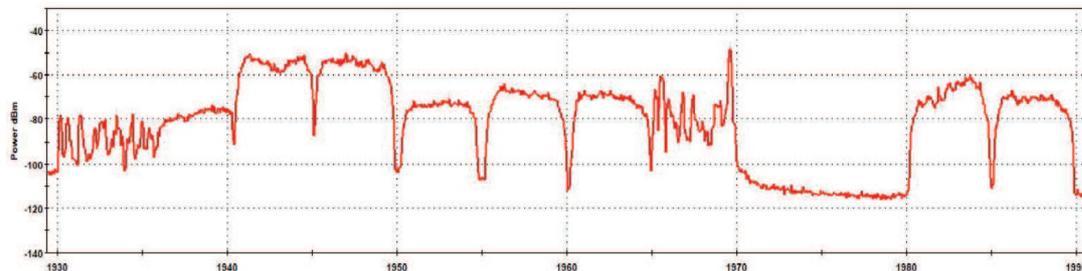


Figura 2.30: Banda 1900 Downlink

- El sistema GSM 1900 utiliza una anchura de banda de 200 KHz por canal, esta anchura esta distribuida parcialmente en toda la banda de 850 con una modulación GMSK, con potencia de transmisión entre 38 *dBm* para coberturas de rango medio y 24 *dBm* para áreas locales.
- El sistema UMTS 1900 utiliza una anchura de banda que debe ser menor a 5 MHz por portadora, esta anchura esta distribuida en la banda de 850 con una modulación WCDMA en espectro ensanchado), con potencia de transmisión entre 38 *dBm* para coberturas de rango medio y 24 *dBm* para áreas locales.

### 2.6.2.3. Banda 4 (AWS ó 1700)

La banda 4, conocida como AWS-1 o 1700/2100 MHz por la frecuencia en que opera, es la primera de las bandas 4G/LTE que se desplegó en Argentina a finales del 2014. La banda atribuida a la República Argentina es la Banda 10 que es más ancha en espectro, 1710-1770 MHz para el enlace de subida y 2110-2170 MHz para el de bajada, pero es adoptada la primera debido a que esta es soportada por mayor cantidad de terminales.

**Banda de operación** A continuación en el Cuadro 2.11 se detalla la banda de frecuencia atribuida al servicio SCMA en la República Argentina:

Frecuencia	Ancho	Duplex	Uso
1710-1770 MHz	60 MHz	400 MHz	Subida
2110-2170 MHz	60 MHz	400 MHz	Bajada

Cuadro 2.11: Banda 4 para 4G

**Operadores móviles** A continuación en el Cuadro 2.12 se muestra la división de la banda atribuidos por los operadores de las telco. Esta distribución entre operadores es conforme al Área de Explotación Nacional, para el Servicio de Comunicaciones Móviles Avanzadas (SCMA).

Lote	Subida	Bajada	Operador
2x10 MHz	1710-1720 MHz	2110-2120 MHz	Movistar
2x10 MHz	1720-1730 MHz	2120-2130 MHz	Claro
2x15 MHz	1730-1745 MHz	2130-2145 MHz	Personal

Cuadro 2.12: Servicios Móviles LTE en banda 4

**Espectro de banda** En la Figura 2.31 se observa un ejemplo de uso del espectro en la localidad de San Martín, en la banda 4 (enlace descendente). Utilizado para servicios móviles 4G/LTE.

- El sistema LTE en banda 4 tiene un ancho de banda entre 10 y 15 MHz por servicio, este ancho de banda utiliza modulación OFDM con portadoras moduladas en QPSK, 16QAM y 64QAM. La potencia de transmisión varía entre 38 dBm para coberturas de rango medio y 24 dBm para áreas locales.

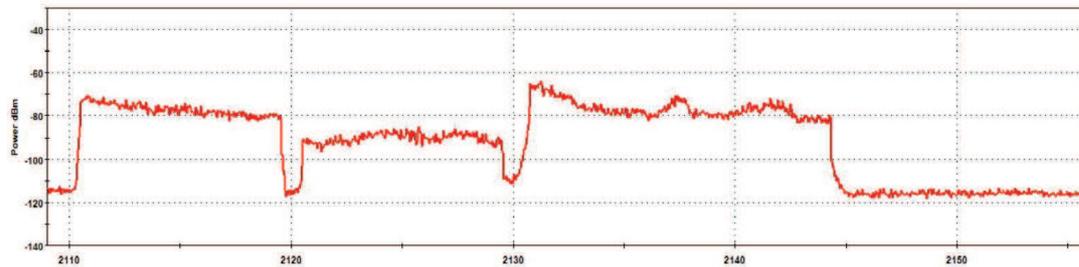


Figura 2.31: Banda 4 Downlink

#### 2.6.2.4. Banda 28 (APT o 700)

La banda de 700 MHz o Banda 28 complementa la banda 4 AWS (1700 y 2100 MHz) de la red 4G.

Al tener una frecuencia menor a la banda 4 tiene mayor alcance de cobertura, por lo cual es habitual encontrarla en zonas rurales o despliegues de rutas, pero también se utiliza para complementar la cobertura en zonas urbanas logrando una mayor penetración de señal dentro de edificios y casas.

**Banda de operación** A continuación en el Cuadro 2.13 se detalla la banda de frecuencia atribuida al servicio SCMA en la República Argentina:

Frecuencia	Ancho	Duplex	Uso
703-748 MHz	45 MHz	55 MHz	Subida
758-803 MHz	45 MHz	55 MHz	Bajada

Cuadro 2.13: Banda 28 para 4G

**Operadores móviles** A continuación en el Cuadro 2.12 se muestra la división de la banda atribuidos por los operadores de las telco. Esta distribución entre operadores es conforme al Área de Explotación Nacional, para el Servicio de Comunicaciones Móviles Avanzadas (SCMA).

Bloque	Subida	Bajada	Operador
2x10 MHz	703-713 MHz	758-768 MHz	Movistar
2x10 MHz	713-723 MHz	768-778 MHz	Personal
2x15 MHz	723-738 MHz	778-793 MHz	Claro

Cuadro 2.14: Servicios Móviles LTE en banda 28

**Espectro en banda 28** En la Figura 2.32 se observa un ejemplo de uso del espectro en la localidad de San Martín, en la banda 28 (enlace descendente). Utilizado para servicios móviles 4G/LTE.

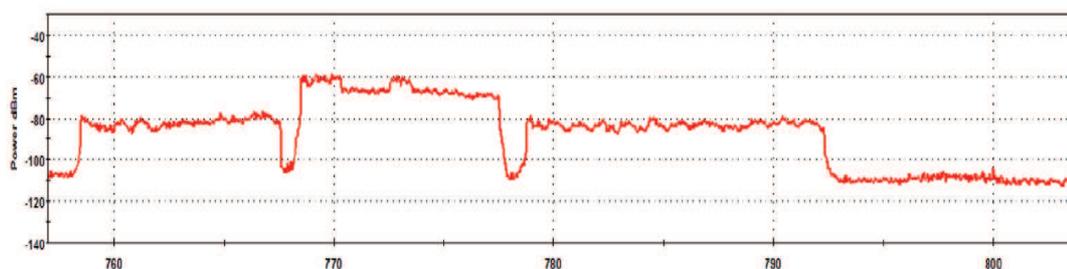


Figura 2.32: Banda 28 Downlink

- El sistema LTE en banda 28 tiene un ancho de banda entre 10 y 15 MHz por servicio, este ancho de banda utiliza modulación OFDM con portadoras moduladas en QPSK, 16QAM y 64QAM. La potencia de transmisión varía entre 38 dBm para coberturas de rango medio y 24 dBm para áreas locales.

#### 2.6.2.5. Banda 7 (2600)

La banda 7 o banda de 2600 MHz, utiliza la banda 2500–2570/2620–2690 MHz en FDD, y la banda 2570–2620 MHz en TDD (Banda 38). Esta banda soporta mayor cantidad de tráfico en simultáneo, por lo que permite brindar mayor capacidad de conexión, por tanto su uso está orientado a grandes centros urbanos con alta concentración de usuarios.

Personal fue el primero en prestar servicio en dicha banda, y su disponibilidad se debió a la Conferencia Mundial de Telecomunicaciones organizado por la UIT, y realizado en Buenos Aires a finales del 2017. La antena se encuentra ubicada frente al hotel Hilton, Puerto Madero.

**Banda de operación** A continuación en el Cuadro 2.15 se detalla la banda de frecuencia atribuida al servicio SCMA en la República Argentina: Argentina.

**Operadores móviles** A continuación en el Cuadro 2.16 se muestra la división de la banda atribuidos por los operadores de las telco para la modalidad FDD. Esta distribución entre operadores es conforme al Área de Explotación Nacional, para el Servicio de Comunicaciones Móviles Avanzadas (SCMA).

Frecuencia	Ancho	Duplex	Uso
2500-2570 MHz	70 MHz	120 MHz	Subida
2620-2690 MHz	70 MHz	120 MHz	Bajada

Cuadro 2.15: Banda 7 para 4G

Lote	Subida	Bajada	Operador
2x15 MHz	2500-2515 MHz	2620-2635 MHz	Movistar
2x15 MHz	2515-2530 MHz	2635-2650 MHz	Claro
2x10 MHz	2560-2570 MHz	2680-2690 MHz	Personal

Cuadro 2.16: Servicios Móviles LTE en banda 7 FDD

**Espectro en banda 7** En la Figura 2.33 se observa un ejemplo de uso del espectro en la localidad de San Martín, en la banda 7 (enlace descendente). Utilizado para servicios móviles 4G/LTE. Como se aprecia en la imagen este servicio aun no se encuentra operando en la localidad como las demás bandas móviles.

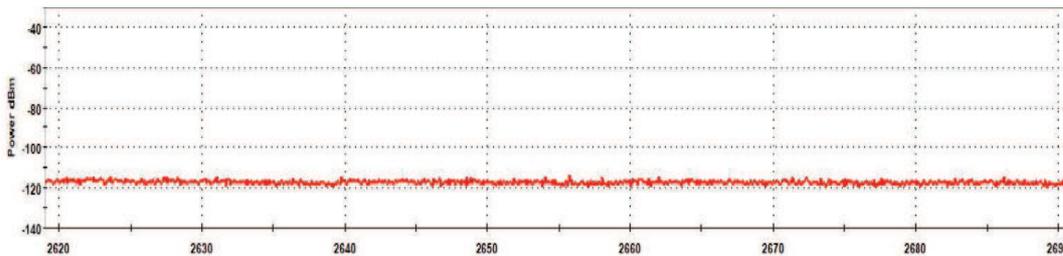


Figura 2.33: Banda 7 Downlink

En este capítulo tratamos el marco teórico de la telefonía móvil. Comenzando por la introducción a los sistemas de comunicación, vimos las técnicas de duplexación y multiacceso usadas. Luego iniciamos el estudio de los fundamentos de la telefonía celular, mostrando las arquitecturas del sistema y tecnologías empleadas. Realizamos un estudio de las antenas y la forma en que operan estas. Terminamos el capítulo estudiando la telefonía móvil Argentina, revisando la evolución histórica del mercado, servicios ofrecidos y la asignación de frecuencias en el país.

En el próximo capítulo nos referiremos a la Normativa y Regulación de las RNI, ya que la función de esta será de regular los niveles de exposición para garantizar la seguridad y bienestar de la población.

---

## Capítulo 3

# Normativa y Regulación para las RNI

En este capítulo desarrollaremos el marco legal de las radiaciones no ionizantes, donde daremos a conocer los organismos internacionales involucrados con la regulación y estandarización de las fuentes generadoras e instrumental de medición de las RNI. Como ser la Organización Mundial de la Salud, la Unión Internacional de Telecomunicaciones, la Comisión Internacional para la Protección contra Radiaciones no Ionizantes, entre otros [5]. También realizaremos un estudio de la regulación en el país, nombrando las entidades encargadas, sus funciones y las resoluciones aprobadas con el fin de regular la exposición a las RNI y brindar seguridad a la población.

### 3.1. Organización Mundial de la Salud

La Organización Mundial de la Salud (OMS) es la entidad encargada de dirigir y coordinar la acción sanitaria en el sistema de las naciones unidas. Entre sus principales funciones como líder en los asuntos sanitarios a nivel mundial está el planificar las investigaciones en salud, prestar apoyo técnico a los países, establecer normas y políticas que mitiguen las tendencias sanitarias a nivel mundial. Con la aparición de nuevas tecnologías y la masificación de equipos que emiten radiaciones no ionizantes la OMS con el fin de precautelar el bienestar del ser humano, creó en 1996 el Proyecto Internacional de Campos Electromagnéticos (CEM) el mismo que ha venido evaluando los datos científicos emitidos a lo largo del tiempo por entidades especializadas como la Agencia Internacional de Inves-

tigación Contra el cáncer (IARC) y muchas otras publicaciones científicas.

En el año 2011 la IARC evaluó el potencial carcinógeno de los CEM de radiofrecuencia emitidos por los teléfonos móviles y lo clasificaron en el grupo 2B de posibles cancerígenos debido a que no se obtuvo pruebas contundentes de lo contrario.

Con el fin de subsanar la falta de conocimiento la OMS determina y promueve las prioridades de investigación vinculados a CEM de radiofrecuencia y la salud. Para esto trabaja en conjunto con organizaciones no gubernamentales como la Comisión Internacional para la Protección contra Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP), que además forma parte del proyecto CEM.

La OMS basa sus recomendaciones referentes a RNI en los estudios del ICNIRP, las mismas que son emitidas por su organismo especializado en el campo de las telecomunicaciones la UIT.

## 3.2. Unión Internacional de Telecomunicaciones

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT ó ITU) fue fundada en 1865 es la organización no gubernamental más antigua del mundo. La UIT es la agencia especializada de la ONU en el campo de las telecomunicaciones desde 1947. Sus actividades giran alrededor de 3 sectores principales: la normalización de las comunicaciones (UIT-T), el área de radiocomunicaciones (UIT-R), y el área de desarrollo de telecomunicaciones (UIT-D).

Principales funciones que desempeña la UIT:

- Gestionar el usos y reparto de frecuencias dentro del espectro radioeléctrico y de las órbitas de los satélites.
- Mejorar la accesibilidad a las telecomunicaciones brindando asistencia técnica, y asesoramiento pero además fomentando la agrupación de grupos de telecomunicaciones, la empresas privada y los grupos de financiación con el fin de emprender nuevos proyectos.
- Estandarizar tecnologías con el fin de interconectar comunicaciones nacionales con redes globales.

Las recomendaciones dadas por la UIT se encuentra agrupado por series, cada serie contiene recomendaciones enfocadas a un mismo tema, como por ejemplo referente a medición de CEM. Pese a ser recomendaciones, a nivel internacional

las administraciones y empresas operadoras las asumen como mandatarios. Para el caso puntual de CEM tenemos las siguientes recomendaciones:

**UIT-T K.52:** Esta recomendación hace referencia al cumplimiento de los límites de exposición de las personas a los CEM en el rango de frecuencia de 9 kHz a 300 GHz y presenta una orientación general, un método de cálculo, y un procedimiento de evaluación de las instalaciones de telecomunicaciones así como teléfonos móviles u otros dispositivos que emitan radiaciones y que se usan próximos a la cabeza.

En general el procedimiento de evaluación consiste en determinar el tipo de instalación de telecomunicaciones, evaluar los posibles peligros de exposición y tomar las respectivas técnicas de atenuación, si estas fuesen necesarias. Las instalaciones se pueden clasificar dentro de los siguientes grupos:

- Inherentemente conforme: Es una fuente segura, produce CEM que cumple con los límites de exposición. El requisito para este tipo de fuentes es un PIRE menor a 2W.
- Normalmente conforme: Son fuentes que producen CEM fuertes, que sobrepasan los límites de exposición, sin embargo la zona de rebasamiento no es accesible a personas en condiciones ordinarias, es decir solo personal autorizado como empleados de mantenimiento podrían verse afectados.
- Provisionalmente conforme: Este tipo de fuentes necesitan de medidas especiales según sea el caso para conseguir la conformidad lo cual requiere determinar mediante la evaluación pertinente basada en cálculos y mediciones.

**UIT-T K.61:** Esta recomendación está orientada hacia las mediciones utilizadas para evaluar la intensidad de los CEM de radiofrecuencia en el espectro comprendido entre 9 kHz y 300 GHz, para verificar que no rebasen los límites de exposición recomendados.

**UIT-T K.62:** Esta recomendación hace referencia a un procedimiento que permita demostrar la conformidad de las emisiones de RF mediante modelos matemáticos, y es aplicable principalmente en sistemas físicamente grandes en los cuales las evaluaciones prácticas son demasiado complejas y costosas. Se describe

un método estadístico aplicable a las variables conocidas por el operador, para determinar el nivel de emisión del sistema en forma de distribución de probabilidad y distribución de probabilidad acumulada.

**UIT-T K.70:** Señala técnicas para limitar la exposición a los CEM en cercanías de estaciones de telecomunicaciones y define técnicas que los operadores de telecomunicaciones pueden utilizar para evaluar la relación de exposición acumulada cerca de las estaciones transmisoras y de esta forma detectar la principal fuente de radiación.

**UIT-T K.83:** Esta recomendación está orientada a la supervisión de los niveles de intensidad de campo electromagnético y especifica la manera en la que se debería realizar un control a largo plazo de los CEM mediante la medición de frecuencias selectiva o de banda ancha.

### 3.3. Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones No Ionizantes

La Comisión Internacional para la Protección contra Radiaciones no Ionizantes (ICNIRP) surge en el octavo congreso de la Asociación Internacional para la Protección contra la Radiación (IRPA) en 1992. Fue creada con el fin de investigar los peligros que podrían causar a la salud las diferentes formas de radiación no ionizante, así como desarrollar recomendaciones internacionales y establecer límites para la exposición a ellas. Esta comisión en cooperación con la división de Salud ambiental de la OMS desarrollo varios documentos sobre criterios de salud relacionados a RNI.

Para la emisión de recomendaciones la ICNIRP ha tomado en cuenta resultados de estudios epidemiológicos y de laboratorio, en el cual se pueden diferenciar dos tipos de efectos por exposición a CEM pudiendo ser directos e indirectos. Los efectos directos son el resultado de la interacción de los CEM directamente sobre el cuerpo humano mientras que los efectos indirectos el cuerpo humano interactúa con un objeto a un potencial eléctrico diferente del cuerpo.

En el proceso de establecer límites de exposición la comisión acogió la opinión de varios científicos, evaluó su validez y reconoció la necesidad de la extrapolación de resultados y experimentos en animales a efectos en los seres humanos. Pese

a que las restricciones emitidas fueron basadas netamente en datos científicos y experimentos en animales la ICNIRP garantiza un adecuado nivel de protección para los humanos. Las recomendaciones emitidas se encuentran establecidas en Restricciones básicas y Niveles de referencia.

las restricciones a la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo están basados directamente en los efectos en la salud. Los Niveles de Referencia son los que permiten evaluar en forma práctica las exposiciones con el fin de determinar si las restricciones básicas pueden ser excedidas.

### 3.4. Comité Electrotécnico Internacional

El Comité Electrotécnico Internacional (IEC) es una de las tres organizaciones hermanas mundiales (IEC, ISO, ITU) que desarrollan estándares internacionales para el mundo. Cuando corresponde, IEC coopera con la ISO (Organización Internacional para la Estandarización) o la UIT, para asegurar que las Normas Internacionales encajen perfectamente y se complementen entre sí. Los comités conjuntos aseguran que las Normas Internacionales combinen todos los conocimientos relevantes de expertos que trabajan en áreas relacionadas.

**Norma Internacional 61566/1997:** IEC 61566 es un Estándar Internacional para la Medición de la Exposición a los CEM de radiofrecuencia e intensidad de campo en el rango de frecuencia de 100 kHz a 1 GHz.

Se aplica a las mediciones de CEM en equipos de transmisión operacionales para garantizar que las transmisiones no constituyan un riesgo potencial para los trabajadores o el público en general.

### 3.5. Comisión Federal de Comunicaciones

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) es una agencia estatal independiente de los Estados Unidos, bajo responsabilidad directa del Congreso. La FCC fue creada en 1934 con la Ley de Comunicaciones y es la encargada de la regulación (incluyendo censura) de telecomunicaciones interestatales e internacionales por radio, televisión, redes inalámbricas, teléfonos, satélite y cable. La FCC otorga licencias a las estaciones transmisoras de radio y televisión, asigna frecuen-

cias de radio y vela por el cumplimiento de las reglas creadas para garantizar que las tarifas de los servicios por cable sean razonables. La FCC regula los servicios de transmisión comunes, por ejemplo, las compañías de teléfonos y telégrafos, así como a los proveedores de servicios de telecomunicaciones inalámbricas.

La FCC ha adoptado en los Estados Unidos las recomendaciones sobre los límites de exposición a intensidad de los CEM, densidad de potencia para transmisores y el SAR para equipos de comunicaciones que operen en intervalos de frecuencias desde los 3 kHz a los 300 GHz.

Los estándares de exposición para la energía de RF han sido desarrollados por varias organizaciones y gobiernos. La mayoría de los estándares modernos recomiendan niveles seguros de exposición por separado para el público en general y para los trabajadores. En los Estados Unidos, la FCC ha adoptado y utilizado pautas de seguridad reconocidas para evaluar la exposición ambiental a RF desde 1985.

Agencias federales de salud y seguridad, como la EPA, la FDA, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) y la Seguridad Ocupacional y la Administración de Salud (OSHA) también se han involucrado en el monitoreo e investigación de problemas relacionados con la exposición a RF. Las directrices de la FCC para la exposición humana a CEM de radiofrecuencia se derivaron de las recomendaciones de dos organizaciones expertas, el Consejo Nacional de Protección y Medición de Radiación (NCRP) y el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE).

Muchos países en Europa y en otros lugares utilizan las directrices de exposición desarrolladas por la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP). Los límites de seguridad de ICNIRP son generalmente similares a los de NCRP e IEEE, con algunas excepciones. Por ejemplo, ICNIRP recomienda niveles de exposición algo diferentes en los rangos de frecuencia superior e inferior y para la exposición localizada debido a dispositivos tales como teléfonos celulares de mano.

La FCC exige que los fabricantes de teléfonos celulares garanticen que sus teléfonos cumplen con los límites indicados para una exposición segura. Todo teléfono celular que esté en o por debajo de los niveles SAR, en otras palabras, cualquier teléfono que se venda legalmente en los Estados Unidos, es un teléfono “seguro”, de acuerdo a estos patrones. Los límites de la SAR para equipos terminales son efectivos desde Agosto de 1996. El límite de la FCC para la exposición pública

de teléfonos celulares es un nivel SAR de 1.6 vatios por kilogramo (1.6 W/Kg).

### 3.6. Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas

El Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas (IEEE), es una asociación mundial de ingenieros dedicada a la estandarización y el desarrollo en áreas técnicas. Según el mismo IEEE, su trabajo es promover la creatividad, el desarrollo y la integración, compartir y aplicar los avances en las tecnologías de la información, electrónica y ciencias en general para beneficio de la humanidad y de los mismos profesionales.

IEEE es una de las organizaciones líderes en la creación de estándares en el mundo. Los Estándares IEEE afectan a una amplia gama de industrias, incluyendo: potencia y energía, biomedicina y salud, tecnología de la información, las telecomunicaciones, el transporte, la nanotecnología, la seguridad de la información, etc. En 2013, la IEEE ya tenía más de 900 estándares activos, con más de 500 normas en elaboración. Uno de los más notables estándares IEEE es la IEEE 802.x grupo de normas que incluye el estándar IEEE 802.3 para Ethernet y el estándar IEEE 802.11 para la red inalámbrica.

**Norma IEEE 95.3/2002:** IEEE 95.3 es un estándar internacional para las mediciones y cálculos de CEM de radiofrecuencia con respecto a la exposición humana a tales campos, en el rango de frecuencia de 100 kHz a 300 GHz.

Se especifican las técnicas e instrumentos activos para la medición y el cálculo de los CEM potencialmente peligrosos tanto en el campo cercano como en el campo lejano de la fuente electromagnética.

Se incluyen las mediciones de fugas y campo cercano y una descripción de los conceptos, técnicas e instrumentos que se pueden aplicar a la medición de la tasa de absorción específica (SAR) o la intensidad del campo eléctrico en organismos (incluidos humanos) y fantasmas expuestos a CEM. Debajo de 100 MHz, la corriente que fluye a través del cuerpo a la tierra se puede medir y se puede usar para determinar la SAR y, por lo tanto, se incluye un breve tratamiento de la medición de la corriente corporal de baja frecuencia.

## 3.7. Regulación Nacional

### 3.7.1. Resolución 202/95 MSyAS

En 1995 la entonces Secretaría de Salud del Ministerio de Salud y Acción Social con el apoyo de otras instituciones científicas afines han elaborado las Publicaciones: “Manual de estándares de seguridad para la exposición a radiofrecuencias y microondas comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz” y “Radiación de Radiofrecuencias: consideraciones biofísicas, biomédicas y criterios para el establecimiento de estándares de exposición”, Volúmenes I y II respectivamente. Ambas publicaciones bajo el Título de **Prospección de Radiación Electromagnética Ambiental no Ionizante**.

Son estudios desarrollados con la preocupación en el avance de la tecnología del electromagnetismo, con su variada aplicación de las radiofrecuencias y microondas, que abarca tanto el campo de los sistemas de comunicación y los usos industriales. A los efectos biológicos de las radiaciones no ionizantes, radiofrecuencias y microondas con frecuencias entre los 100 kHz y los 300 GHz, que han sido ampliamente estudiados y requieren establecimientos de Estándares Nacionales de Seguridad para la exposición a las mismas.

La Resolución 202/95 Aprueba el Estándar Nacional de Seguridad para la exposición a radiofrecuencias comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz, conforme lo establecido en las Publicaciones citadas (Volúmenes I y II). Además incorpora dicho Estándar al Programa Nacional de Garantía de Calidad de la Atención Médica.

A continuación se muestran la Tabla 3.1 con los niveles establecidos por el MSyAS para la exposición ocupacional y poblacional.

Letra del grafico	Región de frecuencias (MHz)	Intensidad del campo eléctrico RMS no perturbado (V/m)	Intensidad del campo magnético RMS no perturbado (A/m)	Densidad de potencia equivalente para onda plana (mW/cm <sup>2</sup> )
<b>A</b>	0,3-3	$376.382,25^{1/2}$	1,58	100
	3-30	$[3.764 (900/f^2)]^{1/2}$	$[0,025 (900/f^2)]^{1/2}$	$900/f^2$
	30-400	$3.764^{1/2}=61,35$	0,16	1
	400-2.000	$3.f^{1/2}$	$0,025 (f/400)$	$f/400$
	2.000-300.000	137	0,36	5
<b>B</b>	0,3-3	275	0,73	20
	3-30	$[3.764 (180/f^2)]^{1/2}$	$[0,03 (180/f^2)]^{1/2}$	$180/f^2$
	30-400	27,5	0,073	0,2
	400-2.000	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$f/2000$
	2.000-300.000	61,35	0,16	1
<b>C</b>	0,3-1	275	0,73	20
	1-10	$[3.764 (20/f^2)]^{1/2}$	$[0,03 (20/f^2)]^{1/2}$	$20/f^2$
	10-400	27,5	0,073	0,2
	400-2.000	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$f/2000$
	2.000-300.000	61,35	0,16	1
<b>D</b>	0,3-1	87	0,23	2
	1-10	$87/f^{1/2}$	$0,23/f^{1/2}$	$2/f$
	10-400	27,5	0,073	0,2
	400-2000	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$f/2.000$
	2000-300.000	61,35	0,16	1

Cuadro 3.1: Niveles de exposición establecidos por el MSyAS

En la Figura 3.1, presentamos las gráficas correspondientes a los niveles presentados en la tabla. La gráfica A siendo la ocupacional, y las gráficas B, C y D poblacionales.

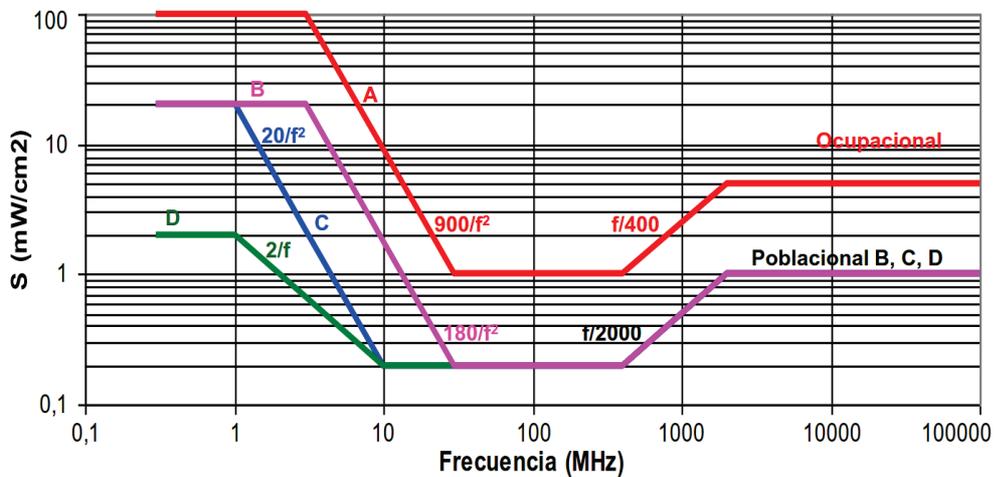


Figura 3.1: Gráfica de los niveles de exposición del MSyAS

### 3.7.2. Resolución 530/00 SECOM

En el año 2000 la entonces Secretaria de Comunicaciones (SECOM), fue la entidad encargada de llevar las políticas nacionales en el desarrollo de las Telecomunicaciones. Controlaba organismos como la Comisión Nacional de Comunicaciones

(CNC) y el Comité Federal de Radiodifusión (COMFER). En la actualidad estas entidades fueron fusionadas y formaron un nuevo organismo denominado Ente Nacional de Comunicaciones (ENACOM), y este junto a la SECOM formaban parte del Ministerio de Comunicaciones hasta setiembre del 2017, y actualmente forman parte del Ministerio de Modernización.

La SECOM, en la Resolución N° 530, aprobó la Resolución N° 202/95 del Ministerio de Salud y Acción Social de la Nación. Sostenía que sería de aplicación obligatoria a todos los sistemas de Telecomunicaciones que irradian, en frecuencias comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz, situados en el territorio nacional.

### 3.7.3. Resolución 3690/04 ex CNC

La Comisión Nacional de Comunicaciones (CNC) fue un organismo público Argentino, dependiente de la Secretaría de Comunicaciones de la Nación (SECOM), que regulaba y supervisaba el sector de las telecomunicaciones y correos en el país. En la actualidad esta función la realiza Ente Nacional de Comunicaciones (ENACOM).

La CNC se ocupaba de supervisar los licenciatarios de telecomunicaciones y correos para garantizar el cumplimiento de la normativa regulatoria; esto incluía la gestión y autorización para la instalación de los satélites de telecomunicaciones y todos los equipos de transmisión de radio y televisión, incluyendo los empleados por los amateurs y la fijación de las normas para el equipo de telecomunicaciones, así como la prevención de las prácticas monopólicas o discriminatorias en el sector.

La Resolución N° 3690 establece las normativas y procedimientos para la evaluación de las Radiaciones No Ionizantes, basadas en normativas internacionales en la materia, expuestas en secciones anteriores, tales como la Comisión Internacional de Protección Contra Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP), la Unión Internacional de Telecomunicaciones (Recomendación UIT-T K-61), etc. Y en cumplimiento de la normativa Argentina vigente, mediante la Resoluciones N° 202/95 del Ministerio de Salud y Acción Social de la Nación, Resolución N° 530 de la Secretaría de Comunicaciones de la Nación. Resuelve, en resumen, los siguientes puntos:

- Los titulares de autorizaciones y licenciatarios de estaciones radioeléctricas y de radiodifusión, respectivamente, deberán demostrar que las radiaciones

generadas por las antenas de sus estaciones no afecten a la población en el espacio circundante a las mismas.

- Los sistemas irradiantes que no cumplan con los valores máximos establecidos en la Resolución N° 2002/95 del MSyAS, y por Resolución N° 530 SC/2000 son de cumplimiento obligatorio, deberán ser adaptados con el fin de cumplir con las condiciones impuestas por dichas Resoluciones.
- Los titulares de licencias de radioaficionados deberán presentar el formulario técnico específico y la declaración jurada relativa al cumplimiento de la Resolución N° 530 SC/2000, para cada una de sus estaciones fijas.
- Los sitios en que estén instaladas o vayan a instalarse más de una estación transmisora de radiocomunicaciones pertenecientes a diferentes usuarios, sitios multiantena, cada uno de dichos usuarios será responsable por la comprobación de que el sitio en su conjunto cumpla con lo establecido en este reglamento.
- Anexa el Protocolo para la Evaluación de las Radiaciones No Ionizantes. Anexa, además, las Condiciones que la Estación Radioeléctrica deberá cumplir para que no sea necesario su evaluación.

#### **3.7.4. Resolución 87/13 OPDS**

El Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS) es la autoridad ambiental bonaerense. Su función es planificar y coordinar la ejecución de la política ambiental de la provincia, para mejorar y preservar la diversidad biológica en su territorio.

El OPDS a través de la resolución N° 87, establece las pautas para realizar la regulación de los sistemas irradiantes y sus instalaciones, por ende resuelve lo siguiente:

- Adoptar como límite de exposición poblacional los límites establecidos para los CEM con un rango de frecuencias mayor a 300 kHz, de la Resolución N° 530/00 de la SECOM, en concordancia con la Resolución N° 202/95 del MS y AS.
- Los criterios para evaluar el impacto visual de los sistemas irradiantes y sus instalaciones mismas.

- Permiso de instalación y funcionamiento de los mismos, exceptuando tales permisos para sistemas irradiantes de radioaficionados y de uso particular.

### 3.7.5. Resolución 1994/15 MS

En la Resolución N° 1994, el Ministerio de Salud estableció los valores de emisión para la Tasa de Absorción Específica (SAR) para todo dispositivo portátil emisor de CEM:

- El valor de SAR medio para todo el cuerpo, en el intervalo de frecuencias de 100 kHz a 10 GHz, no superará los 0.4 W/kg y los 0.08 W/kg para exposición ocupacional y poblacional, respectivamente.
- El valor de SAR localizado en cabeza y tronco, promediado sobre una masa de 1 gramo, no superará los 8 W/kg y 1,6 W/kg para exposición ocupacional y poblacional, respectivamente.
- El valor de SAR localizado en las extremidades, promediado sobre una masa de 1 gramo, no superará los 16 W/kg y 3,2 W/kg para exposición ocupacional y poblacional, respectivamente.

En este capítulo tratamos el marco legal de las RNI, para ello estudiamos los organismos internacionales involucrados con la regulación de las RNI, organismos tales como Organización Mundial de la Salud, la Unión Internacional de Telecomunicaciones, la Comisión Internacional para la Protección contra Radiaciones no Ionizantes, entre otros. También hicimos un estudio de la regulación nacional, conociendo sus funciones supervisoras y regulatorias, mediante sus Resoluciones, para establecer los límites de exposición que garantizan la seguridad de la población.

En el próximo capítulo nos referiremos a la metodología de la medición en el campo de las RNI, y al instrumental que se utiliza para tal fin.

---

## Capítulo 4

# Metodología e Instrumental de Medición

En este capítulo describiremos la metodología que se aplica para la medición de las RNI, daremos definiciones utilizadas para la medición en campo, estudiaremos los métodos de predicción y de medición, aplicados para cada caso. Presentaremos el instrumental utilizado para las mediciones de las RNI en campo, clasificándolo según sea la metodología de medición utilizada. Por último presentaremos el Protocolo de medición utilizado para la Evaluación de las RNI, establecido en el Anexo de la Regulación Nacional (ex CNC Res. 3690/04).

### 4.1. Definiciones previas

**Región de campo cercano:** Es el campo existente en las proximidades de la antena, en la que los campos eléctricos y magnéticos no constituyen sustancialmente ondas planas, sino que varían considerablemente punto a punto. La onda electromagnética posee un campo conservativo y es predominantemente de campo magnético (H) o de campo eléctrico (E) y no mantiene la relación de impedancia característica del vacío (Ecuación 1.4).

Si el generador tiene una alta intensidad de corriente y una baja tensión ( $E/H < 377 \Omega$ ), el campo cercano será predominantemente magnético. Contrariamente, si el generador tiene una alta tensión y una baja intensidad de corriente ( $E/H > 377 \Omega$ ), el campo cercano será principalmente eléctrico.

La región de campo cercano se subdivide a su vez en la región de campo cercano reactivo, que es más próxima al elemento radiante y que contiene la mayor parte o

casi la totalidad de la energía almacenada, y la región de campo cercano radiante en la que el campo de radiación predomina sobre el campo reactivo, pero que no es sustancialmente del tipo onda plana y tiene una estructura compleja.

Se asume que la región del campo cercano reactivo se extiende hasta una longitud de onda de la superficie de la antena (Figura 4.1).



Figura 4.1: Distancia para campo cercano (reactivo y radiante) y campo lejano

**Región de campo lejano CL:** Es la región del campo radiado por una antena, donde la distribución angular de campo es esencialmente independiente de la distancia respecto a la antena. En la región del campo lejano, el campo predominante es del tipo onda plana, es decir, distribución localmente uniforme de la intensidad de campo eléctrico y de la intensidad de campo magnético en planos transversales a la dirección de propagación.

Aquí el conocimiento de uno de los campos, por ejemplo, E, permite la determinación del otro (H), utilizando la relación en la que estas dos cantidades se relacionan entre sí por medio de la impedancia característica del espacio libre.

Entre el campo lejano y el campo cercano hay dos regiones con un límite entre ellas (ver Figura 4.1). La posición geométrica donde se sitúa este límite no está clara y hay diversos puntos de vista para establecer este límite. El utilizado por el Protocolo de Medición, Anexo I de la Res. 3690/04 es el siguiente. Dependiendo de la relación  $L < \text{ó} > a \lambda$ , se debe aplicar:

$$R > \frac{2 \cdot L^2}{\lambda} \quad \text{para} \quad L > \lambda \quad (4.1)$$

$$R > 3 \cdot \lambda \quad \text{para} \quad L < \lambda \quad (4.2)$$

Donde:

- $R$  [m] es la distancia medida desde la antena hasta el punto P bajo estudio.
- $L$  [m] es la máxima dimensión de la antena especificada por el fabricante.
- $\lambda$  [m] es la longitud de onda,  $\lambda = c/f$ .

**Emisión e Inmisión:** Emisión es la radiación producida por una única fuente de radiofrecuencia. En cambio inmisión refiere a la radiación resultante del aporte de todas las fuentes de radiofrecuencias cuyos campos están presentes en el lugar. En la secciones posteriores utilizaremos estos términos para diferenciar instrumentos y métodos aplicados a la medición.

**Exposición:** Es la situación en que se encuentra una persona sometida a campos eléctricos, magnéticos, electromagnéticos o a corrientes de contacto o inducidas asociados a campos electromagnéticos de radiofrecuencias.

**Exposición Poblacional o no controlada:** Corresponde a situaciones en las que el público en general puede estar expuesto, o en el caso que las personas queden expuestas como consecuencia de su trabajo, y no pueden ejercer control sobre la misma (Tabla 1.4).

## 4.2. Método de predicción

Para el caso de una antena única ó **sitio mono-antena**, las predicciones de densidad de potencia ( $S$ ) se pueden realizar a partir de la Ecuación 4.3, estando la antena bajo las condiciones de campo lejano, ver Ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$S = K_r \cdot \frac{PIRE \cdot F^2}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (4.3)$$

Donde:

- $K_r$  es el factor de reflexión empírico, su valor puede ser 2.56 para una reflexión del 60 % o 4 si se considera una reflexión del 100 %.
- $PIRE$  [W] es la potencia isotrópica radiada equivalente de la fuente, también se puede utilizar la potencia radiada aparente (PRA), reemplazándola en la Ecuación 4.3 con la siguiente relación:  $PIRE = 1,64 \cdot PRA$ .

- $F$  es el factor que tiene en cuenta el ángulo de incidencia para un patrón de radiación dado. Se toma  $F=1$ , para una atenuación cero (Si se considera el peor caso).
- $R$  [m] es la distancia medida desde la antena hasta el punto P bajo estudio.

## 4.3. Método de medición

### 4.3.1. Alcance y evaluación del entorno

El procedimiento de medición es requerido a los titulares de autorizaciones o licencias de estaciones radioeléctricas de radiocomunicaciones y a los licenciataria-rios de estaciones de radiodifusión, según dicta la vigente Resolución 3690/04. Previo a la medición se llevará a cabo un relevamiento visual del lugar de instalación de los sistemas irradiantes y se determinará sobre la base de sus ubicaciones, el tipo y las características de sus emisiones y sus características de irradiación, los puntos de mayor riesgo tanto externos al predio de la antena como internos al mismo, que formarán parte de los puntos a medir.

### 4.3.2. Selección de puntos

Se deberá efectuar la medición en los puntos accesibles por parte del público:

- Los puntos de medición se escogerán según las características del sistema irradiante y la longitud de onda de las emisiones, siguiendo donde sea aplicable.
- Para sistemas omnidireccionales se deberán seleccionar como mínimo 16 puntos, ubicados convenientemente sobre el terreno, cuya separación respecto de la estación, esté en función de la longitud de onda del emisor.
- Para sistemas direccionales se deberán adoptar un mínimo de 4 puntos sobre la dirección de máxima propagación. Los 12 puntos restantes deberán ubicarse en función de las características del lóbulo de radiación de dicha fuente.
- El profesional actuante podrá incluir puntos adicionales que, por mediciones exploratorias previas u otras razones, sea necesario considerar, incorporando su justificación en el informe correspondiente.

- A efectos de evitar posibles acoplamientos capacitivos, los puntos de medición deben encontrarse a una distancia no inferior a 20 cm de cualquier objeto conductor.
- En caso de estimarse peligrosos dichos puntos se buscará un método alternativo de evaluación de los mismos.

Los puntos de medición deberán quedar perfectamente definidos sobre el croquis a incluido en el informe técnico, con el fin de permitir la realización de controles periódicos.

Las mediciones se realizarán en las horas de mayor tráfico o de mayor potencia emitida.

### 4.3.3. Precauciones de seguridad

El personal actuante en las mediciones de RNI debe estar completamente advertido acerca del potencial de exposición, por lo que deberán adoptarse precauciones y medidas de seguridad adecuadas.

En caso que las mediciones se realicen en zonas en donde se prevea superar los límites de exposición, se deberá restringir al máximo la exposición del personal de medición. Particularmente en este caso se recomienda realizar la medición en forma remota y no superar un período de 6 minutos de exposición.

### 4.3.4. Instrumental de Medición

El instrumental de medición será seleccionado según la cantidad de fuentes emisoras y el tipo de medición que se proceda a realizar.

#### 4.3.4.1. Instrumental de banda ancha:

Son detectores de radiación electromagnética que responden uniforme e instantáneamente a un amplio rango de frecuencias y no son sintonizables (por lo general). Estos instrumentos se emplean con sondas de medición de E y H del tipo isotrópico, dado que proporcionan una respuesta independiente de la orientación de la sonda.

Los instrumentos de banda ancha son utilizados para la medición de inmisión (Ver Figura 4.2).



Figura 4.2: Instrumento de medición en banda ancha

#### 4.3.4.2. Instrumental de banda angosta:

Son instrumentos de medición de intensidad de campo, analizadores de espectro etc, que también operan sobre un amplio rango de frecuencias, pero su ancho de banda instantáneo de medición se reduce a anchos de banda estrechos. Este tipo de dispositivos debe sintonizarse a la frecuencia de interés.

A su vez, deben utilizarse en conjunto con antenas aptas para los distintos rangos de frecuencia de medición. Los instrumentos de banda angosta son utilizados para la medición de emisión y proporcionan información de la frecuencia bajo análisis (Figura 4.3).



Figura 4.3: Instrumento de medición en banda angosta

#### 4.3.4.3. Instrumental sintonizable de banda ancha:

Estos instrumentos son más versátiles que los anteriores mencionados, pues combinan la utilidad de la sonda isotrópica para la medición de campos electromagnéticos con la funcionalidad en selectividad de frecuencia del analizador de espectro, todo en un espectro amplio de banda (Ver Figuras 4.4 y 4.5).

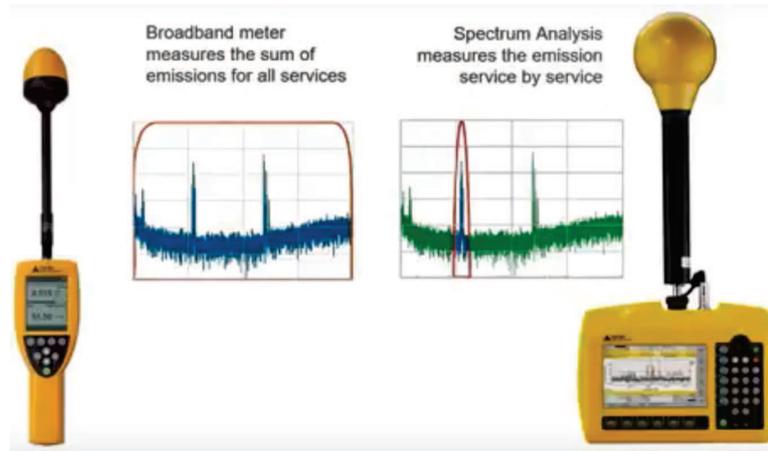


Figura 4.4: Comparación de instrumentos de banda ancha



Figura 4.5: Instrumentos sintonizables en banda ancha

#### 4.3.4.4. Calibración de los instrumentos

Los instrumentos de medición, antenas y sondas empleados para la medición de RNI deberán poseer certificado de calibración, extendido por el fabricante

o por laboratorios acreditados en el país de origen, o certificado de calibración con trazabilidad a los patrones nacionales de medida, mantenidos en laboratorio acreditado, vigentes en ambos casos a la fecha de la medición.

#### 4.3.4.5. Incertidumbre de los instrumentos

Para la realización de las mediciones deben ser tenidas en cuenta todas las incertidumbres especificadas por el fabricante en la respuesta del instrumento:

##### De banda ancha:

- desviación de la isotropía
- respuesta del instrumento en función de la frecuencia
- respuesta del instrumento en función de la temperatura
- errores absolutos en la calibración.

##### De banda angosta:

- Incertidumbre propia de las antenas de medición
- Incertidumbre propia del instrumento de medición
- Incertidumbre del cable, conectores y otros elementos intervinientes en la medición

Se registrará el valor que surja como resultado de la medición más las incertidumbres especificadas por el fabricante más el originado por el error del método empleado.

### 4.3.5. Protocolo de evaluación de las RNI

En primer término se medirá inmisión. Si los valores obtenidos superasen los máximos permisibles más estrictos dados en el Cuadro 1.4, se continuará midiendo la emisión de cada estación.

#### 4.3.5.1. Medición de inmisión

**Determinación del valor máximo en cada punto** Esta medición tiene por objeto obtener el nivel pico máximo, de la componente de los campos eléctrico,

magnético o de la densidad de potencia, a lo largo de una línea vertical que represente la altura del cuerpo humano en el punto de medición, para lo cual se deberá:

- Realizar sobre el punto a verificar un barrido de mediciones de valor pico desde una altura de 20 cm por encima del suelo, a velocidad lenta y constante, hasta una altura de 2 m. Si el valor pico máximo de dichas mediciones resulta inferior al 50 % de la MEP más estricta, se registrará como valor de ese punto. Si dicho valor supera el citado 50 % de la MEP más estricta, se deberá realizar una medición con promediado temporal como se indica en el siguiente punto.
- El profesional actuante seleccionará a su criterio 5 alturas distantes 20 cm entre sí y que no superen los 2 m, en los cuales medirá las componentes de campo E, H y/o densidad de potencia S según corresponda. A cada altura se realizará una **promediación temporal** a lo largo de un período de 6 minutos registrándose los valores medidos y su altura.

#### 4.3.5.2. Medición de emisión

En caso que los resultados obtenidos en las mediciones de inmisión superen los límites del Cuadro 1.4, se deberá proceder a la medición de emisión a fin de evaluar los aportes individuales de cada una de las fuentes emisoras de RNI.

**Selección de puntos de medición** Serán aquellos en los que en la medición de inmisión se superaron los límites más estrictos de MEP. La altura de medición en cada punto será la correspondiente al máximo valor registrado en la promediación temporal.

**Medición** Se medirá la intensidad de campo producida por la estación a verificar sobre cada uno de los puntos de medición seleccionados. La medición se efectuará con instrumentos de banda angosta asociados con antenas de polarización lineal. A tal efecto podrán utilizarse dos métodos alternativos:

- Orientar la antena en tres direcciones ortogonales entre sí (x, y, z) obteniéndose las componentes de campo respectivas. Los valores cuadráticos de intensidad de campo eléctrico y/o magnético se obtendrán de la suma de

los cuadrados de las correspondientes componentes de campo ortogonales, como se observa en las siguientes ecuaciones:

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2 \quad (4.4)$$

$$H^2 = H_x^2 + H_y^2 + H_z^2 \quad (4.5)$$

- Orientar la antena en la dirección de máxima señal. Este método es también aplicable a una antena de apertura.

**NOTA 1:** El valor a registrar será el promedio de las mediciones durante 6 minutos. La cantidad de mediciones en dicho lapso queda a criterio del profesional interviniente.

**NOTA 2:** La antena debe poseer su certificado de calibración actualizado y la incertidumbre de calibración debe sumarse al resto de las incertidumbres.

#### 4.3.6. Informe de medición

En el Informe Técnico deberán constar los siguientes puntos:

- Fecha de medición.
- Hora de inicio.
- Hora de finalización.
- Croquis con las ubicaciones de los puntos de medición.
- Fotos de la instalación donde se pueda identificar las antenas y cantidad de fuentes emisoras a la fecha de la medición.
- Tabla con los valores medidos.
- Características de los instrumentos y sondas o antenas, utilizados con sus certificados de calibración.
- Toda otra información que sea relevante.
- Firma, aclaración y número de matrícula del ingeniero actuante.

- Certificado de Encomienda de tarea profesional expedido por el Consejo Profesional de Ingeniería en Telecomunicaciones, Electrónica y Computación (COPITEC), o en Colegios o Consejos Provinciales con convenios de reciprocidad con el mismo.

En este capítulo tratamos la metodología de medición para la Evaluación de las RNI, estudiando los métodos utilizados para la evaluación de las mismas. Luego nos referimos al instrumental de medición que es utilizado para tal fin. Y por ultimo presentamos el Protocolo para la Evaluación, como modelo de referencia utilizado para la realización de las mediciones de las RNI en campo.

En el próximo capítulo especificaremos los procedimientos requeridos para realizar la medición en campo, siguiendo las pautas del Protocolo de Evaluación de las RNI y realizando la configuración del instrumental a utilizar.



---

## Capítulo 5

# Procedimientos para la Medición

En este capítulo explicaremos los procedimientos para la medición en campo de las RNI, aplicados en el ámbito de la telefonía celular móvil. Estos procedimientos se encuentran enumerados dentro de la normativa de regulación de las RNI (Anexo 1 Res. N° 3690/04 ex CNC). Comenzaremos con una etapa de planificación previa y evaluación del entorno de medición. Luego explicaremos el método de medición utilizado para la evaluación de las RNI. Se planificarán los puntos a evaluar acorde con el sistema irradiante y la topografía del entorno a medir. Por último se presentará el instrumental que se utilizará para la realización de las mediciones en campo, destacando sus características y modo de operación [10, 11]. Detallaremos la forma para realizar la configuración de las mediciones en forma general para luego establecer los parámetros específicos en la medición de la telefonía móvil.

### 5.1. Planificación y evaluación del entorno

Se elegirá un día que el clima se encuentre apropiado para el trabajo en el aire libre, sin lluvias ni otros factores que pudieran perjudicar la medición, porque se medirá con el instrumental expuesto al ambiente.

El horario a realizarse la medición también es importante, se procederá con la tarea de medición en un horario que halla una mayor concentración y circulación de personas, pues en este horario se encontrará un mayor tráfico. Por lo tanto se elegirá un horario de medición entre las 11 y las 14 horas.

Previo a proceder con la medición se realizará un relevamiento visual del lugar, de las instalaciones y de sus sistemas irradiantes. Se identificará el tipo de antena

y sus características de irradiación. También se considerarán las características topográficas del lugar, la ubicación de las edificaciones, superficies reflectoras u objetos conductores que puedan producir áreas de campo relativamente intenso. Posteriormente a la evaluación del entorno se continuará con la elección del método de medición.

## 5.2. Método utilizado y selección de puntos

El método que se utilizará para la medición, sugerido en la normativa de regulación de las RNI, será realizar en primera instancia una medición de inmisión en campo lejano, procediendo a evaluar los puntos de medición seleccionados, los cuales serán acorde con las características de propagación del sistema irradiante.

Conociendo las bandas de frecuencias en que opera la telefonía celular, de 700 a 2200 MHz, se calcula la longitud de onda con que se propagan estas, obteniéndose  $\lambda = 13.6 - 43$  cm. Podemos calcular la distancia en campo lejano con la Ecuación 4.1, asumiendo un  $L = 1,5m$ , de las especificaciones, se obtiene  $1,5 < R < 33$  m. Eligiendo el mayor valor  $R = 33m$ , calculamos la distancia de campo lejano  $CL = 30m$ . Esta distancia se tendrá de referencia al momento de evaluar los puntos de medición.

Para la selección de los puntos de medición se tendrá en cuenta el tipo de antena, sus características de irradiación y ubicación. Se elegirá puntos accesibles al público en general, o puntos de concentración como aulas, laboratorios, comedor y espacios públicos.

Para antenas direccionales, se elegirán 4 puntos sobre la dirección de máxima propagación, y otros 12 puntos ubicados en función del lóbulo de radiación de la fuente.

Para antenas omnidireccionales se elegirán como mínimo 16 puntos, ubicados convenientemente sobre el terreno, y con una distancia acorde a la longitud de onda de la fuente.

## 5.3. Instrumental utilizado

El instrumental con el que cuenta el Laboratorio de Medición y Análisis Radioeléctrico (MARE) para realizar la medición y evaluación de las radiaciones no

ionizantes en campo, es el siguiente:

- Analizador de espectro portátil R& S ETH Mod. 14 (4.5 MHz - 3.6 GHz)
- Sonda isotrópica R& S TSEMF-B1 (30 MHz - 3 GHz)
- Software de medición y evaluación R& S RFEX Ver. 6.1.50



Figura 5.1: Instrumental para medir RNI en campo

En la Figura 5.1, se muestra el instrumental listado en el párrafo anterior, para medición en campo de las RNI. En la próxima sección explicaremos las características más relevantes del instrumental, configuración de los paquetes de medición y la configuración establecida para los servicios de telefonía móvil en el país.

### 5.3.1. Características del equipo

En combinación con los analizadores de espectro Rohde & Schwarz, el sistema de medición R& S TS-EMF detecta CEM de alta frecuencia en el medio ambiente. La antena isotrópica, junto con un software, se ha diseñado específicamente para realizar mediciones de campos electromagnéticos, permitiendo una evaluación simple y precisa de las emisiones totales e individuales en el sitio. A continuación, citamos algunas de sus principales características:

- Mediciones automatizadas de campos electromagnéticos

- Mediciones precisas en escenarios complejos de señales de RF
- Amplio rango de frecuencia de 9 kHz a 6 GHz, cubierto por el conjunto de antenas isotrópicas
- Campo de detección con la antena isotrópica independiente de la dirección y polarización
- Uso combinado posible con varios analizadores de espectro R& S, receptores de prueba y escáneres de red

Como puede apreciarse este sistema TS-EMF permite realizar mediciones utilizando los métodos de inmisión y emisión para la evaluación de las RNI.

En particular, utilizaremos la sonda isotrópica TSEMF-B1 que tiene cobertura en frecuencias de 30 MHz a 3 GHz, rango suficiente para evaluar las RNI emitidas por las antenas de telefonía celular.

### 5.3.2. Forma de medición TSEMF

**Integración:** el TS-EMF es una antena que va midiendo segmentadamente intervalos de frecuencia según las características configuradas y luego agrupa todos estos intervalos en regiones más grandes, pudiendo clasificarlas por bandas de frecuencias, regiones de espectro y tecnologías de comunicación.

**Packets:** Se utiliza el término packet para reunir un grupo de canales, frecuencias con iguales características, esto puede ser de igual ancho de banda de resolución, misma tecnología, etc., de esta forma quedan organizados mediciones con configuración única.

**RFEX:** Es el software que realiza la comunicación PC-Analizador-Antena, gestiona la configuración de la medición, realiza la medición y procesa los datos que mide.

### 5.3.3. Opciones de Medición RFEX

- Medición única; en el contexto de RFEX, una medición única se define como la ejecución única de una secuencia compuesta por uno o varios packets de medidas. Esta forma de medición almacena los datos brutos, realiza la corrección por el factor de antena y de cable, comprime los datos corregidos

(compara el valor corregido con el umbral de aceptación, entonces todos los valores que estén por debajo de este umbral serán eliminados), posteriormente calcula la intensidad del campo resultante teniendo en cuenta ambas polarizaciones.

- Medición pico/promedio; esta medición consiste en una repetición cíclica de la única medida. El tiempo de ciclo se puede seleccionar en el rango de 0 a 30 minutos. Esta forma de medición en lugar de realizar la corrección de los datos inmediatamente, almacena los datos brutos para su evaluación continua de valores pico/promedio. Posteriormente terminado el ciclo de medición, realiza la corrección, compresión y el cálculo del campo resultante como el anterior caso.
- Medición a largo plazo; los métodos descritos anteriormente no son adecuados para una verdadera medición a largo plazo porque generan demasiados datos. Por lo tanto, para las mediciones a largo plazo que pueden durar un tiempo teóricamente ilimitado se comprime toda la información disponible en un ciclo de medición promedio/pico para cada packet, a un único valor. Por lo tanto para un número de  $n$  packets, se calculará un número  $n$  de los valores de campo resultantes y se almacenará como la emisión promedio. Lo mismo se hace para los datos de valor máximo y los resultados en la emisión máxima para cada packet de medición.

## 5.4. Configuración del instrumental

Para poder realizar las mediciones configuraremos previamente los parámetros del hardware que se estará utilizando, como el equipo de medición solo consta del analizador de espectro y la antena TSEMF-B1, se deberá configurar previamente los factores de corrección para la antena y el cable utilizado, que vienen ya tabuladas y calibradas por el fabricante del instrumental.

**Configuración de parámetros de ajuste:** Son los parámetros que realizan la corrección de la antena y del instrumento como de la interfaz de comunicación, tenemos valores de ajuste de las antenas, del cable, los límites aplicables para evaluar la medición, y los umbrales de medición.

**Configuración del analizador:** Se elige el analizador, en este caso utilizaremos el analizador portátil ETH. Se configura la comunicación por LAN, se le asigna la configuración preestablecida para el ETH, se configura la antena GPS, se configura el modelo de la antena con su número de serie para su correcto con sus parámetros preestablecidos.

### 5.4.1. Configuración del Packet

La configuración de medición se realiza en dos pasos. Dado que cada medición puede estar compuesta por una secuencia de mediciones parciales, cada una definida por una configuración separada, conocida como packet de medidas, el primer paso de configuración consiste en definir estos packets. En el segundo paso, este packet se combinarán con una configuración de medición completa.

La necesidad de definir diferentes packets de medición surge del hecho de que el EMF total a evaluar se genera a partir de varias fuentes separadas de radiación electromagnética. Cada una de estas contribuciones (por ejemplo, radiodifusión de TV y radio, estaciones base de telefonía móvil) debe medirse con configuraciones optimizadas del instrumento de análisis, por ejemplo: diferentes anchos de banda, detectores de señal, tiempos de barrido, intervalos de frecuencia.

Cada packet de medición define cómo operar el sistema para evaluar la contribución de EMF de una fuente de radiación en un cierto rango de frecuencia.

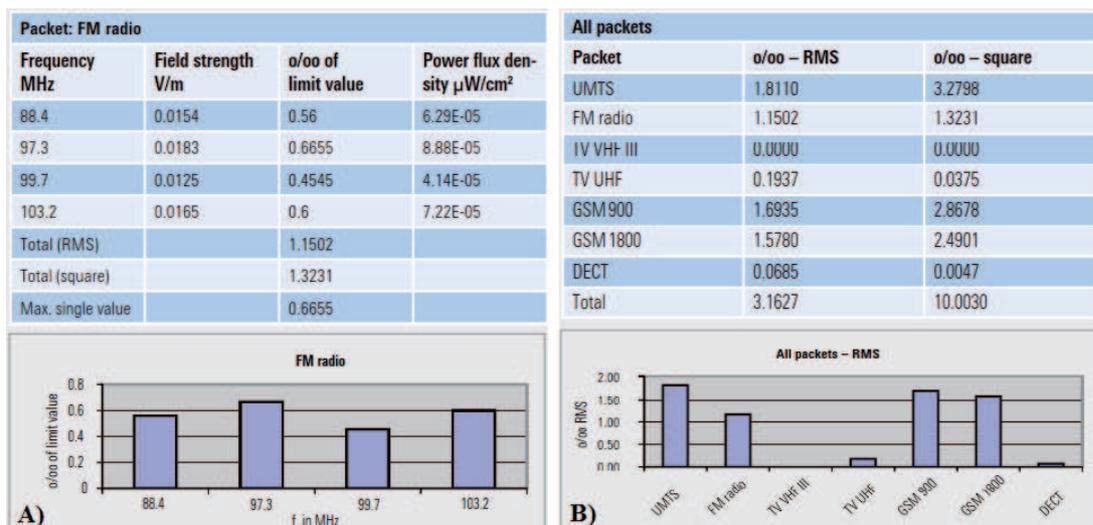


Figura 5.2: Medición del packet: A) Único o B) Conjunto

En la Figura 5.2 se muestra dos arreglos de medición efectuados, la primera

para una medición de la banda de FM (88-108MHz), y el segundo para la medición de un conjunto de tecnologías de comunicación (30-3000MHz) que incluye FM, TV, GSM, UMTS y DECT, entre otros. Por tanto para cada packet se necesitará definir parámetros para:

- la configuración del analizador de espectro,
- el procedimiento de adquisición de datos, y
- las frecuencias de medición para esta configuración en particular.

#### 5.4.1.1. Analizador de espectro

**Ancho de banda de resolución (RBW):** Refiere al ancho de banda de medición en el analizador. En GSM el ancho de banda es de 200 kHz, por tanto el RBW a configurar ha de ser igual o menor si se pretende obtener una buena resolución de medición.

**Nivel de referencia:** Es el valor mínimo de sensibilidad que presenta el analizador para detectar una señal. Por defecto los analizadores R& S utilizan un nivel de referencia de  $97dB\mu V$ .

**Modo de traza:** Se usa para definir qué modo de rastreo se establece en el analizador de espectro. Por defecto la medición utiliza el modo Max Hold, en el cual el analizador, como suele realizar varios barridos, mostrará el nivel máximo evaluado en cada punto de frecuencia.

**Detector RMS:** Puede elegirse entre este modo o el de detección por pico máximo. Se recomienda utilizar el detector RMS si las señales son impulsadas bajo un ciclo de trabajo. Las señales digitales de la telefonía móvil deben medirse así, ya que estas señales se sobrestimarían utilizando el detector de pico máximo.

**Medida del canal de potencia:** Se elige este modo cuando se requiere hacer una medición de potencia en lugar de un barrido normal. Esto resulta útil si el ancho de banda de la señal a medir es más amplio que el RBW máximo. Este modo se utiliza para la medición de señales UMTS que tienen un canal de 5MHz o las de LTE con canales de 10MHz y 15MHz.

#### 5.4.1.2. Frecuencias de Medida

Para evaluar el nivel de radiación electromagnética hay que definir las frecuencias de medición y RFEX implementa dos modos diferentes para la medición:

**Patrón de canal conocido:** Se puede setear las frecuencias que se quieren medir, el software integra un generador de canal, donde las frecuencias de medición se definen con un espaciado equidistante. Una aplicación típica es la medición de los servicios de comunicación móvil, por ejemplo GSM, donde los canales se definen en un espaciado de canal conocido. El ancho del canal se puede elegir en 3 modos:

- Opción Ancho de canal = 0; el nivel medido es aquel cuya frecuencia es la más cercana a la frecuencia de medición como se ingresó en la lista (Figura 5.3A).
- Opción Ancho de canal = RBW; significa que el ancho del canal será el ancho de banda de resolución establecido en el analizador de espectro. Si se definen dos frecuencias de canal de manera que ambos canales no se crucen, habrá espacios en el espectro general que no se tendrán en cuenta cuando se asignen sus niveles máximos. Esta opción puede ser utilizada para medir señales de telefonía móvil GSM con un RBW igual a 200 kHz como el visto en la Figura 5.3B.
- Opción Ancho de canal = Media distancia al canal adyacente; En este caso, el canal se calcula para cubrir la mitad del espacio hasta la frecuencia contigua. Como el canal adyacente se calcula de la misma manera, todas las frecuencias en el packet se tendrán en cuenta durante la evaluación de nivel. Esta opción puede ser utilizada para medir señales en la telefonía móvil como UMTS y LTE, cuyo ancho de canal es mayor al RBW del analizador de espectro, (Figura 5.3C).

**Barrido con búsqueda de picos:** Si no se espera que las frecuencias de medición aparezcan en un patrón con espaciado equidistante, pero se prevee que aparezcan en cualquier orden, entonces se deberá utilizar un barrido con búsqueda de picos. Una aplicación típica son las mediciones en el rango de frecuencias por debajo de 30 MHz.

Para definir las frecuencias de medición para este modo se configura el modo

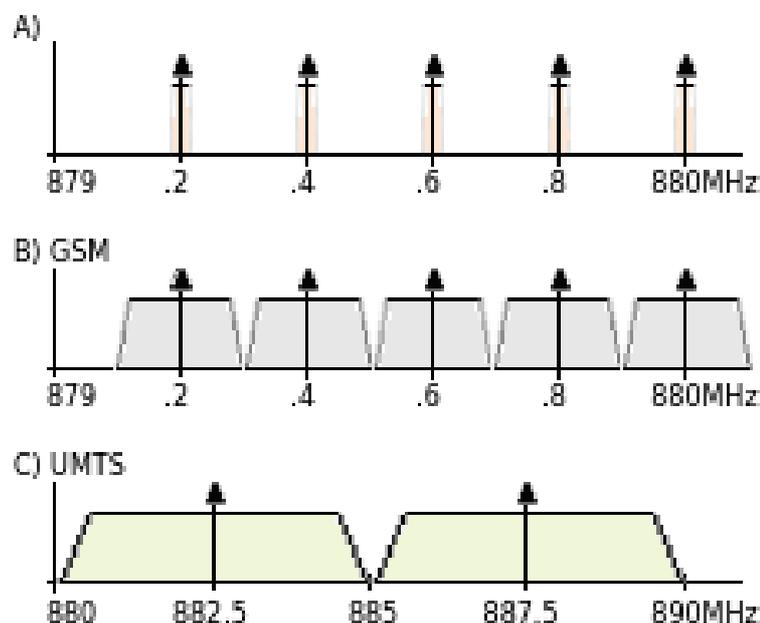


Figura 5.3: Modos de espaciado para el ancho del canal

del barrido, definiendo: el rango de barrido, el número de picos a encontrar (como máximo 50 picos) y la distancia mínima que puede haber entre dos picos consecutivos.

#### 5.4.1.3. Adquisición de datos

**Canales por sub-packet:** Este parámetro solo se tiene en cuenta si se selecciona la opción Patrón de canal conocido en la pestaña Frecuencias de medida. Durante una medición en el modo Patrón de canal conocido, el rango completo de frecuencia no está cubierto por un barrido. En cambio, el rango de frecuencia generalmente se dividirá en rangos más pequeños llamados “sub-packets”, con el fin de garantizar que cada canal de medición se grabe con una cantidad suficiente de píxeles (resolución de pantalla del analizador).

Este campo permite seleccionar la cantidad de canales que se deben grabar en un sub-packet. Tener en cuenta que cuantos menos canales se definan en el sub-packet, mejor será la resolución del espectro medido (habrá más píxeles disponibles por canal), pero esto también aumenta la cantidad de sub-packet a medir (requiere un ajuste frecuente del analizador de espectro, por lo tanto, aumenta el tiempo de medición), ver Figura 5.4A y B.

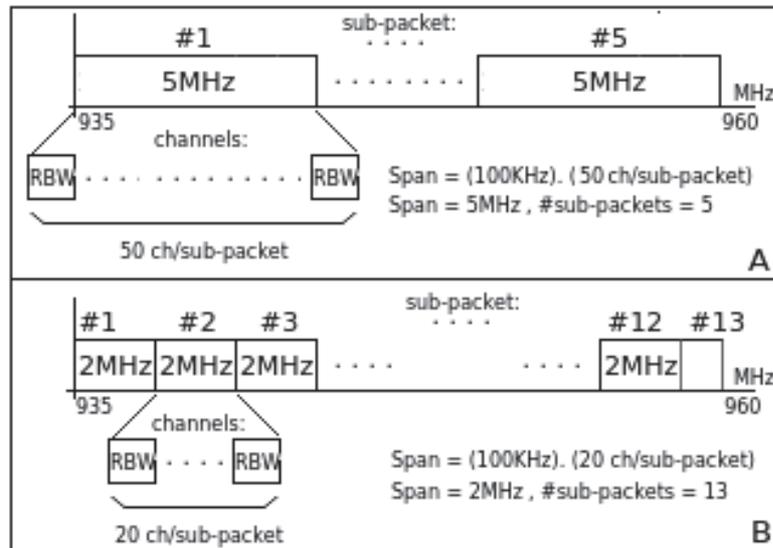


Figura 5.4: Canales por sub-packet: A)Span=5MHz, B)Span=2MHz

**Span de frecuencias por sub-packet:** El rango de frecuencias para un sub-packet es igual al producto de la cantidad de canales y el ancho de banda de resolución:  $Span = RBW \cdot (ch/sub - packet)$ .

Supongamos, por ejemplo, que se mida un rango de frecuencias de 935 a 960 MHz con un RBW de 100 kHz y con 20 canales por sub-packet (Figura 5.4B). Esto da como resultado un sub-packet con un rango de barrido de 2 MHz (20 veces 100 kHz) cada uno. Por lo tanto, el rango de frecuencia completo se divide en 13 sub-packets (el último es algo más pequeño que 2 MHz).

**Tiempo de medida:** Este campo permite ingresar el tiempo que se esperará para leer los datos de rastreo del analizador de espectro después de que se haya iniciado un sub-packet. El tiempo se ingresa en milisegundos. De forma predeterminada, el analizador de espectro establece automáticamente el tiempo de barrido (acoplado al ancho de banda seleccionado).

RFEX consulta el tiempo de barrido establecido por el analizador y el tiempo de espera que establece el software será 1,5 veces este valor.

Si el tiempo de permanencia ajustado en el software es mayor que el tiempo de barrido del analizador de espectro, entonces el analizador realizará múltiples barridos.

**Umbral de aceptación** Una de las principales características de RFEX es su capacidad de reducción de datos. La cantidad de datos ignorados está determinada principalmente por el parámetro de umbral de Aceptación. Debido a esto, es uno de los parámetros más críticos en un packet. Este valor umbral define un nivel de radiación por debajo del cual se ignorará cualquier nivel de campo medido.

Es muy importante establecer este parámetro de forma que no sea demasiado alto (conduciría a un valor de EMF demasiado bajo que se está midiendo) ni demasiado bajo (lo que haría que el piso de ruido del analizador se evalúe como radiación).

## 5.5. Parámetros de medición establecidos

En esta última sección se mostrará la configuración que se realizará en el equipo/software para proceder con la evaluación de las RNI en la banda de la telefonía móvil.

**Packets bandas 850/1900 GSM:** Las bandas de 850 y 1900 en tecnología GSM utilizan la misma configuración en el packet, salvo que se definen los canales adecuados en cada banda (Figura 5.5), los parámetros establecidos para esta tecnología son:

- RBW = 200kHz
- Detección RMS: Si
- Modo de traza: Max Hold
- Anchura de canal = RBW

Estos parámetros del packet se muestra en la Figura 5.6, que son capturas de la interfaz de configuración del software RFEX.

**Packet banda 850/1900 UMTS:** Las bandas de 850 y 1900 en tecnología UMTS utilizan la misma configuración en el packet, salvo que se definen las portadoras en cada banda (Figura 5.7), los parámetros establecidos para esta tecnología son:

- RBW = 100kHz

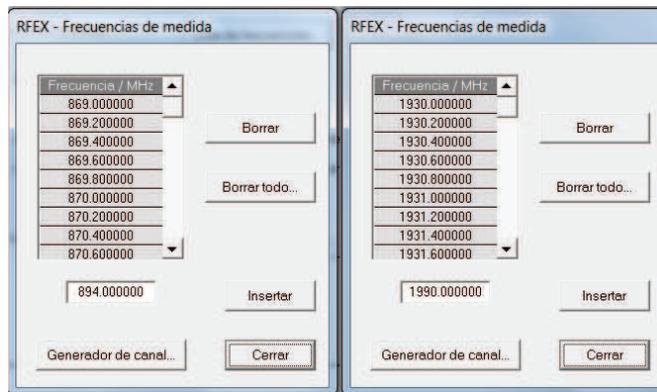


Figura 5.5: Configuración de canales para GSM 850/1900

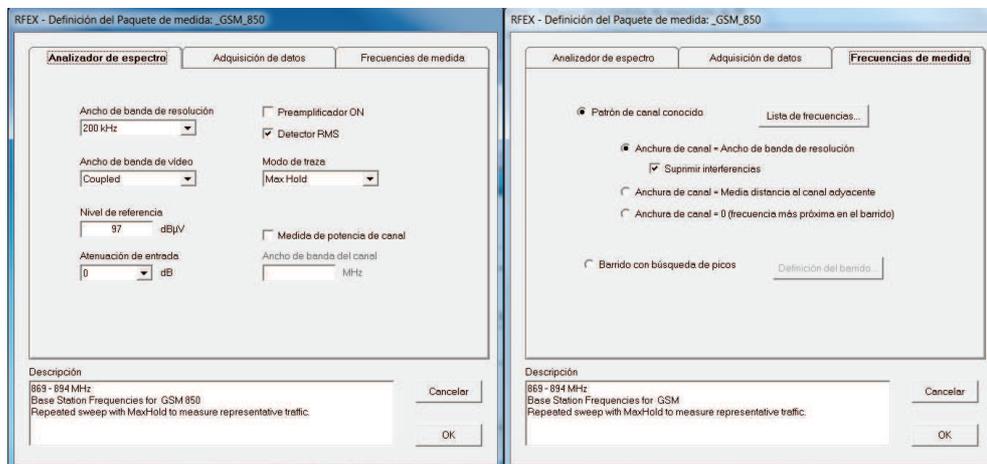


Figura 5.6: Configuración del packet GSM 850

- Detección RMS: Si
- Modo de traza: Max Hold
- Medida de potencia del canal = 10MHz
- Anchura de canal = Media distancia al canal adyacente

Estos parámetros del packet se muestra en la Figura 5.8, que son capturas de la interfaz de configuración del software RFEX.

**Packet banda 4/28 LTE:** Las bandas 4 y 28 en tecnología LTE utilizan la misma configuración en el packet, salvo que se definen las distintas portadoras en cada banda (Figura 5.9), los parámetros establecidos para esta tecnología son:

- RBW = 100kHz

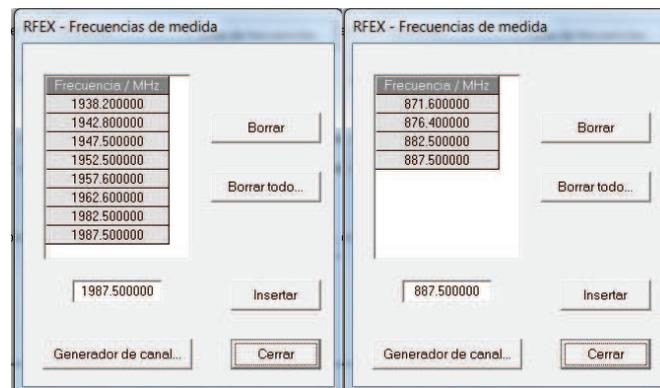


Figura 5.7: Configuración de canales para UMTS Banda II/V

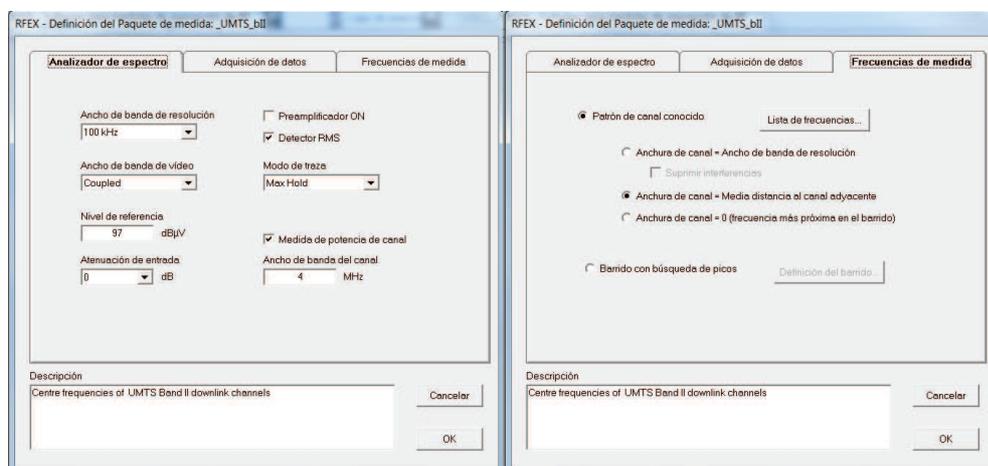


Figura 5.8: Configuración del packet UMTS Banda II

- Detección RMS: Si
- Modo de traza: Max Hold
- Medida de potencia del canal = 4MHz
- Anchura de canal = Media distancia al canal adyacente

Estos parámetros del packet se muestra en la Figura 5.10, que son capturas de la interfaz de configuración del software RFEX.

En este capítulo explicamos los procedimientos que se aplicaron para realizar la medición de las RNI en campo, aplicado a la telefonía móvil. Estudiamos la planificación y evaluación del entorno de medición, luego se eligió el método de medición, se evaluaron los puntos acorde a las características del emplazamiento. Siguiendo el procedimiento, se presentó el instrumental a utilizarse, con las características más sobresalientes y explicando su configuración. Por ultimo mostramos

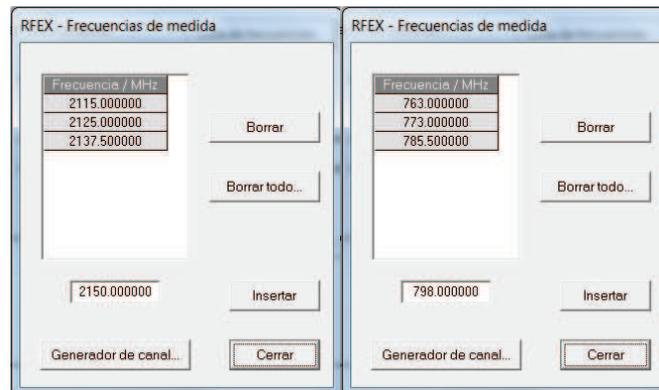


Figura 5.9: Configuración de canales para LTE Banda 4/28

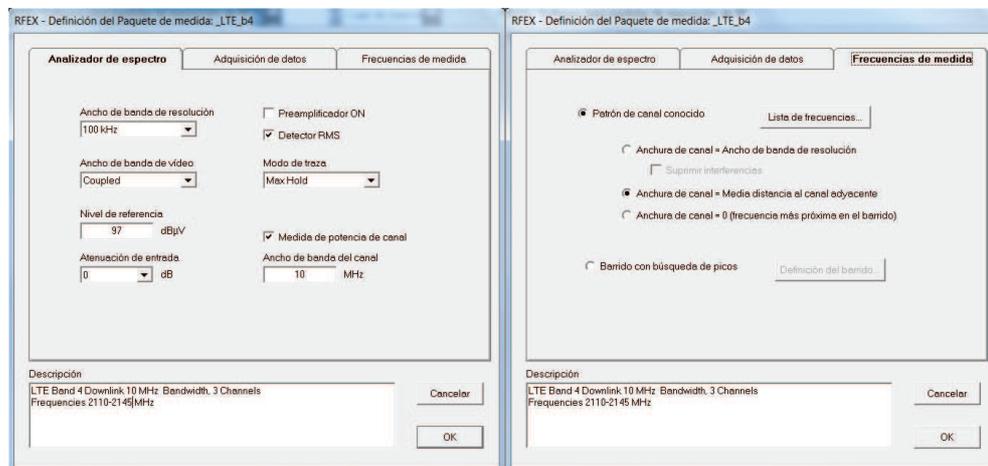


Figura 5.10: Configuración del packet LTE Banda 4

los parámetros que fueron establecidos para el servicio de telefonía móvil.

En el próximo capítulo aplicaremos todos estos procedimientos previos, para realizar la medición de las RNI en campo. Se realizará la medición de dos emplazamientos, ambos de telefonía celular móvil, siendo uno del tipo omnidireccional y el otro direccional. Luego se realizará en este último la inspección de sus instalaciones y la medición de las RNI en campo cercano.

---

## Capítulo 6

# Medición en Campo

Como parte práctica del Proyecto Final Integrador de la carrera, se realizó la medición en campo de las RNI producidas por las antenas de telefonía móvil, instaladas dentro y fuera del Campus.

Se midió 2 emplazamientos, el primero es un sistema sectorizado en 120°, instalado a una altura de 15 metros sobre una edificación interna al campus. El segundo es un sistema omnidireccional, instalado en un monoposte a una altura de 8 metros y se encuentra cercano al acceso del Campus. También se visitó las instalaciones del primer emplazamiento y se realizó la medición de los niveles de campo presentes en el lugar.

### 6.1. Normativa de Regulación

En la República Argentina se encuentra vigente la Resolución Nacional N° 3690/04 de la ENACOM (ex CNC), la cual establece el Protocolo de Evaluación de las RNI, para asegurar el cumplimiento en el territorio nacional de los niveles máximos establecidos por el Ministerio de Salud y Acción Social en la Resolución N° 202/95, y aprobada por la Resolución N° 530/00 de la Secretaria de Comunicaciones.

También cabe nombrar la Resolución N° 87/13 del Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible, que ejerce dominio dentro de la Provincia de Buenos Aires.

## 6.2. Lugar de medición

La sede de la Universidad de San Martín está ubicada en el Partido de General San Martín, al noroeste del Gran Buenos Aires. Construido sobre una antigua playa ferroviaria de más de dos hectáreas, el Campus Miguelete constituye uno de los principales atractivos del territorio bonaerense en términos de planeamiento arquitectónico y conservación patrimonial (Ver Figura 6.1).



Figura 6.1: Fotos de la Sede de la UNSAM

A continuación, mostramos un croquis completo del Campus de la Universidad, donde marcamos con puntos rojos, la ubicación donde se encuentran instalados los sistemas irradiantes de la telefonía móvil (Figura 6.2).

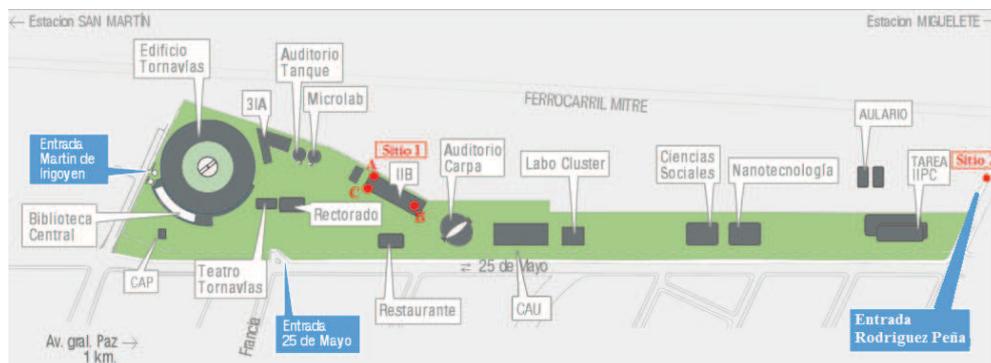


Figura 6.2: Croquis del Campus con la ubicación de los emplazamientos

Los emplazamientos que se midieron son los siguientes:

- Sitio 1, Emplazamiento sectorizado de 120° ubicado sobre terraza de edificio IIB (interno al Campus).
- Sitio 2, Emplazamiento omnidireccional ubicada a 50 metros del acceso Este al Campus (Calle Rodriguez Peña).

### 6.3. Montaje del instrumental

Antes de proceder con la medición se realizó la configuración e interconexión del equipamiento necesario para la medición en campo de las RNI. A continuación en la Figura 6.3 mostramos el equipamiento necesario.



Figura 6.3: Montaje del instrumental utilizado para la medición

#### Instrumental utilizado:

- Antena isotrópica R& S TSEMF-B1
- Analizador de espectro R& S ETH
- Notebook y software de medición R& S RFEX
- Trípode, antena GPS y cables de conexión

## 6.4. Medición en campo

### 6.4.1. Sitio 1

Como se muestra en el croquis general (Figura 6.2), el sistema irradiante se encuentra ubicada dentro del Campus, en la terraza del Instituto de Investigaciones Biotecnológicas (IIB), tal como se observa en la Figura 6.4, el emplazamiento es sectorizado, con 3 sistemas direccionales orientados en  $120^\circ$ . También mostramos una imagen con las coordenadas geográficas del sitio (Figura 6.5).



Figura 6.4: Fotos del sitio de medición mostrando los sistemas irradiantes



Figura 6.5: Ubicación gmaps del emplazamiento del sitio 1

El lugar donde se ubica el emplazamiento es amplio con mucha concentración

de personas, diversidad de edificios y grandes áreas verdes, tal como se verifica su entorno con las Figuras 6.6 y 6.7.



Figura 6.6: Entorno 1 del sitio de medición



Figura 6.7: Entorno 2 del sitio de medición

Siguiendo los criterios establecidos por la normativa de regulación, se evaluó

el entorno a medir de acuerdo con las características del sistema irradiante:

**Tipo de antena:** Los sistemas irradiantes están instalados en la terraza del edificio a una altura de 15 metros. Como se comentó anteriormente estos sistemas son sectorizados, disponiendo de 3 antenas por cada sector. Las antenas son de tipo "panel", y se encuentran instaladas sobre estructuras denominadas pedestales. Todo el sistema hace un total de 9 antenas en el emplazamiento.

**Selección de puntos:** El sistema irradiante al ser sectorizado se realizará una etapa de medición para cada uno de sus sectores, asignados como sectores A, B y C. Al ser direccionales, para cada sector se medirán 4 puntos sobre su máxima dirección de propagación, y otros 12 puntos serán ubicados según las características del lóbulo de radiación. Las mediciones a realizar son de inmisión para campo lejano como indica la normativa de regulación de las RNI.

#### 6.4.1.1. Sector A:

En la Figura 6.8, se muestra un croquis con la ubicación del emplazamiento del sector A, resaltando los puntos 1 al 4 sobre la dirección de máxima propagación del sistema irradiante y los siguientes puntos en función de la orientación de la antena, apuntada al norte geográfico a un azimut de  $0^\circ$ .

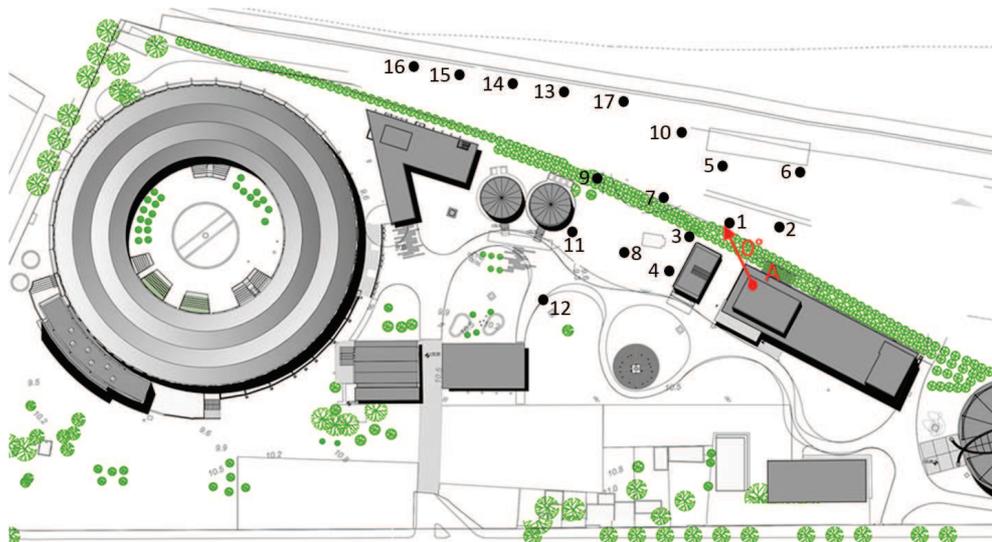


Figura 6.8: Croquis del sector 1A con la ubicación de puntos

#### 6.4.1.2. Sector B:

En la Figura 6.9, se muestra un croquis con la ubicación del emplazamiento del sector B, resaltando los puntos 1 al 4 sobre la dirección de máxima propagación del sistema irradiante y los siguientes puntos en función de la orientación de la antena, apuntada a un azimut de  $120^\circ$ .

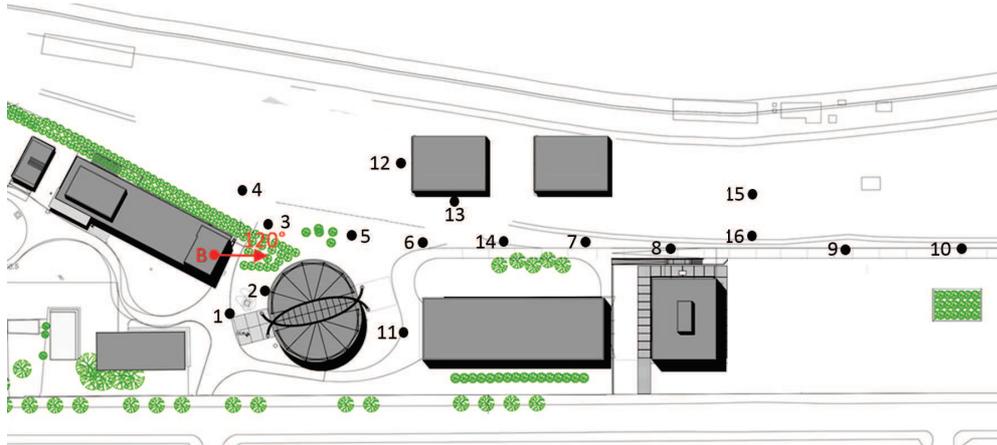


Figura 6.9: Croquis del sector 1B con la ubicación de puntos

#### 6.4.1.3. Sector C:

En la Figura 6.10, se muestra un croquis con la ubicación del emplazamiento del sector C, resaltando los puntos 1 al 4 sobre la dirección de máxima propagación del sistema irradiante y los siguientes puntos en función de la orientación de la antena, apuntada a un azimut de  $240^\circ$ .

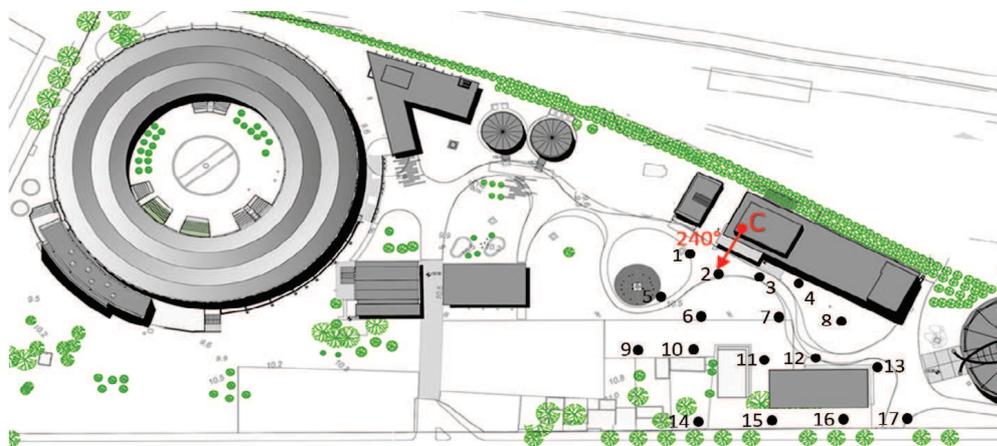


Figura 6.10: Croquis del sector 1C con la ubicación de puntos

### 6.4.2. Sitio 2

Como se muestra en el croquis general del Campus (Figura 6.2), el sistema irradiante se encuentra ubicado en la calle Rodríguez Peña a la altura 2975, entre el paso a nivel de las vías de la estación de tren Miguelete (línea de Ferrocarril Mitre) y entre la Av. 25 de Mayo. El lugar donde se ubica el emplazamiento es muy transitado y cercano al Campus Miguelete, a 50 metros de su acceso. Se muestra en la Figura 6.11 fotos con imágenes del entorno del sitio de medición y una imagen (Figura 6.12) mostrando sus coordenadas geográficas.



Figura 6.11: Entorno de medición en el sitio 2

Siguiendo los criterios establecidos por la normativa de regulación, se evaluó el entorno a medir de acuerdo con las características del sistema irradiante:

**Tipo de antena:** La antena se encuentra instalada en un monoposte a una altura de 8 metros. La antena es modelo Radomo y es del tipo omnidireccional, es decir tiene un azimut de  $360^\circ$ , irradiando con igual potencia a los alrededores de su entorno.



Figura 6.12: Ubicación gmaps del emplazamiento del sitio 2

**Fotos de la instalación:** A continuación se muestran algunas fotos del emplazamiento, tomadas en el momento de la medición (Figura 6.13).



Figura 6.13: Fotos del emplazamiento en el sitio 2

**Selección de puntos:** Dado que el sistema irradiante es del tipo omnidireccional, se seleccionaron 16 puntos, realizándose mediciones de inmisión y en campo lejano como sugiere el Protocolo de Evaluación de las RNI. En la Figura 6.14, se muestra un croquis con la ubicación del emplazamiento en el punto rojo, y los puntos de medición efectuados, numerados para su evaluación.

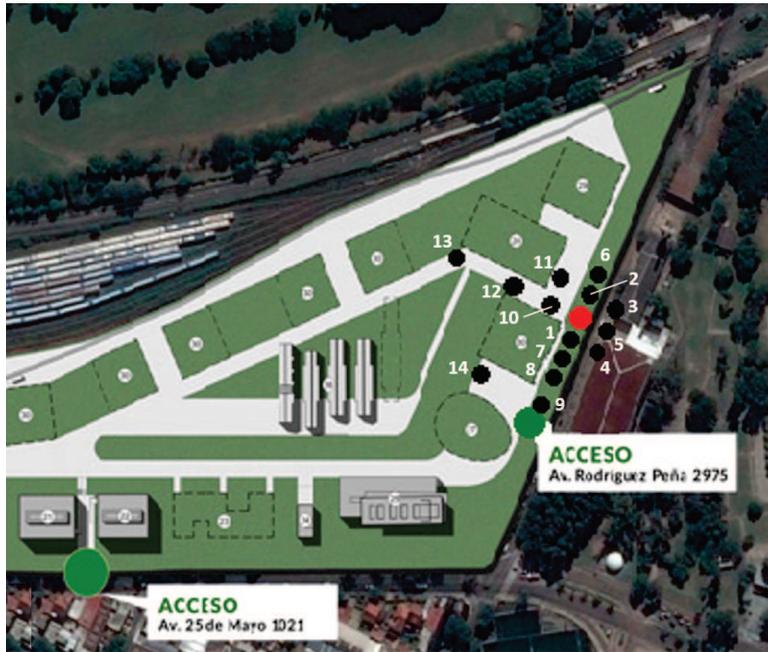


Figura 6.14: Croquis del sitio con los puntos de medición

## 6.5. Medición de radiobase instalada en el IIB

Como el emplazamiento se encuentra instalado en uno de los edificios del Campus, se procedió solicitar autorización para el acceso a sus instalaciones. La infraestructura se encuentra en la terraza del edificio IIB, a una altura aproximada de 15 metros. Se realizó un primer relevamiento del sistema instalado, los equipos y antenas utilizados, y luego se procedió a la medición de las RNI a partir de los niveles del campo eléctrico, usando el criterio de campo cercano.

### 6.5.1. Equipos instalados

Se realizó un relevamiento de la infraestructura instalado en la terraza del edificio, se trata de una radiobase que opera la empresa Telecom Personal que brinda servicios en GSM, UMTS y LTE. El equipos y antenas utilizados son de tecnología multibanda y multihaz.

El sistema general como se observa en la Figura 6.15, consta de:

- Equipo BBU DBS3900
- Equipos RRU B02/B04/B05/B28
- Antenas RX/TX multibandas

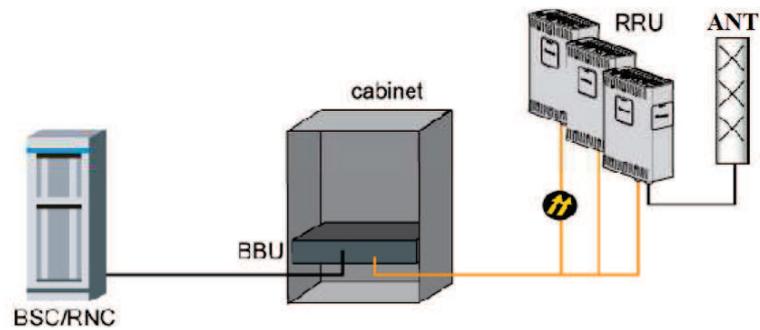


Figura 6.15: Diagrama general de la instalación de una radiobase

El equipo BBU es una unidad de control de banda base. Proporciona puertos para conexiones al BSC (Controladora de radiobases) y a la RRU, realiza una administración centralizada de todo el sistema en términos de Operación y Mantenimiento, de procesamiento de señalización, y proporciona el reloj del sistema. Los equipos RRU son las unidades de radio remota externa. Procesan las señales RF y de banda base. Hay una RRU distinta para cada banda de operación, como se muestra el diagrama de la Figura 6.16.

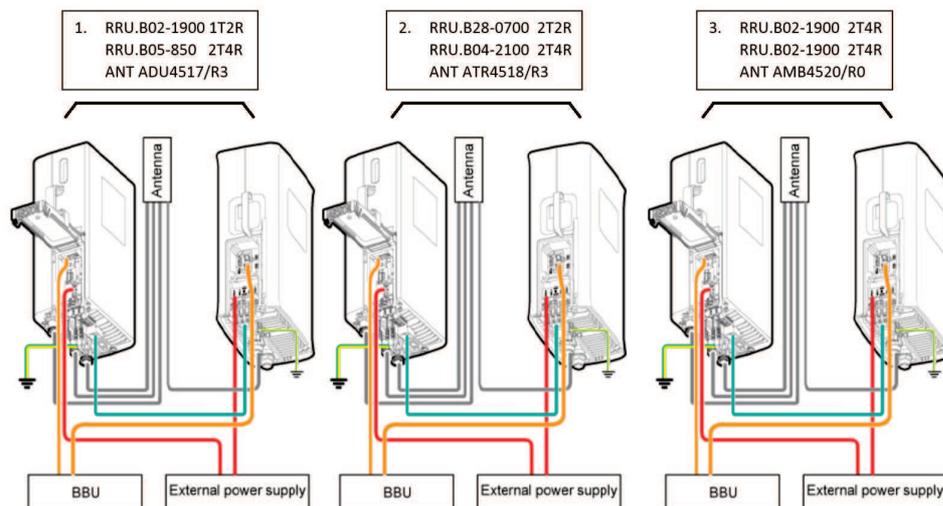


Figura 6.16: Conexión entre equipos RRU y antenas

### 6.5.2. Fotos de la instalación

A continuación se muestran las fotos tomadas en la instalación. En la Figura 6.17 se muestra el gabinete de equipos donde se encuentra la BBU y la

alimentación del sistema en conjunto con las baterías de respaldo. También es observable el cableado externo de alimentación y transmisión entre los equipos RRU y BBU de cada tecnología.



Figura 6.17: Cabina de transmisión alimentación y baterías

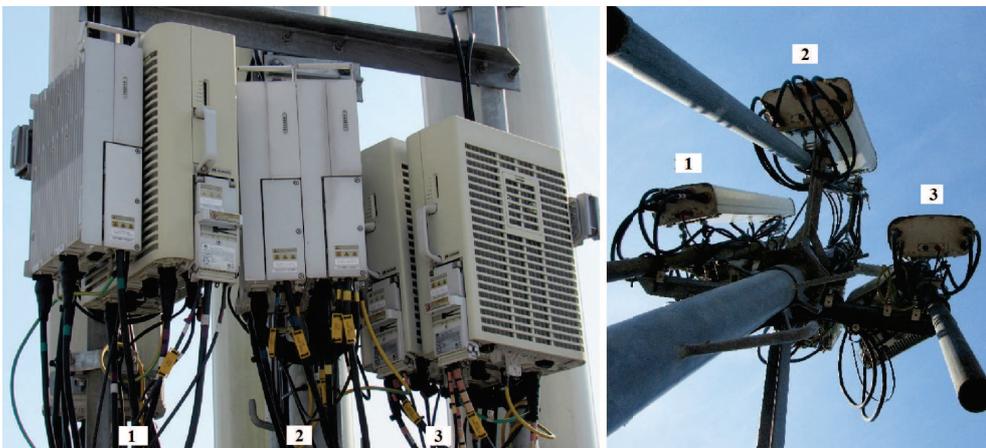


Figura 6.18: Equipos RRU y Antenas utilizados en la instalación

En la Figura 6.18 mostramos los equipos RRU y antenas utilizados por cada sector, con equipamiento numerado tal como sigue:

### Equipamiento 1

- RRU.B02-1900 Model RRU3936-1900
- RRU.B05-850 Model RRU3942-850
- 4-Port Antenna Model ADU4517R3v06

**Equipamiento 2**

- RRU.B28-0700 Model RRU3268-0700
- RRU.B04-2100 Modelo RRU3841
- Tri-Band Antenna Model ATR4518R13

**Equipamiento 3**

- RRU.B02-1900 Model RRU3942-1900
- RRU.B02-1900 Model RRU3942-1900
- Single-Band Dual-Beam Antenna Model AMB4520R0

Se muestra a continuación fotos tomadas en las instalaciones en cada sector del emplazamiento:

**Sector A:** En la Figura 6.19 se observan fotos del sector A con los equipos y antenas instaladas.



Figura 6.19: Fotos de la Instalación del emplazamiento sector A

**Sector B:** En la Figura 6.20 se observan fotos del sector B con los equipos y antenas instaladas.



Figura 6.20: Fotos de la Instalación del emplazamiento sector B

**Sector C:** En la Figura 6.21 se observan fotos del sector C con los equipos y antenas instaladas.



Figura 6.21: Fotos de la Instalación del emplazamiento sector C

### 6.5.3. Características de los sistemas irradiantes:

El sistema irradiante que observamos para brindar los servicios de telefonía móvil, es una combinación de antenas del tipo multibanda y multihaz, que operan irradiando en las bandas de frecuencias asignadas para cubrir la zona, formando una cobertura sectorizada.

Los irradiantes instalados en cada uno de los sectores fueron los siguientes:

**ADU4517R3:** Antena que opera en dos rangos de frecuencia (dual-band), 790-960 y 1710-2180, por lo cual la hace apta para operar en las bandas celulares de 850 y 1900, respectivamente. Utiliza una polarización  $\pm 45^\circ$ , entre otras características importantes citamos las que siguen (Tabla 6.1):

	824-894	1850-1990
Electric downtilt	0-14	0-10
Gain [dBi]	14.7	17.3
Horizontal 3dB beam width	$66 \pm 1.3$	$63 \pm 1.4$
Vertical 3dB beam width	$15.0 \pm 0.9$	$7.1 \pm 0.3$
VSWR	$< 1.5$	$< 1.5$

Cuadro 6.1: Especificaciones de la antena ADU4517R3

Estos datos fueron extraídos de las especificaciones, también se muestra (Figura 6.22) sus dimensiones, conectores y diagramas de radiación de la antena.

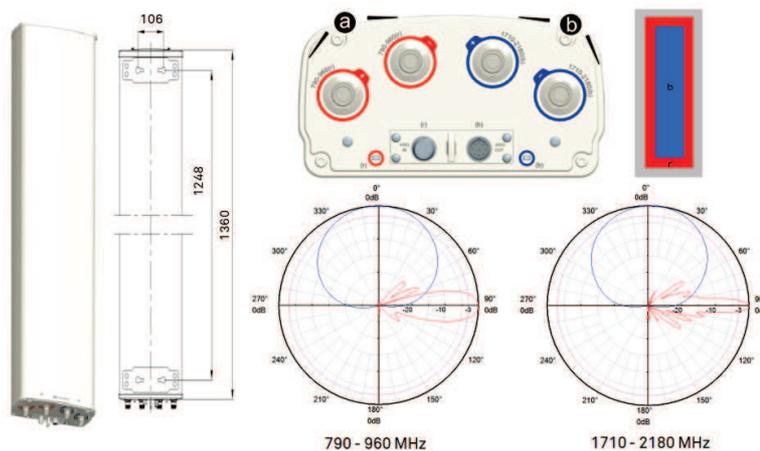


Figura 6.22: Dimensiones, conectores y diagrama de radiación

**ATR4518R13:** Antena tri-banda que opera en dos rangos de frecuencia, 690-960 y  $2 \times (1710-2690)$ , por lo cual la hace apta para operar en las bandas celulares de 700 (banda 28) y 2100 (banda 4), respectivamente. Utiliza una polarización  $+/-45^\circ$ , entre otras características importantes citamos las que siguen (Tabla 6.2, Figura 6.23):

	703-803	1710-1755	2110-2155
Electric downtilt	0-14	0-10	
Gain [dBi]	14.4	17.5	17.8
Horizontal 3dB beam width	$65 \pm 2.5$	$65 \pm 3.9$	$65 \pm 3.3$
Vertical 3dB beam width	$15.6 \pm 1.2$	$7.1 \pm 0.5$	$6.5 \pm 0.5$
VSWR	$< 1.5$	$< 1.5$	

Cuadro 6.2: Especificaciones de la antena ATR4518R13

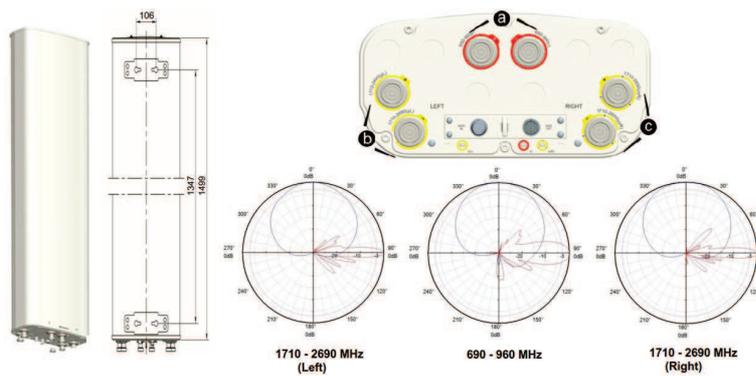


Figura 6.23: Dimensiones, conectores y diagrama de radiación

**AMB4520R0:** Antena de tipo multihaz de una sola banda que opera en la frecuencia de 1710-2690, apta para operar en la banda celular de 1900 MHz (banda II). Utiliza una polarización  $+/-45^\circ$ , entre otras características importantes citamos las que siguen (Tabla 6.3, Figura 6.24):

	1910-1990
Electric downtilt	0-10
Gain [dBi]	19.2 ( $5^\circ$ )
Horizontal 3dB beam width	34
Vertical 3dB beam width	6.3
VSWR	$< 1.5$

Cuadro 6.3: Especificaciones de la antena AMB4520R0

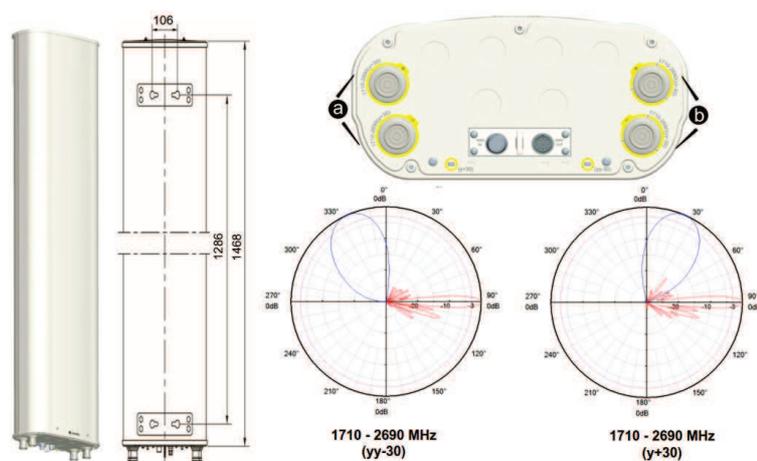


Figura 6.24: Dimensiones, conectores y diagrama de radiación

#### 6.5.4. Medición de las RNI:

Se realizó la medición RNI en el sitio de la instalación de las antenas de telefonía celular, ubicada en la terraza del edificio IIB, a una altura de 15 metros. Se midieron los valores de inmisión para cada sector del emplazamiento, asignados como A, B y C. Se muestra en las Figuras: 6.25, 6.26 y 6.27, los irradiantes de cada uno de los sectores nombrados.



Figura 6.25: Medición RNI en el emplazamiento sector A



Figura 6.26: Medición RNI en el emplazamiento sector B

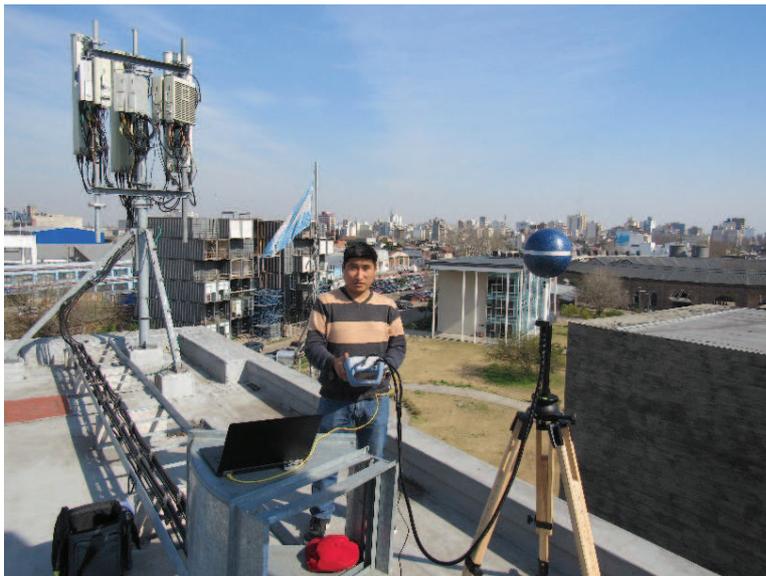


Figura 6.27: Medición RNI en el emplazamiento sector C

**valores medidos:** A continuación mostramos un croquis (Figura 6.28) con los puntos de medición realizados, y una tabla con la distancia a la fuente y los valores de densidad de potencia calculados (Tabla 6.4).

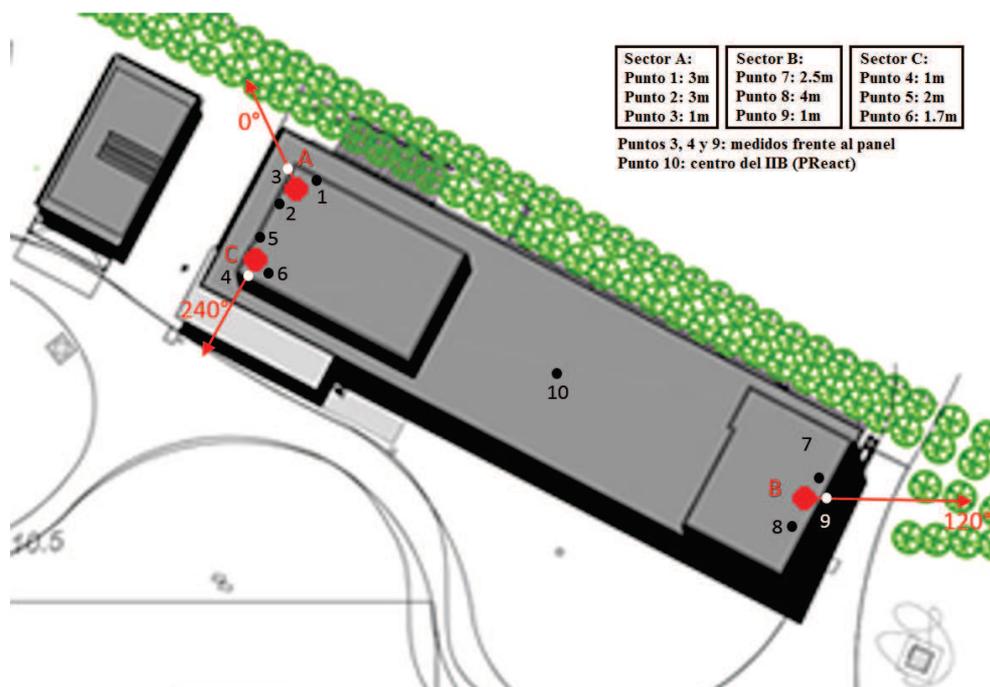


Figura 6.28: Croquis de la terraza del IIB con la ubicación de puntos

Sector	Punto N°	Distancia [m]	Latitud	Longitud	Campo E [V/m]
A	1	3	34,579445S	58,525085W	38,60
	2	3	34,579450S	58,525118W	25,68
	3	1	34,579437S	58,525070W	<b>82,00</b>
C	4	1	34,579470S	58,525168W	<b>114,30</b>
	5	2	34,579488S	58,525150W	93,70
	6	1,7	34,579483S	58,525137W	74,80
B	7	2,5	34,579877S	58,524752W	52,66
	8	4	34,579918S	58,524783W	30,32
	9	1	34,579885S	58,524747W	<b>66,78</b>
	10	30	34,579667S	58,524987W	<b>9,50</b>

Cuadro 6.4: Valores medidos en el emplazamiento IIB

Cabe resaltar que los niveles de campo eléctrico, medidos próximos a las antenas fueron valores altos, pues la distancia a la cual se midió desde la fuente era muy corta (medición en campo cercano), por lo tanto sus niveles de exposición superaron los límites establecidos por la regulación de las RNI. Por otro lado, los valores medidos sólo corresponden a los niveles de campo eléctrico, pues en la medición en campo cercano el campo eléctrico y magnético no guardan correspondencia. Por tanto, en este caso no se puede determinar la densidad de potencia equivalente.

En este capítulo se describió la forma en que se realizó la medición en campo,

es decir las mediciones de inmisión en los sitios declarados, de acuerdo con las características de cada sistema irradiante, mostrándose para cada emplazamiento medido, un mapa del entorno y por sitio un mapa de medición. También se visitó las instalaciones del emplazamiento ubicado en el edificio IIB, procediendo con el estudio del equipamiento de la radiobase instalada y posteriormente midiendo los niveles de campo presentes en el sitio.

En el próximo capítulo se presentarán los niveles de RNI medidos en cada sitio, y se contrastarán con los límites de exposición impuestos por la regulación. Como caso particular en uno de los sitios analizaremos los aportes medidos por cada tecnología y analizaremos el espectro para identificar el operador que brinda servicio en el emplazamiento.

---

## Capítulo 7

# Análisis y Presentación de Resultados

Luego de la realización de la medición en campo, en este capítulo, procedemos al análisis y la presentación de las mediciones de cada sitio. Realizaremos un análisis de los niveles totales encontrados, contrastándolos con los límites expuestos por la regulación nacional. Como caso particular, para el Sitio 1, se presentará los aportes medidos por cada tecnología, mostrando los valores pico y promedio, y se identificará el operador que brinda servicio en el emplazamiento.

### 7.1. Resultados de la medición de inmisión

Se presentan en la Figura 7.1, los límites recomendados por la regulación nacional (ENACOM), para la máxima exposición poblacional (MEP), a partir de la densidad de potencia  $S$  [ $mW/cm^2$ ], resaltando sus límites para las frecuencias de la telefonía móvil. Calculamos los límites para las bandas que operan (rango de 700 a 2700 MHz), mediante la tabla de máxima exposición poblacional (Tabla 1.4), en función de su frecuencia:

- Banda de 700 MHz (LTE banda 28):  $0.35 mW/cm^2$
- Banda de 850 MHz (GSM/UMTS banda V):  $0.44 mW/cm^2$
- Banda de 1700 MHz (LTE banda 4 UpLink):  $0.85 mW/cm^2$
- Banda de 1900 MHz (GSM/UMTS banda II):  $0.95 mW/cm^2$
- Banda de 2100 MHz (LTE banda 4 DownLink):  $1 mW/cm^2$

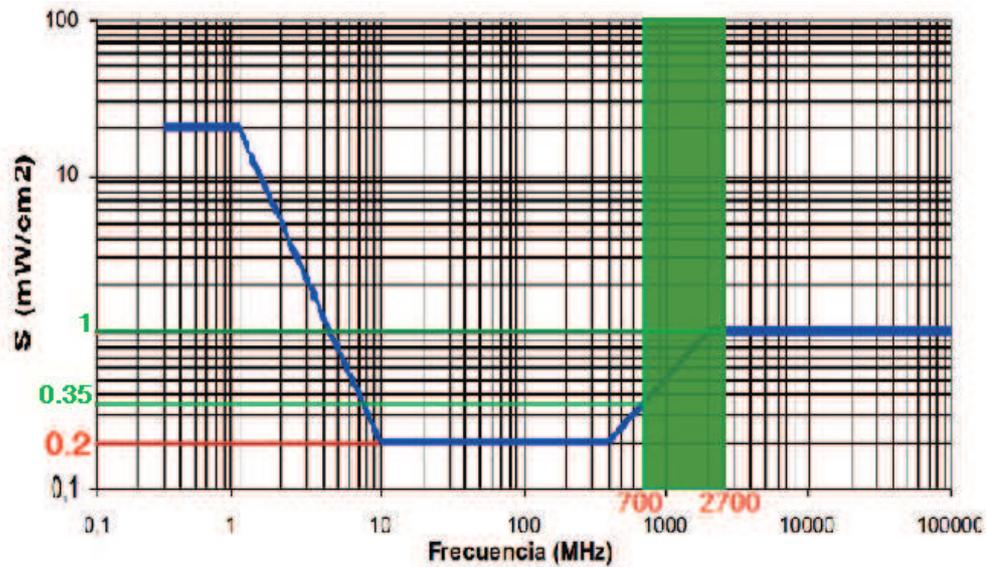


Figura 7.1: Niveles MEP establecidos para la telefonía móvil

Observamos que a partir del cálculo de límites realizado en el párrafo anterior, que estos valores se encuentran dentro del rango de  $0,35$  a  $1 \text{ mW/cm}^2$  de la densidad de potencia (Figura 7.1). No obstante adoptamos como límite de referencia el más bajo correspondiente a la banda de frecuencias de  $10$  a  $400 \text{ MHz}$ , de  $0,2 \text{ mW/cm}^2$ . Esto es apropiado porque realizamos mediciones de inmisión, donde consideramos todas las bandas de frecuencias y aseguramos la obtención de valores menores al límite más estricto. Con esto se determinó donde se encontraban los niveles RNI de los servicios de telefonía móvil respecto a los límites establecidos.

A partir del límite de referencia adoptado, calculamos el valor máximo del pico en cada punto, que debe ser inferior al  $50\%$  del MEP más estricto como determina la normativa de regulación, es decir, el valor pico debe ser inferior a  $0,1 \text{ mW/cm}^2$  para evaluarse como un punto de medición válido.

**Cálculo de los errores de medición:** La incertidumbre máxima de medición isotrópica del instrumento y de la sonda utilizada fue de  $1,65 \text{ dB}$  según las especificaciones del fabricante, y es equivalente al  $46\%$  de la densidad de potencia calculada. La fórmula que permite hacer la corrección de los valores medidos teniendo en cuenta el error del instrumental es la que sigue:

$$S_{\text{corregido}} = 1,46 \times S_{\text{max}} \quad (7.1)$$

A continuación presentamos los valores medidos en los distintos sitios y puntos de medición:

### 7.1.1. Resultados del Sitio 1

En las siguientes tablas se presenta los puntos medidos para cada sector del “Sitio 1”. Cada punto evaluado presenta la distancia a la fuente, coordenadas geográficas, densidad de potencia medida por el instrumento, valor corregido por error del instrumento (Ecuación 7.1) y porcentaje respecto al límite de referencia ( $0,2 \text{ mW/cm}^2$ ).

**Sector 1A:** En la Tabla 7.1, se presentan los puntos de medición evaluados para el Sector 1A del emplazamiento, que corresponde con los puntos de medición establecidos en la Figura 6.9.

Punto N°	Distancia [m]	Latitud	Longitud	Hora	$S_{\max}$ [ $\text{mW/cm}^2$ ]	$S_{\text{corregido}}$ [ $\text{mW/cm}^2$ ]	% Respecto al límite <sub>ref</sub>
1	19.8	34,579317S	58,524922W	10:26:14	0.0042	0.0062	3.1
2	20.5	34,579307S	58,524863W	10:36:52	0.0053	0.0077	3.8
3	26	34,579240S	58,525107W	10:59:26	0.0067	0.0098	4.9
4	30	34,579243S	58,525397W	11:06:20	0.0044	0.0064	3.2
5	37	34,579135S	58,524842W	10:52:43	0.0050	0.0073	3.6
6	44.5	34,579220S	58,524805W	10:47:42	0.0026	0.0038	1.9
7	40.5	34,578902S	58,525253W	12:33:37	0.0050	0.0074	3.7
8	43.5	34,579163S	58,525535W	11:13:17	0.0038	0.0055	2.8
9	64	34,578885S	58,525352W	11:46:45	0.0077	0.0113	5.6
<b>10</b>	<b>52</b>	<b>34,578780S</b>	<b>58,525167W</b>	<b>11:55:02</b>	<b>0.0171</b>	<b>0.0249</b>	<b>12.5</b>
11	66	34,578973S	58,525490W	11:39:49	0.0101	0.0147	7.4
12	70.8	34,579135S	58,525750W	11:27:46	0.0034	0.0049	2.5
13	91	34,578677S	58,525242W	12:03:00	0.0071	0.0103	5.2
14	110.8	34,578508S	58,525410W	12:14:23	0.0082	0.0120	6.0
15	131	34,578397S	58,525612W	12:19:26	0.0018	0.0026	1.3
16	152	34,578345S	58,525667W	12:26:10	0.0028	0.0041	2.1
17	76	34,578750S	58,525042W	12:08:50	0.0100	0.0146	7.3

Cuadro 7.1: Evaluación de puntos del Sitio 1, sector A

Como se observa en la Tabla 7.1, de los 17 puntos evaluados, el n° 10 es el que presenta mayor densidad de potencia, con un valor corregido de  $0,0249 \text{ mW/cm}^2$  que representa el 12.5 % del MEP más estricto para los niveles de inmisión.

**Sector 1B:** En la Tabla 7.2, se presentan los puntos de medición evaluados para el Sector 1B del emplazamiento, que corresponde con los puntos de medición establecidos en la Figura 6.9.

Punto N°	Distancia [m]	Latitud	Longitud	Hora	S <sub>max</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	S <sub>corregido</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	% Respecto al límite <sub>ref</sub>
1	24.3	34,580192S	58,524817W	12:43:00	0.0048	0.0070	3.5
2	21.4	34,579445S	58,525085W	12:50:46	0.0087	0.0127	6.4
3	19.8	34,579450S	58,525118W	12:59:37	0.0126	0.0185	9.2
4	24	34,579437S	58,525070W	12:05:05	0.0024	0.0036	1.8
5	57.5	34,579470S	58,525168W	12:12:19	0.0081	0.0119	5.9
6	87.1	34,579488S	58,525150W	12:18:53	0.0107	0.0157	7.8
7	145	34,579483S	58,525137W	12:24:13	0.0136	0.0199	9.9
8	178	34,579877S	58,524752W	12:32:29	0.0058	0.0085	4.3
9	236	34,579918S	58,524783W	12:39:46	0.0102	0.0149	7.4
10	280	34,579885S	58,524747W	12:46:00	0.0110	0.0161	8.1
11	82	34,580478S	58,524237W	12:48:33	0.0070	0.0102	5.1
12	78	34,579942S	58,523885W	12:58:01	0.0278	0.0405	20.3
<b>13</b>	<b>94.5</b>	<b>34,580138S</b>	<b>58,523890W</b>	<b>13:08:13</b>	<b>0.0383</b>	<b>0.0560</b>	<b>28.0</b>
14	115	34,580465S	58,523795W	13:17:24	0.0304	0.0443	22.2
15	222	34,580660S	58,522630W	13:24:21	0.0015	0.0021	1.1
16	221	34,580835S	58,522690W	13:30:30	0.0123	0.0180	9.0

Cuadro 7.2: Evaluación de puntos del Sitio 1, sector B

Como se observa en la Tabla 7.2, de los 16 puntos evaluados, el n° 13 es el que presenta mayor densidad de potencia, con un valor corregido de 0,0560  $mW/cm^2$  que representa el 28.0 % del MEP más estricto para los niveles de inmisión.

**Sector 1C:** En la Tabla 7.3, se presentan los puntos de medición evaluados para el Sector 1C del emplazamiento, que corresponde con los puntos de medición establecidos en la Figura 6.10.

Punto N°	Distancia [m]	Latitud	Longitud	Hora	S <sub>max</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	S <sub>corregido</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	% Respecto al límite <sub>ref</sub>
1	20.7	34,579410S	58,525392W	12:43:22	0.0040	0.0058	2.9
2	19.8	34,579490S	58,525220W	12:35:45	0.0062	0.0091	4.6
3	21.8	34,579660S	58,525092W	12:49:54	0.0033	0.0048	2.4
4	28.4	34,579683S	58,525280W	12:55:13	0.0068	0.0100	5.0
5	43	34,579518S	58,525717W	12:10:15	0.0179	0.0262	13.1
6	37.7	34,579582S	58,525522W	12:15:45	0.0138	0.0202	10.1
7	33.7	34,579595S	58,525343W	12:21:16	0.0183	0.0268	13.4
8	50.5	34,579532S	58,525342W	12:26:50	0.0147	0.0215	10.7
9	68	34,579573S	58,525847W	12:00:49	0.0263	0.0383	19.2
10	50	34,579708S	58,525477W	13:37:02	0.0256	0.0374	18.7
11	50	34,579783S	58,525387W	13:15:09	0.0172	0.0251	12.5
<b>12</b>	<b>62.1</b>	<b>34,579852S</b>	<b>58,525290W</b>	<b>13:09:13</b>	<b>0.0304</b>	<b>0.0444</b>	<b>22.2</b>
13	74.1	34,579993S	58,525062W	13:02:11	0.0116	0.0169	8.5
14	78.5	34,580103S	58,525648W	12:01:38	0.0241	0.0352	17.6
15	80	34,580032S	58,525438W	13:29:12	0.0261	0.0382	19.1
16	85.5	34,580202S	58,525275W	13:21:34	0.0150	0.0218	10.9
17	100	34,580290S	58,524923W	13:52:25	0.0167	0.0244	12.2

Cuadro 7.3: Evaluación de puntos del Sitio 1, sector C

Como se observa en la Tabla 7.3, de los 17 puntos evaluados, el n° 12 es el que presenta mayor densidad de potencia, con un valor corregido de  $0,0444 \text{ mW/cm}^2$  que representa el 22.2 % del MEP más estricto para los niveles de inmisión.

En resumen, ninguno de los puntos medidos en el emplazamiento registró un valor pico que supere al 50 % del límite MEP más estricto impuesto por la regulación nacional. Con lo cual concluimos la medición y consideramos que el **sitio cumple con los límites establecidos**.

### 7.1.2. Resultados del Sitio 2

En las siguiente Tabla 7.4 se presenta los puntos medidos en el “Sitio 2” y son correspondientes con la Figura 6.14. Cada punto evaluado presenta la distancia a la fuente, coordenadas geográficas, densidad de potencia medida por el instrumento, valor corregido por error del instrumento (Ecuación 7.1) y porcentaje respecto al límite de referencia ( $0,2 \text{ mW/cm}^2$ ).

Punto N°	Distancia [m]	Latitud	Longitud	Hora	S <sub>max</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	S <sub>corregido</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	% Respecto al límite <sub>ref</sub>
1	10	34,582218S	58,517637W	12:06:15	0.0077	0.0112	5.6
2	10	34,582080S	58,517443W	12:11:37	0.0176	0.0257	12.9
3	15	34,582103S	58,517512W	12:16:37	0.0008	0.0012	0.6
4	15	34,582295S	58,517512W	12:21:27	0.0121	0.0176	8.8
5	10	34,582145S	58,517562W	12:26:39	0.0061	0.0089	4.4
6	20	34,582005S	58,517337W	12:31:32	0.0234	0.0342	17.1
7	20	34,582252S	58,517713W	12:36:17	0.0088	0.0128	6.4
8	30	34,582260S	58,517825W	12:41:12	0.0114	0.0167	8.3
9	50	34,582383S	58,518033W	12:46:08	0.0195	0.0285	14.3
<b>10</b>	<b>15</b>	<b>34,581980S</b>	<b>58,517675W</b>	<b>12:52:30</b>	<b>0.0235</b>	<b>0.0343</b>	<b>17.2</b>
11	15	34,582103S	58,517467W	12:58:21	0.0183	0.0267	13.4
12	40	34,581827S	58,517808W	01:20:22	0.0076	0.0111	5.5
13	90	34,581503S	58,518130W	01:25:45	0.0169	0.0247	12.4
14	60	34,582188S	58,518290W	01:33:40	0.0060	0.0088	4.4

Cuadro 7.4: Evaluación de puntos del Sitio 2

Como se observa en la Tabla 7.4, de los 14 puntos evaluados, el n° 10 es el que presenta mayor densidad de potencia, con un valor corregido de  $0,0343 \text{ mW/cm}^2$  que representa el 17.2 % del MEP más estricto para los niveles de inmisión.

En resumen, ninguno de los puntos medidos en el emplazamiento registró un valor pico que supere al 50 % del límite MEP más estricto impuesto por la regulación nacional. Con lo cual concluimos la medición y consideramos que el **sitio cumple con los límites establecidos**.

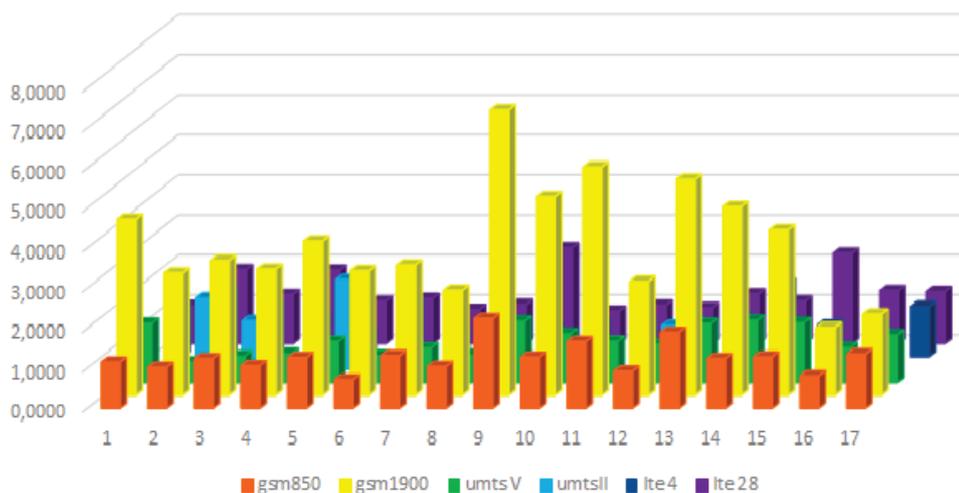
## 7.2. Caso particular: Análisis por tecnologías

Mediante la configuración que se realizaron a los packets, pudimos calcular los niveles que cada tecnología aporta a las RNI, los valores pico y promedio de los niveles de campo, y el espectro en que operan sus bandas. Como caso particular analizamos y presentamos los resultados correspondientes al sitio 1 **sector 1A** (emplazamiento sobre el IBB), se muestran los resultados más relevantes:

### 7.2.1. Aporte RNI por tecnología

En el lugar del emplazamiento se detectaron tecnologías GSM y UMTS en las bandas 850/1900, y LTE en las bandas 700/2100. A continuación se presentan 2 gráficos:

El primero (Figura 7.5) de una gráfica en barras con los niveles de campo que aporta cada tecnología a las mediciones de las RNI.



Cuadro 7.5: Niveles de campo E por banda

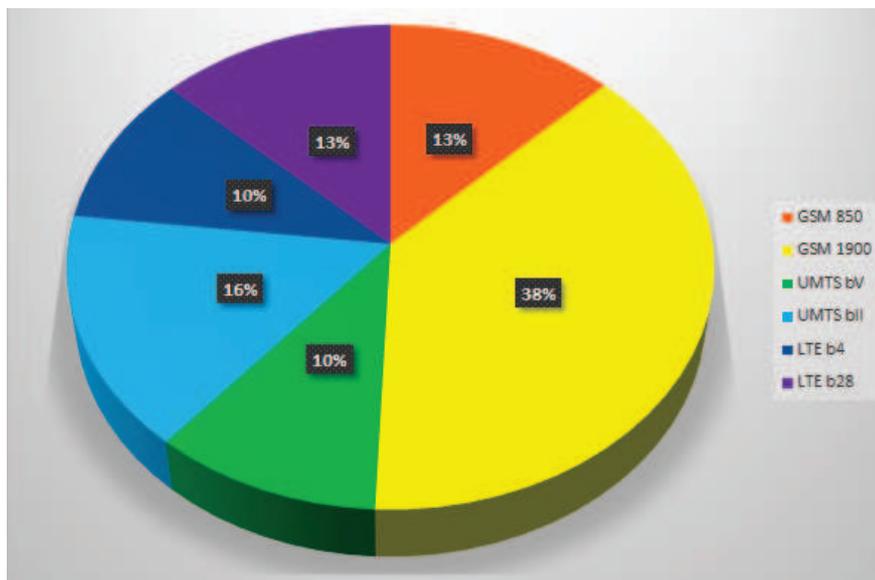
En este gráfico, en el eje  $x$  observamos las 17 mediciones realizadas en campo, y en el eje  $y$  los niveles de campo  $E$  [V/m] medido para cada tecnología y su banda de operación.

Como observamos, banda de 1900 MHz con tecnologías GSM es la que aporta mayor nivel de campo  $E$  a las medición, en la misma banda la tecnología UMTS se encuentra en segundo lugar. La banda de 850 MHz para las tecnologías GSM

y UMTS presenta niveles menores a la anterior banda. Esto puede deberse a que el ciclo de trabajo de la banda de 850 es inferior al de 1900.

Para el caso de las bandas LTE, ambas sub-bandas (4 y 28), presentan niveles similares al de la banda de 850, sin embargo este aporta un espectro homogéneo a la medición, y esto se debe a que LTE utiliza OFDM. Esto puede deberse a que la tecnología LTE utiliza un sistema de modulación más eficiente al de sus predecesores.

En el segundo gráfico, de la Figura 7.6, comparamos todas las tecnologías en un mismo gráfico, para estimar su aporte con los niveles totales obtenidos.



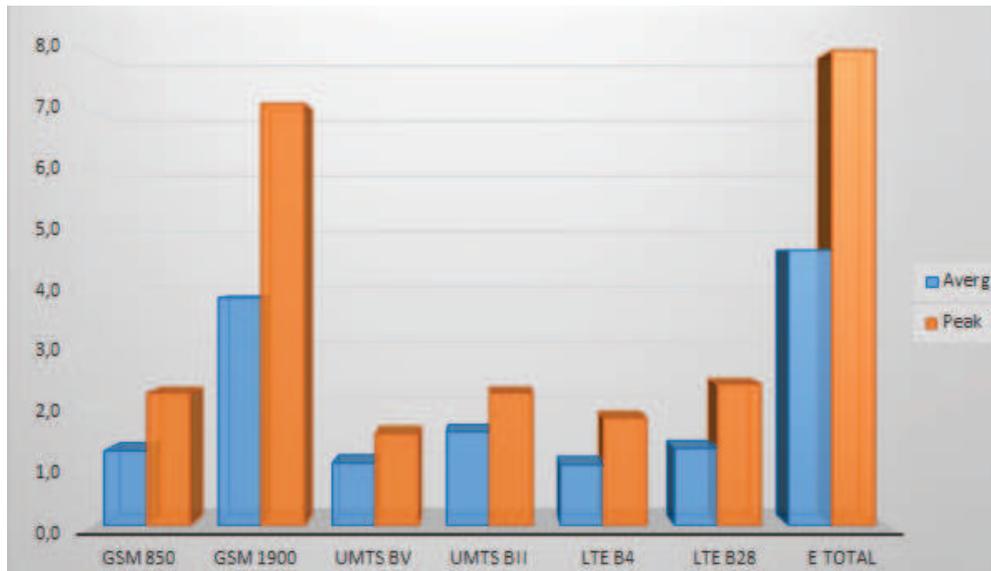
Cuadro 7.6: Aporte de las RNI al nivel total

El nivel total hace referencia a la media calculada de las 17 mediciones realizadas, representando el 100 %. La media calculada de los niveles de cada banda muestra que la banda de 1900 con tecnología GSM, como vimos anteriormente, aporta más cantidad de energía irradiada que las demás sumando el 38 % del nivel total. El segundo lugar la ocupa esta misma banda en tecnología UMTS con el 16 % del nivel total. Estos valores muestran la eficiencia en potencia de la tecnología UMTS sobre la GSM.

En igual forma para la banda de 850 en GSM/UMTS con niveles del 13 % y 10 %, respectivamente.

La tecnología LTE en bandas 4 y 28, ocupan el 13 % y 10 % respectivamente. Esta tecnología muestra tener mayor eficiencia comparándola con GSM y UMTS, pues presenta mayor velocidad de transferencia con menor potencia producto de la modulación OFDM.

**Valores Promedio vs. Pico:** En el gráfico de la Figura 7.7 mostramos para la intensidad de campo eléctrico  $E$ , el valor del nivel pico medido para cada tecnología comparándolo con su valor promedio, medidos en un intervalo temporal de 5 a 6 minutos.

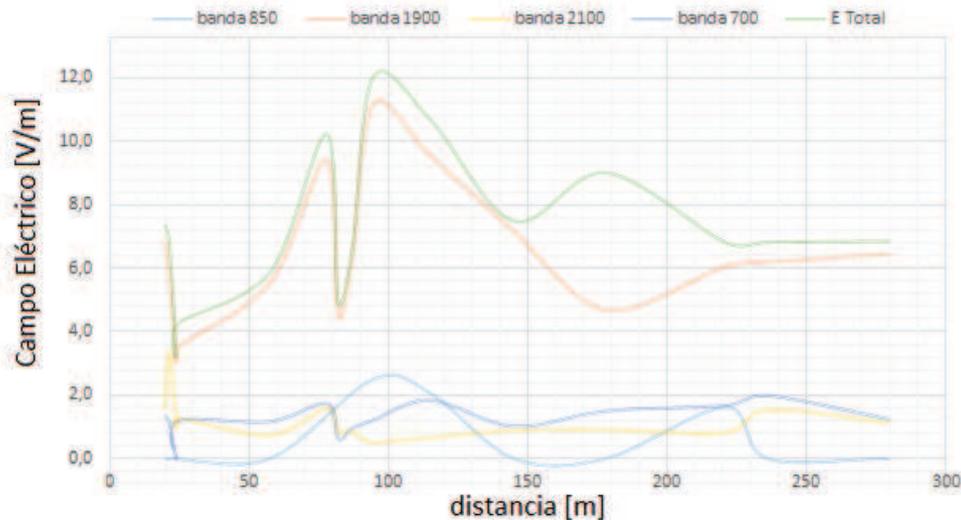


Cuadro 7.7: Campo E Promedio vs Pico

Como se observa en el gráfico, los niveles picos son mayores al promedio, esto es así pues las comunicaciones móviles operan vía radio, y la información que viaja presenta fluctuaciones debido a los fenómenos de desvanecimiento por los trayectos múltiples.

Como era de esperarse, la tecnología GSM en 1900 MHz es la que presenta mayor nivel de campo en sus niveles pico y promedio, con valores de 7.1 V/m y 3.8 V/m, respectivamente. La suma de todas las tecnologías nos da un valor de 8,0 V/m y 4.7 V/m, para sus niveles pico y promedio respectivamente.

**Nivel del campo eléctrico vs. distancia:** En el gráfico de la Figura 7.8, mostramos la ley del cuadrado inverso, que describe como se reduce la densidad de potencia con la distancia a la fuente. Este cálculo se realizó a partir de los puntos evaluados en el **sector 1B** del emplazamiento, pues en estos puntos se pudo medir a mayores distancias, por la ubicación misma de las antenas.



Cuadro 7.8: Relación de campo E con la distancia

Como se observa en el gráfico, se obtiene una buena representación de la atenuación con la distancia a la fuente, a pesar que la evaluación fue realizada con una antena isotrópica, ya que esta realiza mediciones de inmisión evaluando los aporte de todas las fuentes cercanas al sitio. Además se debe tener en cuenta la presencia de obstáculos producen atenuación y desvanecimientos en los campos electromagnéticos.

### 7.2.2. Análisis del espectro

Además de realizar la medición de los niveles de RNI, procedimos a realizar la medición del espectro en las bandas de la telefonía móvil, bandas downlink de 700, 850, 1900 y 2100 MHz. Estas mediciones fueron realizadas desde el Laboratorio MARE, apuntando al emplazamiento con una antena direccional R& S Log-Periodic modelo HL223.

Como se muestra en las Figuras 7.2 y en 7.3, se midió el espectro de las bandas de 850 y 1900 MHz, respectivamente. Observándose que las sub-bandas de mayor potencia medida en *dBm* se encuentra en el intervalo de 869-879 MHz y

1955-1970 MHz, las cuales corresponden con operador *Personal*, para los servicios GSM/UMTS.

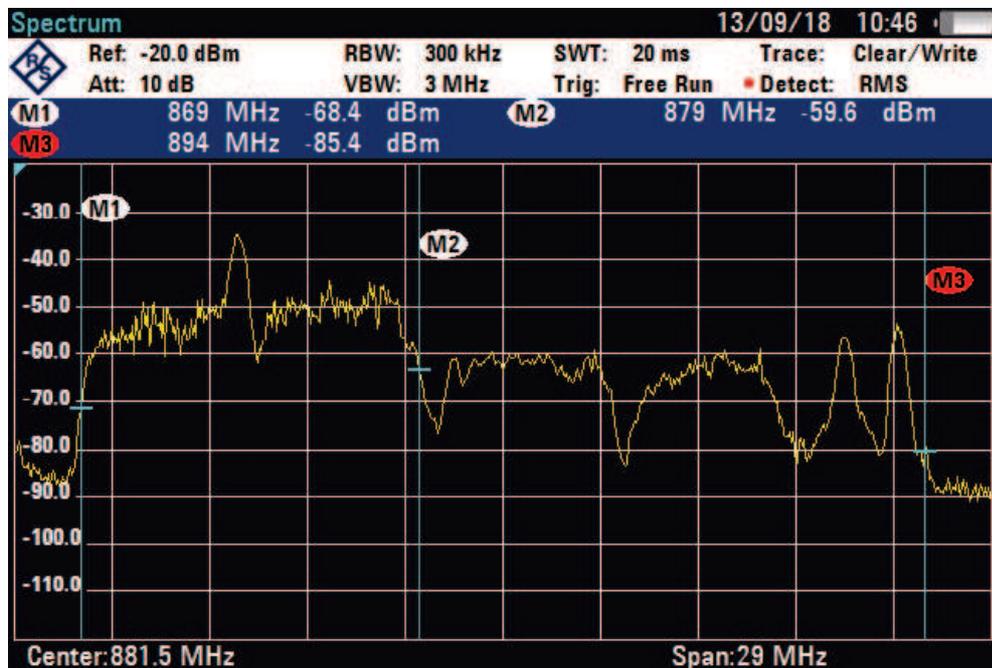


Figura 7.2: Espectro en la banda downlink GSM/UMTS 850MHz

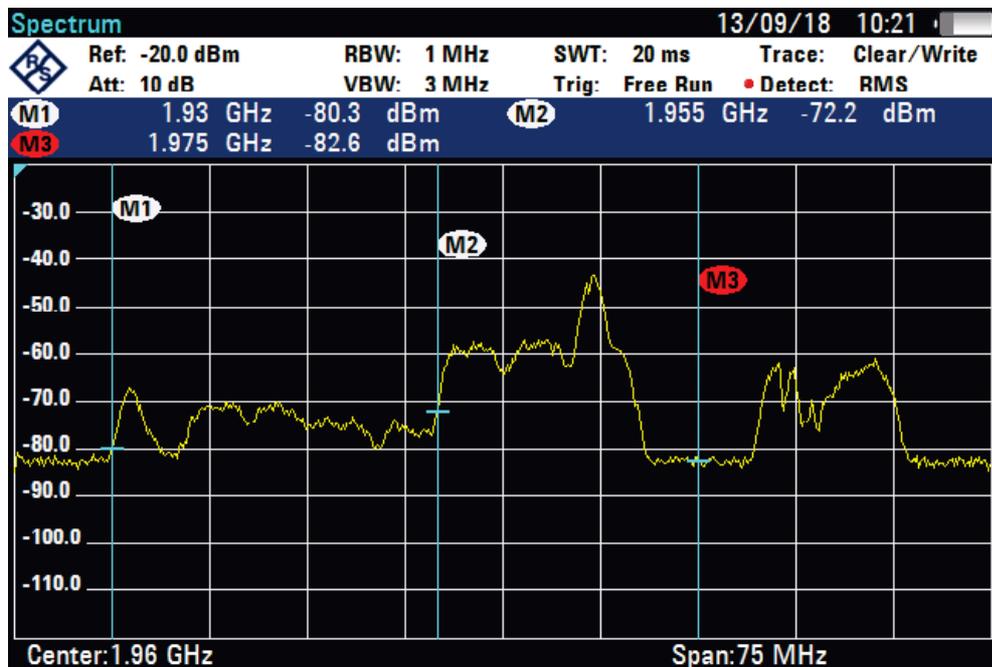


Figura 7.3: Espectro en la banda downlink GSM/UMTS 1900MHz

Como se muestra en las Figuras 7.4 y 7.5, se midió el espectro de las bandas de 700 y 2100 MHz, respectivamente. Observándose que las sub-bandas la mayor potencia medida en  $dBm$  se encuentra en los intervalos de 768-778 MHz y 2130-2145 MHz, las cuales corresponden con el operador *Personal*, para los servicios LTE.

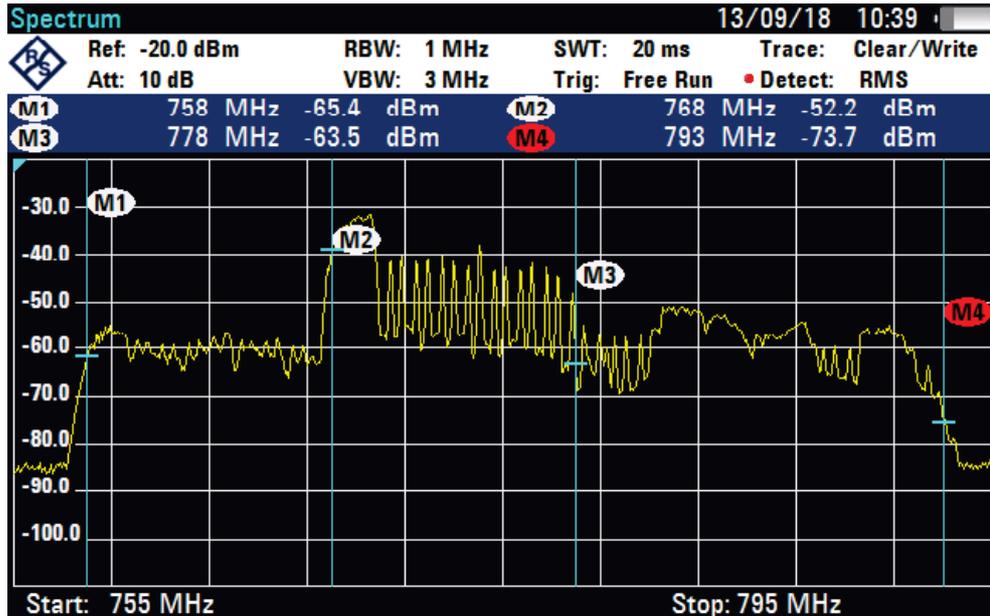


Figura 7.4: Espectro en la banda downlink LTE 700MHz

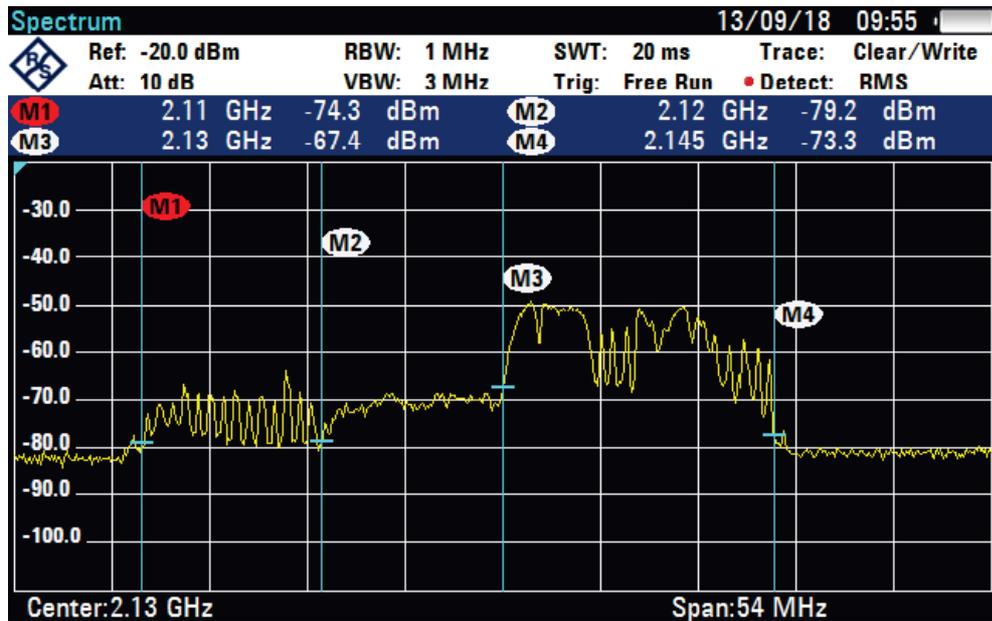


Figura 7.5: Espectro en la banda downlink LTE 2100MHz

De las mediciones del espectro de las bandas móviles, pudimos apreciar que la empresa Personal de Telecom opera en las 3 tecnologías que tiene asignada.

En este capítulo se presentaron los niveles de inmisión de la telefonía móvil medidos en el Campus. Se contrastaron estos valores con los límites establecidos por la MEP de la regulación nacional, encontrándose estos dentro de los límites permitidos. Posteriormente se analizó, en uno de los sitios medidos, el aporte de las tecnologías encontradas en los niveles de RNI, y por último presentamos el espectro encontrado en el emplazamiento con las bandas y tecnologías ocupadas, determinando el operador que brinda servicio en el lugar.

En el próximo capítulo, daremos cierre al proyecto final de carrera desarrollando las conclusiones y presentando como anexo el informe formal de medición en campo de las RNI.



---

## Conclusiones

En este trabajo nos propusimos estudiar las radiaciones no ionizantes producidas por la telefonía móvil y realizar una medición en campo de las mismas en el ámbito de nuestra Universidad. Planteamos evaluar dos emplazamientos, uno ubicado en el interior del Campus, y otro cercano a un acceso del mismo.

Comenzamos estudiando las radiaciones no ionizantes, vimos en principio el espectro radioeléctrico que involucra a las bandas de la telefonía móvil entre los 700 y los 2700 MHz.

Respecto a la radiación electromagnética, estudiamos la densidad de potencia, siendo esta la unidad física con la que se mide la energía de las ondas electromagnéticas. A través de la impedancia característica del medio por el cual se propagan las ondas, pudimos relacionar el campo eléctrico con el magnético y determinar la densidad de potencia. Evaluamos los factores que producen pérdidas en el espacio libre, como la atenuación (ley del cuadrado inverso), y la absorción, pérdidas que sufre la onda al viajar en un medio que no es vacío.

Introducimos los conceptos básicos de antenas como patrones de radiación horizontal (azimut) y vertical (elevación) y la PIRE, parámetro con el cual conocemos la potencia que pueden irradiar. También los tipos de antenas, omnidireccionales y direccionales, que pueden irradiar energía en toda dirección o en alguna particular como las antenas sectoriales panel de la telefonía celular.

Respecto a las radiaciones no ionizantes (RNI), que comprenden desde las radiaciones de baja frecuencia, las de radiofrecuencias y hasta las ópticas, estudiamos las fuentes que las producen como los radioenlaces, las antenas de radio-difusión o las de telefonía celular.

Analizamos los efectos que estas radiaciones producen, los térmicos que se concentran en zonas localizadas del cuerpo expuesto a la radiación, y los no térmicos que aún se siguen estudiando y se relacionan con las interacciones con las células, tejidos y órganos que presentan actividad electromagnética como el

cerebro.

Las recomendaciones del ICNIRP (Comisión Internacional para la Protección contra las Radiaciones no Ionizantes) para limitar la exposición a los campos electromagnéticos, en particular analizamos las unidades físicas utilizadas para medir su interacción con el cuerpo (SAR) o medir la potencia de radiación en el ambiente (S). Distinguimos los tipos de exposiciones, siendo la ocupacional para el caso controlado y la poblacional para el caso contrario. Las restricciones y los niveles de referencia establecidos para evaluar en forma práctica la exposición a los campos electromagnéticos. Las recomendaciones aplicadas en el país, conociendo los límites de exposición establecidos, que son más estrictos que los niveles recomendados por el ICNIRP.

Nos enfocamos en los sistemas de comunicación móvil, sus características y sistemas implementados, en particular la telefonía celular móvil. Las técnicas utilizadas de duplexación para una comunicación bidireccional entre una estación móvil y su base. Las técnicas de multiacceso como TDMA/FDMA mixto usadas en GSM, SDMA para la reutilización de frecuencias, CDMA utilizada en UMTS y OFDMA en LTE. También en las técnicas de modulaciones digitales con alta tasa de transmisión y reducido ancho de banda, como GMSK utilizada en GSM, PSK y QPSK para UMTS y LTE, respectivamente.

Entre los fundamentos de la telefonía móvil, repasamos los principios de los sistemas celulares, como la división de la región de cobertura en celdas más pequeñas y la reutilización de frecuencias. Describimos las características y servicios de estos sistemas. La geometría celular utilizada para ampliar cobertura, en forma omnidireccional y sectorial. Las arquitecturas de las redes, desde una simplificada de red de acceso y red troncal hasta la arquitectura sugerida por el 3GPP, para GSM, UMTS y LTE. Las tecnologías implementadas para la telefonía móvil, desde la primera generación, completamente analógica, con varios estándares TACS en Europa y AMPS en Estados Unidos, ambos con multiacceso FDMA. La segunda generación, con la red de acceso digital, que mejoró la calidad y capacidad de tráfico. El estándar panamericano GSM y los equipos terminales configurables entre cliente-operador mediante la tarjeta inteligente (SIM). La transferencia de datos mediante GPRS, y posteriormente EDGE. La tercera generación, con mayor capacidad de tráfico en movilidad, como UMTS y CDMA2000, y el uso de técnicas de espectro ensanchado. La cuarta generación, convergente con aún mayor capacidad de tráfico como WiMAX y LTE, utilizando multiacceso OFDMA.

Estudiamos las antenas de telefonía móvil, omnidireccionales y direccionales con sectores de 120°, y la infraestructuras de emplazamiento.

Consideramos las instalaciones, usando técnicas de diversidad en espacio y polarización. La polarización, tanto doble H-V o X-Pol. La forma del haz y la inclinación para limitar el área de cobertura, y la inclinación que a ésta se le hace para limitar el área de cobertura (downtilt).

Recorrimos los servicios móviles en forma cronológica y por sus áreas de explotación. Los clasificamos por banda de frecuencia de operación, operadores móviles asignados y espectro.

Respecto a la Normativa y Regulación de las RNI nos centramos en los principales organismos involucrados, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), que basa sus recomendaciones en los estudios realizados por la Comisión Internacional de Protección contra las RNI (ICNIRP), organismo que investiga los efectos y desarrolla recomendaciones sobre exposición a diferentes formas de radiación no ionizante y define para su evaluación en forma práctica, los niveles de referencia para la exposición a los campos electromagnéticos. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), organismo especializado en telecomunicaciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), encargada de regular las telecomunicaciones a nivel internacional. Otras organizaciones que desarrollan estándares para la medición de la exposición a las RNI, como el Comité Electrotécnico Internacional (IEC), la Comisión Federal de Comunicaciones de los EUA (FCC) y el Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas (IEEE).

Revisamos la regulación nacional, empezando por la Res. 202/95 del Ministerio de Salud y Acción Social, que aprueba el Estándar Nacional de Seguridad para la exposición a las radiofrecuencias comprendidas entre los 100 kHz y 300 GHz. La Res. 530/00 de la Secretaria de Comunicaciones, que implementa la anterior. La Res. 3690/04 que establece el Protocolo para la Evaluación de las RNI con los límites para la máxima exposición poblacional (MEP), más restrictivas que las del ICNIRP y define las obligaciones de los titulares y licenciarios de estaciones radioeléctricas y la Res. 87/13 del Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible, que establece las pautas para realizar la regulación de los sistemas irradiantes y sus instalaciones en el ámbito de la provincia de Buenos Aires.

Con esta metodología e instrumental de medición, trabajamos previamente los conceptos de campo lejano y cercano, emisión e inmisión, para determinar los puntos a medir. Comenzamos por el método de predicción, el cálculo teórico para

estimar los niveles de radiación bajo ciertas condiciones y las especificaciones del fabricante de las antenas.

Continuamos especificando el alcance y evaluando el entorno, previo relevamiento visual del lugar al efecto del posterior reporte de medición. Determinamos los puntos a medir según las características del sistema irradiante y lo volcamos en un croquis, teniendo en cuenta la accesibilidad al público y horario de mayor tráfico.

Pasamos al estudio del equipo de medición, sus características de banda ancha selectiva y campo de aplicación que utilizamos para el cálculo de incertidumbre de la medición junto con el certificado de calibración.

Estudiamos el protocolo de evaluación para las RNI, definido en la regulación nacional, donde se especifican los procedimientos para la medición en campo según el método a aplicar, inmisión para evaluar la exposición del entorno y emisión en los casos que superen el límite.

Desarrollamos los procedimientos para la medición, realizamos la planificación y configuración del instrumental, previo a la medición en campo. Planificamos el día y horario para medir con el instrumental al aire libre y evaluar los puntos. Elegimos un horario entre las 11 y 14 horas, para mayor tráfico. Realizamos el relevamiento visual del lugar, para identificar los sistemas irradiantes, encontrándose un emplazamiento con antenas sectorizadas en  $120^\circ$  y el otro con antena omnidireccional.

Procedimos a medir por el método de inmisión en primera instancia y calculamos la distancia de campo lejano para el sistema radiante en cuestión, obteniendo un valor de 30 metros. Elegimos los puntos de medición de acuerdo con el sistema irradiante. Para los sectoriales, tomamos 4 puntos sobre la máxima dirección de propagación, y otros 12 puntos acorde al lóbulo de irradiación. Para los omnidireccionales, elegimos 16 puntos, ubicados convenientemente sobre el terreno.

Presentamos el instrumental utilizado para la medición, describiendo sus principales características y modos de operación. Detallamos la configuración del hardware, las conexiones, los parámetros de las antenas y la interfaz de comunicación con el software. Configuramos los parámetros de los packets por banda y tecnología.

Realizamos la medición en campo, en base a los procedimientos desarrollados. Respetando la normativa de regulación nacional, el protocolo de evaluación y los límites máximos de exposición. Ubicamos el lugar de la medición, dos emplaza-

mientos en el Campus de nuestra Universidad y previo relevamiento visual del sitio montamos del instrumental.

Procedimos con la medición en campo, aplicando el método de inmisión de los sistemas irradiantes de telefonía celular, evaluamos los sitios definidos en la etapa de procedimiento. Para el sitio 1, evaluamos un emplazamiento de 3 sectores, cada uno con su sistema de antenas, orientadas con un azimut de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  y  $240^\circ$ . Realizamos la medición para antenas direccionales y evaluamos cada sector. En el sitio 2, un emplazamiento omnidireccional, realizamos la medición con el procedimiento para antenas omnidireccionales.

Como caso particular, medimos la radiobase instalada en la terraza del IIB. Realizamos un relevamiento de la infraestructura instalada, los equipos y antenas utilizados. Resultó una radiobase de la empresa Telecom Personal, que brinda los servicios GSM, UMTS y LTE. Estudiamos las características y especificaciones de los sistemas irradiantes, siendo estos de tecnología multibanda y multihaz. Procedimos con la medición de las RNI a partir de los niveles del campo eléctrico, usando el criterio de campo cercano.

Mostramos los resultados de la medición en campo. Comprobamos con el desarrollo práctico de la medición en campo que los niveles de densidad de potencia son inferiores a los límites establecidos por la regulación nacional. Quedando expresamente afirmado, que todas las mediciones efectuadas en los sitios descritos **cumplen con los límites establecidos**.

Como estos límites para la regulación nacional son niveles de exposición más restrictivos que los niveles de referencia del ICNIRP, podemos afirmar que las mediciones efectuadas en los sitios descritos **cumplen con las recomendaciones internacionales del ICNIRP**.

A través de las mediciones podemos afirmar que el emplazamiento sectorial, ubicado dentro del campus irradia con más potencia y mayor cobertura que el emplazamiento omnidireccional ubicado sobre la calle Rodríguez Peña.

En la mediciones realizadas a nivel de la radiobase, ubicada sobre el edificio IIB, encontramos niveles altos de campo eléctrico, que de ser accesibles al público serían de alto riesgo, por tratarse de campos intensos. Sin embargo, el emplazamiento se encuentra aislado del acceso al público general.

**Del análisis realizado a las tecnologías del sitio 1**, podemos afirmar que este operador brinda servicio en las tres tecnologías que tiene asignadas. De la comparación de tecnologías, concluimos que GSM irradia con más potencia

que UMTS y LTE. Además LTE resulta más eficiente que UMTS y GSM, pues opera a mayor velocidad y con menor potencia, aportando menor cantidad de RNI. De la comparación del valor promedio Vs. pico, verificamos que los niveles pico aportan el 80 % al valor promedio, sin embargo estos niveles son esporádicos. De la comparación de nivel y distancia, podemos observar la ley del cuadrado inverso de la atenuación en campo, a pesar de haberse obtenido de un método de inmisión. Por último del análisis del espectro podemos atribuir las bandas de telefonía móvil al operador Personal de Telecom.

Como cierre final, podemos afirmar que además de la experiencia y conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera, mediante este proyecto pudimos integrarlos junto a los específicos de las RNI y realizar una comprobación práctica. Esta nos permitió ofrecer un aporte a la comunidad universitaria, brindándoles tranquilidad y seguridad a partir del control de los niveles de exposición a las radiaciones no ionizantes de la telefonía móvil en el Campus.

Finalmente esta experiencia podría replicarse en otros ámbitos nacionales y de la localidad de San Martín como ser escuelas, hospitales, espacios públicos.

---

# APÉNDICE:

## Informe de Radiaciones no Ionizantes de la Telefonía Móvil

### 1. Objetivo:

Medición de la radiación expuesta en el sitio donde se hallan emplazadas las antenas del solicitante y sus áreas cercanas, para controlar el cumplimiento de los límites de Radiación No Ionizante basados en la reglamentación vigente (Res. 202/95 MS y AS, Res. 530/00 SC, Res. 87/13 OPDS y Res. 3690/04 CNC).

### 2. Introducción:

Durante el día 4 de setiembre de 2018 entre las 10:00 y 13:00 hs, se realizó la visita en la ubicación detallada más abajo, para proceder con la medición in situ y verificar los niveles de radiación emitidos por las antenas de telefonía móvil:

- Dirección: Av. 25 de Mayo y Francia
- Localidad: San Martín
- Provincia: Buenos Aires
- Coordenadas geográficas: -34.579646, -58.524961

La tarea consistió en realizar mediciones de inmisión en puntos específicos del sitio y alrededores, accesibles por el público en parte, según los criterios establecidos por la normativa de regulación. En caso que estos valores obtenidos superasen los máximos permisibles, se presentará un informe con valores de emisión producidos por cada antena.

En el Anexo I se detallan los valores límites para la máxima exposición permitida (MEP) poblacional, en función de la frecuencia de acuerdo con la Resolución N° 202/95 del Ministerio de Salud y Acción Social de la Nación y se adjuntan fotografías del sitio, mientras que en el Anexo II se detallan las especificaciones de los instrumentos utilizados con sus respectivos certificados de calibración.

### 3. Tecnologías instalada en el sitio:

Se procede a medir los sistemas de telefonía celular comprendidos entre las frecuencias de 700 MHz y 2700 MHz, a continuación se detallan las tecnologías de cada banda:

- 698 - 806 MHz. Sistema LTE con banda 28
- 824 - 894 MHz. Sistema GSM/UMTS en banda 850 MHz
- 1710 - 1770 MHz. Sistema LTE con banda 4 UL
- 2110 - 2170 MHz. Sistema LTE con banda 4 DL
- 1850 - 1990 MHz. Sistema GSM/UMTS en banda 1900 MHz
- 2500 - 2690 MHz. Sistema LTE con banda 7

### 4. Medición de inmisión:

El criterio para las mediciones de inmisión se encuentra establecido en la **Resolución N° 3690/04** de la ex CNC. Es la medición del campo electromagnético producto del aporte de fuentes múltiples, por esto se utiliza el equipo de banda ancha, debido a que las personas están expuestas simultáneamente a diferentes tipos de radiaciones electromagnéticas. Esta medición tiene por objetivo obtener el nivel pico máximo de la densidad de potencia en cada punto, a lo largo de una línea vertical que representa la altura del cuerpo humano en el punto de medición (20 cm a 2 m).

- Si el valor pico máximo de dichas mediciones resulta inferior al 50 % de la MEP más estricta, se registrará como valor de ese punto.

- Si dicho valor supera el citado 50 % de la MEP más estricta, se deberá realizar una medición con promediación temporal.

Al realizar la medición de inmisión, consideramos la sumatoria de todas las fuentes RNI, que llevan al punto de medición. Es decir que no solamente se medirán los niveles de RNI producidos por la estación radiobase de telefonía celular, sino que también las emisiones de TV-VHF, TV-UHF, FM, sistemas de comunicaciones móviles como radio-taxis, policía, bomberos, etc.

No obstante se adopta como límite de referencia el correspondiente a las bandas de frecuencias de 10 a 400 MHz, de **0.2 mW/cm<sup>2</sup>**, debido a que estamos realizando mediciones de inmisión, que debe considerar todas las bandas de frecuencias y asegurar la obtención de valores menores al de la referencia.

## 5. Cálculos de los errores de medición:

La incertidumbre máxima de medición isotrópica del instrumento y de la sonda utilizada es de 1.65 dB, según las especificaciones del fabricante y es equivalente al 46 % de la densidad de potencia calculada. La fórmula que permite hacer la corrección de los valores medidos teniendo en cuenta el error del instrumental es la que sigue:

$$S_{\text{corregido}} = 1,46 \times S_{\text{max}}$$

## 6. Resultado de la medición de inmisión:

El sistema irradiante es sectorizado con ángulo de azimut de 120°. Por tanto se realizará la medición para cada sector del emplazamiento. Cada punto evaluado presenta la distancia a la fuente, coordenadas geográficas, hora de medición, densidad de potencia medida por el instrumento, valor de la densidad corregida por el error del instrumento y porcentaje respecto al límite de referencia.

**Sector A:** En la Tabla 7.9, se presenta los puntos de medición evaluados para el Sector A del emplazamiento, que corresponde con los puntos de medición establecidos en la Figura 7.6.

Como se observa en la Tabla 7.9, de los 17 puntos evaluados, el n° 10 es el que presenta mayor densidad de potencia, con un valor corregido de 0.0249 mW/cm<sup>2</sup> que representa el 12.5 % del MEP más estricto para los niveles de inmisión.

Punto N°	Distancia [m]	Latitud	Longitud	Hora	S <sub>max</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	S <sub>corregido</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	% Respecto al límite <sub>ref</sub>
1	19.8	34,579317S	58,524922W	10:26:14	0.0042	0.0062	3.1
2	20.5	34,579307S	58,524863W	10:36:52	0.0053	0.0077	3.8
3	26	34,579240S	58,525107W	10:59:26	0.0067	0.0098	4.9
4	30	34,579243S	58,525397W	11:06:20	0.0044	0.0064	3.2
5	37	34,579135S	58,524842W	10:52:43	0.0050	0.0073	3.6
6	44.5	34,579220S	58,524805W	10:47:42	0.0026	0.0038	1.9
7	40.5	34,578902S	58,525253W	12:33:37	0.0050	0.0074	3.7
8	43.5	34,579163S	58,525535W	11:13:17	0.0038	0.0055	2.8
9	64	34,578885S	58,525352W	11:46:45	0.0077	0.0113	5.6
<b>10</b>	<b>52</b>	<b>34,578780S</b>	<b>58,525167W</b>	<b>11:55:02</b>	<b>0.0171</b>	<b>0.0249</b>	<b>12.5</b>
11	66	34,578973S	58,525490W	11:39:49	0.0101	0.0147	7.4
12	70.8	34,579135S	58,525750W	11:27:46	0.0034	0.0049	2.5
13	91	34,578677S	58,525242W	12:03:00	0.0071	0.0103	5.2
14	110.8	34,578508S	58,525410W	12:14:23	0.0082	0.0120	6.0
15	131	34,578397S	58,525612W	12:19:26	0.0018	0.0026	1.3
16	152	34,578345S	58,525667W	12:26:10	0.0028	0.0041	2.1
17	76	34,578750S	58,525042W	12:08:50	0.0100	0.0146	7.3

Cuadro 7.9: Evaluación de puntos en el sector A del emplazamiento

**Sector B:** En la Tabla 7.10, se presenta los puntos de medición evaluados para el Sector B del emplazamiento, que corresponde con los puntos de medición establecidos en la Figura 7.7.

Punto N°	Distancia [m]	Latitud	Longitud	Hora	S <sub>max</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	S <sub>corregido</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	% Respecto al límite <sub>ref</sub>
1	24.3	34,580192S	58,524817W	12:43:00	0.0048	0.0070	3.5
2	21.4	34,579445S	58,525085W	12:50:46	0.0087	0.0127	6.4
3	19.8	34,579450S	58,525118W	12:59:37	0.0126	0.0185	9.2
4	24	34,579437S	58,525070W	12:05:05	0.0024	0.0036	1.8
5	57.5	34,579470S	58,525168W	12:12:19	0.0081	0.0119	5.9
6	87.1	34,579488S	58,525150W	12:18:53	0.0107	0.0157	7.8
7	145	34,579483S	58,525137W	12:24:13	0.0136	0.0199	9.9
8	178	34,579877S	58,524752W	12:32:29	0.0058	0.0085	4.3
9	236	34,579918S	58,524783W	12:39:46	0.0102	0.0149	7.4
10	280	34,579885S	58,524747W	12:46:00	0.0110	0.0161	8.1
11	82	34,580478S	58,524237W	12:48:33	0.0070	0.0102	5.1
12	78	34,579942S	58,523885W	12:58:01	0.0278	0.0405	20.3
<b>13</b>	<b>94.5</b>	<b>34,580138S</b>	<b>58,523890W</b>	<b>13:08:13</b>	<b>0.0383</b>	<b>0.0560</b>	<b>28.0</b>
14	115	34,580465S	58,523795W	13:17:24	0.0304	0.0443	22.2
15	222	34,580660S	58,522630W	13:24:21	0.0015	0.0021	1.1
16	221	34,580835S	58,522690W	13:30:30	0.0123	0.0180	9.0

Cuadro 7.10: Evaluación de puntos en el sector B del emplazamiento

Como se observa en la Tabla 7.10, de los 16 puntos evaluados, el n° 13 es el que presenta mayor densidad de potencia, con un valor corregido de 0.0560 mW/cm<sup>2</sup> que representa el 28.0 % del MEP más estricto para los niveles de inmisión.

**Sector C** En la Tabla 7.11, se presenta los puntos de medición evaluados para el Sector C del emplazamiento, que corresponde con los puntos de medición establecidos en la Figura 7.8.

Punto N°	Distancia [m]	Latitud	Longitud	Hora	S <sub>max</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	S <sub>corregido</sub> [mW/cm <sup>2</sup> ]	% Respecto al límite <sub>ref</sub>
1	20.7	34,579410S	58,525392W	12:43:22	0.0040	0.0058	2.9
2	19.8	34,579490S	58,525220W	12:35:45	0.0062	0.0091	4.6
3	21.8	34,579660S	58,525092W	12:49:54	0.0033	0.0048	2.4
4	28.4	34,579683S	58,525280W	12:55:13	0.0068	0.0100	5.0
5	43	34,579518S	58,525717W	12:10:15	0.0179	0.0262	13.1
6	37.7	34,579582S	58,525522W	12:15:45	0.0138	0.0202	10.1
7	33.7	34,579595S	58,525343W	12:21:16	0.0183	0.0268	13.4
8	50.5	34,579532S	58,525342W	12:26:50	0.0147	0.0215	10.7
9	68	34,579573S	58,525847W	12:00:49	0.0263	0.0383	19.2
10	50	34,579708S	58,525477W	13:37:02	0.0256	0.0374	18.7
11	50	34,579783S	58,525387W	13:15:09	0.0172	0.0251	12.5
<b>12</b>	<b>62.1</b>	<b>34,579852S</b>	<b>58,525290W</b>	<b>13:09:13</b>	<b>0.0304</b>	<b>0.0444</b>	<b>22.2</b>
13	74.1	34,579993S	58,525062W	13:02:11	0.0116	0.0169	8.5
14	78.5	34,580103S	58,525648W	12:01:38	0.0241	0.0352	17.6
15	80	34,580032S	58,525438W	13:29:12	0.0261	0.0382	19.1
16	85.5	34,580202S	58,525275W	13:21:34	0.0150	0.0218	10.9
17	100	34,580290S	58,524923W	13:52:25	0.0167	0.0244	12.2

Cuadro 7.11: Evaluación de puntos en el sector C del emplazamiento

Como se observa en la Tabla 7.11, de los 17 puntos evaluados, el n° 12 es el que presenta mayor densidad de potencia, con un valor corregido de 0.0444 mW/cm<sup>2</sup> que representa el 22.2% del MEP más estricto para los niveles de inmisión.

## 7. Detalles del sitio de medición:

El lugar donde se ubica el emplazamiento es amplio con mucha concentración de personas, diversidad de edificios y grandes áreas verdes.

Los sistemas irradiantes están instalados en la terraza del edificio a una altura de 15 metros. Como se comentó anteriormente estos sistemas son sectorizados, disponiendo de 3 antenas por cada sector. Las antenas son de tipo "panel", y se encuentran instaladas sobre estructuras denominadas pedestales. Todo el sistema hace un total de 9 antenas en el emplazamiento.

En las próximas Figuras 7.6, 7.7 y 7.8, se presenta un croquis con la ubicación del sistema irradiante y los puntos de medición evaluados cada sector del emplazamiento.

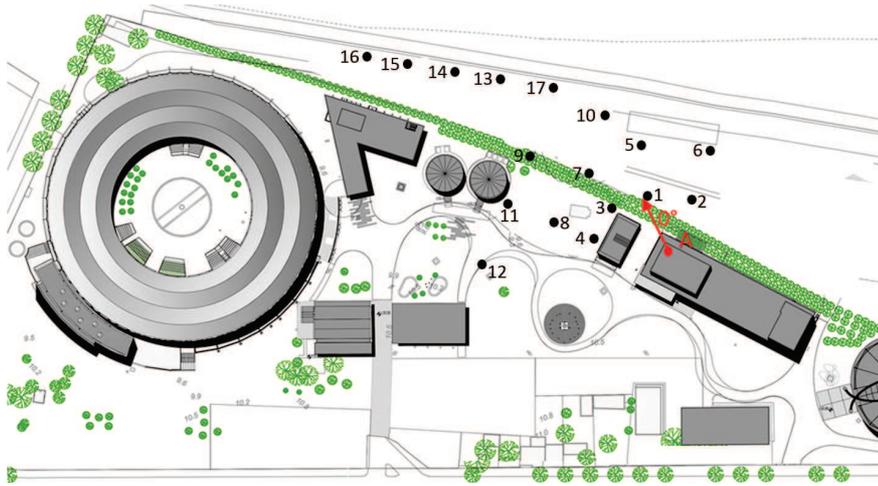


Figura 7.6: Croquis del sector A con los puntos de medición

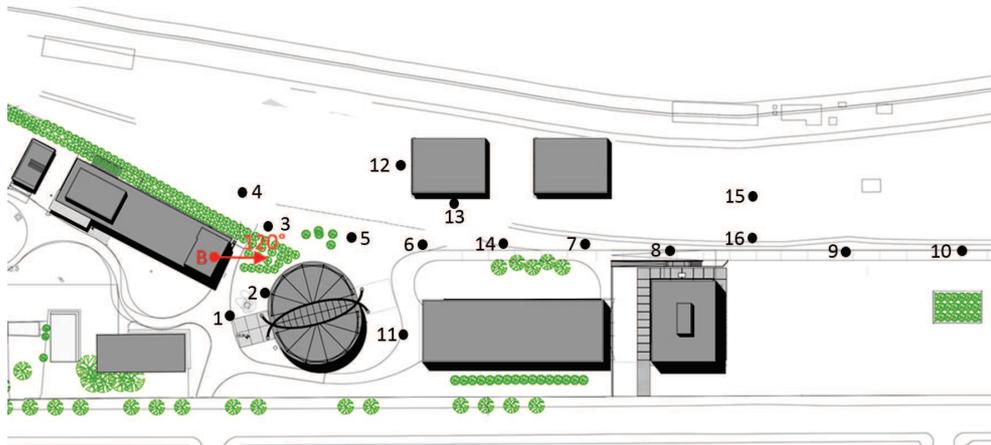


Figura 7.7: Croquis del sector B con los puntos de medición

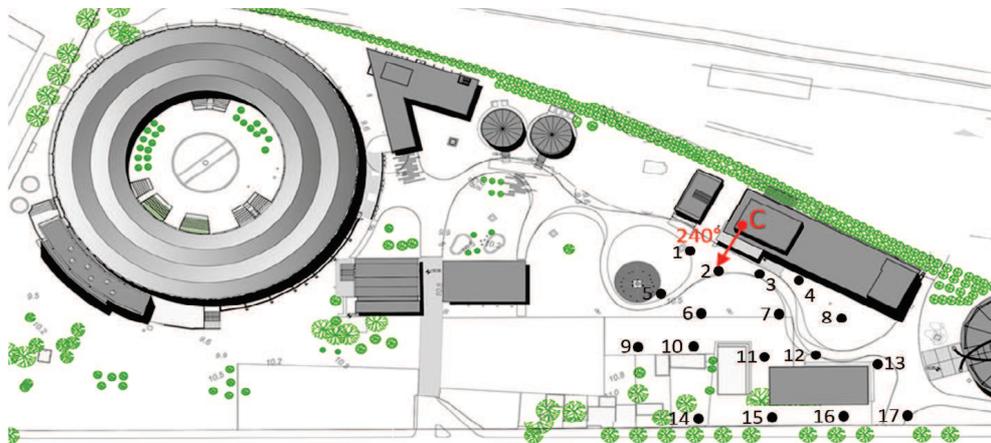


Figura 7.8: Croquis del sector C con los puntos de medición

## 8. Resultados y conclusiones:

A partir de los resultados obtenidos de las mediciones de inmisión se puede afirmar que ninguno de los puntos medidos en el emplazamiento registra un valor pico que supere al 50 % del límite MEP más estricto impuesto por la regulación nacional. Con lo cual se concluye la medición y se considera que el **EL SITIO CUMPLE CON LOS LÍMITES ESTABLECIDOS.**

## 9. Limitaciones:

Se hace la aclaración que las mediciones de RNI realizadas en este informe son aplicables para toda medición de inmisión comprendido entre la frecuencia de 700 a 2700 MHz, que fueron los establecidos para la medición de las bandas de telefonía celular.

## ANEXO 1

### Límites recomendados por Regulación Nacional:

Se presentan en la Tabla 7.12, los límites recomendados por la regulación nacional para la máxima exposición poblacional (MEP), determinada con la densidad de potencia  $S$  [ $mW/cm^2$ ], en función de las frecuencias a determinar. En la Figura 7.9 se resalta los límites de exposición para las frecuencias de la telefonía móvil.

Rango de Frecuencia [MHz]	Densidad de Potencia
0,3 – 1	20
1 – 10	$20 / f^2$
10 – 400	0,2
400 – 2000	$f / 2000$
2000 – 100000	1

Cuadro 7.12: Tabla de límites de máxima exposición poblacional

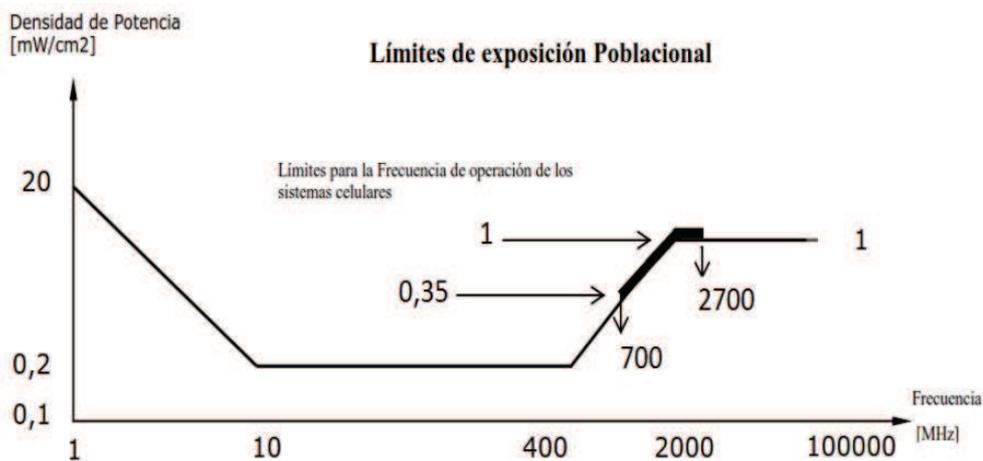


Figura 7.9: Límites de exposición para frecuencias de telefonía móvil

## Fotos del lugar de medición:

En las Figuras ?? y ?? se muestran fotos del entorno en que se evaluaron las RNI. Como se observa el lugar está diverso de edificios y áreas verdes con concentración de personas.



Figura 7.10: Entorno de medición del emplazamiento



Figura 7.11: Entorno de medición del emplazamiento

En las Figura 7.12, se observa los sistemas irradiantes del emplazamiento, ubicados en la terraza del edificio IIB.



Figura 7.12: Fotos del sitio de medición mostrando los sistemas irradiantes

En la Figura 7.13, se observa con más detalle las antenas instaladas en el sector C del emplazamiento medido.



Figura 7.13: Fotos de la Instalación del emplazamiento sector C

## ANEXO 2

### Instrumental y Certificado de Calibración:

Para realizar el reporte de medición de radiaciones no ionizantes, se utilizó el siguiente instrumental y su correspondiente certificado de calibración:

**Equipo: Analizador de espectro portátil: ETH**

- Serie # 103017. Rohde & Schwarz
- Fecha de vencimiento de la calibración: 04/04/2017

**Antena Isotrópica: TS-EMF. 300 MHz – 3 GHz**

- Serie # 101905. Rohde & Schwarz
- Fecha de vencimiento de la calibración: 29/03/2018



Figura 7.14: Instrumental de medición



**ROHDE & SCHWARZ**

**Calibration Certificate**

**Certificate Number 75-587412**

---

**Kalibrierschein**

**Unit Data**

Item: **ETH HANDH. TV ANALY. 3.6 GHZ + TG**

Manufacturer: **ROHDE & SCHWARZ**

Type: **ETH**

Material Number: **2114.1508K14**    Serial Number: **103017**

Asset Number: \_\_\_\_\_

---

**Order Data**

Customer: \_\_\_\_\_

---

Order Number: **3750004821**

Date of Receipt: **2016-02-25**

**Performance**

Place and Date of Calibration: **Johor Bahru, 2016-02-25**

Scope of Calibration: **Standard Calibration**

Statement of Compliance (Incoming): **New device**

Statement of Compliance (Outgoing): **Measurement results within specifications**

Extent of Calibration Documents: **2 Pages Calibration Certificate  
16 Pages Outgoing Results**

Ref. No. **75-587412**

Cal	Custom. Due Date
2016-02-25	

This calibration certificate documents, that the named item is tested and measured against defined specifications. Measurement results are located usually in the corresponding interval with a probability of approx. 95% (coverage factor k = 2). Calibration is performed with test equipment and standards directly or indirectly traceable by means of approved calibration techniques to the PTB/DKD or other national / international standards, which realize the physical units of measurement according to the International System of Units (SI). In all cases where no standards are available, measurements are referenced to standards of the R&S laboratories. Principles and methods of calibration correspond with EN ISO/IEC 17025. The applied quality system is certified to EN ISO 9001. This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Calibration certificates without signatures are not valid. The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein dokumentiert, dass der genannte Gegenstand nach festgelegten Vorgaben geprüft und gemessen wurde. Die Messwerte lagen im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von annähernd 95% im zugeordneten Werteintervall (Erweiterte Messunsicherheit mit k = 2). Die Kalibrierung erfolgte mit Messmitteln und Normalen, die direkt oder indirekt durch Ableitung mittels anerkannter Kalibriertechniken rückgeführt sind auf Normale der PTB/DKD oder anderer nationaler/internationaler Standards zur Darstellung der physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI). Wenn keine Normale existieren, erfolgt die Rückführung auf Bezugsnormale der R&S-Laboratorien. Grundsätze und Verfahren der Kalibrierung entsprechen EN ISO/IEC 17025. Das angewandte Qualitätsmanagement-System ist zertifiziert nach EN ISO 9001. Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Kalibrierscheine ohne Signifizierungen sind ungültig. Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

---

**Rohde & Schwarz Technologies Malaysia Sdn Bhd**

Date of Issue: **2016-02-25**

Head of Laboratory  
Laborleitung



**Andy Goh**

Person Responsible  
Bearbeiter



**Wei Chuan Teo**

Page 1/18  
ver9813/RSJB0606

Rohde & Schwarz Technologies Malaysia Sdn Bhd  
PLO 227 Jalan Kencana Mas 2  
Kaw. Perindustrian Tobrau III  
Johor Bahru 81100, Malaysia

Figura 7.15: Certificado de calibración del analizador de espectro ETH

**TRI AXIS SENSOR CALIBRATION REPORT**

**DATE:** 29/03/2017  
**REFERENCE:** RSEMF30\_1217\_100872  
**OBJECT:** TRI AXIS SENSOR  
**MANUFACTURER:** SATIMO  
**CUSTOMER:** ROHDE & SCHWARZ  
**DATE OF CALIBRATION:** 29/03/2017

**WARRANTY:**

This Calibration certificate may not be reproduced other than in full. Calibration certificates without signature and seal are not valid. This documentation contains property information which is protected by copyright. All rights are reserved. No part of this document may be photocopied, reproduced without the prior written right of SATIMO. SATIMO shall not be liable for errors contained herein or for incidental or consequential in connection with the furnishing, performance or use of this material. The information contained in this document is subject to change without notice. SATIMO warrants that material for a period of twelve months from the date of the shipment. Warranty doesn't apply to Normal wear, Normal tear, Improper use, Improper maintain, Improper installation.

Date

29/03/2017

SEAL

PROJECT MANAGER

MVO INDUSTRIES  
Technopole Brest Iroise  
225 Rue Pierre Huguon  
29200 BREST

Figura 7.16: Certificado de calibración de la antena isotrópica TSEMF-B1

---

# Bibliografía

- [1] Ramón Agusti, Francisco Bernardo, Fernando Casadevall, Ramón Ferrús, Jordi Pérez-Romero, y Oriol Sallent. *LTE Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. Fundacion Vodafone España, 2010.
- [2] Carlos Crespo Cadenas. *Radiocomunicaciones*. Pearson Educación, 2008.
- [3] Servicio de Asesoramiento Técnico (SAT). *Código de Buenas Practicas para el Despliegue de Redes de Comunicaciones Móviles*. Federacion Argentina de Municipios(FAM) and Operador de Comunicaciones Moviles (OCM), 3IA UNSAM, SECOM, 2014.
- [4] Arunabha Ghosh, Jun Zhang, Jeffrey G. Andrews, Ramón Ferrús, y Rias Muhamed. *Fundamentals of LTE*. Prentice Hall, 2011.
- [5] ICNIRP. *Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magneticos y electromagnéticos (hasta 300 GHz)*, 1997.
- [6] Ramón Ramírez Luz. *Sistemas de radiocomunicaciones*. Ediciones Parainfo, 2015.
- [7] Fernando Arturo Gallegos Paz. *Software Aplicativo para el Análisis Predictivo del Comportamiento de los Niveles de Campo Eléctrico y Distribución de Potencia Producida por las Estaciones de Telefonía Móvil (UCSM-Perú)*, 2009.
- [8] José María Hernando Rábanos. *Comunicaciones Móviles*. Centro de Estudios Ramón Areces, 2004.
- [9] Rohde & Schwarz. *Antenna Basics White Paper*, 2015.
- [10] Rohde & Schwarz. *RFEX System Software for EMF Measurements*, 2016.

- [11] Rohde & Schwarz. *User Manual For R&S TS-EMF*, 2016.
- [12] Wayne Tomasi. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Pearson Educación, 2003.